

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

LA MODÉLISATION DANS LE TRANSPORT FERROVIAIRE COMME OUTIL DE PRISE DE DÉCISION
DANS LES EFFORTS DE DÉCARBONISATION

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

MAÎTRISE ÈS SCIENCES DE LA GESTION

PAR

OLGA GRIJUC

OCTOBRE 2025

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de mémoire, Mark Purdon, pour son soutien constant, ses conseils judicieux et sa grande disponibilité tout au long de ce projet. Ma reconnaissance va également aux experts qui m'ont généreusement offert leur temps et partagé leurs précieuses connaissances, contribuant ainsi significativement à la richesse de ce travail. Un grand merci à mes gestionnaires, collègues et amis pour leur écoute attentive et leurs encouragements précieux durant ce parcours exigeant. Je souhaite aussi exprimer ma profonde gratitude à ma famille, pour leur soutien et leur affection qui m'ont porté tout au long de ce chemin. Une pensée toute particulière à ma sœur, qui a entrepris elle aussi une maîtrise en même temps que moi, partageant ainsi avec moi les joies et les défis de cette belle aventure académique.

DÉDICACE

À ma mère

AVANT-PROPOS

Ce mémoire est le fruit d'un cheminement personnel et professionnel, nourri par un intérêt profond pour les enjeux de transition énergétique et pour le rôle que peut jouer l'innovation dans les secteurs industriels stratégiques. Travailler sur la modélisation dans le transport ferroviaire m'a permis de mieux comprendre la complexité des décisions qui façonnent l'avenir du développement durable, tout en mettant en lumière les limites entre les outils théoriques et leur application concrète.

Ce mémoire ne se limite pas à une analyse technique, il s'inscrit dans une réflexion plus large sur les dynamiques qui influencent les choix stratégiques dans le secteur ferroviaire. Il interroge la place réelle des outils de modélisation dans un univers où les décisions sont aussi guidées par des intérêts économiques, des cadres réglementaires et des enjeux organisationnels. À travers cette recherche, j'ai souhaité mieux comprendre comment ces éléments s'articulent et influencent, en pratique, les trajectoires de décarbonisation.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
DÉDICACE	iii
AVANT-PROPOS.....	iv
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	viii
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS	ix
RÉSUMÉ	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 Problématique de recherche.....	6
1.1 Objet de recherche	6
1.2 La problématique au Canada	9
1.3 La question de recherche.....	13
1.4 Revue de la littérature	14
1.4.1 Modélisation et décarbonisation des transports.....	14
1.4.2 Modélisation et décarbonisation du transport ferroviaire canadien	19
1.4.3 Lien avec la problématique et question de recherche	20
1.4.4 Facteurs complémentaires à la modélisation dans la prise de décision	22
1.5 Cadre théorique	24
1.5.1 Politique de modélisation	25
1.5.1.1 Défis et limites de la modélisation dans la prise de décision	27
1.5.2 Cadre analytique et hypothèse de recherche.....	28
1.6 Synthèse critique.....	29
CHAPITRE 2 Méthodologie	31
2.1 Introduction	31
2.2 Conception de la recherche	31
2.2.1 Approche.....	31
2.2.2 Critères de sélection des cas.....	34
2.2.3 Intégration de l'avis d'experts externes	36
2.3 Méthodes de collecte de données.....	39
2.3.1 Analyse documentaire	39

2.3.2 Données secondaires	40
2.4 Méthodes d'analyse	41
2.4.1 Données quantitatives	42
2.5 Conclusion	43
CHAPITRE 3 Présentation de résultats	44
3.1 Introduction	44
3.2 L'utilisation des modèles technico-économiques dans la prise de décision ferroviaire.....	45
3.3 L'impact perçu des modèles sur la décarbonisation.....	46
3.4 Les limites et défis liés à l'utilisation des modèles.....	47
3.5 Les facteurs externes influençant la prise de décision	47
3.6 Tableau de synthèse	48
3.7 Des sujets émergents.....	49
3.8 Résultats descriptifs – triangulation de données.....	50
3.9 Analyse comparative des émissions et de la performance carbone.....	51
3.10 Comparaison de la performance environnementale : limites et interprétation	52
CHAPITRE 4 Discussion de résultats	54
4.1 Introduction	54
4.2 Synthèse des résultats principaux.....	54
4.3 Résumé thématique.....	56
4.4 Lien avec les questions et objectifs de recherche.....	57
4.5 Lien entre attentes et résultats.....	58
4.6 Discussion approfondie des résultats	59
4.7 Résultats qui divergent ou apportent de nouvelles pistes	61
4.8 Réflexion sur les spécificités du contexte étudié	62
4.8.1 Implications pratiques	63
4.8.2 Implications politiques ou environnementales	64
4.9 Limites de l'étude.....	65
4.10 Conclusion	65
CONCLUSION	67
RÉFÉRENCES	74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Analyse thématique (modèle)	42
Tableau 3.1 Synthèse de résultats	48
Tableau 3.2 Émissions de GES, tonnage et intensité carbone de CN et CPKC (2020–2023)	51

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

AAR – Association of American Railroads

ACFC – Association des chemins de fer du Canada

CDP – Carbon Disclosure Project

CN – Canadien National

CO₂e – Équivalent dioxyde de carbone

CPKC – Canadian Pacific Kansas City

EPA – Environmental Protection Agency

GES – Gaz à effet de serre

GTM – Gross Ton Mile

IAM – Integrated Assessment Model

SASB – Sustainability Accounting Standards Board

SBTi – Science Based Targets initiative

TCFD – Task Force on Climate-related Financial Disclosures

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

RÉSUMÉ

Résumé

En 2025, le secteur du transport ferroviaire canadien est confronté à des défis significatifs liés à la décarbonisation, en raison des préoccupations croissantes concernant les changements climatiques et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Le contexte actuel met en lumière plusieurs tendances et dynamiques qui façonnent la manière dont la modélisation est devenue un outil essentiel de prise de décision pour répondre à ces défis. Les modèles jouent un rôle crucial en fournissant des outils d'analyse sophistiqués et des scénarios prospectifs pour l'anticipation des impacts, l'optimisation des itinéraires et des opérations, l'analyse coût-bénéfice, l'évaluation des technologies et la gestion des risques, ce qui permet aux acteurs du secteur de prendre des décisions plus éclairées et stratégiques. Malgré les avantages qu'elle confère, la modélisation peut comporter certains défis et limitations quant aux impacts sur l'orientation et l'élaboration des décisions en matière de décarbonisation et l'atteinte des objectifs de réduction de GES, en particulier dans le transport ferroviaire, ou d'autres variables issues d'un contexte complexe d'interactions systémique ont un impact sur la prise de décision. À travers une étude de cas portant sur les entreprises ferroviaires canadiennes de Classe 1, cette recherche vise à illustrer ce constat tout en orientant les travaux futurs sur l'utilisation des modèles décisionnels pour améliorer l'efficacité des stratégies d'entreprise face aux enjeux climatiques et aux impératifs du développement durable.

Mots clés :

Décarbonisation, modélisation, transport, rail, prise de décision

ABSTRACT

Abstract

In 2024, the Canadian rail transport sector is facing significant challenges related to decarbonization, due to growing concerns about climate change and the need to reduce greenhouse gas emissions. The current context highlights several trends and dynamics that are shaping the way modeling has become an essential decision-making tool in responding to these challenges. Models play a crucial role in providing sophisticated analytical tools and forward-looking scenarios for impact anticipation, route and operational optimization, cost-benefit analysis, technology assessment and risk management, enabling industry players to make more informed and strategic decisions. Despite its benefits, modeling can present certain challenges and limitations in terms of its impact on the orientation and elaboration of decarbonization decisions and the achievement of GHG reduction targets, particularly in rail transport, where other variables from a complex context of systemic interactions impact on decision-making. Through a case study of Class 1 Canadian railway companies, this research aims to illustrate this finding while guiding future studies on the use of decision-making models to enhance the effectiveness of business strategies in addressing climate challenges and the imperatives of sustainable development.

Keywords:

Decarbonisation, modeling, transport, rail, decision making

INTRODUCTION

Les gouvernements, les organisations internationales et la société civile intensifient leurs efforts pour atteindre des objectifs ambitieux de décarbonisation. Le secteur du transport est soumis actuellement à des pressions croissantes pour réduire son empreinte carbone. Il est connu que le transport est largement dominé par les véhicules à moteur à combustion. D'autre part, le transport de marchandises est étroitement lié au développement économique d'un pays, ce qui en fait un secteur sensible de l'économie.

Le Canada s'est engagé à réduire ses émissions de GES de 40–45 % sous le niveau de 2005 d'ici 2030 et à atteindre la carboneutralité en 2050 (GdC, 2021). En 2021, le secteur des transports représente environ 22 % des émissions nationales (≈ 150 Mt CO₂e) et pourrait devenir la première source d'ici 2030 (GdC, 2023). À l'intérieur de ce secteur, le rail ne pèse toutefois que < 4 % des émissions ($\approx 5,9$ Mt CO₂e en 2023) (ECCC, 2025), ce qui crée un contraste : faible contribution relative aux émissions, mais rôle potentiel élevé dans une stratégie de décarbonation fondée sur l'efficacité énergétique et le report modal — la première visant la décarbonation “dans” le rail (intensité énergétique et carbone par tonne-kilomètre / passager-kilomètre), le second la décarbonation “par” le rail (déplacement de la demande depuis la route et l'aérien vers des services ferroviaires compétitifs et fiables).

Pourtant, le secteur ferroviaire transporte près de 70 % du fret terrestre interurbain et plus de 100 millions de personnes par an (avant la pandémie) (ACFC, 2024), ce qui en fait le mode de transport terrestre ayant la plus faible intensité en GES. De plus, le transport ferroviaire est considéré comme une méthode de déplacement efficace qui favorise les objectifs climatiques, la croissance économique et le bien-être. De ce fait, comme mentionné par Transports Canada, « encourager le passage au transport ferroviaire, lorsque cela est faisable, ainsi que le soutien de la modélisation climatique et la contribution à l'élaboration de politiques favorisant la réduction des émissions des locomotives, offre des opportunités immédiates de diminuer les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des transports » (GdC, 2023).

Face à ces objectifs, et l'urgence d'action, la prise de décision efficace par l'utilisation de modèles pour la formulation et orientation des politiques en général est un défi important. La complexité du système de transports dans le contexte des efforts de décarbonisation entreprises par les grands acteurs du secteur rajoute une forte pression sur leur capacité d'être agiles et contribuer à l'atteinte des objectifs climatiques.

Cette recherche examine le rôle de la modélisation dans la transition vers un transport ferroviaire de marchandises plus durable au Canada. Elle part du constat que, bien que la modélisation soit un outil essentiel pour analyser les scénarios de décarbonisation, son application seule ne suffit pas à garantir une prise de décision efficace et cohérente avec les objectifs environnementaux.

La question centrale repose alors sur la compréhension de la façon dont les modèles actuels influencent la prise de décision des compagnies de transports, et en particulier des chemins de fer canadiens, pour atteindre les objectifs de décarbonisation. Deux domaines importants sont actuellement à l'étude, notamment l'application des modèles utilisés dans les efforts de décarbonisation du fret ferroviaire, donc qui impliquent les GES que les chemins de fer émettent directement à la suite de leurs activités, et la décarbonisation du fret par transport terrestre par le transfert modal du camionnage vers le transport ferroviaire.

Afin d'examiner la question centrale, l'analyse est structurée autour de trois axes complémentaires, articulés de manière à dissocier la place des modèles dans le cycle décisionnel, les conditions d'applicabilité, et leur impact effectif sur la décarbonisation.

Dans un premier temps, nous nous concentrons sur l'usage décisionnel des modèles. Il s'agit d'établir la position des outils de modélisation dans l'élaboration des décisions et d'en identifier l'utilité, par exemple est-ce que le modèle a déclenché la prise de décision, a aidé dans l'élaboration de la stratégie ou en fin de compte a justifié une décision déjà prise. L'attention porte sur la chronologie "modèles - instances décisionnelles - choix d'investissement, sur les modalités d'interprétation des résultats par les parties concernées et sur les usages récurrents (p. ex. simulation opérationnelle, dimensionnement puissance/tonne, placement de locomotives).

Le deuxième axe est concentré sur l'évaluation économique et allocation des ressources. Cet axe isole l'influence des modèles financiers (TCO/DCF, seuils de rentabilité, coût du capital) dans l'arbitrage entre options technologiques et infrastructures. Il examine la manière dont ces outils cadrent le go/no-go, structurent les hypothèses (prix de l'énergie, CAPEX/OPEX, horizons d'actualisation), et traduisent les risques opérationnels en critères budgétaires, distinctement des sorties technico-opérationnelles.

Et enfin nous nous penchons sur les défis opérationnels, technologiques et réglementaires. L'objectif est d'identifier les conditions qui limitent ou facilitent l'applicabilité des résultats de modèles : intégration des

données en temps réel, interopérabilité entre services, dépendance aux validations terrain, contraintes d'infrastructure (p. ex. ravitaillement hydrogène, disponibilité électrique) et adaptation aux exigences réglementaires évolutives. L'axe documente les écarts modèle-terrain et les exigences de calibration qui en découlent.

Pris ensemble, ces trois axes permettent (i) de dissocier l'usage organisationnel des modèles de leur poids financier, (ii) d'identifier les conditions d'applicabilité et de transférabilité des résultats au terrain, (iii) de qualifier et, lorsque possible, de quantifier l'impact effectif sur la décarbonisation, et (iv) d'évaluer la capacité de projection et la robustesse des choix dans le temps.

À cette fin, l'analyse repose sur une hypothèse testable formulée à partir de la problématique centrale. Celle-ci mobilise les cadres théoriques basés sur la théorie du choix rationnel, qui permet d'examiner les logiques d'optimisation guidant les décisions des acteurs, et l'approche institutionnaliste, qui met en lumière l'influence des structures, des normes et des règles sur les pratiques organisationnelles.

Ce mémoire mobilise également le concept de « politique de la modélisation », qui postule que les modèles ne sont jamais des outils neutres. En définissant le périmètre du problème et en privilégiant certaines hypothèses ou indicateurs, ils façonnent activement ce que les décideurs perçoivent comme faisable et pertinent. Cette dimension complète la rationalité et l'institutionnalisme en introduisant la notion centrale d'autorité. Le mémoire examinera non seulement comment les résultats techniques acquièrent de l'autorité, mais aussi pourquoi cette autorité est variable. Comme l'analyse le démontrera au chapitre 4, cette autorité est moins une question de pure robustesse technique qu'une construction sociale et politique. Elle dépend de la capacité d'un modèle à s'inscrire dans un « ordre décisionnel légitime » et de la légitimité des institutions qui le produisent et l'utilisent.

Cette étude vise ainsi à comprendre dans quelle mesure la modélisation constitue un levier stratégique pour accélérer la transition énergétique du transport ferroviaire de marchandises au Canada, et à identifier les conditions nécessaires pour en maximiser l'impact sur la prise de décision technologies, les changements dans la demande de transport, et les exigences réglementaires à venir.

La recherche s'appuie sur une étude de cas portant sur les deux principales compagnies de transport ferroviaire de marchandises au Canada : le Canadien National (CN) et le Canadien Pacifique Kansas City (CPKC). L'étude de cas vise à comprendre, à travers ces organisations, comment les outils de modélisation

sont intégrés (ou non) dans les stratégies de décarbonisation. Elle permet une exploration de leur gouvernance, de leurs outils d'analyse, et des dynamiques organisationnelles entourant la prise de décision. La recherche est fondée sur des entretiens semi-dirigés menés auprès de divers acteurs du secteur ferroviaire et de la transition énergétique au Canada. Elle s'appuie également sur une revue documentaire ciblée des politiques publiques, des rapports corporatifs, des publications scientifiques et des documents institutionnels liés à la modélisation et à la décarbonisation.

Pour tester notre hypothèse et obtenir une image complète de la situation, cette recherche ne se limite pas à l'analyse qualitative des processus décisionnels. Elle intègre également une analyse quantitative comparative de la performance carbone des deux cas d'étude, le CN et CPKC. En s'appuyant sur les données publiques des entreprises (rapports de durabilité, réponses au CDP, etc.), nous comparerons leurs émissions de gaz à effet de serre (GES), leur tonnage transporté et l'évolution de leur intensité carbone sur la période 2020-2023. L'objectif de cet axe quantitatif n'est pas de mesurer directement l'efficacité d'un modèle spécifique, mais de servir de contrepoint analytique. Il permettra de valider ou de nuancer les discours institutionnels et les stratégies de décarbonisation déclarées, afin d'évaluer si les différentes approches de la modélisation (ou leur absence d'influence) se traduisent par des résultats empiriques distincts et mesurables chez les deux leaders du secteur.

Le choix d'une approche qualitative repose sur la volonté de comprendre les logiques d'action, les représentations et les contraintes vécues par les acteurs concernés. Les enjeux abordés (décision stratégique, usages de la modélisation, transition énergétique) sont complexes, contextuels, et fortement influencés par les dynamiques organisationnelles, ce qui justifie une démarche inductive, sensible à la diversité des points de vue.

Cette démarche vise à mettre en évidence les dynamiques institutionnelles et les perceptions des acteurs concernant l'intégration de la modélisation dans les choix de décarbonisation ferroviaire. L'approche de traçage de processus est mobilisée pour identifier les enchaînements logiques entre l'usage de la modélisation et les décisions stratégiques prises, en retraçant les séquences d'événements et les mécanismes causaux à partir des témoignages recueillis.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux. Le premier chapitre présente la problématique et une revue de la littérature qui permettent de situer l'étude dans le paysage scientifique existant, d'explicitier les fondements théoriques et de définir les concepts clés. Il met également en évidence les

principales lacunes qui justifient la présente recherche. Le deuxième chapitre est consacré à la méthodologie. Il détaille la stratégie de recherche, les choix méthodologiques, la démarche de collecte et d'analyse des données, ainsi que les considérations éthiques et les limites de l'étude. Le troisième chapitre présente les résultats empiriques issus des entretiens, organisés selon les grandes thématiques d'analyse. Il propose une lecture structurée des usages, obstacles et leviers identifiés en lien avec la modélisation et la décarbonisation ferroviaire. Le quatrième et dernier chapitre propose une discussion critique des résultats à la lumière de la problématique, des objectifs et de la littérature. Il met en perspective les apports de la recherche, ses limites, et propose des recommandations concrètes à l'attention des praticiens et des décideurs. Enfin, une conclusion générale vient clore le mémoire. Elle récapitule les principaux résultats, souligne les contributions théoriques et pratiques de l'étude, évoque ses limites, et ouvre des pistes pour de futures recherches sur l'intégration de la modélisation dans les politiques de transition ferroviaire.

CHAPITRE 1

Problématique de recherche

1.1 Objet de recherche

La situation d'urgence climatique est un problème primordial de nos jours, qui force les gouvernements et les entreprises privées à chercher des solutions qui mettent les bases envers la décarbonisation des sources énergétiques tout en préservant le bien-être de la population et le développement économique. Dans ce contexte, une prise de décision efficace par différents acteurs et secteurs est cruciale afin de garantir une transition durable et un développement des solutions systémiques avec l'accent mis sur le "triple résultat", c'est-à-dire l'objectif d'atteindre la durabilité socio-économique et environnementale (Matthies, Giupponi, et Ostendorf, 2007). Cette recherche des solutions s'encadre bien dans le contexte du « problème de décision » qui est défini comme une situation dans laquelle un individu ou un groupe perçoit une différence entre un état présent et un état désiré et où l'individu ou le groupe dispose d'alternatives d'action, le choix de l'action peut avoir un effet significatif sur cette différence perçue et l'individu ou le groupe est a priori incertain quant à l'alternative à sélectionner (Lombardi et Ferretti, 2015). De ce fait, la décarbonisation des transports représente un problème de décision complexe en raison de divers objectifs concurrents, de compromis inévitables et de multiples résultats possibles. Pour aborder cette problématique, il est crucial d'adopter des méthodologies et des approches adéquates afin de guider les décisions et d'impliquer efficacement les parties prenantes. Compte tenu du fait que les transitions énergétiques sont aussi des processus sociotechniques et politiques, façonnés par des rapports de pouvoir, des valeurs, et des formes variables de légitimité et de participation (Sovacool et Hess, 2017 ; Radtke et Wurster, 2023), la qualité des décisions dépend autant de la façon analytique des outils mobilisés que de la capacité institutionnelle à assurer la transparence, la participation des acteurs et la justice procédurale. L'adoption de cadres méthodologiques tels que l'aide multicritère à la décision, les processus participatifs et les approches de gouvernance adaptative permet ainsi aux parties prenantes de naviguer dans l'incertitude, de répartir équitablement les coûts et bénéfices de la transition, et de consolider des trajectoires de transport bas carbone.

Cette approche ouvre la voie à une compréhension élargie de la décarbonisation comme problème de gouvernance adaptative. Certains auteurs (van den Bergh et al., 2021) montrent que l'efficacité des politiques climatiques est basée sur la combinaison d'instruments complémentaires (tarification du carbone, quotas d'émission, normes d'efficacité énergétique) et sur leur coordination entre les différents

niveaux de gouvernance. Les interactions entre ces instruments peuvent créer des synergies positives lorsqu'elles sont cohérentes, mais aussi des redondances ou contradictions si elles ne sont pas intégrées dans une stratégie systémique (Rogge et Reichardt, 2016 ; Edmondson, Kern et Rogge, 2019). L'enjeu central réside donc dans la construction de cadres institutionnels capables de gérer cette complexité et de maintenir la crédibilité et la cohérence des transformations bas carbone à long terme. Toutefois, la mise en œuvre de ces mesures dépend de la capacité des acteurs publics et privés à coordonner leurs actions dans un contexte d'intérêts divergents et d'incertitudes technologiques persistantes. Ainsi, la gouvernance de la transition énergétique ne repose pas uniquement sur des instruments normatifs, mais aussi sur la qualité des processus décisionnels et la capacité à coordonner les différents niveaux d'action.

Les avancées technologiques ont favorisé un développement exponentiel des outils permettant d'accompagner les méthodologies employées dans l'élaboration des politiques de développement durable. (Susser et al., 2021; Trutnevyte et al., 2019). Parmi ces outils, les logiciels de modélisation jouent un rôle important en intégrant simultanément de multiples variables afin de simuler divers scénarios et d'identifier des solutions optimales face à des problématiques complexes. Selon la définition offerte par le journal Nature (2020), les modèles informatiques (ou computationnels) sont des « modèles mathématiques simulés par calcul afin d'étudier des systèmes complexes. (...) Les paramètres du modèle mathématique sont ajustés au moyen de simulations informatiques afin d'examiner différents résultats possibles ». Avec leur développement scientifique, les modèles ont progressivement servi à guider l'action publique sur nombreux enjeux complexes et parfois controversés (Calder et al. 2018; Bauer et al., 2023). Le domaine de l'économie, compte parmi les premiers à avoir intégré la modélisation comme outil d'analyse des politiques basé sur les données probantes (Estrada et Park, 2018). Dans le sujet qui nous intéresse, et notamment la politique climatique, les modèles intégrés IAM (« Integrated Assessment Models » en anglais), qui sont à la base des simulations proposés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (IPCC, 2022; Fernandez-Villaverde et al., 2025; Pfenninger et al. 2018; van Beek et al., 2020; Dietz, 2024) sont aujourd'hui largement utilisées pour orienter la politique climatique, offrant aux décideurs des cadres analytiques pour anticiper les conséquences des politiques publiques pour la décarbonisation, optimiser leurs choix stratégiques futurs (Gilbert et al. 2018; Yu et al., 2023), et adapter le discours politique (Beck M., 2018), malgré certaines critiques qui leur sont adressés (McLaren, D., et Markusson, N., 2020; Low, S., et Schäfer, S., 2020; Rubiano Rivadeneira et Carton, 2022). En pratique, la mise en œuvre de ces approches est contextualisée : elles doivent être adaptées aux spécificités nationales et composer avec des obstacles d'adoption (Gambhir et

al., 2019) et avec des contraintes d'accès et usage de l'énergie (Groppi et al., 2025; Pye et al., 2021)., autant de facteurs qui impactent leur efficacité décisionnelle.

Dans le secteur des transports, la décarbonisation représente un défi majeur impliquant des interactions complexes entre les systèmes environnementaux, économiques et sociaux (IPCC, 2022). Ces interdépendances génèrent de nombreuses incertitudes, notamment en ce qui concerne l'évolution des comportements des acteurs, l'efficacité des politiques mises en place et l'impact des transformations technologiques (Axsen et al., 2020; Speizer et al., 2024; Workman et al., 2024). Face à cette complexité, la modélisation représente un outil essentiel pour structurer la prise de décision et évaluer les effets potentiels des différentes options stratégiques – c'est précisément l'objet de notre recherche.

Toutefois, les modèles ne sont pas neutres : ils définissent le problème, posent des hypothèses et mettent certains critères en avant (coût, service, carbone, équité). Cela influence directement ce que les décideurs jugent faisable et prioritaire (Bauer et al., 2023), ce qui explique le développement d'un concept de « politique de modélisation » qui encadre et gouverne un modèle au-delà du calcul lui-même : quelles données on retient, quelles hypothèses on pose, quels scénarios et indicateurs on priorise, comment on présente l'incertitude, et qui tranche ces choix dans l'organisation. Ces décisions définissent le problème, rendent certaines options plus visibles que d'autres et donnent de l'autorité à des résultats qui paraissent alors crédibles et utilisables par les décideurs (Bauer et al., 2023). Dans le climat, par exemple, l'IPCC s'appuie sur des familles de scénarios qui stabilisent quelques trajectoires jugées plausibles : cela aide à agir, mais réduit la variété des options considérées (Beck et Oomen, 2021). En pratique, les décisions publiques se prennent en rationalité limitée, ce qu'on va voir plus loin dans le cadre analytique, si bien que la « preuve » issue des modèles coexiste avec des considérations politiques et organisationnelles (Cairney, 2015). Enfin, délimiter le système, par exemple inclure ou non le temps de transbordement dans un modèle de transport ou les émissions des locomotives dans une cour de triage, gérer l'incertitude et choisir les scénarios, comme le prix interne du carbone, le mix électrique ou la période d'investissement, façonnent le contenu même de « l'évidence » produite — les projections servant justement à fabriquer de l'information sur ce qui n'est pas encore arrivé pour agir au présent (Doukas et Nikas, 2020 ; Aykut et al., 2019).

Le point de départ de notre problématique est donc le décalage, souvent observé, entre le potentiel analytique des modèles de décarbonisation et leur influence réelle sur les décisions stratégiques. La

littérature sur la « politique de la modélisation » suggère que les modèles ne sont pas de simples outils techniques neutres ; ils sont eux-mêmes des constructions sociales et politiques. Ils « façonnent l'espace des futurs possibles » (Beck et Oomen, 2021) et entrent en concurrence avec d'autres formes de savoir et d'intérêts. En effet, la prise de décision fondée sur des preuves (« evidence-based policy-making » en anglais) n'est pas un processus linéaire et rationnel, mais un exercice politique complexe où les preuves scientifiques ne sont qu'un type d'information parmi d'autres (Cairney, 2015).

En somme, la modélisation se veut un cadre structurant pour réduire l'incertitude et comparer des trajectoires de transition, mais il est important de rendre les hypothèses et certaines concessions sous-jacents explicites. La section suivante examine la problématique propre au Canada — marquée par l'étendue géographique, la forte dépendance au transport routier, l'hétérogénéité des politiques provinciales et fédérales et un partage de compétences — afin de préciser les contraintes, leviers et besoins de modélisation qui en découlent.

1.2 La problématique au Canada

Au Canada, le transport de marchandises représente environ 10 % des émissions nationales de GES en 2019 et devrait devenir la plus grande source d'émissions liées au transport avant 2030 (2024). Les camions jouent un rôle particulièrement important dans les émissions de fret, représentant 87 % des émissions de fret du Canada, avec une croissance prévue qui est plus de deux fois supérieure à celle du fret ferroviaire, aérien et maritime au cours de la prochaine décennie. Dans l'ensemble, les émissions de fret au Canada devraient être supérieures de 15 % en 2030 par rapport aux niveaux de 2005 (ECCC, 2025).

La transition vers un secteur des transports durable au Canada représente un défi majeur en raison de la complexité des systèmes socio-économiques et environnementaux impliqués (TC, 2023). Le Canada s'est engagé, dans le cadre de l'Accord de Paris, à réduire ses émissions de 40-45 % par rapport aux niveaux de 2005 d'ici 2030. Cette transition repose sur l'électrification des transports, l'amélioration de l'efficacité énergétique et l'intégration de carburants alternatifs. Les modèles permettent d'évaluer l'impact de ces mesures en termes de réduction des émissions, de faisabilité technique et de coûts économiques. Parmi celles-ci, les modèles économiques et environnementaux simulent les effets des politiques de tarification du carbone sur la demande de transport, les modèles de transport évaluent l'optimisation des infrastructures, par exemple, le chemin de fer à haute fréquence de VIA Rail entre Québec et Windsor et

les projections énergétiques permettent d’anticiper les besoins en infrastructures pour l’électrification des transports et l’intégration de l’hydrogène.

La prise de décision dans les efforts de décarbonisation exige une compréhension approfondie des interactions entre les politiques publiques, les innovations technologiques, les infrastructures et les comportements des acteurs. Il est important à noter que les politiques de transport ferroviaire sont définies au niveau fédéral par Transports Canada, en coordination avec les compagnies ferroviaires, les provinces et les municipalités. Toutefois, les décisions d’investissement et d’innovation restent fortement influencées par les modèles économiques et réglementaires américains, notamment ceux de l’Environmental Protection Agency (EPA) et de l’Association of American Railroads (AAR), vu que les compagnies ferroviaires canadiennes de Classe 1 opèrent sur un vaste réseau ferroviaire nord-américain, qui incluent le Canada, les États-Unis et le Mexique (CPKC, par exemple). Cela pourrait limiter à un certain niveau l’autonomie du Canada dans l’adoption de nouvelles technologies et retarde parfois la transition vers des solutions bas carbone. Dans ce contexte, la modélisation se veut un outil pour anticiper les impacts des différentes stratégies et optimiser les choix en matière de politiques de réduction des émissions de GES (IPCC, 2022). Cependant, plusieurs défis persistent dans l’application des modèles pour la planification des transports au Canada. D’une part, la diversité des approches modélisatrices, qu’elles soient « bottom-up » (ascendantes) ou « top-down » (descendantes), entraîne des différences méthodologiques qui influencent les résultats et les recommandations issues des modèles. D’autre part, la complexité des interactions entre les systèmes énergétiques, économiques et environnementaux introduit des incertitudes importantes, rendant difficile l’évaluation précise des effets à long terme des politiques de décarbonisation. De plus, l’adoption et l’intégration des outils de modélisation dans le processus décisionnel demeurent hétérogènes entre les différentes instances gouvernementales (fédérales, provinciales et municipales) et le secteur privé, ce qui limite la cohérence des stratégies à l’échelle nationale. Par conséquent, l’amélioration de la modélisation dans le domaine des transports au Canada passe par un renforcement de la collaboration interdisciplinaire, une harmonisation des méthodologies et une meilleure intégration des incertitudes dans les analyses prospectives.

Entre autres, l’harmonisation des normes d’émissions avec les États-Unis illustre les défis d’une politique fondée sur des modèles scientifiques tout en restant alignée avec les réalités économiques nord-américaines. Également, Environnement et Changement climatique Canada publie régulièrement des scénarios de réduction des émissions, intégrant les incertitudes liées aux prix de l’énergie et à la croissance

économique (ECCC 2025). Finalement, les décisions sont influencées par des considérations économiques, notamment l'impact de la tarification du carbone sur les ménages et les entreprises.

Le transport ferroviaire joue un rôle clé dans la transition vers un secteur des transports à faibles émissions de carbone au Canada (ACFC, 2022b). Comparé aux autres modes de transport terrestre, le rail est reconnu pour son efficacité énergétique et sa faible empreinte carbone, notamment pour le transport des marchandises sur de longues distances. Les trains de fret, en particulier ceux des compagnies ferroviaires comme CN et CPKC, qui demeurent les deux exploitants dominants de transport ferroviaire de marchandises au Canada, permettent de réduire significativement les émissions de GES en substituant une partie du transport routier, qui est plus polluant (ACFC, 2016a). Ils sont considérés comme des chemins de fer de Classe I, car leurs revenus dépassent le seuil de 250 millions \$ depuis les deux dernières années (TC, 2024). Le secteur ferroviaire représente un levier clé pour la réduction des émissions, notamment à travers l'amélioration de l'efficacité énergétique des locomotives, le développement du transport intermodal, combinant rail et transport routier pour réduire l'empreinte carbone et l'adoption de carburants alternatifs, tels que le biodiesel, l'hydrogène et l'électrification partielle. Les avantages des émissions du transport ferroviaire versus le transport par camion sont également promus par Transport Canada, toutefois, le ministère n'indique aucune politique ou plan de transfert du camionnage vers le rail, la majorité des actions étant concentrés sur la diminution des émissions provenant du transport ferroviaire et camionnage séparément (TC, 2024).

Historiquement structurant pour l'économie nationale, le rail conserve une part importante dans le transport des marchandises lourdes, en particulier les produits miniers, les produits agricoles et les ressources énergétiques. Bien que reconnu pour son efficacité énergétique et sa faible intensité carbone par rapport au camionnage (IEA, 2019), le secteur ferroviaire canadien repose toujours largement sur le diesel pour la propulsion des locomotives.

Il convient à noter que les investissements nécessaires pour la conversion du fret ferroviaire vers des solutions bas-carbone restent un frein majeur. La modélisation permet d'identifier les stratégies les plus rentables, mais l'acceptation politique et économique de ces solutions conditionne leur mise en œuvre. En effet, la modélisation informatique joue un rôle clé dans ce processus, en fournissant des projections, des simulations et des analyses de scénarios permettant d'éclairer la prise de décision. Cependant, comme l'indique le rapport du Sénat du Canada (Neufeld et Massicotte, 2017), la mise en œuvre de politiques de

transition énergétique n'est pas dictée uniquement par les résultats des modèles, mais aussi par des consultations publiques, des négociations intergouvernementales et des arbitrages économiques. La consultation des parties prenantes, notamment les compagnies ferroviaires, les provinces et les groupes environnementaux, influence considérablement les décisions finales.

L'intégration de technologies innovantes, telles que l'électrification des voies ferrées et l'utilisation de carburants alternatifs, comme l'hydrogène ou les biocarburants, constitue une priorité pour réduire davantage l'empreinte environnementale du rail. Toutefois, ces transformations nécessitent d'importants investissements en infrastructures et une planification stratégique fondée sur des modèles de simulation robustes, capables d'évaluer les coûts, les bénéfices environnementaux et l'impact sur l'ensemble du réseau de transport (ACFC, 2024). Par ailleurs, la complémentarité entre le transport ferroviaire et les autres modes de transport, dans une logique de multimodalité, doit être intégrée dans les stratégies de développement durable des compagnies ferroviaires canadiennes, mais aussi du secteur de transport au complet, afin d'optimiser les flux de marchandises et de passagers. Ainsi, l'amélioration des outils de modélisation pour la prise de décision dans le secteur ferroviaire est essentielle pour simuler des scénarios intermodaux à différentes échelles de temps, quantifier les coûts versus les bénéfices, les émissions de GES, intégrer l'incertitude, calculer les investissements dans l'infrastructure ou ressources alternatives et coordonner les politiques publiques avec les choix d'entreprise afin d'orienter des trajectoires de décarbonisation crédibles, résilientes et socialement acceptables (Rubiano Rivadeneira et Carton, 2022).

La modélisation est souvent présentée comme un levier clé pour orienter les décisions en matière de décarbonisation du transport ferroviaire (Hernandez et al., 2023; Kirschstein, T., et Meisel, F., 2015; Heinold A., 2020). Pourtant, son impact réel reste difficile à évaluer pour le Canada, faute de recherches empiriques approfondies. Ce manque de données pose un véritable défi: sans preuve concrète, il est difficile de mesurer la valeur ajoutée de ces modèles et leur influence sur les choix stratégiques. Cela soulève une question essentielle : dans quelle mesure et de quelle manière la modélisation peut-elle vraiment contribuer à concevoir et à mettre en place des stratégies efficaces pour réduire les émissions de gaz à effet de serre du transport ferroviaire au Canada ?

Afin de mieux adresser cette problématique, nous envisageons d'identifier et analyser les limites des approches de modélisation existantes, notamment en ce qui concerne leur adoption par les décideurs et leur influence sur les choix stratégiques, et ce pour mieux comprendre la place réelle de la modélisation

dans la transition énergétique du transport ferroviaire et d'identifier les améliorations nécessaires pour maximiser son impact sur les politiques publiques.

1.3 La question de recherche

Pour formuler notre question de recherche, on cherche à mieux comprendre comment se déroule le processus de prise de décision dans le secteur ferroviaire et quel rôle y jouent les modèles et outils de simulation. Plus précisément, on s'intéresse à leur influence sur les décisions politiques et opérationnelles liées à la décarbonisation des chemins de fer de Classe 1 au Canada. Notre objectif est d'identifier les mécanismes sous-jacents qui guident ces décisions.

Nous nous interrogeons notamment sur l'impact des modèles d'émissions : dans quelle mesure influencent-ils les choix stratégiques en matière d'efficacité énergétique, de réduction des gaz à effet de serre et, plus globalement, de décarbonisation ? Par ailleurs, si les modèles coût-bénéfice sont intégrés aux décisions, quel est leur rôle dans l'orientation des investissements vers des technologies de propulsion alternatives, comme les locomotives à hydrogène ou les trains électriques à batterie, ou encore vers d'autres solutions de décarbonisation ? Enfin, compte tenu du cadre réglementaire qui encadre l'industrie ferroviaire, il est essentiel d'examiner comment les modèles de conformité influencent les stratégies internes des compagnies en matière de durabilité et leurs efforts de plaidoyer auprès des décideurs publics.

Pour des fins d'analyse, nous considérons le développement des hypothèses initiales testables concernant l'influence des modèles sur la prise de décision en matière de décarbonisation des opérations ferroviaires canadiennes et leur impact sur la stratégie d'entreprise. Compte tenu du consensus largement adopté par la communauté scientifique sur l'utilité de la modélisation et les avantages qu'elle apporte, notamment dans le contexte des défis climatiques mondiaux et plus particulièrement avec l'avenue des IAM (Cointe et al., 2019; Dietz, 2024; IPCC, 2022; Trutnevyte et al., 2019; Srikrishnan et al., 2022; Weyant, 2017), nous explorons deux scénarios possibles pour répondre à notre question de recherche. D'une part, il est possible que l'intégration de la modélisation dans les stratégies d'entreprise des chemins de fer de Classe 1 au Canada ait une influence significative sur la prise de décision en matière de décarbonisation. D'autre part, il se peut que cette hypothèse soit erronée et que, malgré son potentiel, la modélisation ne joue qu'un rôle marginal, sans véritable impact sur les choix stratégiques et opérationnels des acteurs ferroviaires. L'analyse de ces deux possibilités nous permettra de mieux cerner le rôle réel de la

modélisation et d'identifier les leviers ou les obstacles à son adoption efficace dans les efforts de transition vers un transport ferroviaire plus durable.

Ainsi, cette recherche vise non seulement à analyser l'influence des modèles sur la prise de décision, mais également à mieux comprendre les conditions qui permettraient d'en maximiser l'impact. En explorant ces hypothèses, nous chercherons à identifier les facteurs facilitant ou limitant l'adoption des outils de modélisation dans la planification stratégique et opérationnelle du secteur ferroviaire. En fin de compte, cette étude apportera un éclairage sur le rôle réel de la modélisation dans la transition vers un transport ferroviaire plus durable et pourrait contribuer à l'élaboration de recommandations visant à renforcer son utilisation dans les processus décisionnels.

1.4 Revue de la littérature

Peu d'études traitent directement de la modélisation appliquée à la décarbonisation du transport ferroviaire canadien. Les recherches existantes se concentrent essentiellement sur l'amélioration de l'efficacité énergétique des locomotives, les gains logistiques ou les évaluations économiques générales (Ireland et al., 2004; Miranda, Cordeau, et Frejinger, 2021; Ortiz-Astorquiza, Cordeau, et Frejinger, 2021). En revanche, très peu de travaux s'intéressent aux usages réels des modèles comme outils d'aide à la décision stratégique, ou à leur influence sur les choix technologiques et les politiques d'investissement des compagnies ferroviaires. Ce déséquilibre est accentué par un déficit d'études interdisciplinaires combinant des approches quantitatives (comme la modélisation) et qualitatives (comme les dynamiques institutionnelles). De plus, le manque d'ancrage institutionnel, l'absence de standards partagés entre acteurs, et la faible coordination intersectorielle (entre opérateurs, régulateurs et chercheurs) sont autant de facteurs qui freinent l'implémentation stratégique des modèles. Enfin, la majorité des modèles développés sont centrés sur des dimensions techniques et n'intègrent pas suffisamment les contraintes politiques, territoriales et comportementales spécifiques au contexte canadien.

1.4.1 Modélisation et décarbonisation des transports

La modélisation joue un rôle central dans l'élaboration de stratégies visant à réduire l'empreinte carbone des transports. Elle permet d'analyser des systèmes complexes, d'anticiper les effets des politiques publiques et d'optimiser la prise de décision. Dans la littérature scientifique, une abondance de recherches met en évidence l'utilisation des modèles mathématiques et informatiques pour soutenir la transition énergétique et l'adoption de solutions bas-carbone (Doukas et Nikas, 2020; Rabe et Goldsman, 2019,

Srikrishnan et al., 2022). Cette approche est particulièrement pertinente pour le secteur des transports, qui représente environ 25 % des émissions mondiales de GES liées à l'énergie et demeure l'un des secteurs les plus difficiles à décarboner (Hickman, Ashiru, et Banister, 2010).

La modélisation appliquée au transport repose sur diverses approches visant à mieux comprendre les dynamiques énergétiques et environnementales du secteur. Parmi les modèles les plus couramment utilisés figurent les modèles de systèmes énergétiques, qui ne se limitent pas au secteur de l'électricité, mais englobent l'ensemble des secteurs économiques consommateurs d'énergie (Nikas, Doukas, et Papandreou, 2019; Siskos, Capros, et De Vita, 2015). Ces modèles permettent d'évaluer différentes trajectoires de décarbonisation en tenant compte des interactions entre l'offre et la demande énergétique.

Dans le cadre des décisions politiques et stratégiques, les décideurs s'appuient sur des modèles mathématiques d'aide à la décision intégrant des aspects économiques, énergétiques et environnementaux, appelés modèles E3 (Bahn, 2018). Parmi ceux-ci, trois grandes catégories se distinguent par leur approche et leur portée analytique – les modèles "bottom-up" (ascendants), qui reposent sur une approche détaillée et technologique, en intégrant des paramètres spécifiques aux infrastructures et aux technologies. Ils permettent d'identifier les leviers techniques et économiques susceptibles d'accélérer la transition énergétique. Les modèles "top-down" (descendants) adoptent une vision macroéconomique et systémique, en intégrant des variables globales telles que les tendances économiques, les interactions intersectorielles et les politiques énergétiques. Les modèles hybrides combinent les approches des deux catégories précédentes pour fournir une vision plus complète et intégrée des transformations énergétiques et économiques (Vaillancourt, Bahn, et El Maghraoui, 2019).

Les travaux récents sur les IAM soulignent leur rôle dans la planification de scénarios de décarbonisation. Selon Beck et Oomen (2021), l'IPCC agit comme un véritable « *mapmaker* », en délimitant les trajectoires jugées techniquement et économiquement viables pour la réduction des émissions. Cette normalisation scientifique, bien qu'efficace pour produire un consensus, tend à restreindre la diversité des approches et à invisibiliser certaines dimensions politiques ou sociales de la transition. Cette logique se retrouve également dans le transport, où les modèles d'évaluation technico-économiques définissent des marges de manœuvre étroites pour la planification carbone, laissant en arrière-plan les contraintes institutionnelles et les réalités opérationnelles des compagnies de transport.

Par ailleurs, de nombreuses études portent sur le potentiel des carburants alternatifs et des nouvelles technologies de propulsion. Creutzig et al. (2012) analysent le rôle de la biomasse dans les modèles IAM, tandis que Blanco Reaño et Faaij (2019) explorent l'usage de l'hydrogène et des e-carburants. Melaina (2024) ainsi que Moriarty, P. et Honnery, D. (2019) soulignent que l'hydrogène pourrait jouer un rôle clé dans la décarbonisation des transports lourds et du stockage énergétique. Popovich et al. (2021) ont étudié l'option d'équiper les locomotives diesel-électrique de voitures batteries. Cette configuration offre aux compagnies ferroviaires la possibilité de mettre à profit des surplus d'énergies renouvelables disponibles à faible coût. D'autres auteurs ont analysé l'électrification des modes de transport, qui implique une refonte profonde des infrastructures énergétiques et des systèmes de transport (IEA, 2024; Zenith et al., 2020). Par contre, cela pourrait constituer un cas complexe, car, contrairement à d'autres secteurs, les transports posent des défis spécifiques en raison de leur forte dépendance aux combustibles fossiles et des contraintes techniques liées à l'autonomie et aux infrastructures de recharge.

La transformation du transport routier et ferroviaire est étroitement liée à l'évolution de l'approvisionnement énergétique. En effet, l'intégration de nouvelles sources d'énergie – électricité, hydrogène, biocarburants – entraîne une reconfiguration des réseaux de production, de distribution et de stockage, ce qui génère des tensions entre les différents secteurs économiques (Rottoli, Luderer, et Yeh, 2024). Une décarbonisation réussie du secteur de l'électricité aurait ainsi des répercussions majeures sur les transports, en facilitant leur transition vers des solutions à faible émission de carbone (Bogdanov et al., 2019).

Les études montrent que l'électrification des transports, en synergie avec un secteur électrique décarboné, constitue une stratégie clé pour réduire les émissions de CO₂ (Luderer et al., 2018). Toutefois, certaines limitations persistent : l'électrification reste particulièrement difficile pour le transport de fret, l'aviation et le transport maritime, où la densité énergétique des combustibles fossiles demeure difficile à remplacer (Creutzig et al., 2015).

Au-delà de l'électrification, d'autres solutions de décarbonisation sont envisagées, notamment les biocarburants, considérés comme une alternative intéressante pour les transports lourds et l'aviation. Toutefois, leur déploiement à grande échelle soulève des défis liés à la concurrence pour les terres agricoles et les ressources en eau, ainsi qu'à leur coût élevé (Bertram et al., 2018; Calliope et al., 2021). L'hydrogène et les e-carburants, qui pourraient jouer un rôle central dans les secteurs difficiles à électrifier,

sont également des alternatives étudiées. Des études récentes soulignent leur potentiel pour le transport ferroviaire et maritime, bien que leur production et leur distribution nécessitent des infrastructures adaptées (Blanco Reaño et Faaij, 2019; Melaina, 2024).

Et finalement le transfert modal, qui consiste à privilégier les modes de transport les moins polluants, notamment en favorisant le transport ferroviaire pour le fret, est reconnu pour son efficacité énergétique et son potentiel de réduction des émissions (Kaack, Vaishnav, Morgan, Azevedo, et Rai, 2018). Plusieurs études examinent comment substituer le transport routier par le rail pour réduire la consommation énergétique et les émissions de GES (Ahsan et al., 2023; Jonkeren et al., 2019; Nassar et al., 2023). La littérature souligne d'abord pourquoi le transfert modal est recherché : le transport routier pèse fortement dans les émissions énergétiques mondiales, tandis que le rail présente une meilleure efficacité par tonne-kilomètre. Dans une synthèse de référence, Kaack et al. (2018) montrent que, malgré ce différentiel, la part du routier est restée élevée dans de nombreux pays, ce qui implique d'aller au-delà d'un simple constat technico-énergétique pour agir sur les conditions du transfert, incluant les infrastructures, facteurs économiques et organisation des chaînes logistiques.

Sur le plan méthodologique, trois familles de modélisation ressortent. Premièrement, des approches ex post de type décomposition "shift-share" permettent d'attribuer la part des réductions d'émissions liée aux changements de parts modales. Jonkeren et al. (2019) proposent un cadre simple en données et applicable à plusieurs échelles dépendamment du corridor ou pays, capable d'isoler les effets de marché et les gains ou pertes de compétitivité entre modes ; cet outil informe « où » et « pourquoi » le rail progresse ou recule et clarifie ainsi le ciblage des politiques. Deuxièmement, des approches ex ante de dynamique des systèmes simulent l'impact de politiques combinées, par exemple les investissements, la tarification carbone ou amélioration logistique sur les choix modaux et les émissions. Nassar et al. (2023) analysent et combinent les facteurs comme la capacité, la congestion, les coûts et les préférences de mode pour évaluer des scénarios de transfert vers le rail et les risques de congestion ou autres conséquences négatives. Troisièmement, des modèles micro-logistiques lient les choix de transport et la gestion d'inventaire sous contrainte d'émissions. Boone et Ganeshan (2025) montrent comment l'introduction d'une contrainte carbone ou d'un prix interne du CO₂ déplace le choix optimal vers des modes plus sobres comme le rail ou l'intermodal, mais en prenant également en compte les coûts de stock, l'incertitude de délai et les émissions d'entreposage.

Les constats dans la littérature concernant le transfert du transport routier vers le rail convergent. D'un point de vue physique, le rail reste moins carboné par Tonne-km que le camion ; un transfert bien élaboré produit des gains mesurables d'énergie et de CO₂ (Kaack et al., 2018). D'un point de vue opérationnel, la fiabilité, mesurée par la variabilité des temps de transit, et le temps restent des déterminants majeurs du choix modal ; le transport routier demeure un choix plus avantageux pour les petits lots et délais serrés, tandis que le rail est beaucoup plus attrayant à mesure que les volumes et distances augmentent, surtout lorsque l'accès aux terminaux est plus rapide. Du point de vue politique, les études soulignent l'importance d'aligner les incitatifs en internalisant les coûts externes du transport routier et via une tarification du carbone — ainsi que sur les investissements dans les infrastructures comme les voies d'évitement, capacités terminales, accès portuaires, etc. pour rendre l'intermodal réellement concurrentiel (Jonkeren et al., 2019; Kaack et al., 2018; Nassar et al., 2023).

Il est important de noter que les défis du transfert modal sont assez bien identifiés dans la littérature. Sur le plan logistique, les coûts de transbordement, le "dernier kilomètre", la disponibilité des créneaux ferroviaires et la coordination aux terminaux constituent des freins récurrents (Nassar et al., 2023). Sur le plan économique, l'écart entre coûts privés et coûts sociaux du transport routier limite l'incitation naturelle à basculer vers le rail (Kaack et al., 2018). Sur le plan comportemental et sectoriel, des études régionales montrent des freins importants : par exemple, Das, Mokobori et Gopinath (2025) estiment, via un modèle fondé sur un coût généralisé, qu'un marché dominé à ~90 % par le transport routier peut évoluer vers ~70/30 route/rail si des actions ciblées réduisent le temps et les coûts opérationnels, mais l'ampleur du transfert dépend du type de flux, des exigences de délai et du contexte institutionnel. Enfin, sur le plan décisionnel, Beil (2025) indique que l'acceptabilité et les préférences des acteurs pour des mesures "pull", comme les investissements dans les infrastructures ou les incitatifs pour le transfert modal, plutôt que "push", comme les restrictions et les taxes, sont très importantes pour réussir la transition modale.

En somme, la modélisation dans le contexte de transfert modal du transport routier vers le rail remplit trois rôles complémentaires : mesurer a posteriori l'apport réel de la transition vers le rail aux réductions de CO₂ (Jonkeren et al., 2019), tester en amont, ou de façon prospective, des combinaisons d'instruments financiers et d'investissements en tenant compte des contraintes de réseau et de coûts (Nassar et al., 2023), et éclairer, à l'échelle opérationnelle, les compromis entre coût, niveau de service et empreinte carbone dans les choix de transport (Boone et Ganeshan, 2025). Lorsqu'utilisés ensemble, ces approches

permettent d'identifier les options de route à potentiel intéressant, de prioriser les investissements qui améliorent la fiabilité et d'ajuster les incitations économiques afin de réduire les émissions (Kaack et al., 2018; Ahsan et al., 2023).

1.4.2 Modélisation et décarbonisation du transport ferroviaire canadien

Le manque d'études sur l'impact de la modélisation dans la décarbonisation du transport ferroviaire de fret canadien est frappant, aussi bien en ce qui concerne la transition énergétique des chemins de fer que le transfert modal du camionnage vers le rail. Nos recherches dans la littérature scientifique révèlent un nombre très limité d'études portant sur la décarbonisation du fret ferroviaire, que ce soit au Canada ou à l'international. Bien que certains pays ou régions du monde aient progressé dans ce domaine (Golightly et al., 2022; Tian et al., 2024), cette thématique demeure sous-explorée, en particulier dans le contexte canadien.

Au Canada, la majorité des travaux académiques se concentrent davantage sur le développement et l'optimisation des modèles de transport, qui, bien que pouvant indirectement contribuer à la réduction des émissions de GES, mettent principalement l'accent sur la gestion des actifs, les améliorations en matière de sécurité et l'analyse des émissions sur l'ensemble du cycle de vie dans les cadres de prise de décision (Ireland et al., 2004; Miranda et al., 2021; Ortiz-Astorquiza et al., 2021; Wang et al., 2024). En d'autres termes, peu de recherches ont été menées au Canada pour modéliser l'impact potentiel du passage du transport routier au transport ferroviaire de marchandises sur les émissions de GES. Quelques études aux États-Unis ont analysé des solutions de décarbonisation pour l'industrie ferroviaire, (Hernandez, et al., 2024; Hernandez et al., 2023; Mandegari et al., 2023; Popovich et al., 2021), et les premières essais concernant les études en décarbonisation du rail étant conduits à partir de 1970 sur la viabilité de l'électrification des voies ferrées, mais sous un angle principalement économique, en excluant l'évaluation des impacts environnementaux (Popovich et al., 2021). Bien que ces recherches puissent présenter des similitudes avec le contexte canadien, elles négligent toutefois les spécificités politiques et territoriales de l'industrie ferroviaire au Canada, limitant ainsi leur applicabilité directe. Ce constat souligne l'importance de combler ce vide scientifique afin de mieux comprendre comment la modélisation peut influencer les stratégies de décarbonisation dans le transport ferroviaire de fret canadien.

Le secteur ferroviaire canadien présente des caractéristiques uniques qui impactent l'efficacité des modèles de décarbonisation. Les rapports d'inventaire national sur les émissions de GES (ECCC, 2024)

montrent que les émissions du transport ferroviaire ont diminué progressivement grâce à des améliorations de l'efficacité énergétique, mais des défis subsistent, notamment dans le transport de marchandises.

1.4.3 Lien avec la problématique et question de recherche

L'un des rôles majeurs de la modélisation dans la décarbonisation ferroviaire est sa capacité à offrir une vision prospective des transformations du secteur. En théorie, elle agit comme un instrument de rationalisation, permettant d'évaluer des futurs complexes et d'éclairer les choix stratégiques. Au Canada, cette fonction est visible dans les travaux de Transports Canada, qui utilise des exercices de modélisation pour analyser les technologies et les mesures pouvant contribuer à la décarbonisation du fret terrestre d'ici 2050 (TC, 2023, 2024). De même, la modélisation joue un rôle déterminant dans l'évaluation de nouvelles technologies comme les trains à hydrogène (Guglielmo, 2024; Cryderman, 2024), en simulant des scénarios d'implémentation pour identifier les voies les plus propices à leur adoption.

Cette vision de la modélisation comme un simple outil d'analyse technique objectif est cependant incomplète. La littérature académique souligne son rôle crucial, et souvent politique, dans la définition même des politiques publiques. Des travaux comme ceux de Hernandez et al. (2023, 2024) montrent que l'intégration des externalités environnementales dans les modèles économiques peut ajuster les stratégies d'investissement, liant ainsi l'analyse technique à des arbitrages de politique publique. De même, les modèles d'aide à la décision (DSM) peuvent faciliter l'alignement des stratégies nationales sur les engagements internationaux comme l'Accord de Paris (Doukas et Nikas, 2020). Ces perspectives suggèrent que la modélisation est, au mieux, une interface entre la science et la politique, un « objet frontière » qui traduit des données techniques en langage décisionnel.

Toutefois, ce mémoire part du constat que cette interface est loin d'être neutre et que son influence est souvent dépendante à des logiques qui dépassent le cadre technique. C'est ici que se situe le cœur de notre problématique. La prise de décision ne repose pas uniquement sur des résultats de modélisation. Comme le postule la théorie de la décision fondée sur les preuves (« evidence-based policy-making » en anglais), le processus politique n'est pas un exercice de rationalité globale où les meilleures données sont prises en compte (Cairney, 2015). Les décideurs opèrent dans un cadre de rationalité limitée, où l'incertitude, l'ambiguïté et la surcharge d'informations les obligent à utiliser des raccourcis cognitifs, des heuristiques et à se fier à leurs croyances et aux pressions politiques (Head, 2010). Dans ce contexte, la

preuve scientifique n'est qu'un type d'information parmi d'autres, en concurrence avec l'expérience des praticiens, les préférences du public et, surtout, les intérêts politiques et industriels.

Cette réalité est au centre de la « politique de la modélisation » (Bauer et al., 2023). Les modèles ne sont pas des miroirs passifs de la réalité ; ils sont des constructions actives qui façonnent la perception du problème et des solutions. Comme l'affirment Aykut et al. (2019), la production de savoirs anticipatifs est une « activité intrinsèquement contestée et politique ». Le choix d'un modèle, de ses hypothèses et de ses indicateurs est déjà un acte politique. En retour, les modèles agissent comme des « créateurs de corridors » (« corridor makers » en anglais) (Beck et Oomen, 2021) : ils ne se contentent pas de cartographier les futurs possibles, ils délimitent un corridor étroit de futurs jugés « faisables », souvent au détriment d'alternatives plus radicales mais jugées politiquement ou économiquement irréalistes. Ainsi, loin d'être un simple outil d'aide à la décision, la modélisation devient un instrument qui peut être utilisé pour légitimer des décisions préétablies, cadrer le débat et exclure certaines options.

L'influence réelle des modèles est donc conditionnée par leur alignement avec des forces externes bien plus puissantes. Premièrement, les politiques de transport durable sont façonnées par des considérations géopolitiques (Tellenne, 2023). La décarbonation est devenue un enjeu de souveraineté et de compétitivité industrielle. Comme l'analysent Bordoff et O'Sullivan (2022), le « nouvel ordre énergétique » n'est pas le fruit d'une optimisation technique, mais d'une intervention délibérée des gouvernements pour transformer les marchés en réponse à des crises géopolitiques. Dans ce contexte, les choix d'investissement dans une technologie ferroviaire (par exemple, privilégier l'hydrogène produit localement) peuvent répondre à des impératifs de sécurité énergétique qui priment sur les conclusions d'un modèle de coût-efficacité.

Deuxièmement, la gouvernance multiniveaux (Knieling et Leal Filho, 2013) fragmente l'autorité et complexifie la prise de décision. La décarbonisation du rail au Canada est un « problème complexe » (« wicked problem » en anglais) qui exige une coordination entre les objectifs fédéraux, les politiques énergétiques provinciales, les réglementations municipales et les stratégies des entreprises privées. Un modèle national peut identifier une solution optimale (par exemple, l'électrification), mais sa mise en œuvre se heurte à un amalgame de juridictions et d'intérêts divergents, créant des défis que l'outil technique ne peut surmonter.

Troisièmement, les facteurs socio-économiques, tels que les préférences des usagers et les dynamiques du marché du travail, sont des variables que les modèles peinent à intégrer de manière satisfaisante. Comme le critique Creutzig (2016), les modèles dominants (IAM) sous-estiment l'importance des changements comportementaux et infrastructurels. De plus, des études comme celles de Rubiano Rivadeneira et Carton (2022) et Trutnevyte et al. (2019) soulignent les angles morts de ces modèles, qui omettent souvent les questions de justice sociale, d'inégalités et de transformations sociétales au profit d'une logique d'optimisation économique.

Enfin, les modèles eux-mêmes présentent des limites techniques qui justifient la prudence des décideurs. Le transport de fret est un secteur « difficile à décarboner » en raison de contraintes physiques et techniques fondamentales (Creutzig et al., 2015). Comme le montre Luderer et al. (2018), les modèles ont tendance à sous-estimer les émissions résiduelles de ces secteurs et à surestimer la rapidité de la transition. Ces incertitudes techniques, combinées aux pressions politiques et économiques, renforcent la tendance des décideurs à privilégier le statu quo ou des solutions plus prudentes.

En conclusion, la modélisation influence la prise de décision en matière de décarbonisation ferroviaire, mais son impact est profondément limité et conditionné. Les modèles peuvent offrir des recommandations précises, mais leur adoption dépend de leur alignement avec les intérêts politiques et industriels, les contraintes géopolitiques et de gouvernance, et les logiques économiques de court terme. Au Canada, les lacunes en matière d'incitations claires pour une transition ferroviaire verte, couplées à un cadre réglementaire qui favorise l'optimisation des technologies existantes plutôt qu'un incitatif de changement, créent un environnement où la modélisation risque de rester un exercice de justification plutôt qu'un véritable levier de transformation. C'est précisément ce décalage entre le potentiel affiché et l'influence réelle des modèles que notre question de recherche vise à explorer : comment, et dans quelle mesure, la modélisation contribue-t-elle réellement à la prise de décision pour la décarbonisation du transport ferroviaire au Canada ?

1.4.4 Facteurs complémentaires à la modélisation dans la prise de décision

La littérature met en évidence plusieurs facteurs non liés à la modélisation qui influencent les décisions en matière de décarbonisation.

D'abord, les politiques publiques et gouvernance, puisque le cadre réglementaire et les mécanismes de gouvernance jouent un rôle clé dans la mise en œuvre des stratégies de décarbonisation. Les politiques nationales, comme la Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité, fixent des objectifs qui orientent les décisions au-delà des résultats des modèles (GdC, 2022a).

Deuxièmement, les facteurs économiques et financiers, comme les incitations économiques, les coûts d'investissement, et la rentabilité des technologies bas carbone influencent fortement les décisions stratégiques. Par exemple, l'intégration des coûts des externalités environnementales dans les modèles économiques peut modifier l'évaluation des projets ferroviaires (Wang et al., 2024). L'analyse coûts-bénéfice est souvent utilisée pour justifier des investissements, mais elle doit être complétée par des considérations d'équité sociale et de résilience économique.

La consultation des parties prenantes (gouvernements, entreprises, société civile) est essentielle pour garantir l'acceptabilité sociale des politiques climatiques. L'approche participative permet d'enrichir la modélisation en intégrant des perspectives qualitatives souvent négligées (Strassheim et Kettunen, 2014). Cette dimension est particulièrement importante pour le secteur ferroviaire, où les décisions peuvent avoir des impacts significatifs sur les communautés locales et les travailleurs du secteur.

Les impacts environnementaux indirects et les préoccupations liées à la justice climatique sont des éléments que la modélisation purement quantitative ne capture pas toujours (Rubiano Rivadeneira et Carton, 2022). Des analyses qualitatives complémentaires sont donc nécessaires pour une évaluation holistique des politiques de décarbonisation (Velazquez et al., 2015). L'intégration des principes de durabilité sociale et environnementale permet de concevoir des politiques plus robustes et résilientes face aux défis climatiques futurs.

En somme, la modélisation ne peut être considérée comme le seul facteur déterminant. La prise de décision résulte d'une interaction complexe entre les résultats des modèles, les dynamiques politiques, les contraintes économiques, les considérations environnementales et la participation des parties prenantes. De ce fait, nous nous penchons sur l'hypothèse que la modélisation à elle seule n'a pas d'impact ou influence significative sur la prise de décisions dans la décarbonisation du secteur ferroviaire canadien.

1.5 Cadre théorique

L'hypothèse selon laquelle la modélisation à elle seule n'influence pas la prise de décision dans la décarbonisation du secteur ferroviaire canadien trouve un écho dans les articles analysés, soulevant plusieurs interrogations sur l'efficacité des outils de modélisation et les dynamiques décisionnelles qui structurent le secteur ferroviaire. D'une part, certaines études mettent en avant la capacité des modèles à guider les investissements en infrastructures, à optimiser l'implantation des énergies alternatives et à structurer des scénarios de transition énergétique (Golightly et al., 2022; Hernandez et al., 2023). D'autre part, d'autres travaux soulignent les limites de la modélisation face aux facteurs politiques, économiques et institutionnels qui façonnent la prise de décision réelle (Felix Creutzig, 2016; Head, 2010). Ainsi, si la modélisation fournit un cadre analytique robuste, son adoption effective dépend de la manière dont les entreprises ferroviaires, les décideurs publics et les acteurs industriels l'intègrent dans leurs stratégies.

Cette étude s'inscrit dans le cadre théorique du processus décisionnel, intégrant des approches fondamentales qui mettent en évidence le rôle central de la modélisation en tant qu'outil analytique essentiel à l'élaboration de solutions et à la prise de décision. Parmi les cadres théoriques mobilisés, plusieurs perspectives permettent d'analyser l'utilisation des modèles dans les décisions stratégiques des compagnies ferroviaires en matière de décarbonisation.

Les thèmes communs dans la littérature résident dans la reconnaissance du potentiel des modèles en tant qu'outils de planification stratégique, mais également dans l'importance des facteurs externes (politiques, économiques et institutionnels) qui influencent leur adoption. Les divergences concernent la capacité réelle des modèles à impulser un changement structurel : certains auteurs affirment que les modèles facilitent la transition énergétique, tandis que d'autres insistent sur la persistance des freins politiques et industriels qui limitent leur impact direct.

Au Canada, la situation est marquée par des politiques publiques favorisant une décarbonisation progressive, mais non contraignante du secteur ferroviaire. Le règlement sur les émissions des locomotives impose des limites d'émissions sans incitations directes à l'électrification ou à l'hydrogène, ce qui freine les investissements à long terme. Le transport ferroviaire canadien, dominé par le fret diesel, se heurte à des obstacles structurels (infrastructures, coûts de conversion, absence d'une vision politique forte) qui limitent l'impact immédiat des modèles dans la transition bas-carbone. Ainsi, si la modélisation est un outil

précieux, elle ne suffit pas à déclencher la transformation du secteur sans une volonté politique et une pression économique incitatrice.

1.5.1 Politique de modélisation

Le processus de prise de décision dans les organisations complexes, notamment dans le secteur du transport ferroviaire, tend à s'appuyer sur des données probantes afin de garantir des choix cohérents, justifiables et efficaces. Nous pouvons définir la preuve comme un argument ou une affirmation étayée par des informations. Le processus de prise de décision est ancré dans les théories politiques basées sur le concept de la rationalité limitée. Cette dernière suggère que les gens peuvent avoir des capacités cognitives limitées, mais qu'ils sont néanmoins orientés vers des objectifs et prennent le temps de prendre les bonnes décisions ; ils font face à l'incertitude en essayant, dans la mesure du possible, d'articuler leurs valeurs, de classer leurs problèmes politiques les plus importants et de rechercher des preuves pour les bons types de solutions (Cairney, 2015).

Selon Strassheim et Kettunen (2014), de nombreuses études sur les politiques fondées sur des données probantes s'accrochent encore à un modèle linéaire et que l'expertise et les preuves sont "socialement ancrées" dans les relations d'autorité et les contextes culturels. Les faits pertinents pour la politique sont le résultat d'une lutte intense et complexe pour l'autorité politique et épistémique.

Le même modèle linéaire a été décrit par Nilsson et al. (2008), qui indiquent également que de nombreux modèles sont conçus de manière incorrecte, pour résoudre des problèmes en utilisant une approche "rationnelle-instrumentale": un seul décideur ou un groupe de décideurs identifie un problème, le modèle fournit les données et les solutions possibles, et le décideur sélectionne la meilleure option. Au contraire, de nombreux acteurs rivalisent pour définir les problèmes, la production de ce que nous appelons "connaissances" est un processus très contesté, les solutions sont souvent produites pour faire avancer les projets favoris des participants, et le moment de l'adoption des solutions politiques, ainsi que les motivations qui les sous-tendent, sont souvent imprévisibles.

La tendance à utiliser la modélisation formelle est plus faible dans les domaines importants où de nombreuses croyances sont déjà ancrées et lorsque les décideurs politiques n'aiment pas l'imprévisibilité des résultats de la modélisation. En outre, même les modèles sophistiqués ont tendance à se limiter à des sous-systèmes individuels ou à des départements gouvernementaux ; les questions peuvent être

transversales, mais l'analyse renforce la pensée en silo (Nilsson et al., 2008). Cette exclusion peut avoir un impact significatif sur les résultats du modèle, mais peut être atténuée si les connaissances des experts, qui peuvent s'avérer précieuses pour identifier ces facteurs ou réduire les lacunes dans les connaissances respectives, sont sollicitées de manière structurée et prises en compte de manière efficace (Doukas et Nikas, 2020).

La modélisation informatique a connu un essor considérable, principalement en raison de son faible coût et des progrès technologiques, plutôt que sous l'impulsion d'une demande politique explicite en faveur d'une élaboration des politiques fondées sur des modèles. En parallèle, on observe dans la littérature que l'application effective de ces outils dans le processus décisionnel reste inégale (Bauer et al., 2023).

Dans un contexte de prise de décision complexe, caractérisé par des objectifs de performance multiples et parfois contradictoires, il est souvent plus pertinent d'examiner plusieurs alternatives quantifiables qui offrent des perspectives variées et divergentes (Yeomans et Gunalay, 2020). Cette approche permet d'appréhender la complexité inhérente aux systèmes étudiés et d'éviter une vision réductionniste qui limiterait les options stratégiques.

La planification des transports dans le monde réel se confronte fréquemment à des contraintes incompatibles et des exigences incongrues, qui sont difficilement transposables dans les modèles mathématiques (Brugnach et al., 2007; Janssen et al., 2010; Walker et al., 2003). Bien que les formulations mathématiques puissent produire des solutions dites « optimales », il demeure incertain que ces solutions soient réellement adaptées aux dynamiques complexes du système de transport initial (Acharjya et Anitha, 2017; Brugnach et al., 2007; Janssen et al., 2010; Loughlin et al., 2001). Cette inadéquation souligne la nécessité d'une validation empirique et d'une prise en compte des incertitudes systémiques dans l'application des modèles aux décisions stratégiques.

En effet, les facteurs influençant la prise de décision modélisée sont largement déterminés par le niveau d'incertitude et de risque, indépendamment du cadre de modélisation utilisé. L'incertitude est définie comme « un concept général reflétant un manque de connaissance ou d'accord sur les résultats possibles et leurs probabilités », tandis que le risque se réfère à « un résultat potentiellement négatif découlant d'une incertitude, dont l'évaluation dépend du contexte étudié et peut être quantifiée en termes de probabilité ou évaluée qualitativement sur la base de l'expertise des parties prenantes » (Doukas et Nikas, 2020, p 1.). De manière générale, aucun cadre de modélisation ne parvient à intégrer exhaustivement

l'ensemble des incertitudes et des risques pertinents, limitant ainsi la capacité des modèles à servir d'outils autonomes pour la prise de décision.

La littérature récente souligne que la modélisation n'est pas un exercice neutre, mais une *pratique de co-production* entre science et politique (Beck et Oomen, 2021; Rubiano Rivadeneira et Carton, 2022). Les IAM traduisent des choix de valeurs — par exemple, la primauté de l'efficacité économique sur la justice distributive — et orientent ainsi les politiques publiques. En mobilisant le concept de « politique d'anticipation » (« politics of anticipation » en anglais), Beck et Oomen montrent comment la modélisation crée un corridor d'action où les décisions futures sont anticipées et cadrées par les outils mêmes qui prétendent les informer. Dans le contexte ferroviaire canadien, cette observation suggère que les modèles internes (scénarios d'électrification, investissements alternatifs) participent eux aussi à définir les limites du « possible » pour CN et CPKC.

1.5.1.1 Défis et limites de la modélisation dans la prise de décision

En 2014, le statisticien David Hand a fait la déclaration suivante (Hand, 2014) : « En général, lorsque nous construisons des modèles statistiques, nous ne devons pas oublier que l'objectif est de comprendre quelque chose du monde réel. Ou prédire, choisir une action, prendre une décision, résumer des preuves, etc., mais toujours à propos du monde réel, et non d'un monde mathématique abstrait : nos modèles ne sont pas la réalité - un point bien mis en évidence par George Box (1979) dans sa remarque souvent citée que "tous les modèles sont faux, mais certains sont utiles" Dans la plupart des environnements décisionnels du "monde réel", il existe d'innombrables exigences et objectifs de système qui ne seront jamais explicitement apparents ou inclus dans la formulation du modèle (Brugnach et al., 2007; Walker et al., 2003).

En outre, la plupart des aspects subjectifs restent inévitablement non modélisés et non quantifiés dans les modèles de décision élaborés. Cela se produit régulièrement lorsque les décisions finales sont élaborées sur la base non seulement d'objectifs modélisés, mais aussi d'objectifs plus subjectifs des parties prenantes et de préférence socio-politico-économiques. Lorsqu'il existe des objectifs non modélisés et des problèmes non quantifiés, des méthodes non traditionnelles sont nécessaires pour rechercher dans la zone de décision non seulement des ensembles de solutions non inférieures, mais aussi des alternatives qui sont manifestement sous-optimales par rapport au problème modélisé. De plus, pour améliorer la

prise de décision face à de telles ambiguïtés, il est souvent préférable d'élaborer un nombre limité d'options dissemblables qui offrent des perspectives contrastées (Yeomans et Gunalay, 2020).

Les critiques adressées aux IAMs mettent en avant leurs lacunes en matière de justice, de représentation sociale et d'institutions (Rubiano Rivadeneira et Carton, 2022; Trutnevyte et al., 2019; Krawczyk, F., et Braun, A. C., 2025). Les modèles supposent souvent des acteurs rationnels opérant dans un contexte uniforme, ce qui néglige les asymétries économiques, la gouvernance multi-niveaux et les dynamiques politiques propres à chaque territoire. Dans le cas canadien, cela signifie que la modélisation des stratégies de décarbonisation ferroviaire doit intégrer les particularités institutionnelles — telles que la régulation fédérale et provinciale, les marchés énergétiques régionaux et la capacité d'investissement différenciée entre entreprises.

Des travaux récents (Peng et al., 2021; Iyer et al., 2015; Davidson et al., 2024) plaident pour une intégration explicite des institutions et comportements dans les modèles de durabilité. Ces auteurs montrent que la performance des politiques climatiques ne dépend pas seulement de la structure économique, mais aussi de la coordination interinstitutionnelle, des capacités de mise en œuvre et des comportements collectifs. Pour le transport ferroviaire, cela signifie que la modélisation de la décarbonisation doit considérer la variabilité institutionnelle (réglementations, partenariats public-privé, normes opérationnelles) comme un déterminant majeur de la prise de décision. Ce cadre analytique combine ainsi la logique techno-économique (modèles de coût/bénéfice) et la logique institutionnelle et décisionnelle (analyse des choix des entreprises ferroviaires).

1.5.2 Cadre analytique et hypothèse de recherche

Ce mémoire repose sur un cadre analytique conçu pour examiner la relation causale entre la modélisation (la variable indépendante, 'X') et la décarbonisation (la variable dépendante, 'Y'). L'hypothèse centrale est que la modélisation—entendue ici comme un ensemble de processus d'analyse prospective, de simulation de scénarios et d'aide à la décision stratégique—agit comme un mécanisme fondamental influençant les trajectoires de réduction des émissions. L'objectif n'est pas seulement de constater une corrélation, mais bien de retracer le processus par lequel les activités de modélisation (le 'X') se traduisent en actions concrètes et en résultats mesurables de décarbonisation (le 'Y'). En appliquant ce cadre au contexte spécifique du transport ferroviaire de fret au Canada, nous cherchons à élucider comment et dans quelle mesure cet outil analytique influence la transition écologique dans un secteur à forte intensité carbone.

1.6 Synthèse critique

La littérature confirme l'utilité de la modélisation pour projeter les trajectoires de décarbonisation, mais souligne aussi ses limites : qualité des données, incertitudes, et faible adoption par les acteurs décisionnels. Plusieurs auteurs insistent sur le fait que même les modèles les plus sophistiqués n'intègrent pas toujours l'ensemble des incertitudes, des risques ou des objectifs sociaux qui influencent les décisions (Doukas et Nikas, 2020; Yeomans et Gunalay, 2020). Des éléments subjectifs, tels que les préférences des parties prenantes, les dynamiques politiques ou les intérêts industriels, restent souvent non modélisés (Brugnach et al., 2007).

Les critiques récurrentes adressées à la modélisation relèvent d'une tendance à simplifier excessivement les systèmes complexes et à négliger la nature non linéaire et conflictuelle de la décision publique (Cairney, 2015; Strassheim et Kettunen, 2014). Les approches dites « rationnelles-instrumentales » tendent à ignorer les interactions entre institutions, la pluralité des valeurs sociales et les effets de pouvoir dans la définition des politiques (Nilsson et al., 2008). Ainsi, la modélisation est parfois perçue comme une solution à la recherche d'un problème (Radaelli, 2004) développée indépendamment des besoins réels des décideurs.

Enfin, dans le cas spécifique du Canada, les politiques climatiques sont élaborées à l'intersection de contraintes économiques, de rapports de force politique et de considérations territoriales. Le secteur ferroviaire étant fortement intégré aux marchés nord-américains, ses décisions sont souvent influencées par les régulations américaines, ce qui impacte la portée des modèles produits localement (Neufeld et Massicotte, 2017).

Le présent mémoire se positionne alors comme une contribution empirique à cette problématique en explorant, à partir du cas canadien, dans quelle mesure la modélisation peut réellement influencer sur les décisions dans un secteur confronté à de fortes contraintes économiques et politiques.

Cette revue de la littérature et l'analyse de la problématique nous conduisent à formuler notre hypothèse de recherche centrale : la modélisation technico-économique, malgré son potentiel analytique, n'a pas d'impact significatif direct sur les décisions stratégiques de décarbonisation des compagnies ferroviaires canadiennes. Nous postulons que son influence est déterminée par d'autres facteurs dominants — notamment les contraintes financières, le cadre réglementaire nord-américain et les logiques

opérationnelles internes. La modélisation servirait ainsi davantage d'outil de justification a posteriori que de levier de décision a priori. C'est cette hypothèse que la méthodologie suivante vise à tester.

À partir de ces constats, le chapitre suivant présentera la méthode employée pour collecter et analyser les données empiriques permettant de répondre à la problématique identifiée.

CHAPITRE 2

Méthodologie

2.1 Introduction

Ce chapitre décrit la méthodologie utilisée pour tester notre hypothèse de recherche, énoncée au chapitre précédent, qui soutient que la mise en œuvre de techniques de modélisation n’a pas d’impact significatif direct sur le processus de prise de décision visant à améliorer les stratégies de décarbonisation des compagnies ferroviaires, suggérant que d’autres facteurs, tels que les contraintes économiques, réglementaires et organisationnelles, entrent en jeu.

Pour explorer cette hypothèse, une approche qualitative a été privilégiée, mobilisant l’étude de cas et le traçage de processus (« process-tracing » en anglais) à partir des données empiriques. Ce dispositif méthodologique permet d’examiner les liens de causalité entre l’utilisation des modèles technico-économiques et les décisions prises en matière de décarbonisation. Il repose sur une combinaison d’analyses documentaires, d’entretiens semi-dirigés avec des experts, et d’examens comparatifs des stratégies de CN et CPKC, deux principales compagnies ferroviaires canadiennes.

L’objectif principal de cette méthodologie est de retracer les mécanismes causaux reliant la modélisation technico-économique aux décisions stratégiques prises en matière de décarbonisation, tout en identifiant les facteurs externes qui peuvent moduler ou limiter son influence.

L’étude utilise une approche qualitative, notamment l’étude de cas comparative, en se concentrant sur le transport ferroviaire de marchandises au Canada, couvert à 80% par deux entreprises ferroviaires de Classe 1 – CN et CPKC. Le chapitre décrit également les critères d’analyse des données, le rôle des conseils d’experts externes et la manière dont ces éléments ont été intégrés dans la conception de la recherche.

2.2 Conception de la recherche

2.2.1 Approche

La méthode de l’étude de cas a été choisie pour explorer la manière dont les outils de modélisation sont intégrés dans les processus de prise de décision au sein des entreprises ferroviaires. L’objectif est de comprendre si ces outils influencent de manière significative leurs stratégies de décarbonisation. L’étude

de cas est particulièrement adaptée pour examiner des phénomènes complexes dans leur contexte réel (George et Bennett, 2005). Dans cette recherche, les entreprises ferroviaires, qui utilisent des outils de modélisation avancée pour la décarbonisation, permettent une analyse comparative par la méthode du traçage de processus pour découvrir premièrement les mécanismes causaux des cas à l'étude, et deuxièmement les conceptualiser dans le contexte actuel. Cette approche permet de comprendre non seulement les résultats obtenus, mais aussi les processus sous-jacents à leur mise en œuvre.

Le traçage de processus est un terme avec l'origine dans les études sur la psychologie cognitive, mais qui a été utilisé en par Alexander L. George (1979) dans la science politique pour décrire l'utilisation de l'évidence provenant des études de cas afin de faire d'inférences sur les explications historiques. Il implique l'analyse des étapes intermédiaires dans un processus pour comprendre comment ce processus a été mis en place et si et comment il a généré les résultats. Cette méthode est particulièrement adaptée à l'analyse des processus complexes impliquant plusieurs variables interdépendantes. Elle permet d'étudier les relations de cause à effet en identifiant les empreintes empiriques laissées par l'utilisation des modèles dans les processus de décision.

Le traçage du processus est défini comme l'utilisation « d'histoires, de documents d'archives, de transcriptions d'entretiens et d'autres sources pour voir si le processus causal qu'une théorie suppose ou implique dans un cas est en fait évident dans la séquence et les valeurs des variables intervenantes dans ce cas » (George et Bennett, 2005). Beach et Pedersen (2019) nous donnent également une autre définition : « La traçabilité des processus est une méthode de recherche permettant de retracer les mécanismes de causalité à l'aide d'une analyse empirique détaillée de la façon dont un mécanisme de causalité a fonctionné dans des cas réels. »

L'application du traçage du processus pour cette recherche repose sur trois éléments clés :

- a) La théorisation des mécanismes causaux reliant la modélisation aux décisions.
- b) L'analyse empirique des traces laissées par ces mécanismes (rapports d'experts, documents institutionnels, retours d'entretiens).

Dans notre étude, cette méthode permet de tester empiriquement le lien de causalité entre la modélisation (notre variable 'X') et la décarbonisation (notre variable 'Y'), tel que défini dans notre cadre analytique, et de déterminer si la modélisation constitue un facteur déterminant ou simplement un outil

influencé par des considérations plus larges. L'un des principaux atouts de la méthode du traçage de processus est qu'elle confronte les chercheurs à la possibilité de découvrir de multiples facteurs causaux, souvent révélés à travers l'examen minutieux des détails et des séquences d'événements d'un cas étudié. Ces éléments, parfois inattendus, peuvent émerger au-delà des hypothèses alternatives initialement formulées (Bennett et Checkel, 2015).

Partant de la logique bayésienne, qui nécessite de rechercher des sources de preuves diverses et indissociables (Beach et Pedersen, 2019), des entrevues avec de diverses parties prenantes, analyse des articles scientifiques et des médias ont été effectués et analysés par le processus de triangulation, impliquant une contre-vérification des inférences causales du traçage de processus à l'étude. Dans notre cas l'analyse va s'appuyer principalement sur les caractéristiques, dynamiques, processus et les résultats de la modélisation dans la prise de décision et élaboration des politiques de décarbonisation.

La revue documentaire a constitué une première étape essentielle dans la collecte des données. Elle a permis d'examiner des documents stratégiques, des rapports annuels, des bilans carbone, des stratégies de durabilité et des publications scientifiques relatives à la modélisation, à la transition énergétique et aux politiques de décarbonation. Cette analyse a été guidée par des critères de pertinence thématique (focalisation sur le transport ferroviaire, modélisation, politiques climatiques), de temporalité (données récentes, notamment de 2020 à 2024), de disponibilité (documents publics) et de crédibilité (documents émanant d'organismes reconnus comme Transport Canada, CN, CPKC, ou des revues académiques). Elle a permis d'identifier les outils de modélisation utilisés, les résultats présentés et les intentions stratégiques des compagnies étudiées en matière de décarbonisation.

Parallèlement, des entretiens semi-dirigés ont été réalisés auprès de neuf experts provenant de domaines variés – modélisation technico-économique, politiques climatiques, ingénierie ferroviaire et transport durable. Ces entretiens ont été menés entre novembre 2024 et janvier 2025 à l'aide d'un guide structuré autour de cinq thématiques clés : le rôle des modèles dans les décisions, les exemples concrets de leur usage, les défis méthodologiques, les facteurs concurrents à la modélisation, et les perspectives d'évolution. Les entretiens, d'une durée moyenne d'une heure, ont été enregistrés (avec consentement), transcrits intégralement, puis analysés selon une approche thématique. Ils ont fourni des éléments qualitatifs indispensables pour comprendre les représentations, les usages réels et les limites perçues des outils de modélisation dans le contexte ferroviaire canadien. Enfin, les études de cas ont été conduites sur

les deux principales compagnies de fret ferroviaire au Canada, CN et CPKC, qui à elles seules, couvrent environ 95 % des tonnes-kilomètres du secteur ferroviaire canadien. L'étude de cas s'est appuyée sur la méthode du traçage de processus afin d'explorer les mécanismes causaux reliant l'usage des modèles aux décisions stratégiques. L'objectif était de retracer les chaînes décisionnelles, d'identifier les points de contact entre modélisation et action, et de repérer les facteurs qui facilitent ou freinent l'opérationnalisation des résultats des modèles. Pour ce faire, les rapports publics, les déclarations des dirigeants, les documents stratégiques et les indicateurs de performance environnementale ont été examinés dans une perspective comparative entre les deux compagnies.

2.2.2 Critères de sélection des cas

Puisque 95% du fret ferroviaire canadien est transporté par les deux compagnies CN et CPKC, nous avons sélectionné ces deux compagnies pour faire l'objet de l'étude, toutefois, en prenant soin de considérer les impacts sur les autres compagnies ferroviaires qui font partie du réseau, les particularités similaires étant tout à fait pertinentes pour la compréhension de l'état de la question. La sélection du CN et du CPKC s'est appuyée premièrement sur le critère de pertinence par rapport à l'objectif de recherche et cela comprend notamment l'utilisation d'outils de modélisation par les deux compagnies et leur engagement en faveur de la décarbonisation. Les deux entreprises utilisent des techniques de modélisation intégrées, telles que la prévision des émissions, l'analyse de scénarios et l'optimisation des itinéraires, dans le cadre de leurs stratégies de décarbonisation. De plus, les deux entreprises se sont publiquement engagées à atteindre des objectifs ambitieux en matière de développement durable, y compris des émissions carboneutres (CN, 2020; CPKC, 2023; Railroading, 2023).

Ensuite, le critère de représentativité a été considéré dans le choix et cela comprend l'importance ou la valeur générée par ces compagnies dans le système ferroviaire canadien, puisqu'il s'agit des acteurs majeurs détenant plus de 90% de tonnes-miles (TC, 2024) du système du secteur ferroviaire canadien, et leurs pratiques constituent des références pour l'industrie. Leur comparabilité est un élément important également, car opérant sur des marchés qui se chevauchent et dans des environnements réglementaires similaires, ils fournissent une base de comparaison équilibrée.

Les similitudes en termes de taille, de réseau, et de contraintes réglementaires font de CN et de CPKC des cas d'étude idéaux pour comparer l'impact des outils de modélisation sur la décarbonation. Leur comparaison permet de mieux comprendre si ces technologies conduisent à des améliorations

significatives dans des contextes similaires, ou si d'autres facteurs organisationnels et contextuels jouent un rôle déterminant.

La sélection des deux principales compagnies ferroviaires canadiennes de Classe 1, le CN et CPKC, comme cas d'étude, n'est pas seulement une question de représentativité du marché. Elle constitue le cœur de la conception comparative de cette recherche, essentielle pour tester l'hypothèse de travail. Ces deux organisations opèrent dans un environnement macro-contextuel similaire : elles sont soumises aux mêmes objectifs nationaux de décarbonisation, à un cadre réglementaire fédéral largement harmonisé, et à une influence nord-américaine comparable via des normes industrielles (par ex., EPA, AAR).

Ce contexte partagé agit comme une variable de contrôle, permettant à l'analyse de se concentrer sur les facteurs organisationnels internes. L'intégration de cette comparaison au cadre analytique permet de tester l'hypothèse de la manière suivante :

- Si les deux compagnies, malgré des cultures d'entreprise ou des stratégies internes potentiellement différentes, convergent vers la même pratique – c'est-à-dire une utilisation limitée des modèles de décarbonisation au profit de facteurs financiers ou réglementaires – cela renforce considérablement l'hypothèse. Cela suggérerait que les contraintes externes et les logiques de rationalité limitée sont des forces dominantes qui supplantent les stratégies organisationnelles individuelles.
- Si, à l'inverse, une compagnie démontre une intégration stratégique significative des modèles de décarbonisation tandis que l'autre les relègue à un rôle de justification (confirmant l'analyse de Head (2010)), cela remettrait en question l'hypothèse. Cela indiquerait que la culture organisationnelle et "l'expertise anticipative" (Aykut et al., 2019) d'une entreprise peuvent, en fait, créer des trajectoires de décision distinctes, même sous des pressions externes identiques.

On ne doit donc pas s'attendre a priori à une similarité parfaite. Bien que les pressions économiques favorisent la convergence, la littérature sur la « politique de la modélisation » (Bauer et al., 2023) suggère que les organisations développent leurs propres « répertoires » et « assemblages » d'expertise. La comparaison permettra d'examiner comment chaque compagnie « performe » son expertise (Oomen et al., 2022) et pourquoi certains modèles acquièrent (ou non) de l'autorité en interne (Udrea et Bauer, 2023), fournissant ainsi un test robuste de la relation entre les modèles et la prise de décision réelle.

2.2.3 Intégration de l'avis d'experts externes

L'étude adopte une approche qualitative centrée sur la réalisation d'entretiens semi-dirigés avec des experts en transport ferroviaire et en modélisation. Cette approche permet d'explorer en profondeur le rôle effectif des modèles technico-économiques dans la prise de décision, les défis et limites associés à leur usage et les autres facteurs influençant les décisions, en lien avec l'hypothèse selon laquelle la modélisation ne peut, à elle seule, dicter les choix stratégiques.

Les entretiens semi-directifs permettent d'explorer les perceptions et les pratiques des experts du domaine. Cette méthode est particulièrement utile pour analyser les aspects qualitatifs de la prise de décision et pour comprendre comment la modélisation est utilisée ou ignorée dans les processus décisionnels, selon Denzin et al. (2024).

Dans cette étude, les entretiens ont été menés avec neuf experts en transport ferroviaire et en modélisation. Une difficulté méthodologique inhérente à l'étude d'organisations d'envergure sur des sujets stratégiques sensibles est l'accès aux décideurs internes. Malgré des invitations et relances, nous n'avons pas obtenu d'entretiens avec des employés actuellement en poste chez CN ou CPKC, en raison de la sensibilité du sujet et des contraintes internes de communication. Cette absence a été contournée par une stratégie de triangulation robuste. Nous avons choisi de réaliser des entretiens avec des experts externes et d'anciens employés. Leur point de vue critique est précieux, car il offre une perspective qui va au-delà des communications officielles de l'organisation. En croisant leurs analyses avec l'examen approfondi des documents publics (rapports de durabilité, réponses CDP), cette approche permet de reconstituer de manière fiable les processus décisionnels, conformément à la méthode du traçage de processus.

Les entretiens ont été menés dans la période novembre 2024 – janvier 2025 auprès de neuf experts issus de divers domaines qui comprennent des spécialistes en transport ferroviaire travaillant sur des projets de transition énergétique, des experts en modélisation développant des outils pour l'analyse de la décarbonisation et des chercheurs en politique environnementale examinant les contraintes réglementaires du secteur. Malgré l'absence d'entretiens avec des représentants des chemins de fer de

classe 1, les experts consultés, certains ayant déjà travaillé pour ces compagnies dans le passé, offrent une vision analytique complémentaire sur l'usage et les limites de la modélisation dans la prise de décision.

Les experts externes ont été sélectionnés sur la base de leur expertise dans le domaine, leur expérience professionnelle et leur point de vue neutre. Plus précisément, les experts ont une spécialisation dans la modélisation des transports, les stratégies de décarbonisation ou les opérations ferroviaires et plusieurs années d'expérience dans l'application d'outils de modélisation avancés dans les secteurs des transports ou de l'énergie. Ils sont présentement non affiliés aux chemins de fer de classe 1 pour garantir l'impartialité des conseils. Il est à noter que leur profil est très divers, les experts étant issus d'organismes publics, d'instituts de recherche, d'autres entreprises ferroviaires, consultants indépendants spécialisés dans la modélisation ou transition énergétique, etc. Cela nous a permis d'élargir la portée des conclusions.

Le rôle des experts externes a été très important dans l'obtention de l'information pertinente à l'objectif de recherche avant de procéder avec les études de cas, puisque les experts ont fourni des informations sur l'état de l'art des techniques de modélisation pour la décarbonisation, les défis communs et les limites de la mise en œuvre des outils de modélisation, et les meilleures pratiques pour interpréter et intégrer les résultats de la modélisation dans la prise de décision stratégique.

Ces informations ont servi de référence pour évaluer les pratiques du CN et du CPKC. Toutefois, les informations ont également servi pendant l'analyse des résultats des études de cas pour renforcer la robustesse de l'analyse par le biais d'une perspective indépendante et sectorielle. Cela permettra de mieux contextualiser les résultats des deux cas d'étude et de fournir des recommandations plus globales et applicables au secteur ferroviaire.

La méthode de collecte des avis des experts a été réalisée par l'entremise des entretiens semi-directifs, ayant comme thème de discussion l'importance et l'impact des outils de modélisation dans la décarbonisation, le contexte général des pratiques de décarbonisation dans le secteur ferroviaire, les défis et limites des approches de modélisation, ainsi que des suggestions d'améliorations ou de nouvelles approches.

Les entretiens ont été structurés autour des cinq questions suivantes :

- a) Si et comment les outils de modélisation technico-économique sont-ils utilisés par les chemins de fer pour informer les efforts de décarbonisation et de réduction des émissions de gaz à effet de serre ?
- b) Pouvez-vous fournir des exemples où les modèles ont influencé la prise de décision en ce qui concerne les projets ferroviaires ? Certains concernent-ils le fret ou le passage du transport terrestre (c'est-à-dire le camionnage) au transport ferroviaire ?
- c) Quels sont les défis et les opportunités liés à l'utilisation de modèles pour la prise de décision dans le secteur ferroviaire ? (des exemples?)
- d) Quels sont les autres facteurs qui entrent en concurrence avec la modélisation technico-économique pour influencer la prise de décision dans le secteur ferroviaire ?
- e) Quelles sont les autres questions qui restent à traiter concernant la modélisation dans le transport ferroviaire ?

Ces questions ont été formulées pour tester systématiquement l'hypothèse de recherche et pour alimenter les trois axes d'analyse principaux. La conception des questions s'appuie directement sur les cadres théoriques de la prise de décision en rationalité limitée et de la politique de la modélisation.

Les deux premières questions visent à opérationnaliser l'axe 1 (Usage décisionnel des modèles). La question (a) établit une base de référence : la modélisation est-elle une pratique reconnue et utilisée pour informer les efforts de décarbonisation ? La question (b) pousse cette exploration plus loin en demandant des exemples concrets d'influence. Elle cherche à vérifier le caractère « performatif » des modèles, c'est-à-dire leur capacité à définir les termes du débat et à façonner les solutions perçues comme concevables. La mention spécifique du transfert modal est centrale à la problématique, permettant de vérifier si les modèles sont utilisés pour des optimisations internes (efficacité énergétique) ou pour des changements stratégiques systémiques (concurrencer le camionnage), un levier pourtant identifié comme critique.

La troisième question est le point d'entrée principal de l'axe 3 (Défis et applicabilité). Elle part du principe que l'utilisation des modèles n'est pas automatique et cherche à identifier les freins concrets qui valident l'hypothèse d'un impact limité. Ces « défis » peuvent être techniques (qualité des données, complexité des infrastructures), mais aussi organisationnels. La littérature sur la politique de la modélisation souligne que les modèles sont souvent perçus comme des « boîtes noires » et que leur complexité croissante peut

limiter leur adoption par les décideurs qui ne peuvent ni les « comprendre » ni les « valider » (Bauer et al., 2023).

La quatrième question est la plus critique pour tester l'hypothèse de recherche. Elle postule que la modélisation n'est pas le facteur dominant et demande aux experts d'identifier ce qui l'emporte. Cette question est directement informée par la revue de la littérature, notamment par Head (2010), qui soutient que la prise de décision est influencée par des « facteurs non scientifiques (pressions économiques, politiques, sociales) » et que les modèles sont « ignorés s'ils contredisent des intérêts politiques ou industriels ». Elle sonde également la « rationalité limitée » (Cairney, 2015), où les « preuves » issues des modèles coexistent avec des « considérations politiques et organisationnelles ». Enfin, elle permet d'identifier les facteurs externes, tels que les contraintes réglementaires ou les « considérations géopolitiques », qui définissent le cadre dans lequel les décisions sont prises.

Enfin, la dernière question est une question ouverte conçue pour la validation et l'exploration. Elle permet aux experts de soulever des « thèmes émergents » qui n'auraient pas été capturés par les questions précédentes. Elle sert également à identifier les lacunes perçues dans le domaine, informant ainsi directement les recommandations et les « pistes pour de futures recherches » qui concluront ce mémoire.

La présentation de résultats sera sous forme d'une synthèse incluse dans le chapitre d'analyse et le chapitre de discussion afin de résumer la contribution des experts.

Il est pertinent de noter que nous avons identifié certaines limites dans l'analyse et intégration des avis des experts, notamment les biais potentiels, car les experts peuvent avoir des points de vue influencés par leur propre contexte ou expériences professionnelles. De plus, l'avis des experts ne peut pas remplacer les données empiriques, mais sert à les enrichir et à les valider dans certains contextes.

2.3 Méthodes de collecte de données

2.3.1 Analyse documentaire

Une première source de données provient de documents internes disponibles au public des entreprises ferroviaires, notamment les rapports de durabilité et bilans carbone, documentation technique sur les outils de modélisation utilisés, stratégies de décarbonisation et rapports d'avancement, les résultats des outils de modélisation (par exemple, scénarios de réduction des émissions, modèles d'optimisation

énergétique), dossiers de prise de décision relatifs aux initiatives de développement durable et les plans stratégiques pour la décarbonation.

Puisque nous n'avons pas accès à des documents internes, seulement ceux publics ont été analysés, en utilisant les critères de sélection basés sur la pertinence par rapport à la décarbonisation, le contexte décisionnel, l'aspect temporel, l'accessibilité et crédibilité et les perspectives comparatives pour assurer une cohérence entre les cas.

Il est crucial de noter que, bien que l'analyse des documents internes non disponibles au public présente certains avantages pour une étude plus approfondie, elle ne s'avère pas essentielle pour répondre à la question de recherche et atteindre l'objectif de celle-ci, compte tenu des informations actuellement disponibles sur la décarbonisation du secteur ferroviaire canadien. Toutefois, elle pourra être très utile dans des recherches futures pour analyser les dynamiques et contextes internes de chaque compagnie.

2.3.2 Données secondaires

Des données quantitatives sur les émissions de GES et la consommation énergétique avant et après l'implémentation des outils de modélisation ont été collectées à partir de bases de données publiques et de publications des entreprises. La collecte de données s'est fait principalement par une recherche des bases de données académiques, consultation des sites officiels des entreprises et des organismes du même secteur, ainsi que les publications des organisations gouvernementales et non gouvernementales (Transport Canada, ACFC, etc.). D'autres sources secondaires ont été consultées, comme les rapports publics annuels des entreprises ferroviaires, publications académiques et scientifiques, comme des études sur la décarbonation ferroviaire, l'analyse des outils de modélisation, etc., des données gouvernementales sur les indicateurs d'émissions du secteur ferroviaire canadien, ainsi que des articles de presse spécialisés du secteur ferroviaire. L'analyse de ces sources vise premièrement à contextualiser les cas étudiés afin de comprendre les tendances générales et les pratiques communes dans le secteur ferroviaire ainsi qu'à identifier les meilleures pratiques pour repérer des exemples pertinents pour enrichir l'analyse.

Les données extraites des sources secondaires ont été organisées selon les thèmes correspondant aux critères d'analyse pour être en mesure d'identifier, mais aussi de comparer par la méthode d'analyse croisée des deux cas à l'étude, les stratégies de décarbonation et évaluer l'impact des outils de modélisation. Les données issues de l'analyse des sources primaires et des entretiens avec les experts et

les parties prenantes des deux compagnies seront comparés avec les données secondaires pour analyser et comprendre les raisons possibles des divergences, s'il y en a, qui peuvent être encrés dans un contexte spécifique, méthodologies différentes, etc. Cette triangulation des données permettra un meilleur renforcement de la crédibilité des conclusions.

2.4 Méthodes d'analyse

L'analyse des données s'est concentrée sur certains sujets clés afin d'assurer la pertinence avec la problématique de recherche. Un des sujets est lié à l'influence sur la prise de décision, spécifiquement la mesure dans laquelle les résultats de la modélisation ont influencé les décisions stratégiques. Ensuite le sujet d'efficacité des stratégies de décarbonisation a été considéré en étudiant les changements dans les résultats de la réduction des émissions liées aux décisions éclairées par la modélisation. Un autre sujet est la position des parties prenantes en ce qui concerne la perception de l'utilité, de la fiabilité et des limites des outils de modélisation. Finalement, nous avons considéré les facteurs contextuels en lien avec la culture organisationnelle, les pressions réglementaires et les conditions du marché influençant l'intégration de la modélisation. Les données de chaque entreprise ont été analysées indépendamment afin d'identifier les cas spécifiques où la modélisation a eu un impact sur les décisions stratégiques et les facteurs internes influençant l'utilisation des outils de modélisation.

Ensuite, avec une analyse transversale, les résultats du CN et du CPKC ont été comparés afin de mettre en évidence les similitudes et les différences dans la manière dont les outils de modélisation influencent la prise de décision et évaluer si les impacts observés s'alignent sur l'hypothèse où la contredisent. Cette analyse est présentée dans le chapitre suivant.

Les transcriptions des entretiens et les documents ont été analysés de manière thématique afin d'identifier les schémas et les idées récurrentes et ont été synthétisés par réponse ou position des experts, afin de comprendre, notamment, l'influence directe des modèles sur la prise de décision. Cette analyse a été guidée par les sujets de questions en regroupant les propos des experts selon quatre grandes thématiques entourant l'utilisation des modèles technico-économiques : leur rôle dans la prise de décision ferroviaire, leur impact sur la décarbonisation, les défis et limites qui en freinent l'adoption, ainsi que les facteurs externes influençant leur utilisation, mais est restée ouverte aux thèmes émergents (voir Tableau 2.1 ci-dessous). En complément, nous avons utilisé l'analyse selon la méthode du traçage de processus pour mieux comprendre le processus de modélisation des deux compagnies décrit par les experts afin de valider

les axes thématiques. Les données issues des entretiens, des documents et des consultations d’experts externes ont fait l’objet d’une vérification croisée selon l’approche de triangulation afin de renforcer la solidité et la fiabilité des résultats.

Tableau 2.1 Analyse thématique (modèle)

Thème	CN	CPKC
Rôle des modèles dans la prise de décision ferroviaire		
Impact des modèles sur la décarbonisation		
Défis et limites		
Facteurs externes influençant leur utilisation		

Plusieurs mesures ont été prises pour assurer la fiabilité et la validité des données, telles que la transcription systématique des entretiens et la triangulation des données.

Pour clarifier l’utilisation du traçage du processus dans cette recherche, il convient de préciser que cette méthode a servi à reconstruire les chaînes causales liant l’usage des modèles à certaines décisions stratégiques des entreprises ferroviaires. Concrètement, cette démarche a reposé sur l’identification d’événements clés (déploiement de technologies, adoption de stratégies climatiques, ajustements aux cadres réglementaires) et leur mise en correspondance avec des éléments empiriques issus des entretiens et de la documentation analysée. Chaque étape du processus décisionnel a été codée selon une grille d’analyse thématique, permettant d’isoler les mécanismes explicatifs (par exemple : validation interne des scénarios, pressions réglementaires, arbitrages budgétaires). Ces séquences ont ensuite été confrontées aux hypothèses formulées en amont, afin de tester leur cohérence logique et leur robustesse. L’objectif n’était pas de prouver une causalité linéaire, mais d’établir une plausibilité empirique dans l’enchaînement des facteurs ayant influencé ou freiné l’intégration de la modélisation dans les décisions de décarbonisation.

2.4.1 Données quantitatives

Bien que cette recherche repose principalement sur une méthodologie qualitative, l’intégration de données quantitatives sur les émissions de GES et le tonnage transporté permet d’offrir un contrepoint analytique essentiel pour valider ou nuancer les discours institutionnels analysés. Les données relatives à

CN proviennent du rapport *2023 Supplément de données – Index GRI et SASB* (CN, 2023), qui présente les émissions annuelles et les volumes en tonnes-kilomètres (Gross Ton Mile (GTM) en anglais). Pour CPKC, les chiffres sont tirés du *Rapport des données sur la durabilité* (CPKC, 2025b), le Supplément de données au Rapport sur le Développement durable (CPKC, 2022) et complété par les réponses CDP 2024 (CPKC, 2024).

Il est à noter que les données GTM pour CPKC post-fusion sont partiellement estimées, en raison d'un périmètre de consolidation encore en cours d'harmonisation. Cette limite est abordée dans la discussion critique (Chapitre 4).

2.5 Conclusion

Ce chapitre présente la méthodologie pour tester l'hypothèse de recherche en s'appuyant sur une étude de cas, basés sur une analyse du secteur ferroviaire de fret canadien, comprenant les activités des deux grandes compagnies ferroviaires CN et CPKC. Cette approche permettra d'explorer l'impact des outils de modélisation sur les stratégies de décarbonisation dans le système de transport ferroviaire canadien, tout en tenant compte des spécificités propres à chaque entreprise, selon les outils d'analyse basée sur le traçage de processus et triangulation de données. Le prochain chapitre présente les résultats de l'étude et ensuite une discussion de ses implications pour l'hypothèse de recherche et sur les efforts de décarbonisation en général dans l'industrie ferroviaire.

CHAPITRE 3

Présentation de résultats

3.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats issus des entretiens d'experts et de l'analyse des documents de CN et CPKC. Il s'appuie sur la méthode décrite au chapitre précédent. L'objectif est de vérifier que la modélisation n'a pas d'effet direct significatif sur les décisions de décarbonisation ferroviaire. Nous retraçons comment les résultats de modèles impactent les décisions et où ils restent surtout informatifs. Les résultats sont structurés par axes thématiques et interprétés à la lumière du cadre théorique et des questions de recherche.

L'analyse des entrevues menées auprès d'experts du secteur ferroviaire met en lumière le rôle des modèles technico-économiques dans la prise de décision, en particulier en ce qui concerne l'optimisation des opérations, la réduction des émissions, le transfert modal (camion versus train) et les investissements stratégiques. Bien que ces modèles soient largement utilisés pour évaluer la rentabilité et la faisabilité des projets, leur impact sur la transition énergétique et la décarbonisation reste limité. Cette analyse explore les principaux enjeux liés à l'utilisation des modèles, en regroupant les propos des experts selon quatre grandes thématiques: leur rôle dans la prise de décision ferroviaire, leur impact sur la décarbonisation, les défis et limites qui en freinent l'adoption, ainsi que les facteurs externes influençant leur utilisation (voir Tableau 3.1 plus bas). De plus, des thèmes émergents ont été identifiés, révélant des tendances et des défis sous-jacents qui façonnent l'avenir des modèles dans l'industrie ferroviaire.

Dans les entrevues menées, il est intéressant de constater l'absence de discussions concernant la promotion d'un transfert modal du transport routier vers le rail comme stratégie de réduction des émissions. Malgré la reconnaissance du rail comme un mode de transport plus écologique, les modèles visant à favoriser le transfert modal sont peu utilisés dans les décisions stratégiques.

On remarque aussi une absence de modélisation proactive. Quelques experts ont confirmé que peu de compagnies ferroviaires modélisent activement des stratégies de captation de marché routier à travers des avantages écologiques. Ensuite on constate que le transfert modal est surtout influencé par l'évolution des coûts du carburant et non par une volonté environnementale. De plus, des outils comme les calculateurs d'empreinte carbone existent, mais leur usage demeure marginal dans les stratégies

commerciales. Selon certains experts, il y a aussi une influence de la structure commerciale, par exemple, la logique du « Precision Scheduled Railroading (PSR) » peut limiter la flexibilité du rail pour capter le fret court à moyen parcours, préféré par le camionnage. Et enfin, on met l'accent sur les contraintes de service. La fiabilité et la flexibilité supérieures du transport routier freinent également le transfert modal, malgré les gains potentiels en émissions.

Les résultats des neuf entrevues révèlent que, bien que les modèles occupent une place centrale dans l'évaluation des projets de décarbonisation ferroviaire, ils demeurent principalement orientés par une logique financière. Leur potentiel en tant qu'outils d'orientation pour une stratégie de transfert modal demeure sous-exploité, en raison de contraintes économiques, réglementaires et logistiques. Les constats issus des entrevues sont présentés par thématiques dans les sections suivantes. L'absence d'intérêt pour le transfert modal dans le cadre d'une stratégie de décarbonisation des transports s'est révélée être un élément surprenant de cette recherche. Une discussion approfondie de cette question est proposée dans le chapitre suivant.

3.2 L'utilisation des modèles technico-économiques dans la prise de décision ferroviaire

Les modèles technico-économiques sont largement utilisés dans l'industrie ferroviaire nord-américaine, notamment pour l'évaluation de la sécurité, l'optimisation des opérations et la planification des investissements. Un des experts (codé comme E7) souligne l'importance des logiciels de simulation technique, comme le « Train Operations and Energy Simulator » (TOES™) et « New Cars », qui permettent d'analyser l'interaction véhicule-voie, la consommation de carburant et la stabilité des trains.

Toutefois, leur adoption varie selon les priorités stratégiques des compagnies : certains modèles sont intégrés pour justifier des investissements, tandis que d'autres sont principalement utilisés pour soutenir des décisions déjà prises. Par exemple, l'expert E9 affirme : « Le processus décisionnel chez CN commence par des modèles financiers, puis des modèles techniques sont utilisés pour déterminer la faisabilité des solutions ». Les modèles sont mobilisés à des fins d'application concrète (p. ex. placement de locomotives) et surtout pour des analyses financières (TCO/DCF) qui cadrent les décisions d'investissement. Ils servent rarement en amont des investissements et plutôt à valider ou illustrer des choix déjà pris — constat appuyé par E3 et E7. Dans un autre exemple donné par E2, chez CP, les modèles sont liés à des tests terrain (pilotes) et servent de support aux investissements (locomotives, freins, etc.). Souvent, « les modèles arrivent après que la direction a tranché » (E6), ce qui traduit un rôle d'appui tardif.

L'organisation interne des compagnies ferroviaires influence également l'utilisation des modèles, notamment à travers des défis liés à l'intégration des données et à la collaboration entre services. Les experts E4 et E7 indiquent que « le principal défi est d'intégrer différents modèles pour qu'ils fonctionnent ensemble de manière cohérente ». Plus largement dans le secteur (incluant CN), E5 et E4 soulignent que le manque de partage de données entre services ralentit l'adoption de modèles à grande échelle — l'interopérabilité souffre de pratiques internes de confidentialité. Un autre exemple donné par E2 illustre les défis de CP pour intégrer une multitude de modèles pour les locomotives à hydrogène. La compagnie a mené des tests de prototype en les insérant dans des rames de trains de charbon afin d'en évaluer la faisabilité. Le principal défi concerne l'infrastructure : il n'existe pas de réseau d'approvisionnement en hydrogène déployé à grande échelle. Pour réaliser l'essai, CP a dû utiliser un tender distinct pour le stockage de l'hydrogène. Les résultats de ces essais alimentent ensuite des modèles d'affaires qui évaluent la viabilité financière et la faisabilité opérationnelle, ce qui a un impact significatif sur la décision finale.

D'un point de vue économique, la rentabilité reste le facteur décisif : les modèles financiers, comme le coût total de possession (« Total Cost of Ownership » (TCO) en anglais) et l'analyse de flux de trésorerie actualisé (« Discounted Cashflow » (DCF) en anglais) sont les plus influents dans la prise de décision, selon l'expert E2. Celui-ci confirme que « les investissements majeurs passent toujours par une analyse financière de flux de trésorerie actualisé » et qu'« un modèle de TCO est utilisé pour évaluer les coûts d'achat, de mise en œuvre et d'entretien sur le long terme ». Par exemple, selon E2, Canadian Pacific (CP) est passé « d'une des flottes les plus anciennes en Amérique du Nord à l'une des plus récentes » en remplaçant des locomotives DC par des AC — une décision « fondée sur un modèle financier estimant les économies opérationnelles », les bénéfices environnementaux venant comme co-bénéfices.

3.3 L'impact perçu des modèles sur la décarbonisation

Si les modèles sont utilisés pour estimer les émissions de GES, leur impact réel sur la décarbonisation demeure limité par des facteurs économiques et réglementaires. Les experts notent que le rail étant déjà considéré comme un mode de transport « vert », il bénéficie de moins d'attention que d'autres secteurs en matière de réduction des émissions (E8). Pourtant, certaines compagnies utilisent des modèles pour optimiser l'utilisation de carburants alternatifs, comme le biodiesel ou pour évaluer l'efficacité des locomotives à hydrogène (E9). Toutefois, l'adoption de ces solutions reste freinée par des coûts élevés et un manque d'infrastructures adaptées (E3). Enfin, les experts soulignent que la perception et l'acceptation des modèles influencent leur mise en application : certaines entreprises utilisent les résultats pour justifier

des décisions déjà prises plutôt que pour orienter de nouvelles stratégies (E4). Par exemple, chez CN, l'intégration de 8–10 % de biodiesel a été décidée pour des raisons de coût et de faisabilité, les modèles n'intervenant qu'ensuite pour valider les réductions (E9). Chez CP, le pilote hydrogène s'est heurté à la logistique de ravitaillement ; là encore, la modélisation a surtout servi à encadrer la faisabilité, tandis que la décision tenait d'abord à des contraintes techniques/économiques (E8).

3.4 Les limites et défis liés à l'utilisation des modèles

L'un des défis majeurs des modèles technico-économiques réside dans leur capacité à refléter fidèlement la complexité des opérations ferroviaires. Plusieurs experts insistent sur la nécessité de valider les modèles avant de s'appuyer sur leurs résultats : une mauvaise calibration peut fausser les décisions, comme ce fut le cas par exemple avec un modèle de consommation de carburant utilisé par CN qui avait sous-estimé l'impact du vent sur les trains vides, entraînant une augmentation des coûts plutôt qu'une optimisation (E9). De plus, l'intégration de variables en temps réel reste un défi, les modèles étant souvent statiques et incapables de prendre en compte des perturbations, comme les pannes ou les conditions météorologiques (E9). Pour CP, un des experts mentionne la forte dépendance à la validation terrain et limites d'infrastructure (hydrogène) (E8), avec des modèles parfois cloisonnés qui obligent des validations par divers intervenants avant décision. L'innovation dans ce domaine repose sur l'amélioration de la connectivité des bases de données et l'introduction d'intelligence artificielle, mais les avancées restent limitées. À cet effet, l'expert E4 affirme : « l'un des défis est de faire en sorte que les modèles développés en milieu académique puissent être appliqués en industrie, ce qui prend souvent des années » (E4). De plus, l'expert E1 confirme : « les modèles doivent évoluer pour intégrer des données en temps réel. L'IA pourrait améliorer la précision prédictive, mais l'industrie ferroviaire n'en est pas encore là » (E1).

3.5 Les facteurs externes influençant la prise de décision

Au-delà des modèles eux-mêmes, divers facteurs externes modifient la manière dont les décisions ferroviaires sont prises. Les considérations économiques restent prédominantes : les compagnies ferroviaires privilégient les décisions rentables à court et moyen terme, avec des seuils de retour sur investissement stricts, et ceci est valable pour tous les opérateurs, incluant CN et CP (E2, E9). Les réglementations ont un impact inégal : alors que certaines grandes compagnies doivent se conformer aux normes de réduction des émissions, la majorité des petits opérateurs en sont exemptés, ce qui limite l'incitation au changement (E8). Toujours selon E8, les programmes américains soutiennent davantage les investissements bas carbone que le financement disponible au Canada, ce qui pèse sur le rythme

d'adoption. Par ailleurs, « l'absence d'un système de crédits carbone pour le transport ferroviaire au Canada freine les initiatives visant à transférer du fret de la route vers le rail » (E3). Également, le rail étant perçu comme déjà « vert », il attire moins l'attention prioritaire en matière de réduction additionnelle des émissions (E8). Enfin, l'infrastructure existante constitue une barrière majeure: les locomotives à hydrogène et à batterie nécessitent des installations spécifiques qui ne sont « la principale considération dans la prise de décision reste le retour sur investissement (ROI) » (E9).

3.6 Tableau de synthèse

Le Tableau 3.1 suivant présente une synthèse comparative entre CN et CPKC quant à l'utilisation des modèles dans leurs démarches de décarbonisation, en mettant en évidence leur rôle dans la prise de décision, leur impact, les obstacles rencontrés et les facteurs externes influençant leur efficacité.

Tableau 3.1 Synthèse de résultats

Entreprise	CN	CPKC
Rôle des modèles	Application concrète (placement de locomotives, analyse financière)	Tests terrain, Support aux investissements (locomotives, freins)
Impact sur la décarbonisation (y compris shift modal)	Réduction indirecte des GES (optimisation carburant) Justification biocarburants/ locomotives alternatives Efforts limités pour le shift modal	Réduction via gains économiques Projet hydrogène évalué économiquement Efforts limités pour le shift modal
Défis et limites	Modèles statiques et peu intégrés Sensibilité aux conditions réelles	Dépendance à la validation terrain Limites Infrastructure (hydrogène) Modèles cloisonnés
Facteurs externes	Réglementations fédérales Contraintes économiques Image « rail vert »	Réglementations fédérales Contraintes économiques Image « rail vert »

La synthèse des résultats met en évidence que tant CN que CPKC utilisent des modèles dans leurs processus décisionnels, principalement en support, à des fins financières et techniques, notamment pour l'optimisation opérationnelle et l'évaluation des investissements. Toutefois, leur impact direct sur la décarbonisation reste limité : les modèles contribuent indirectement à la réduction des émissions, notamment par l'amélioration de l'efficacité énergétique ou la justification de choix technologiques (comme les biocarburants ou l'hydrogène). Les deux entreprises rencontrent des limites similaires, telles

que des modèles peu intégrés, parfois statiques, et une forte dépendance aux conditions réelles. On observe toutefois quelques différences dans les défis vécus actuellement par les deux compagnies : CN privilégie des applications internes (placement/modernisation de locomotives, biocarburants) centrées sur les gains en carburant et de productivité ; CPKC mise davantage sur des pilotes terrain, limités par les infrastructures et des validations opérationnelles. Leur utilisation est également influencée par des facteurs externes, comme les réglementations fédérales, la rentabilité économique, les fournisseurs et la perception du rail comme un mode déjà écologique, toutefois, le potentiel des modèles à induire un véritable changement, notamment en ce qui concerne le transfert modal est très réduit. L'hypothèse selon laquelle la modélisation seule ne suffit pas à influencer la décision est confirmée : les décisions sont guidées avant tout par des considérations financières, opérationnelles et contextuelles, la modélisation jouant un rôle de soutien plutôt qu'un levier principal.

3.7 Des sujets émergents

Plusieurs experts ont mentionné un manque de collaboration et de transparence dans l'industrie ferroviaire et que le manque de partage de données ralentit l'adoption de modèles à grande échelle. Les compagnies ont tendance à garder leurs analyses confidentielles pour conserver un avantage concurrentiel, limitant ainsi l'apprentissage collectif et l'amélioration des pratiques industrielles (E5, E4).

De plus, les experts ont évoqué un écart entre la recherche académique et l'industrie ferroviaire. De nombreux modèles sont développés dans le cadre académique, mais ne sont pas adoptés par l'industrie en raison de leur complexité ou de leur manque d'adaptation aux contraintes opérationnelles des entreprises (E4).

Ensuite, certains participants ont confirmé qu'il est nécessaire d'intégrer des modèles dynamiques et prédictifs, puisque les modèles actuels sont statiques et ne prennent pas suffisamment en compte les perturbations en temps réel. L'utilisation de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique pourrait permettre une meilleure anticipation des défaillances et des besoins en maintenance (E1, E9).

Sans surprise, le rôle des incitations économiques et réglementaires dans la transition énergétique ferroviaire a été mentionné pendant les entrevues, vu que l'adoption de technologies bas-carbone est fortement influencée par les politiques publiques. Les experts indiquent que les programmes de

subventions aux États-Unis facilitent davantage la transition énergétique que ceux du Canada, où le financement est souvent insuffisant pour couvrir les coûts élevés des nouvelles technologies (E8).

Finalement, on constate une tension entre efficacité opérationnelle et objectifs environnementaux. Bien que les modèles puissent aider à optimiser la consommation d'énergie et à réduire les émissions, les compagnies ferroviaires restent principalement axées sur la rentabilité. La réduction des coûts opérationnels est souvent l'argument déterminant pour l'adoption d'une nouvelle technologie, plutôt que l'impact environnemental seul (E2, E9).

3.8 Résultats descriptifs – triangulation de données

L'analyse des résultats par la méthode du traçage de processus met en évidence des séquences spécifiques entre l'usage de la modélisation et les décisions de décarbonation dans les compagnies ferroviaires canadiennes. Si les modèles sont fréquemment mentionnés dans les rapports institutionnels, les documents de durabilité et les communications publiques de CN et de CPKC, les entrevues révèlent qu'ils interviennent rarement en amont des décisions stratégiques. Comme le résume E1 : « Les modèles sont souvent là pour appuyer ce qui a déjà été décidé. »

Le traçage permet de situer les modèles dans différentes étapes des processus décisionnels : phase d'évaluation, phase de justification post-décisionnelle, ou encore dans les communications externes. Cette méthode permet également de visualiser les interactions entre les contraintes contextuelles (réglementation, image publique, contraintes économiques) et les fonctions assignées aux modèles (diagnostic, communication, conformité).

Pour CN, les données montrent une intégration des modèles dans une logique de conformité environnementale et d'optimisation interne. Les rapports CDP, ou selon le « Task Force on Climate-related Financial Disclosures » (TCFD) et annuels mobilisent des projections, des outils de simulation énergétique et des scénarios d'atténuation. Toutefois, les modèles sont rarement utilisés pour orienter les choix d'investissement en phase initiale : ils servent principalement à valider ou illustrer des décisions déjà prises. Les propos de E3 et E7 renforcent ce constat d'un usage instrumentalisé des modèles, qui légitiment des choix plus qu'ils ne les structurent. L'absence de liens directs entre modélisation et décisions majeures (électrification, biocarburants) illustre cette distance.

Du côté de CPKC, le traçage révèle une approche plus exploratoire et expérimentale. L'entreprise mobilise des modèles dans des projets pilotes, comme les locomotives à hydrogène, mentionnés dans ses rapports stratégiques (CPKC, 2025a). Si la modélisation intervient dans l'analyse de faisabilité ou dans le suivi des résultats, elle ne constitue pas une base structurante pour la prise de décision. L'extrait de E6, indiquant que « les modèles arrivent après que la direction a tranché », reflète bien une posture d'appui tardif, confirmée par les rapports internes mettant l'accent sur des engagements symboliques plus que sur une planification modélisée.

En somme, le traçage de processus met en lumière deux logiques dominantes : chez CN, une modélisation intégrée mais descendante, (instrument de conformité et de suivi) ; chez CPKC, une modélisation expérimentale, illustrative, mais peu directive. Dans les deux cas, les modèles ne structurent pas les trajectoires décisionnelles.

3.9 Analyse comparative des émissions et de la performance carbone

L'analyse documentaire est complétée ici par une comparaison quantitative entre CN et CPKC, portant sur les émissions de GES, le tonnage transporté et l'intensité carbone qui a été calculée à partir des données des émissions et tonnages déclarés dans les rapports de chaque compagnie. Les tableaux suivants récapitulent ces données pour la période 2020-2023. À noter que l'intensité des émissions a été calculée à partir des données sur les émissions et tonnages.

L'examen des émissions de GES, du tonnage transporté et de l'intensité carbone qui en résulte ne vise pas à prouver un lien de causalité direct avec un modèle spécifique. Son objectif est d'établir une base de référence empirique : les stratégies et les approches de modélisation, telles que décrites par les experts, se traduisent-elles par des résultats de performance distincts et mesurables pour le CN et le CPKC ?

Tableau 3.2 Émissions de GES, tonnage et intensité carbone de CN et CPKC (2020–2023)

Année	Émissions (MtCO ₂ e)		Tonnage (milliards de t.km)		Intensité (t CO ₂ e / M GTMs)	
	CN	CPKC	CN	CPKC	CN	CPKC
2020	5,38	3,03	455,4	94,4	11,80	32,10
2021	5,26	2,99	458,4	101,9	11,50	29,36
2022	5,18	3,05	463,7	105,6	11,20	28,88
2023	5,06	4,70	452,0	378,5	11,20	12,42

Une vérification croisée entre les émissions déclarées par CN en 2023 (5,06 MtCO₂e) et le tonnage brut transporté (452,0 milliards de tonnes-kilomètres) révèle une intensité carbone brute d'environ 11,2 t CO₂e par million de GTM. Or, CN rapporte une intensité de 10,67 t CO₂e / M GTM pour la même année. Ce léger écart pourrait s'expliquer par des différences méthodologiques, notamment l'exclusion de certaines catégories d'émissions (ex. non ferroviaires), des ajustements internes au périmètre de reporting, ou l'usage de valeurs pondérées par type de fret. Cette observation met en évidence les limites de comparabilité directe entre les indicateurs publiés et les calculs bruts, soulignant l'importance de la transparence méthodologique dans l'évaluation de la performance environnementale.

Si on compare les deux compagnies, les données montrent une intensité carbone plus faible et relativement stable chez CN comparativement à CPKC, qui affiche des valeurs plus élevées. Cette différence s'explique en partie par une meilleure efficacité opérationnelle chez CN, mais il est très important de considérer les changements organisationnels de CPKS. En effet, les émissions de 2023 incluent la totalité du périmètre post-fusion (CP + KCS), ce qui explique l'augmentation nette des émissions absolues. L'intensité baisse fortement en 2023, car le volume de fret a été multiplié (passage d'approximativement 105 000 M GTM à près de 379 000 M GTM), ce qui dilue les émissions sur une base plus large. Cette baisse d'intensité reflète l'effet de la fusion et une amélioration apparente de la productivité, bien que les comparaisons directes soient à prendre avec prudence, en raison de méthodologies différentes avant et après 2023.

Cependant, ces chiffres seuls ne peuvent expliquer pourquoi ces performances diffèrent ; ils ne nous disent rien sur le rôle de la modélisation dans l'atteinte de ces résultats. Ils constituent un "quoi" qui nécessite le "pourquoi" de l'analyse qualitative. La section suivante utilisera ces données comme un contrepoint pour interpréter de manière critique les stratégies de décarbonisation des deux firmes.

3.10 Comparaison de la performance environnementale : limites et interprétation

L'analyse quantitative met en évidence une performance environnementale plus favorable chez CN en termes d'intensité carbone. En 2022, CN présentait une intensité calculée d'environ 11,17 t CO₂e/M GTMs, contre 14,44 pour CPKC. Toutefois, il convient de nuancer cette observation. CN déclare officiellement une intensité de 10,67 t CO₂e/M GTM pour 2023 (CN, 2023), ce qui est légèrement inférieur à notre estimation brute. Cette différence s'explique probablement par l'exclusion de certaines catégories d'émissions (ex. hors rail) ou des pondérations appliquées au mix de fret.

D'une part, les données de CPKC reposent sur un périmètre partiellement estimatif, en raison de la fusion avec KCS survenue en 2023. D'autre part, le tonnage brut n'est pas toujours ventilé avec la même granularité (fret payant vs GTM totaux).

Cette hétérogénéité dans les méthodes de calcul soulève un enjeu de comparabilité entre les compagnies ferroviaires. Il souligne l'importance de l'harmonisation des indicateurs climatiques à l'échelle du secteur, notamment via des cadres de divulgation comme le CDP, la TCFD ou les normes du SASB.

Les difficultés rencontrées dans la collecte et l'interprétation des données pour CPKC illustrent les limites des systèmes actuels de reddition de comptes environnementale. Une recommandation concrète émerge de cette analyse : le secteur ferroviaire canadien gagnerait à adopter un cadre standardisé de calcul et de divulgation des émissions, notamment pour les indicateurs d'intensité carbone, incluant les périmètres, le mix énergétique et les charges transportées.

En ce qui concerne CN, la légère diminution de ses émissions absolues entre 2020 et 2023 s'explique principalement par l'optimisation opérationnelle, notamment une gestion plus efficace des itinéraires, et de la charge par train. CN a également investi dans des programmes de modernisation de locomotives et des solutions logicielles de planification énergétique, sans modifier fondamentalement son parc moteur. La réduction de l'intensité est donc liée à une amélioration de la productivité ferroviaire.

Contrairement à CN, CPKC a davantage concentré ses efforts sur des projets pilotes à long terme (locomotives à batterie ou hydrogène), ce qui n'a pas encore généré d'effets mesurables sur l'efficacité carbone.

En conclusion, les difficultés rencontrées pour comparer rigoureusement le CN et le CPKC sur une base purement quantitative ne sont pas un échec méthodologique ; elles sont un résultat en soi. Elles illustrent l'hétérogénéité des pratiques de reporting et l'impact majeur d'événements organisationnels (comme une fusion) sur les données de performance. Cela confirme que les stratégies ne peuvent être évaluées par des chiffres isolés et renforce la nécessité de l'approche qualitative de ce mémoire. Plus important encore, cette hétérogénéité justifie une recommandation de cette recherche : le secteur ferroviaire canadien doit adopter un cadre standardisé de calcul et de divulgation pour permettre une évaluation transparente et fiable des efforts de décarbonisation. Les données actuelles servent davantage à illustrer des logiques internes qu'à permettre une réelle reddition de comptes sectorielle.

CHAPITRE 4

Discussion de résultats

4.1 Introduction

Le mémoire explore l'hypothèse selon laquelle les modèles technico-économiques ne constituent pas un levier décisif dans la prise de décision des entreprises ferroviaires canadiennes en matière de décarbonisation. Cette hypothèse a été examinée à travers une méthodologie qualitative à l'aide du traçage de processus, afin d'identifier le rôle réel des outils de modélisation dans les décisions stratégiques des compagnies ferroviaires, en lien avec les efforts nationaux et internationaux de décarbonisation.

4.2 Synthèse des résultats principaux

Les résultats montrent que les outils de modélisation sont intégrés dans les discours et stratégies des compagnies ferroviaires, mais leur rôle est principalement consultatif. Les décisions sont largement influencées par des contraintes économiques (coût, rentabilité), des obligations réglementaires et des facteurs techniques. Les modèles financiers et opérationnels ont plus de poids que les modèles environnementaux.

Dans les entrevues ce constat s'explique par plusieurs facteurs :

- a) Une fragmentation institutionnelle qui freine l'intégration des modèles dans les processus décisionnels complexes,
- b) Une logique de rentabilité à court terme qui limite l'adoption de solutions à bénéfices différés,
- c) Une faible interaction entre producteurs de modèles et décideurs politiques ou industriels.

Les outils de simulation financière (ROI, TCO) sont les plus utilisés pour orienter les décisions. En revanche, bien qu'utilisés pour la conformité ou les rapports ESG, les modèles n'amorcent pas les décisions dans le contexte de décarbonisation. Les essais pilotes de locomotives à hydrogène ou à batterie semblent davantage répondre à des impératifs de conformité réglementaire anticipée et à la nécessité de maintenir une légitimité auprès des parties prenantes (gouvernements, investisseurs, opinion publique), plutôt qu'à une logique interne fondée sur les résultats issus de la modélisation.

Dans les entrevues menées, un constat particulièrement révélateur est l'absence quasi totale de références explicites au transfert modal – c'est-à-dire au déplacement du fret routier vers le transport

ferroviaire – comme levier stratégique de décarbonation. Aucun des experts interrogés n’a mentionné de modélisation active ou de stratégie institutionnelle visant à intégrer ce levier dans les plans de réduction des émissions. Cette omission est d’autant plus significative que le transfert modal est reconnu dans la littérature et les politiques publiques comme l’une des stratégies les plus efficaces pour réduire rapidement les émissions du secteur du transport. Par conséquent, il semble que ce levier, bien qu’identifié à l’échelle macro, ne figure pas parmi les priorités opérationnelles de CN et de CPKC.

L’analyse des rapports et des données internes confirme cette tendance. Les deux compagnies mettent plutôt l’accent sur la réduction des émissions directes (scope 1 et 2), par des mesures technico-opérationnelles telles que la modernisation du parc de locomotives, l’optimisation des trajets, l’intégration de carburants alternatifs (biocarburants, hydrogène) ou encore des initiatives de maintenance préventive (CN, 2022; CPKC, 2025b). Ces efforts, bien qu’importants, sont centrés sur l’efficacité interne, sans remise en question de la structure actuelle du marché du transport.

Or, le potentiel environnemental du transfert modal est largement documenté. Selon l’Association des chemins de fer du Canada, un transfert de 10 % du trafic routier vers le rail permettrait de réduire jusqu’à 3,7 mégatonnes de CO₂e par an (ACFC, 2016a, 2016b, 2022a, 2022b). Ce chiffre souligne l’ampleur des gains possibles si une stratégie structurée et appuyée par des modèles venait à être mise en œuvre. Pourtant, les acteurs ferroviaires interrogés semblent peu enclins à s’engager dans cette voie, révélant une dissociation entre le potentiel du rail comme solution collective et la logique de rentabilité qui guide les compagnies.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce désintérêt. D’abord, les défis logistiques et opérationnels liés à la captation de fret de courte distance ou intermodal (transbordement, délais, coordination avec les réseaux routiers) limitent l’attrait immédiat du rail face à la flexibilité du camionnage. De ce fait, Rodemann (2025), identifie, pour l’Amérique du Nord, les freins et leviers de l’intermodal rail-route comme la capacité des terminaux, les horaires, l’intégration des technologies d’information, etc., confirmant les coûts et temps de connexion comme inhibiteurs clés. Toutefois, selon les analyses de sensibilité, tel qu’étudié par Das, D. K., Mokobori, B. J., et Gopinath, R. (2025), les réductions ciblées du temps de trajet, des temps de chargement et déchargement, du coût de chargement et des dépenses en carburant pourraient conduire à un changement substantiel vers le transport ferroviaire, favorisant ainsi un système plus équilibré. Ensuite, la structure actuelle des incitatifs économiques ne récompense pas directement le transfert

modal : contrairement à l'électrification ou aux carburants alternatifs, il n'existe pas de mécanisme de financement robuste ou de tarification carbone différenciée qui rendrait ce choix compétitif. Björk (2023), rappelle que le report modal est souvent un moyen et pas un objectif, et que les politiques privilégient l'énergie, comme l'électrification, les carburants, plutôt que des incitatifs directs au changement de mode. Boone, T., et Ganeshan, R. (2025) formalise le choix modal sous contrainte d'émissions et montre que, sans contrainte de prix explicite différenciée, le coût/temps reste le critère dominant dans la décision et la route demeure attractive pour les envois sensibles aux délais. De plus, le choix modal n'oppose pas seulement le coût vs CO₂ : les modes lents comme le rail et le maritime, émettent moins en transport mais allongent les délais, gonflant les stocks (cycle, sécurité, en transit) et donc émissions d'entreposage ; les modes rapides (LTL/TL) font l'inverse. Das et al. (2025) montre qu'un équilibre modal n'émerge que si les coûts généralisés, incluant le temps et la fiabilité, sont alignés, sinon le transport routier reste dominant., Ceci étant dit, les dynamiques de marché et les préférences des clients jouent un rôle majeur : de nombreux expéditeurs privilégient la réactivité et la fiabilité du transport routier, même à coût environnemental plus élevé (Beil, M. et al. 2025).

Il en ressort que le transfert modal reste un angle mort dans la stratégie des deux compagnies, faute de conditions favorables sur le plan institutionnel, logistique et politique. Pourtant, cette lacune pourrait être comblée par une combinaison de leviers : intégration du transfert modal dans les modèles de planification, amélioration des infrastructures intermodales, développement de partenariats logistiques, ou encore incitatifs réglementaires plus ciblés. Autant d'actions qui nécessitent une vision systémique et multi acteurs, largement absente des cadres actuels.

En somme, la faible prise en compte du transfert modal par CN et CPKC illustre une tension entre logique commerciale et logique environnementale. Si les compagnies ferroviaires souhaitent réellement contribuer à la décarbonation du secteur du transport, il leur faudra dépasser la seule optimisation interne et s'engager dans des stratégies systémiques où la captation du fret routier devient une priorité modélisée, mesurée et soutenue.

4.3 Résumé thématique

Les résultats des entrevues se structurent selon quatre axes : usage des modèles, impact sur la décarbonation, contraintes méthodologiques et rôle des facteurs externes. La convergence des témoignages suggère que les modèles jouent principalement un rôle de validation ex post, venant

renforcer ou confirmer des orientations stratégiques déjà prises, plutôt que d’initier de nouvelles trajectoires décisionnelles directement axées sur les objectifs de décarbonisation. Ainsi, au lieu d’agir comme catalyseurs de changement vers une transition énergétique, ces modèles sont davantage utilisés pour ajuster ou rationaliser des décisions motivées par des impératifs économiques ou réglementaires, reléguant les objectifs climatiques au second plan.

La triangulation des données – entre les entretiens semi-dirigés, l’analyse documentaire (rapports CDP, TCFD, rapports annuels), et les données quantitatives sur les émissions et le tonnage transporté – a permis de confirmer cette lecture. Les discours des entreprises mettent en avant l’usage d’outils analytiques, mais leur portée réelle dans les processus décisionnels est difficile à tracer. Peu d’éléments permettent de relier directement une baisse d’intensité carbone ou une adoption technologique à l’usage d’un modèle spécifique. De plus, les données quantitatives issues des rapports publics révèlent parfois des écarts ou des incohérences avec les discours stratégiques, renforçant l’idée d’un usage symbolique des modèles dans la communication environnementale.

Enfin, les contraintes méthodologiques identifiées – notamment l’absence de standardisation des indicateurs, les différences de périmètre de calcul ou encore la fusion récente de CPKC – limitent l’usage des modèles comme outils de comparaison ou d’arbitrage. Cela renforce le constat selon lequel les décisions de décarbonation relèvent davantage d’un équilibre entre pressions externes, logiques d’image et opportunités technico-financières que d’une logique strictement fondée sur les résultats de modélisation.

4.4 Lien avec les questions et objectifs de recherche

La question de recherche portait sur l’usage des modèles dans les décisions de décarbonation. Il est établi que ces outils sont présents, mais leur fonction est secondaire. La seconde question, sur leur capacité à influencer les décisions, reçoit une réponse nuancée. Les données collectées montrent que les modèles peuvent orienter certaines options techniques ou opérationnelles, mais ne constituent pas un levier décisionnel autonome. Ils accompagnent des trajectoires définies selon d’autres logiques – économiques, réglementaires ou organisationnelles – et sont rarement utilisés comme point de départ pour formuler des stratégies ambitieuses de réduction des émissions. Le rôle des modèles est donc davantage instrumental que stratégique : ils encadrent la décision a posteriori, sans en être le moteur initial.

Les objectifs de recherche ont été atteints en ce sens que l'étude a permis de cartographier précisément l'utilisation des modèles et d'en identifier les limites.

4.5 Lien entre attentes et résultats

L'attente initiale était que les modèles technico-économiques aient un rôle moins fort dans la prise de décision et l'analyse révèle ce résultat. Cette déconnexion entre potentiel analytique et réalité décisionnelle souligne une asymétrie de pouvoir entre expertise et stratégie (Head, 2010). Cela suggère que, malgré la sophistication croissante des outils de simulation, leur influence reste tributaire de considérations extérieures à la modélisation elle-même, comme les incitatifs politiques ou les objectifs corporatifs à court terme.

Les modèles servent à légitimer des choix, à structurer des diagnostics, mais rarement à déclencher l'action. Comme l'affirme un expert : « La modélisation est souvent mobilisée après coup, comme outil de justification plutôt que comme déclencheur de l'action. » Ce schéma s'applique à CN, qui privilégie des outils normés pour répondre à ses obligations de reporting, et à CPKC, qui expérimente des projets pilotes sans démonstration claire de l'influence initiale des modèles.

La comparaison entre les deux entreprises illustre le concept d'équilibre ponctué (Baumgartner et Jones, 2009) : les transformations stratégiques répondent à des pressions externes (réglementations, attentes des investisseurs, enjeux réputationnels) plus qu'à des modélisations internes. L'adhésion de CPKC aux objectifs validés par la SBTi en 2023 (CPKC, 2023), par exemple, découle d'un contexte externe plus que d'un exercice analytique interne.

Les résultats répondent également aux questions de recherche sur l'usage et l'influence des modèles. Leur intégration est hétérogène : pour certains experts les modèles sont utiles pour comparer des options, tandis que d'autres les jugent peu adaptés aux réalités opérationnelles. Surtout, les décisions majeures (transfert modal, électrification, choix de carburants) dépendent d'abord de logiques stratégiques et d'incitatifs politiques et financiers, non de calculs modélisés.

Ces constats rappellent les limites de la rationalité instrumentale dans les processus décisionnels et soulignent l'importance des contextes institutionnels, économiques et politiques, comme l'exposaient Head (2010) ou Creutzig (2016). De même, ils ouvrent la voie à une réflexion critique sur les conditions

d'un usage plus stratégique des modèles. La discussion à venir analysera comment les cadres institutionnels et les dynamiques internes limitent ou favorisent cet usage, et proposera des pistes pour renforcer leur rôle décisionnel dans la décarbonisation ferroviaire.

4.6 Discussion approfondie des résultats

Les résultats obtenus dans cette recherche confirment plusieurs constats déjà établis dans la littérature. D'une part, ils rejoignent les analyses de Head (2010), Nilsson et al. (2008) et Radaelli (2004), qui critiquent le modèle linéaire de prise de décision. Ces auteurs soulignent que les décisions politiques ou stratégiques sont rarement initiées par les résultats de la modélisation, mais que les modèles sont plutôt mobilisés a posteriori pour justifier des choix déjà orientés par d'autres considérations.

Ce constat est également en cohérence avec les travaux sur la dépendance au sentier, tel que ceux de Liebowitz et Margolis (1995), qui mettent en évidence la résistance organisationnelle au changement, particulièrement dans les secteurs fortement capitalistiques, comme le ferroviaire. La structure même des investissements, la longévité des équipements et la complexité des chaînes décisionnelles contribuent à ancrer les entreprises dans des trajectoires technologiques difficiles à modifier. Dans ce contexte, les modèles technico-économiques deviennent des outils de rationalisation de décisions existantes, plutôt que des moteurs d'innovation ou de transition. La littérature sur les limites cognitives et les biais institutionnels dans l'adoption des outils d'aide à la décision est ainsi pleinement confirmée par les résultats empiriques de cette recherche.

Ces observations nous amènent à explorer la nuance apportée par le concept d'autorité dans le cadre de la décarbonation ferroviaire. Celui-ci peut être envisagé non pas comme un pouvoir disciplinaire (tel que proposé par Foucault), mais plutôt comme une capacité institutionnelle et réglementaire à définir, encadrer et légitimer les priorités dans des processus décisionnels complexes. L'autorité réside ici dans la capacité de certains acteurs – gouvernements, agences de régulation, grandes entreprises ferroviaires – à établir les règles du jeu dans lesquelles les outils de modélisation sont conçus, interprétés et appliqués.

Dans cette optique, les modèles ne sont pas des instruments neutres : leur impact dépend de la légitimité des institutions qui les produisent, ou les cautionnent. Par exemple, lorsqu'une autorité publique impose une méthode de calcul des émissions ou fixe des objectifs de performance, les modèles qui y sont conformes acquièrent une autorité formelle (Green, 2014). À l'inverse, les modèles développés en interne

par les compagnies, souvent dans une logique d'optimisation ou de communication, ne sont influents que s'ils s'alignent sur des normes reconnues ou servent des intérêts stratégiques clairs.

Ce phénomène est particulièrement observable au Canada, où les asymétries réglementaires modulent la portée des modèles. CN et CPKC, bien qu'assujettis à certaines obligations de transparence environnementale (CDP, TCFD), n'intègrent que rarement les modèles en amont de leurs décisions stratégiques en matière de décarbonisation. Ces outils interviennent surtout en aval, dans une logique de conformité ou de justification, ce qui limite leur rôle structurant.

Ce constat renvoie à une conception de l'autorité comme construite moins sur la technicité des instruments que sur leur insertion dans un dispositif institutionnel reconnu. Autrement dit, ce n'est pas la puissance explicative d'un outil qui lui confère une influence sur la décision, mais sa capacité à s'inscrire dans un ordre décisionnel légitime. Ainsi, lorsque les modèles ou recommandations sont issus de collaborations entre autorités réglementaires, universités et acteurs industriels, ils peuvent acquérir un statut prescriptif. À l'inverse, les outils propriétaires, opaques ou déconnectés des cadres normatifs en vigueur peinent à s'imposer.

Ce cadre rejoint les approches décisionnelles qui envisagent l'action publique non comme un enchaînement rationnel d'analyses, mais comme un processus d'arbitrage entre intérêts concurrents, contraintes institutionnelles et fenêtres d'opportunité (Cairney, 2015). Cette approche rejoint les travaux en politiques publiques qui conçoivent la décision fondée sur les données probantes comme un processus négocié, dans lequel les modèles jouent un rôle d'appui, de coordination ou de persuasion, plutôt que de pilotage autonome.

Ces résultats empiriques confirment non seulement les limites de la rationalité instrumentale, mais ils suggèrent également que la modélisation est employée dans une logique que nous qualifions d'« écoblanchiment technique ». Nous définissons ce concept comme l'utilisation de modèles environnementaux complexes non pas pour orienter ou informer la décision stratégique (la variable 'X'), mais pour légitimer symboliquement des décisions (la variable 'Y') déjà prises sur la base d'autres logiques financières ou opérationnelles. Cette pratique s'inscrit directement dans le cadre de la « politique de la modélisation » : les modèles ne servent pas à découvrir une solution, mais à construire l'autorité et l'apparence de rigueur scientifique d'une stratégie de décarbonisation préétablie, satisfaisant ainsi les exigences de reporting (CDP, TCFD) sans altérer la trajectoire fondamentale de l'entreprise.

4.7 Résultats qui divergent ou apportent de nouvelles pistes

L'analyse des entrevues et des documents stratégiques révèle une divergence majeure qui constitue un résultat principal de ce mémoire : l'absence quasi totale du transfert modal comme levier de décarbonisation modélisé et piloté par les compagnies ferroviaires. Alors que le déplacement du fret routier vers le rail est universellement reconnu comme la contribution la plus significative et la plus immédiate que le secteur ferroviaire puisse apporter à la décarbonisation nationale, ce levier demeure un angle mort stratégique dans les pratiques de CN et CPKC. Cette absence est la preuve la plus flagrante que les modèles sont utilisés pour l'optimisation interne (efficacité énergétique du diesel, biocarburants) plutôt que pour une transformation systémique du transport de marchandises. Les témoignages d'experts révèlent des résistances internes persistantes à l'égard des modèles environnementaux, peu documentées dans la littérature existante (GdC, 2022b). Cela montre que, sans incitatifs réglementaires clairs ou pressions de marché significatives, les compagnies peuvent retarder l'adoption de solutions bas carbone, malgré l'existence de projections favorables issues de la modélisation.

Le rôle marginal des modèles environnementaux ressort de manière récurrente dans les données empiriques recueillies. Bien que les outils de modélisation soient abondamment mobilisés dans les documents publics (rapports ESG, communications stratégiques), leur usage reste largement instrumental et postérieur aux décisions majeures. Cette pratique révèle ce qui peut être qualifié d'« écoblanchiment technique » : les modèles environnementaux servent principalement à mettre en scène des engagements climatiques plutôt qu'à influencer en profondeur les trajectoires stratégiques.

Cette instrumentalisation est particulièrement manifeste dans la manière dont les compagnies ferroviaires utilisent la modélisation pour satisfaire les exigences de transparence imposées par les cadres réglementaires (ex. : CDP, TCFD), ou pour répondre aux attentes croissantes des investisseurs responsables. Les modèles sont ainsi utilisés pour illustrer des progrès en matière d'efficacité énergétique ou d'émissions réduites, mais sans que leur utilisation précède ou oriente de manière substantielle les décisions d'investissement ou les choix d'innovation technologique.

Un autre signe de cette dissociation entre visibilité environnementale et action concrète est l'absence totale de mobilisation des modèles en soutien à une stratégie de transfert modal du fret routier vers le rail — pourtant identifié comme l'une des mesures de décarbonation les plus efficaces. Malgré les bénéfices environnementaux majeurs qu'offrirait une telle approche, comme l'a estimé ACFC (réduction

de 3,7 Mt CO₂e/an pour un transfert de 10 % du trafic routier), ni CN ni CPKC n'ont intégré ce levier dans leurs modélisations internes ou dans leurs priorités stratégiques. Les décisions continuent de se concentrer sur l'optimisation interne du parc existant (modernisation, carburants alternatifs), sans remise en question du modèle opérationnel dominant.

Cette double dissociation — entre modélisation et décision stratégique, d'une part, et entre discours environnemental et transformations systémiques, d'autre part — soulève des questions critiques sur l'authenticité des engagements climatiques. L'utilisation des modèles comme outils de légitimation symbolique plutôt que comme instruments de gouvernance environnementale réelle met en lumière une tension fondamentale entre les exigences externes de conformité et les logiques internes de rentabilité et de contrôle des risques.

À terme, ces constats invitent à repenser le rôle des modèles non seulement comme assistances techniques, mais comme leviers politiques et stratégiques. Les recherches futures pourraient ainsi s'attacher à explorer les mécanismes de légitimation symbolique mis en œuvre par les entreprises à travers la mise en scène des modèles environnementaux. Elles pourraient également analyser les conditions nécessaires — institutionnelles, financières, réglementaires — pour réintégrer véritablement la modélisation environnementale au cœur des processus décisionnels. Cela impliquerait non seulement une transformation des incitatifs, mais aussi une redéfinition des pratiques de reddition de comptes, afin de distinguer les engagements authentiques des stratégies de communication opportunistes.

4.8 Réflexion sur les spécificités du contexte étudié

Le secteur ferroviaire canadien est caractérisé par une forte concentration, dominé par deux compagnies de classe 1 (CN et CPKC), responsables de plus de 90 % des tonnes-milles parcourues dans le pays (TC, 2023). Ce duopole fonctionne dans un environnement réglementaire largement aligné sur les normes de l'EPA des États-Unis (GdC, 2017), ce qui pourrait restreindre l'autonomie du Canada dans l'élaboration de politiques spécifiques de décarbonisation. Cette harmonisation continentale, bien qu'elle facilite le commerce inter-frontalier, freine l'innovation locale en matière d'électrification, d'hydrogène ou de tarification carbone ciblée.

De plus, le cadre réglementaire canadien actuel repose davantage sur des engagements volontaires, comme le protocole d'entente entre Transports Canada et l'ACFC (GdC, 2023), plutôt que sur des mesures

contraignantes. Cela encourage une logique incrémentale, centrée sur l'optimisation du diesel existant plutôt que sur une transition technologique de rupture. L'absence de crédits carbone ferroviaires, comme souligné par certains experts, prive les entreprises d'un incitatif économique fort pour investir dans des solutions à faibles émissions.

Ainsi, le contexte canadien présente une structure décisionnelle conservatrice, où les modèles sont intégrés principalement pour répondre à des obligations de conformité ou pour justifier des actions a posteriori, plutôt que pour impulser une transformation proactive. Dans ce cadre, la rentabilité à court terme demeure la priorité, ce qui limite l'impact des outils environnementaux sur les trajectoires de décarbonation.

4.8.1 Implications pratiques

Pris ensemble, les résultats confirment que la modélisation agit surtout comme outil d'appui — utile pour l'optimisation et la justification — tandis que le processus décisionnel provient d'abord de contraintes financières et institutionnelles. L'apport de l'étude est de préciser à quelles conditions les modèles pèsent réellement sur les choix : (i) existence d'incitations crédibles et alignées, (ii) capacités organisationnelles pour traduire les sorties en décisions, (iii) adéquation des hypothèses aux réalités opérationnelles et territoriales. Lorsque ces leviers sont réunis, l'usage des modèles devient décisionnel ; à défaut, il demeure informatif.

Les résultats invitent les décideurs à mieux intégrer les modèles environnementaux en amont des décisions, non pas seulement à des fins de conformité réglementaire, mais comme outils structurants de planification stratégique. Plusieurs facteurs identifiés dans les entrevues expliquent la marginalisation actuelle de ces modèles : un manque de formation des gestionnaires sur l'interprétation des résultats modélisés et une culture organisationnelle axée sur la rentabilité à court terme, tel que souligné par les experts E3 et E9. Il est donc recommandé de développer des programmes de formation ciblés pour les cadres intermédiaires et supérieurs sur l'usage et la portée des scénarios environnementaux, de créer des outils de pilotage interne incluant explicitement des indicateurs liés aux émissions de GES, et de favoriser l'instauration de mécanismes d'évaluation des projets intégrant la durabilité comme critère de performance. Une telle approche permettrait non seulement de mieux anticiper les risques climatiques à moyen et long terme, mais aussi de repositionner la modélisation comme levier d'innovation, au-delà de son rôle actuel d'outil justificatif ou de communication institutionnelle.

4.8.2 Implications politiques ou environnementales

L'étude suggère l'introduction d'un système de crédits carbone spécifique au secteur ferroviaire canadien, tel que proposé par l'ACFC (2023), afin de valoriser les gains d'efficacité énergétique et les initiatives de réduction des émissions au même titre que dans les autres secteurs du transport. Cette mesure permettrait de créer une incitation économique directe, jusqu'ici absente, pour investir dans les solutions bas carbone. Il est à noter que la position de l'ACFC est spécifiquement d'ouvrir au rail la génération de crédits sous le « Règlement sur les combustibles propres » (RCP) (DORS/2022-140) (GdC, 2022b), qui réduit l'intensité carbone des carburants en générant des crédits quand l'intensité réelle ($\text{gCO}_2\text{e/MJ}$) passe sous la référence (crédits échangeables), plutôt qu'un système séparé couvrant tout projet ferroviaire. Concrètement, l'ACFC a demandé à ECCC de réintroduire un Ratio d'efficacité énergétique (REE/EER) pour le rail et d'autoriser la substitution de carburant en usage final (qui implique le remplacement du diesel utilisé par les locomotives par une électricité à faible carbone, de l'hydrogène (H_2) ou des carburants à faible intensité carbone) sous la Catégorie 3 du RCP, afin que les opérateurs ferroviaires génèrent des crédits pour des réductions vérifiées, monétisables ensuite (vente/usage conformité). Dans cet esprit, chaque tonne de CO_2e évitée par un changement d'énergie/efficacité donne droit à des crédits échangeables, en créant un signal-prix qui facilite le financement des projets bas carbone.

De plus, une meilleure gouvernance multiniveau est nécessaire pour aligner les objectifs climatiques fédéraux et provinciaux avec les réalités opérationnelles des entreprises ferroviaires. Actuellement, les divergences entre les priorités provinciales et les stratégies fédérales créent une fragmentation des efforts, freinant une action coordonnée. Des mécanismes de concertation plus structurés, incluant les compagnies, les gouvernements et les parties prenantes locales, devraient être mis en place pour assurer une cohérence des politiques de décarbonation.

Par ailleurs, les entrevues révèlent plusieurs facteurs limitant l'impact des modèles dans les décisions stratégiques, notamment l'absence d'obligations réglementaires contraignantes, la faiblesse des incitatifs fiscaux, et le manque de standardisation dans les méthodes de modélisation utilisées par les entreprises. Ces lacunes réduisent l'influence des modèles utilisés dans les stratégies de décarbonisation, qui sont souvent perçus comme des outils de conformité plutôt que des leviers de transformation. Pour que la modélisation joue un rôle plus structurant, une politique publique proactive devrait soutenir le développement d'outils de modélisation normalisés, interopérables et intégrés aux processus décisionnels des entreprises.

4.9 Limites de l'étude

L'un des principaux enjeux méthodologiques de cette étude réside dans la taille et la nature de l'échantillon. Avec neuf entretiens réalisés, la base empirique demeure restreinte. De plus, l'absence d'entretiens directs avec des représentants de CN et CPKC limite l'accès à une information directe sur les dynamiques internes de prise de décision. Bien que certains participants aient une expérience antérieure dans ces compagnies, leur perspective actuelle reste externe.

De plus, les données utilisées sont principalement documentaires et issues d'entrevues qualitatives. Or, les outils de modélisation évoqués n'ont pas pu être testés directement. Cela limite l'analyse à leur perception et leur usage déclaré, sans vérification empirique de leur efficacité ou de leur précision. Par ailleurs, le cadre analytique repose fortement sur la triangulation d'informations, ce qui rend les conclusions dépendantes de la qualité des sources disponibles.

Ces limites peuvent restreindre la portée des résultats et nuancer leur transférabilité à d'autres contextes ou secteurs. L'absence d'observations internes ou de données propriétaires rend difficile une évaluation complète de la manière dont les modèles sont intégrés dans les routines organisationnelles.

Les recherches futures pourraient s'orienter vers des méthodologies mixtes, intégrant des analyses quantitatives sur les performances réelles des stratégies de décarbonation modélisées. Une observation participante dans les compagnies ferroviaires ou des études de cas comparatives à l'international (ex. Europe, Japon) offriraient des perspectives enrichies. Il serait également utile d'inclure une analyse technique approfondie des outils de modélisation eux-mêmes : architecture, algorithmes, données d'entrée, et validation empirique. Enfin, la constitution de panels de décideurs ferroviaires pourrait permettre d'évaluer comment les modèles influencent les arbitrages stratégiques en temps réel, et non uniquement sur le plan déclaratif.

4.10 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en lumière les liens complexes entre modélisation, prise de décision et décarbonisation dans le secteur ferroviaire canadien. Il confirme que les outils de modélisation, bien que largement présents, ne sont pas les moteurs principaux de l'action climatique dans ce secteur. Ce rôle est plutôt assumé par des facteurs externes, tels que la réglementation, les pressions économiques et les

opportunités de marché. Les résultats soulignent également que les modèles sont principalement mobilisés à des fins de validation ou d'optimisation, et non comme déclencheurs de changement.

   partir de ces constats, la conclusion générale du mémoire proposera des recommandations pratiques et théoriques pour une meilleure intégration de la modélisation dans les stratégies ferroviaires de décarbonisation. Elle synth  tiser   les enseignements clés, tout en proposant des pistes concrètes pour faire évoluer les pratiques décisionnelles dans le sens d'une plus grande efficacité environnementale.

CONCLUSION

Ce dernier chapitre vise à clore le mémoire en résumant les apports majeurs de la recherche, en mettant en valeur les contributions théoriques, méthodologiques et pratiques, et en proposant des pistes concrètes pour les acteurs concernés ainsi que pour les travaux futurs.

Le but de cette recherche était d'examiner dans quelle mesure les modèles technico-économiques influencent les décisions de décarbonisation dans le secteur ferroviaire canadien, plus particulièrement au sein des compagnies CN et CPKC, en mettant en lumière les écarts entre leur potentiel théorique et leur usage effectif dans les processus décisionnels.

Cette étude de nature qualitative, exploratoire et appliquée, mobilise une triangulation méthodologique comprenant neuf entretiens semi-dirigés avec des experts en transport et modélisation, une analyse approfondie de plusieurs documents publics (rapports de durabilité, réponses CDP, stratégies climatiques, etc.), ainsi qu'un traçage de processus visant à reconstruire les chaînes causales dans la prise de décision.

Elle couvre le champ du transport ferroviaire de marchandises au Canada, avec une attention particulière portée aux stratégies climatiques mises en œuvre entre 2020 et 2024, dans un contexte de pressions réglementaires croissantes, de transition énergétique incertaine, et d'évolution technologique. L'étude se concentre principalement sur le territoire canadien, mais prend également en compte les influences du cadre réglementaire nord-américain, notamment les normes américaines, qui exercent une influence significative sur les pratiques des compagnies opérant de part et d'autre de la frontière.

Le mémoire s'est penché sur les interactions complexes entre modélisation technico-économique, processus décisionnels et politiques climatiques dans le secteur ferroviaire canadien. Il a examiné le rôle des outils de modélisation dans les stratégies de décarbonisation, en tenant compte des dynamiques organisationnelles, des pressions institutionnelles et des contraintes économiques auxquelles sont confrontées les compagnies ferroviaires comme CN et CPKC. L'étude a aussi pris en compte le cadre réglementaire nord-américain, les incitatifs financiers, et les limitations des outils de modélisation actuellement en usage.

Le problème central exploré soulève des enjeux plus vastes sur l'efficacité des politiques climatiques, la logique de rentabilité à court terme, le manque d'incitatifs réglementaires contraignants et l'usage inégal des données probantes dans les processus décisionnels stratégiques. Elle renvoie également à un déséquilibre entre modèles financiers, opérationnels et environnementaux, les premiers exerçant une influence prépondérante dans les choix d'investissement et de transitions technologiques. À cela s'ajoute un constat particulièrement saillant : l'absence quasi systématique du transfert modal dans les scénarios modélisés. Alors même que ce levier est reconnu pour son potentiel de réduction des émissions, il ne figure ni dans les discours ni dans les outils de simulation mobilisés par les compagnies et même dans les rapports gouvernementaux. Ce silence méthodologique interroge la capacité des modèles actuels à proposer des transformations systémiques plutôt qu'une simple optimisation de l'existant.

En ce sens, la question du transfert modal dépasse le simple aspect technique : elle reflète un angle mort stratégique dans la gouvernance de la décarbonation ferroviaire. Intégrer pleinement ce levier dans la modélisation exigerait une évolution des cadres de planification, des logiques d'investissement, ainsi qu'un engagement politique clair en faveur d'une intermodalité soutenue et structurante.

Les objectifs principaux de cette recherche étaient triples : évaluer le rôle effectif des modèles technico-économiques dans les décisions de décarbonisation des compagnies ferroviaires; identifier les facteurs systémiques, économiques, institutionnels et technologiques qui influencent ou limitent leur utilisation ; proposer des pistes concrètes pour une meilleure intégration de ces outils dans les stratégies climatiques nationales et sectorielles.

Ces objectifs ont été atteints de manière nuancée. Le rôle secondaire des modèles dans les décisions stratégiques a été clairement mis en évidence, notamment leur usage en tant qu'outils de validation a posteriori plutôt que comme déclencheurs de changement. Les facteurs freinant leur adoption ont été documentés à travers les données issues des entrevues : la prédominance des logiques de rentabilité à court terme, l'absence de cadres réglementaires contraignants, le manque de reconnaissance institutionnelle des modèles environnementaux, ainsi que les difficultés d'intégration dans des environnements organisationnels complexes. Toutefois, des dimensions restent à approfondir, comme la capacité des modèles à intégrer l'intelligence artificielle ou à anticiper les ruptures technologiques, ainsi que leur potentiel à servir de support dans des démarches participatives ou de gouvernance collaborative.

L'étude repose sur neuf entrevues semi-dirigées menées auprès d'experts en transport ferroviaire, en modélisation et en politiques climatiques, et sur l'analyse de plusieurs documents publics incluant des rapports annuels, des stratégies climatiques, des réponses aux questionnaires du CDP, des rapports TCFD, des documents techniques, et des publications gouvernementales (ACFC, Transports Canada, etc.). Ces sources ont été croisées afin d'assurer une triangulation robuste. L'approche de traçage de processus a permis de cartographier les séquences décisionnelles en analysant comment les compagnies ferroviaires intègrent (ou non) les modèles technico-économiques dans leurs décisions liées à la décarbonisation.

La démarche suivie est systématique et rigoureuse. Elle a débuté par la formulation d'une problématique ancrée dans les enjeux de la transition énergétique. Ensuite, un cadre théorique multidimensionnel a été élaboré, mobilisant la théorie du processus décisionnel. La collecte des données a été faite par des entretiens et analyses documentaires. L'analyse s'est appuyée sur une grille thématique couvrant quatre axes d'interprétation (rôle des modèles, impact sur la décarbonation, défis et limites, facteurs externes), permettant une interprétation fine, mise en lien avec les concepts théoriques discutés dans la revue de la littérature.

Les résultats démontrent que les modèles technico-économiques sont bien présents dans les processus de décision des compagnies ferroviaires, mais leur rôle est majoritairement limité à une fonction d'appui ou de validation ex post. Ils sont rarement mobilisés comme déclencheurs directs de décisions stratégiques en matière de décarbonisation.

L'analyse qualitative issue des entrevues et de l'analyse documentaire souligne que les décisions des entreprises, telles que CN et CPKC, sont largement guidées par des logiques économiques, notamment la rentabilité des investissements, la conformité aux normes réglementaires existantes (souvent alignées sur celles de l'EPA américaine), ainsi que par la faisabilité technique et infrastructurelle des projets. Les initiatives de transition sont souvent pilotées par des considérations opérationnelles plutôt que par des impératifs environnementaux.

En réponse aux questions de recherche, il apparaît que les modèles sont utilisés dans les compagnies ferroviaires, mais leur impact est indirect et subordonné à des facteurs externes ou organisationnels. Ils sont mobilisés pour valider des décisions déjà orientées par d'autres priorités, et non comme moteurs de transformation stratégique. Cette hiérarchisation des modèles (financiers en premier lieu, suivis par les modèles opérationnels, et enfin les modèles environnementaux) reflète une gouvernance axée sur la

performance économique à court terme plutôt que sur l'anticipation des impératifs climatiques de long terme.

L'analyse des résultats, structurée par nos trois axes définis en introduction, a permis de répondre directement à notre problématique. Concernant l'usage décisionnel des modèles, notre analyse a confirmé qu'ils sont principalement utilisés comme outils de validation ex post ou de justification, plutôt que comme des déclencheurs de décision a priori. L'axe sur l'évaluation économique a démontré la domination écrasante des modèles financiers (TCO, ROI) sur les modèles environnementaux, ces derniers n'étant pris en compte que s'ils s'alignent sur une rentabilité à court terme. Enfin, l'analyse des défis opérationnels, technologiques et réglementaires a révélé que ces contraintes (notamment le cadre réglementaire nord-américain et les logiques de rentabilité) sont les véritables déterminants de l'action, reléguant la modélisation à un rôle secondaire. Collectivement, ces trois constats convergent pour confirmer notre hypothèse centrale : les modèles technico-économiques ne constituent pas le levier principal de la décision de décarbonisation, qui demeure pilotée par des logiques externes et financières.

Les principales limites de la recherche sont liées à la taille restreinte de l'échantillon et à l'absence d'accès aux décideurs internes de CN et CPKC. Ces limites réduisent la généralisabilité des résultats et imposent une interprétation prudente, centrée sur les tendances observées plutôt que sur des généralisations statistiques.

En ce qui concerne la contribution au domaine, sur le plan théorique, la recherche confirme les hypothèses formulées dans la littérature selon lesquelles les outils de modélisation, bien qu'essentiels en théorie pour planifier la transition énergétique, exercent une influence limitée dans des contextes décisionnels dominés par des logiques économiques et institutionnelles. Elle contribue à nuancer les cadres théoriques existants, en montrant que les modèles sont davantage utilisés comme outils de validation que comme déclencheurs de changement.

Sur le plan pratique, cette étude offre des perspectives concrètes pour les décideurs et planificateurs du secteur ferroviaire en proposant des ajustements aux pratiques actuelles d'intégration des modèles. Elle souligne l'importance de rendre les modèles plus accessibles, interopérables et sensibles aux réalités économiques et techniques du secteur ferroviaire. Les recommandations formulées peuvent contribuer à renforcer la pertinence et l'acceptabilité des modèles auprès des praticiens.

Sur le plan méthodologique, la recherche met en valeur l'intérêt d'une approche qualitative fondée sur le traçage de processus, combinée à l'analyse thématique et à la triangulation des données. Cette démarche a permis de reconstruire de manière rigoureuse les mécanismes décisionnels internes aux entreprises ferroviaires, d'examiner la hiérarchie d'influence des différents types de modèles, et d'intégrer les points de vue d'experts indépendants. Elle ouvre la voie à de futures recherches adoptant une posture systémique et interdisciplinaire pour analyser les décisions complexes dans des contextes à forte incertitude.

Face à ces constats, qui soulignent le rôle encore limité de la modélisation comme levier de décision stratégique dans la décarbonisation ferroviaire, nous proposons les recommandations pratiques suivantes. Celles-ci visent à combler les écarts identifiés et à renforcer l'intégration effective de la modélisation environnementale dans les processus décisionnels du secteur:

- a) Intégrer les modèles environnementaux dans la prise de décision stratégique :
 - Établir une obligation réglementaire d'intégration des modèles de décarbonisation dans les études de faisabilité pour les nouvelles acquisitions de locomotives et infrastructures ferroviaires.
 - Développer des outils de modélisation hybrides intégrant à la fois des paramètres financiers et environnementaux pour mieux évaluer les bénéfices à long terme des investissements bas carbone.
 - Prioriser les modèles prédictifs capables d'anticiper les économies de GES sur plusieurs décennies afin d'influencer la planification stratégique.
 - Intégrer explicitement le transfert modal dans les scénarios modélisés, en quantifiant ses bénéfices environnementaux et économiques à court et long terme.
- b) Accélérer l'adoption de technologies bas carbone à l'aide de modèles dynamiques :
 - Mettre à jour les modèles de rentabilité pour intégrer les bénéfices indirects, comme les réductions d'émissions évitées et les gains futurs de compétitivité.
 - Développer des scénarios de transition progressifs, modélisant des options de modernisation comme des flottes hybrides.
 - Intégrer l'intelligence artificielle pour rendre les modèles plus réactifs aux changements de coûts énergétiques et aux évolutions réglementaires.
- c) Encourager une réglementation plus incitative basée sur la modélisation des impacts:

- Créer un système de crédits carbone spécifique au secteur ferroviaire, conditionné à l'usage de la modélisation environnementale.
 - Rendre obligatoire la modélisation environnementale pour les projets ferroviaires financés publiquement.
 - Introduire un prix minimum du carbone dans les modèles économiques ferroviaires pour internaliser les coûts environnementaux.
- d) Réduire la dépendance aux normes américaines en favorisant des modèles canadiens:
- Développer des modèles adaptés aux réalités canadiennes (climat, distances, réseau).
 - Créer un centre d'expertise national en modélisation ferroviaire.
 - Expérimenter des scénarios spécifiques au Canada incluant électrification partielle et corridors à faibles émissions.
- e) Renforcer la coopération entre industrie, gouvernement et recherche :
- Créer une plateforme nationale de modélisation des émissions ferroviaires pour partager les données.
 - Mettre en place un programme fédéral de financement des expérimentations conditionné à l'usage de modèles avancés.
 - Favoriser et renforcer les partenariats entre compagnies ferroviaires et universités pour développer des outils plus adaptés et performants.

Des travaux futurs pourraient approfondir l'évaluation des outils de modélisation utilisés au Canada en analysant leurs algorithmes, leur validation empirique, leur transparence méthodologique, leur capacité à intégrer les incertitudes climatiques, ainsi que leur interopérabilité avec les outils de planification énergétique et logistique.

D'autres études pourraient effectuer des comparaisons internationales systématiques, notamment avec les pratiques des pays plus avancés dans la transition ferroviaire, tels que l'Allemagne, le Japon et la France, en mettant l'accent sur les différences institutionnelles, les politiques d'incitation, et les innovations technologiques.

Des recherches interdisciplinaires, combinant sciences sociales, génie des transports, économie de l'environnement et science des données, pourraient favoriser une compréhension intégrée et plus fine

des leviers de transformation, en s'appuyant notamment sur les approches de modélisation participative, les méthodes de simulation prospective et les outils de gouvernance collaborative.

Il serait également pertinent d'étudier l'impact de l'intelligence artificielle sur les modèles de planification ferroviaire, notamment en matière de prédiction, d'optimisation en temps réel et d'adaptation aux contextes locaux. Des expérimentations pilotes dans certaines provinces pourraient permettre de tester l'efficacité de ces outils dans un cadre contrôlé avant leur généralisation à l'échelle nationale.

Conclusion générale

Ce mémoire a montré que, bien que la modélisation technico-économique constitue un outil central pour anticiper les trajectoires de décarbonisation et évaluer la viabilité de différentes options technologiques, elle demeure insuffisante pour orienter les décisions si elle n'est pas insérée dans un cadre décisionnel plus large, intégrant des leviers institutionnels, réglementaires, économiques et organisationnels. En l'absence de mécanismes incitatifs solides, de normes contraignantes et de reconnaissance institutionnelle explicite des modèles environnementaux, leur potentiel de transformation reste limité.

Dans un contexte de transition vers des systèmes de transport durables, il devient essentiel de repositionner la modélisation comme un levier stratégique de gouvernance climatique. Cela implique non seulement de renforcer son intégration dans les processus de planification et d'investissement, mais aussi de développer des capacités institutionnelles pour interpréter, comparer et valoriser les résultats issus des modèles. La modélisation ne doit plus être perçue comme un outil purement technique ou marginal, mais comme un instrument central de pilotage, à condition qu'elle soit soutenue par des politiques ambitieuses, une volonté collective d'action climatique, et une culture organisationnelle ouverte à l'innovation et à la collaboration intersectorielle.

RÉFÉRENCES

- ACFC. (2016a). *How railways can be part of Canada's climate change solution*. Retrieved from https://www.railcan.ca/wp-content/uploads/2016/10/RAC-submission-to-ECCC_July_1_2016_FINAL.pdf
- ACFC. (2016b). *Les chemins de fer au Canada: guide du parlementaire*. Retrieved from https://www.railcan.ca/wp-content/uploads/2017/03/RAC_ParliamentGuide_FR.pdf
- ACFC. (2022a). *Changements politiques visant à soutenir la durabilité du secteur ferroviaire canadien*. Retrieved from <https://www.railcan.ca/wp-content/uploads/2022/04/RAC-Environment-White-Paper-FR.pdf>
- ACFC. (2022b). *Vers le net zéro. Élaborer une Feuille de route pour la décarbonisation du secteur ferroviaire au Canada*. Retrieved from
- ACFC. (2023). *Mémoire prébudgétaire 2024*. Retrieved from https://www.railcan.ca/wp-content/uploads/2023/12/FR_RAC-2024-PRE-BUDGET_SUBMISSION-2023.pdf
- ACFC. (2024). *Tendances ferroviaires*. Retrieved from <https://www.railcan.ca/wp-content/uploads/2024/02/SPARK-RAC-RAIL-TRENDS-2024-FR8-DIGITAL.pdf>
- Acharjya, D., et Anitha, A. (2017). A Comparative Study of Statistical and Rough Computing Models in Predictive Data Analysis. *International Journal of Ambient Computing and Intelligence (IJACI)*, 8(2), 32-51. doi:10.4018/IJACI.2017040103
- Ahsan, N., Hewage, K., Razi, F., Hussain, S. A., et Sadiq, R. (2023). A critical review of sustainable rail technologies based on environmental, economic, social, and technical perspectives to achieve net zero emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 185. doi:10.1016/j.rser.2023.113621
- Axsen, J., Plötz, P., et Wolinetz, M. (2020). Crafting strong, integrated policy mixes for deep CO2 mitigation in road transport. *Nature Climate Change*, 10(9), 809–818. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0877-y>
- Aykut, S., Demortain, D., et Benboudiz, B. (2019). The Politics of Anticipatory Expertise: Plurality and Contestation of Futures Knowledge in Governance — Introduction to the Special Issue. *Science et Technology Studies*, 32(4), 2–12. <https://doi.org/10.23987/sts.87369>
- Bahn, O. (2018). The Contribution of Mathematical Models to Climate Policy Design: a Researcher's Perspective. *Environmental Modeling et Assessment*, 23(6), 691-701. doi:10.1007/s10666-018-9637-z
- Bauer, A., Capari, L., Fuchs, D., et Udrea, T. (2023). Diversification, integration, and opening: developments in modelling for policy. *Science et Public Policy (SPP)*, 50(6), 977–987. <https://doi.org/10.1093/scipol/scad038>
- Baumgartner, F. R., et Jones, B. D. (2009). *Agendas and instability in American politics* (2nd ed.). Chicago: The University of Chicago Press.
- Beach, D., et Pedersen, R. B. (2019). *Process-tracing methods : foundations and guidelines* (Second edition ed.). Ann Arbor: University of Michigan Press.
- Beck, M. (2018). Telling stories with models and making policy with stories: an exploration. *Climate Policy*, 18(7), 928–941. <https://doi.org/10.1080/14693062.2017.1404439>
- Beck, S., et Oomen, J. (2021). *Imagining the corridor of climate mitigation: What is at stake in IPCC's politics of anticipation?* *Environmental Science et Policy*, 123, 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.05.011>
- Beil, D., Putz-Egger, L.-M., Sys, C., et Roorda, M. J. (2025). Assessing the acceptance of modal shift policy among shippers and logistics providers. *Transport Policy*, 166, 148–165. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2025.03.010>

- Bennett, A., et Checkel, J. T. (2015). *Process tracing : from metaphor to analytic tool*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bertram, C., Luderer, G., Popp, A., Minx, J. C., Lamb, W. F., Stevanović, M., . . . Kriegler, E. (2018). Targeted policies can compensate most of the increased sustainability risks in 1.5 °C mitigation scenarios. *Environmental Research Letters*, 13(6), 064038. doi:10.1088/1748-9326/aac3ec
- Björk, L., Vierth, I., et Cullinane, K. (2023). Freight modal shift: A means or an objective in achieving lower emission targets? The case of Sweden. *Transport Policy*, 142, 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.08.013>
- Blanco Reaño, H. J., et Faaij, A. (2019). *Hydrogen potential in the future EU energy system : a multi-sectoral, multi-model approach*. University of Groningen, [Groningen]. WorldCat database.
- Bogdanov, D., Farfan, J., Sadoskaia, K., Aghahosseini, A., Child, M., Gulagi, A., . . . Breyer, C. (2019). Radical transformation pathway towards sustainable electricity via evolutionary steps. *Nature Communications*, 10(1), 1-16. doi:10.1038/s41467-019-08855-1
- Boone, T., et Ganeshan, R. (2025). Freight Mode Choice with Emission Caps: Revisiting Classical Inventory and Transportation Decisions. *Sustainability*, 17(9), 4135. <https://doi.org/10.3390/su17094135>
- Bordoff, J., et O’Sullivan, M. L. (2022). The New Energy Order: How Governments Will Transform Energy Markets. *Foreign Affairs*, 101(4), 131–144.
- Box, G. E. P., et University of Wisconsin--Madison Mathematics Research, C. (1979). *Robustness in the strategy of scientific model building*. Madison, Wis.: University of Wisconsin--Madison, Mathematics Research Center.
- Brugnach, M., Tagg, A., Keil, F., et de Lange, W. J. (2007). Uncertainty Matters: Computer Models at the Science-Policy Interface. *Water Resources Management : An International Journal - Published for the European Water Resources Association (EWRA)*, 21(7), 1075-1090. doi:10.1007/s11269-006-9099-y
- Cairney, P. (2015). *The Politics of Evidence-Based Policy Making* [1 online resource (152 pages)]. Retrieved from <https://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=4720674>
- Calder, M., Craig, C., Culley, D., de Cani, R., Donnelly, C. A., Douglas, R., Edmonds, B., Gascoigne, J., Gilbert, N., Hargrove, C., Hinds, D., Lane, D. C., Mitchell, D., Pavey, G., Robertson, D., Rosewell, B., Sherwin, S., Walport, M., et Wilson, A. (2018). Computational modelling for decision-making: where, why, what, who and how. *Royal Society Open Science*, 5(6). <https://doi.org/10.1098/rsos.172096>
- Calliope, P., Sonja, G., Paraskevi, K., Stavros, P., Yuri, K., Michal, W., . . . Ingvar, L. (2021). Advanced biofuels to decarbonise European transport by 2030: Markets, challenges, and policies that impact their successful market uptake. *Energy Strategy Reviews*, 34, 100633.
- CN. (2020). *Rapport sur le développement durable 2020*. Retrieved from www.cn.ca
- CN. (2022). *Rapport sur le développement durable 2022*. Retrieved from <https://www.cn.ca/fr/engagement-responsable>
- CN. (2023). *Supplément de données Index GRI et SASB*. Retrieved from <https://www.cn.ca/fr/investisseurs/rapports-et-archives>
- Cointe, B., Cassen, C., et Nadaï, A. (2019). Organising Policy-Relevant Knowledge for Climate Action: Integrated Assessment Modelling, the IPCC, and the Emergence of a Collective Expertise on Socioeconomic Emission Scenarios. *Science et Technology Studies*, 32(4), 36–57.
- CPKC. (2022). *2022 Supplément de données (publié en anglais: Sustainability Data Report)*. Retrieved from <https://www.cpkcr.com/content/dam/cpkcr/documents/english/pdfs/sustainability/2022%20Sustainability%20Data%20Report.pdf>
- CPKC. (2023). *Stratégie du CP en matière de Climat (publié en anglais : CP Rail Climate Strategy)*. Retrieved from www.cpkcr.com

- CPKC. (2024). *Réponse CDP 2024 (publié en anglais: 2024 CDP Response)*. Retrieved from <https://www.cpkcr.com/content/dam/cpkc/sustainability/sustainability-pdfs-dec-2024/2024%20CPKC%20CDP%20Response.pdf>
- CPKC. (2025a). Programme de locomotives à hydrogène de CPKC. Retrieved from <https://www.cpkcr.com/fr/durabilite/Programme-de-locomotives-a-hydrogene>
- CPKC. (2025b). *Rapport des données sur la durabilité de 2023*. Retrieved from <https://www.cpkcr.com/content/dam/cpkc/sustainability/CPKC%202023%20Sustainability%20Data%20Report%20French%20Feb%202025.pdf>
- Creutzig, F. (2016). Evolving Narratives of Low-Carbon Futures in Transportation. *Transport Reviews*, 36(3), 341-360. doi:10.1080/01441647.2015.1079277
- Creutzig, F., Jochem, P., Edelenbosch, O. Y., Mattauch, L., Vuuren, D. P. v., McCollum, D., et Minx, J. (2015). Transport: A roadblock to climate change mitigation? *Science*, 350(6263), 911-912. doi:10.1126/science.aac8033
- Creutzig, F., Minx, J., Edenhofer, O., Popp, A., Luderer, G., et Plevin, R. (2012). Reconciling top-down and bottom-up modelling on future bioenergy deployment. *Nature Climate Change*, 2(5), 320-327. doi:10.1038/nclimate1416
- Cryderman, K. (2024, April 1, 2024). A different kind of steam engine: How CPKC aims to decarbonize its fleet with hydrogen locomotives. *Globe et Mail*, B1. Retrieved from <https://www.theglobeandmail.com/business/article-hydrogen-trains-cpkc/#:~:text=CPKC%20now%20has%20three%20diesel,the%20end%20of%20the%20year.>
- Das, D. K., Mokobori, B. J., et Gopinath, R. (2025). Exploring balanced modal split for freight transportation system: A case of the central region of South Africa. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101479>
- Davidson, M. R., Filatova, T., Peng, W., Verbeek, L., et Kucuksayacigil, F. (2024). *Simulating institutional heterogeneity in sustainability science*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 121(8), e2215674121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2215674121>
- Denzin, N. K., Lincoln, Y. S., Giardina, M. D., et Cannella, G. S. (2024). *The SAGE handbook of qualitative research* [1 ressource en ligne (lviii, 741 pages): illustrations](Sixth edition ed.).
- Dietz, S. (2024). Chapter 1 Introduction to integrated assessment modeling of climate change. *Handbook of the Economics of Climate Change*, 1(1), 1–51. <https://doi.org/10.1016/bs.hesec.2024.10.002>
- Doukas, H., et Nikas, A. (2020). Decision support models in climate policy. *European Journal of Operational Research*, 280(1), 1-24. doi:10.1016/j.ejor.2019.01.017
- ECCC. (2024). *Rapport d'inventaire national 1990-2022: sources et puits de gaz à effet de serre au Canada*. (1910-7072). Gatineau, QC
- ECCC. (2025). *Rapport d'inventaire national 1990–2023 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada. (Partie 1)*. Gatineau, QC Retrieved from canada.ca/inventaire-ges.
- Edmondson, D. L., Kern, F., et Rogge, K. S. (2019). The co-evolution of policy mixes and socio-technical systems: Towards a conceptual framework of policy mix feedback in sustainability transitions. *Research Policy*, 48(10). <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.03.010>
- Estrada, M. A. R., et Park, D. (2018). The past, present and future of policy modeling. *Journal of Policy Modeling*, 40(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jpolmod.2018.01.003>
- Fernández-Villaverde, J., Gillingham, K. T., et Scheidegger, S. (2025). Climate Change Through the Lens of Macroeconomic Modeling. *Annual Review of Economics*, 17, 125. <https://doi.org/10.1146/annurev-economics-091124-045357>
- Gambhir, A., Butnar, I., Li, P.-H., Smith, P., et Strachan, N. (2019). A Review of Criticisms of Integrated Assessment Models and Proposed Approaches to Address These, through the Lens of BECCS. *Energies*, 12(9), 1747. <https://doi.org/10.3390/en12091747>

- GdC. (2022a). *8e communication nationale sur les changements climatiques et cinquième rapport biennal du Canada sur les changements climatiques (2022) – sommaire exécutif - Canada*. Gouvernement du Canada Retrieved from <https://www.canada.ca>
- GdC. (2023). *2023-2030 Protocole d'entente entre Transports Canada et l'Association des Chemins de fer du Canada pour la réduction des émissions des locomotives*. Retrieved from <https://tc.canada.ca/fr/services-generaux/politiques/2023-2030-protocole-entente-entre-transports-canada-association-chemins-fer-canada-reduction-emissions-locomotives>
- George, A. L., et Bennett, A. (2005). *Case studies and theory development in the social sciences*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- George, Alexander L. (1979). Case Studies and Theory Development: The Method of Structured, Focused Comparison. *Diplomacy: New Approaches in History, Theory and Policy*, edited by Paul Gordon Lauren, 43–68. New York: Free Press.
- Gilbert, N., Ahrweiler, P., Barbrook-Johnson, P., Narasimhan, K. P., et Wilkinson, H. (2018). Computational Modelling of Public Policy: Reflections on Practice. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 21(1). <https://doi.org/10.18564/jasss.3669>
- Golightly, D., Pierce, K., Palacin, R., et Gamble, C. (2022). A feasibility assessment of multi-modelling approaches for rail decarbonisation systems simulation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 236(6), 715-732. doi:10.1177/09544097211039395
- Green, J. F. (2014). Atmospheric Accountants: Entrepreneurial Authority and the Greenhouse Gas Protocol. In *Rethinking Private Authority: Agents and Entrepreneurs in Global Environmental Governance* (pp. 132–162). Princeton University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctt5hhqdr.11>
- Groppi, D., Pastore, L. M., Nastasi, B., Prina, M. G., Astiaso Garcia, D., et de Santoli, L. (2025). Energy modelling challenges for the full decarbonisation of hard-to-abate sectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115103>
- Guglielmo, V. K., Morgane; Petručić, Josipa (2024). *Programme Innovation ferroviaire intelligente 2022 à 2024, Rapport de synthèse*. Retrieved from https://cutric-crituc.org/wp-content/uploads/2024/07/CRITUC-Programme-Innovation-ferroviaire-intelligente-2022-a-2024_French_3juillet_2024.pdf
- Hand, D. J. (2014). Wonderful examples, but let's not close our eyes. *Statistical Science*, 29(1), 98-100. doi:10.1214/13-STS446
- Head, B. (2010). *Evidence-based policy: principles and requirements*. Paper presented at the Productivity Commission 2010, Strengthening Evidence Based Policy in the Australian Federation.
- Heinold, A. (2020). Comparing emission estimation models for rail freight transportation. *Transportation Research Part D*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102468>
- Hernandez, A., Ng, M., Durango-Cohen, P. L., et Mahmassani, H. S. (2024). Optimizing service networks to support freight rail decarbonization: Flow selection, facility location, and energy sourcing. *European Journal of Operational Research*, 317(3), 906-920. doi:10.1016/j.ejor.2024.04.010
- Hernandez, A., Ng, M. T. M., Siddique, N., Durango-Cohen, P. L., Elgowainy, A., Mahmassani, H. S., . . . Zhou, Y. (2023). Evaluation of Rail Decarbonization Alternatives: Framework and Application. *Transportation Research Record*. doi:10.1177/03611981231170182
- Hickman, R., Ashiru, O., et Banister, D. (2010). Transport and climate change: Simulating the options for carbon reduction in London. *Transport Policy*, 17(2), 110-125. doi:10.1016/j.tranpol.2009.12.002
- IEA. (2019). *The future of rail : opportunities for energy and the environment* [1 online resource (175 pages)]. Retrieved from <https://doi.org/10.1787/9789264312821-en>
- IEA. (2024). *Global EV outlook 2024 : moving towards increased affordability*. IEA Publications. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/aa21aa97-eea2-45b4-8686-ae19d8939161/GlobalEVOutlook2024.pdf>

- IPCC Working Group III. (2022). *Climate change 2022 : mitigation of climate change : Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (P. R. Shukla, J. Skea, et A. Reisinger, Eds.). WMO, IPCC Secretariat. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>
- Ireland, P., Case, R., Fallis, J., Dyke, C. V., Kuehn, J., et Meketon, M. (2004). The Canadian Pacific Railway Transforms Operations by Using Models to Develop Its Operating Plans. *Interfaces*, 34(1), 5-14. doi:10.1287/inte.1030.0055
- Iyer, G. C., Clarke, L. E., Edmonds, J. A., Flannery, B. P., Hultman, N. E., McJeon, H. C., et Victor, D. G. (2015). *Improved representation of investment decisions in assessments of CO2 mitigation*. *Nature Climate Change*, 5(5), 436–440. <https://doi.org/10.1038/nclimate2553>
- Janssen, J. A. E. B., Krol, M. S., Schielen, R. M. J., et Hoekstra, A. Y. (2010). The effect of modelling expert knowledge and uncertainty on multicriteria decision making: a river management case study. *Environmental Science and Policy*, 13(3), 229-238. doi:10.1016/j.envsci.2010.03.003
- Jonkeren, O., Francke, J., et Visser, J. (2019). A shift-share based tool for assessing the contribution of a modal shift to the decarbonisation of inland freight transport. *European Transport Research Review*, 11(1), 1-15. doi:10.1186/s12544-019-0344-x
- Kaack, L. H., Vaishnav, P., Morgan, M. G., Azevedo, L. I., et Rai, S. (2018). Decarbonizing intraregional freight systems with a focus on modal shift. *Environmental Research Letters*, 13(8), 083001. doi:10.1088/1748-9326/aad56c
- Kirschstein, T., et Meisel, F. (2015). GHG-emission models for assessing the eco-friendliness of road and rail freight transports. *Transportation Research Part B*, 73, 13–33. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.12.004>
- Knieling, J. r., et Leal Filho, W. (2013). *Climate change governance* [1 online resource]. doi:10.1007/978-3-642-29831-8
- Krawczyk, F., et Braun, A. C. (2025). Models like heroes? Making Integrated Assessment Models (IAMs) ready for deep decarbonization and a socio-economic transformation. *Energy Research et Social Science*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.103959>
- Liebowitz, S. J., et Margolis, S. E. (1995). Path Dependence, Lock-in, and History. *Journal of Law, Economics, et Organization*, 11(1), 205-226.
- Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité, § ch. 22 (2021).
- Lombardi, P., et Ferretti, V. (2015). New spatial decision support systems for sustainable urban and regional development. *Smart and Sustainable Built Environment*, 4(1), 45-66. doi:10.1108/SASBE-07-2014-0039
- Loughlin, D. H., Ranjithan, S. R., Brill, E. D. J., et Baugh, J. W. J. (2001). GENETIC ALGORITHM APPROACHES FOR ADDRESSING UNMODELED OBJECTIVES IN OPTIMIZATION PROBLEMS. *Engineering Optimization*, 33(5), 549-569. doi:10.1080/03052150108940933
- Low, S., et Schäfer, S. (2020). Is bio-energy carbon capture and storage (BECCS) feasible? The contested authority of integrated assessment modeling. *Energy Research et Social Science*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101326>
- Luderer, G., Bertram, C., Pietzcker, R. C., Pehl, M., Kriegler, E., Vrontisi, Z., . . . Iyer, G. (2018). Residual fossil CO₂ emissions in 1.5-2 °C pathways. *Nature Climate Change*, 1-8. doi:10.1038/s41558-018-0198-6
- Mandegari, M., Ebadian, M., et Saddler, J. (2023). Decarbonizing North America's rail sector, international initiatives and local opportunities. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 21. doi:10.1016/j.trip.2023.100859
- Matthies, M., Giupponi, C., et Ostendorf, B. (2007). Environmental decision support systems: Current issues, methods and tools. *Environmental Modelling and Software*, 22(2), 123-127. doi:10.1016/j.envsoft.2005.09.005

- McLaren, D., et Markusson, N. (2020). The co-evolution of technological promises, modelling, policies and climate change targets. *Nature Climate Change*, 10(5), 392–397.
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-0740-1>
- Melaina. (2024). Modeling hydrogen markets: Energy system model development status and decarbonization scenario results. *Energy and Climate Change*, 5.
 doi:10.1016/j.egycc.2024.100153
- Miranda, P. L., Cordeau, J.-F., et Frejinger, E. (2021). A time-space formulation for the locomotive routing problem at the Canadian National Railways. *Computers and Operations Research*, 139.
 doi:10.1016/j.cor.2021.105629
- Moriarty, P., et Honnery, D. (2019). Prospects for hydrogen as a transport fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(31), 16029–16037. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.278>
- Nassar, R. F., Ghisolfi, V., Annema, J. A., van Binsbergen, A., et Tavasszy, L. A. (2023). A system dynamics model for analyzing modal shift policies towards decarbonization in freight transportation. *Research in Transportation Business et Management*, 48. doi:10.1016/j.rtbm.2023.100966
- Nature (2020) *Computational Models*. [Computational models - Latest research and news | Nature](#) accédé le 18 octobre 2025.
- Neufeld, R., et Massicotte, P. (2017). *Decarbonizing transportation in Canada : report of the Standing Senate Committee on Energy, the Environment and Natural Resources*. Retrieved from Ottawa: http://epe.lac-bac.gc.ca/100/201/301/weekly_acquisitions_list-ef/2017/17-26/publications.gc.ca/collections/collection_2017/sen/yc26-0/YC26-0-421-10-eng.pdf
- Nikas, A., Doukas, H., et Papandreou, A. (2019). A Detailed Overview and Consistent Classification of Climate-Economy Models. In H. Doukas, A. Flamos, et J. Lieu (Eds.), *Understanding Risks and Uncertainties in Energy and Climate Policy: Multidisciplinary Methods and Tools for a Low Carbon Society* (pp. 1-54). Cham: Springer International Publishing.
- Nilsson, M. n., Jordan, A., Turnpenny, J., Hertin, J., Nykvist, B. r., et Russel, D. (2008). The use and non-use of policy appraisal tools in public policy making: an analysis of three European countries and the European Union. *Policy Sciences : Integrating Knowledge and Practice to Advance Human Dignity*, 41(4), 335-355. doi:10.1007/s11077-008-9071-1
- Oomen, J., Hoffman, J., et Hajer, M. A. (2022). Techniques of futuring: On how imagined futures become socially performative. *European Journal of Social Theory*, 25(2), 252–270.
<https://doi.org/10.1177/1368431020988826>
- Ortiz-Astorquiza, C., Cordeau, J.-F., et Frejinger, E. (2021). The Locomotive Assignment Problem with Distributed Power at the Canadian National Railway Company. *Transportation Science*, 55(2), 510-531. doi:10.1287/trsc.2020.1030
- Peng, W., Iyer, G., Binsted, M., Marlon, J., Clarke, L., Edmonds, J. A., et Victor, D. G. (2021). *The surprisingly inexpensive cost of state-driven emission control strategies*. *Nature Climate Change*, 11(9), 738–745. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01128-0>
- Pfenninger, S., Hirth, L., Schlecht, I., Schmid, E., Wiese, F., Brown, T., Davis, C., Gidden, M., Heinrichs, H., Heuberger, C., Hilpert, S., Krien, U., Matke, C., Nebel, A., Morrison, R., Müller, B., Pleßmann, G., Reeg, M., Richstein, J. C., et al. (2018). Opening the black box of energy modelling: Strategies and lessons learned. *Energy Strategy Reviews*, 19, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.12.002>
- Popovich, N. D., Rajagopal, D., Tasar, E., et Phadke, A. (2021). Economic, environmental and grid-resilience benefits of converting diesel trains to battery-electric. *Nature Energy*, 6(11), 1017–1025. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00915-5>
- Pye, S., Broad, O., Bataille, C., Brockway, P., Daly, H. E., Freeman, R., Gambhir, A., Geden, O., Rogan, F., Sanghvi, S., Tomei, J., Vorushylo, I., et Watson, J. (2021). Modelling net-zero emissions energy systems requires a change in approach. *Climate Policy*, 21(2), 222–231.
<https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1824891>

- Rabe, M., et Goldsman, D. (2019). Decision-Making Using Simulation Methods in Sustainable Transportation (Chapter 12). In J. Faulin, S. E. Grasman, A. A. Juan, et P. Hirsch (Eds.), *Sustainable transportation and smart logistics : decision-making models and solutions*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- Radaelli, C. M. (2004). The diffusion of regulatory impact analysis - Best practice or lesson-drawing? *European Journal of Political Research*, 43(5), 723-747. doi:10.1111/j.0304-4130.2004.00172.x
- Radtke, J., et Wurster, S. (2023). Multilevel governance of energy transitions in Europe: Addressing wicked problems of coordination, justice, and power in energy policy. *Zeitschrift Für Politikwissenschaft : Journal of Political Science*, 33(2), 139–155. <https://doi.org/10.1007/s41358-023-00353-7>
- Railroading, P. (2023). CPKC report highlights sustainability developments. *Progressive Railroading*. Retrieved from https://www.progressiverailroading.com/canadian_pacific_kansas_city/news/CPKC-report-highlights-sustainability-developments--69540
- Règlement sur les combustibles propres, (2022b).
- Règlement sur les émissions des locomotives, (2017).
- Rottoli, M., Luderer, G., et Yeh, S. (2024). *Perspectives on road transport decarbonization in Europe a model-based analysis*. Technische Universität Berlin, Berlin. Retrieved from <https://doi.org/10.14279/depositonce-19584> WorldCat database.
- Rodemann, H., Templar, S., Palkowski, C., et Little, N. (2025). *An investigation into the enablers and inhibitors of intermodal rail freight in North America*. Research in Transportation Business et Management, 63. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2025.101509>
- Rogge, K. S., et Reichardt, K. (2016). Policy mixes for sustainability transitions: An extended concept and framework for analysis. *Research Policy*, 45(8), 1620–1635. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.04.004>
- Rubiano Rivadeneira, N., et Carton, W. (2022). *(In)justice in modelled climate futures: A review of integrated assessment modelling critiques through a justice lens*. Energy Research et Social Science, 92, 102781. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102781>
- Siskos, P., Capros, P., et De Vita, A. (2015). CO2 and energy efficiency car standards in the EU in the context of a decarbonisation strategy: A model-based policy assessment. *Energy Policy*, 84, 22-34. doi:10.1016/j.enpol.2015.04.024
- Sovacool, B. K., et Hess, D. J. (2017). Ordering theories: Typologies and conceptual frameworks for sociotechnical change. *Social Studies of Science*, 47(5), 703–750. <https://doi.org/10.1177/0306312717709363>
- Speizer, S., Fuhrman, J., Aldrete Lopez, L., George, M., Kyle, P., Monteith, S., et McJeon, H. (2024). Integrated assessment modeling of a zero-emissions global transportation sector. *Nature Communications*, 15(1), 4439. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48424-9>
- Srikrishnan, V., Guan, Y., Tol, R.S.J. Keller, K. (2022). Probabilistic projections of baseline twenty-first century CO2 emissions using a simple calibrated integrated assessment model. *Climatic Change*, 170(3-4). <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03279-7>
- Strassheim, H., et Kettunen, P. (2014). When Does Evidence-Based Policy Turn into Policy-Based Evidence? Configurations, Contexts and Mechanisms. *Evidence et Policy: A Journal of Research, Debate and Practice*, 10(2), 259-277. doi:<https://doi.org/10.1332/174426514X13990433991320>
- Süsser, D., Ceglaz, A., Gaschnig, H., Stavrakas, V., Flamos, A., Giannakidis, G., et Lilliestam, J. (2021). Model-based policymaking or policy-based modelling? How energy models and energy policy interact. *Energy Research et Social Science*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101984>

- TC. (2023). *La décarbonization des transports*. Canada Retrieved from <https://tc.canada.ca/fr/services-generaux/transparence/documents-information-transports-canada/2023/sujets/decarbonization-transports>
- TC. (2024). *Les transports au Canada en 2023. Un Survol*. Canada
- Tellenne, C. (2023). Géopolitique du carbone : les États face à la décarbonation. *Constructif*, N° 64(1), 23-28. doi:10.3917/const.064.0023
- Tian, A.-Q., Wang, X.-Y., Xu, H., Pan, J.-S., Snášel, V., et Lv, H.-X. (2024). Multi-objective optimization model for railway heavy-haul traffic: Addressing carbon emissions reduction and transport efficiency improvement. *Energy*, 294. doi:10.1016/j.energy.2024.130927
- Trutnevite, E., Hirt, L. F., Bauer, N., Cherp, A., Hawkes, A., Edelenbosch, O. Y., Pedde, S., et van Vuuren, D. P. (2019). *Societal transformations in models for energy and climate policy: The ambitious next step*. *One Earth*, 1(4), 423–435. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.12.002>
- Udrea, T., et Bauer, A. (2023). Between control and independence: computational modelling within EC's trade sustainability impact assessments. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 41(1), 21–34. <https://doi.org/10.1080/14615517.2022.2112811>
- Vaillancourt, K., Bahn, O., et El Maghraoui, N. (2019). *History and recent state of TIMES optimization energy models and their applications for a transition towards clean energies* [1 online resource.]. Retrieved from <http://epe.lac-bac.gc.ca/100/200/300/gerad/cahiers/2019/G1953.pdf>
- van Beek, L., Hajer, M., Pelzer, P., van Vuuren, D., et Cassen, C. (2020). Anticipating futures through models: the rise of Integrated Assessment Modelling in the climate science-policy interface since 1970. *Global Environmental Change*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102191>
- van den Bergh, J., Castro, J., Drews, S., Exadaktylos, F., Foramitti, J., Klein, F., Konc, T., et Savin, I. (2021). Designing an effective climate-policy mix: accounting for instrument synergy. *Climate Policy*, 21(6), 745–764. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1907276>
- Velazquez, L., Munguia, N. E., Will, M., Zavala, A. G., Verdugo, S. P., Delakowitz, B., et Giannetti, B. (2015). Sustainable transportation strategies for decoupling road vehicle transport and carbon dioxide emissions. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 26(3), 373–388. doi:10.1108/meq-07-2014-0120
- Walker, W. E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J. P., van Asselt, M. B. A., Janssen, P., et Kreyer von Krauss, M. P. (2003). Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. *Integrated Assessment*, 4(1), 5-17. doi:10.1076/iaij.4.1.5.16466
- Wang, Y., de Blois, S., et Oldknow, K. D. (2024). Incentivized decarbonization through safer and more efficient heavy haul operations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 238(3), 300-309. doi:10.1177/09544097231169420
- Weyant, J. (2017). Some Contributions of Integrated Assessment Models of Global Climate Change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(1), 115–137. <https://doi.org/10.1093/reep/rew018>
- Workman, M., Darch, G., Denisart, B., Roberts, D., Wilkes, M., Brown, S., et Kruitwagen, L. (2024). A robust decision-making approach in climate policy design for possible net zero futures. *Environmental Science and Policy*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103886>
- Yeomans, J. S., et Gunalay, Y. (2020). An Innovative Modelling and Decision-Support Approach for Evaluating Urban Transshipment Problems Using Electrical Trucks. *International Journal of Smart Vehicles and Smart Transportation (IJSVST)*, 3(2), 19-37. doi:10.4018/IJSVST.2020070102
- Yu, S., You, L., et Zhou, S. (2023). A review of optimization modeling and solution methods in renewable energy systems. *Frontiers of Engineering Management*, 10(4), 640–671. <https://doi.org/10.1007/s42524-023-0271-3>

Zenith, F., Isaac, R., Hoffrichter, A., Thomassen, M. S., et Møller-Holst, S. (2020). Techno-economic analysis of freight railway electrification by overhead line, hydrogen and batteries: Case studies in Norway and USA. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 234(7), 791–802. <https://doi.org/10.1177/0954409719867495>