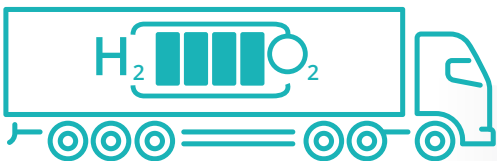
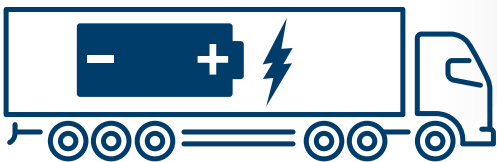


DÉCARBONATION DU TRANSPORT ROUTIER LONGUE DISTANCE DANS L'EST DU CANADA

PARTIE 2 | Une évaluation techno-économique de technologies
carboneutres sur le corridor A20-H401 entre les villes de Québec et Windsor



RESPONSABLE DE LA MODÉLISATION

Nicholas Roberts, CPCS

CHARGÉ DE PROJET (MODÉLISATION)

Mathieu Cyr, CPCS

RESPONSABLES DE LA RECHERCHE

Johanne Whitmore, HEC Montréal

Dr Pierre-Olivier Pineau, HEC Montréal

RÉVISEURS

Dr Matteo Craglia, International Transportation Forum (OECD)

Dr Simon Langlois-Bertand, Institut énergie Trottier

Joe Lynch, Ontario Ministry of Transportation

Hajo Ribberink, CanmetENERGY, Natural Resources Canada

Dr Arthur Yip, US National Renewable Energy Laboratory

REMERCIEMENTS

L'analyse de CPCS s'appuie sur des sources de données accessibles au public, des documents universitaires, des données et des points de vue partagés par des experts du gouvernement, des universités et de l'industrie. CPCS remercie HEC Montréal ainsi que les membres de l'industrie et du milieu universitaire pour leur contribution et leurs conseils sur la méthodologie de modélisation et les paramètres d'entrée tout au long de cette étude, en particulier lors de l'atelier d'experts tenu en avril 2023.

NOTE

Cette analyse s'inscrit dans le contexte d'un exercice académique d'évaluation des coûts économiques dans le cadre de scénarios théoriques. En tant que telle, l'analyse comporte plusieurs hypothèses et limitations mentionnées dans le présent rapport. Les types de propulsion carboneutre évalués sont les suivants : camions électriques à batterie, camions électriques à caténaire (avec batterie), camions à pile à hydrogène et camions au gaz naturel renouvelable. Les observations et les conclusions présentées sont la responsabilité des auteurs et ne reflètent pas nécessairement les opinions du gouvernement du Québec.

Ce rapport est une traduction du rapport original publié en anglais : <https://energie.hec.ca/decarbonizing-long-haul-trucking-in-eastern-canada/>

CPCS

999 boulevard De Maisonneuve Ouest #620
Montréal, Québec H3A 3L4 CANADA

cpcs.ca

Chaire en gestion du secteur de l'énergie | HEC Montréal

3000 chemin de la Côte-Sainte-Catherine
Montréal, Québec H3T 2A7 CANADA

energie.hec.ca

Pour citer ce rapport : Roberts, N., Cyr, M., Whitmore, J., Pineau, P.-O., 2023. *Décarbonation du transport routier longue distance dans l'est du Canada : Partie 2 - Une évaluation techno-économique de technologies carboneutres sur le corridor A20-H401 entre les villes de Québec et Windsor*, préparé par CPCS et la Chaire en gestion du secteur de l'énergie - HEC Montréal pour le gouvernement du Québec.

Dépôt : septembre 2023

ISBN : 978-2-925295-01-3

©2023 Chaire de gestion du secteur de l'énergie - HEC Montréal.

Conception graphique : Brigitte Ayotte (Ayograph)

Images en couverture : DepositPhotos

Résumé

Pour atteindre l'objectif de carboneutralité du Canada d'ici 2050, il est indispensable de décarboner le secteur des transports, qui représente plus de 20 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle nationale.¹ À l'intérieur de ce secteur, la décarbonation des camions lourds de classe 8 utilisés pour le transport de marchandises sur de longues distances constitue un défi de taille, car ils représentent environ 24 % des émissions globales du secteur des transports et leurs émissions augmentent depuis 1990.²

Afin de contribuer au débat sur les technologies carboneutres pour le camionnage longue distance, une simulation d'adoption progressive de quatre technologies carboneutre a été réalisée sur le corridor de l'Autoroute 20 (A20) – Highway 401 (H401) entre les villes de Québec et Windsor. Les camions à 1) batterie électrique; 2) à pile à combustible à hydrogène vert; 3) à caténaires électriques (avec recharge dynamique); et 4) au gaz naturel renouvelable (GNR) comprimé sont comparés sur la base des coûts des véhicules (capital et fonctionnement) et des coûts d'infrastructure (ex., stations de recharge et de ravitaillement). La comparaison est effectuée par rapport à un scénario de référence qui maintient le statu quo (*business-as-usual*) de l'exploitation de camions au diesel.

Chaque technologie a été évaluée sous deux perspectives: a) la *perspective « corridor »* qui compare une trajectoire d'adoption progressive pour tous les camions longue distance de classe 8 opérant sur le corridor, avec la transition vers la technologie carboneutre respective d'ici 2050, et b) la *perspective « véhicule »* qui évalue les coûts totaux du cycle de vie d'un seul camion longue distance de classe 8 au cours de sa durée de vie typique de 10 ans.³ Une analyse de sensibilité a également été réalisée pour tenir compte de l'incertitude et de la variabilité des principaux paramètres de modélisation (ex., prix d'achat des véhicules, prix du carburant et de l'électricité et les coûts d'infrastructure) et pour tester la robustesse des résultats économiques (ex., valeur actuelle nette [VAN], taux de rendement économique [TRE]).

Perspective « corridor »

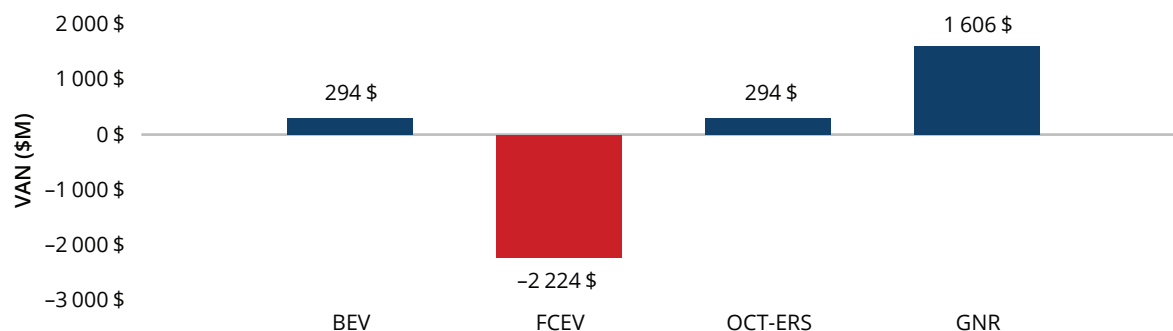
Dans l'ensemble, les **camions électriques à batterie, à caténaires et au GNR ont tous un potentiel de coûts de réduction des GES négatifs**, ce qui signifie que des économies peuvent être réalisées en mettant en œuvre ces technologies par rapport aux camions diesel. Cependant, chaque technologie est confrontée à des coûts initiaux élevés pour les véhicules et l'infrastructure avant que les économies de coûts opérationnels en termes de carburant, d'entretien et d'atténuation des émissions de GES (prix du carbone) ne se matérialisent pour compenser l'investissement initial.

¹ Gouvernement du Canada, 2022. *Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité*, page web consultée le 1^{er} août 2023, www.canada.ca/fr/services/environnement/meteo/changementsclimatiques/plan-climatique/carboneutralite-2050/loi-canadienne-responsabilite-matiere-carboneutralite.html

² Ibid

³ Estimation des associations de transporteurs routiers de l'Ontario et du Québec

GRAPHIQUE 1. PERSPECTIVE CORRIDOR – COMPARAISON SOMMAIRE DE LA VALEUR ACTUELLE NETTE (MILLIONS DE DOLLARS DE 2022) PAR TECHNOLOGIE



Source : CPCS, 2023.

En termes d'évaluation strictement économique, les camions au GNR ont tendance à obtenir les meilleurs résultats, avec la valeur actuelle nette (VAN) la plus élevée de 1 606 millions de dollars et un ratio avantages-coûts (RAC) de 2,4 en fonction des hypothèses de base. Or, les camions fonctionnant au GNR continuent à émettre des gaz d'échappement et sont critiqués pour les émissions fugitives en amont liées au stockage et au transport du carburant GNR. En outre, la disponibilité des approvisionnements à grande échelle et les limites de l'offre de GNR durable suscitent des inquiétudes, en particulier si la demande continue d'augmenter dans le secteur des transports et d'autres secteurs (ex., maritime, aviation, bâtiments et industries)^{4,5}.

Les camions à batterie électrique (*battery electric vehicle* [BEV]) (ex aequo avec les camions à caténares), affichent la deuxième performance la plus favorable, avec un RAC de 1,1 et une VAN positive de 294 millions de dollars. Les économies importantes réalisées sur les coûts de carburant et d'entretien pendant la durée de vie du camion permettent de compenser le prix d'achat plus élevé. Toutefois, l'autonomie, la disponibilité commerciale, le temps de charge et l'infrastructure constituent des obstacles à l'adoption à grande échelle des BEV. Les temps de charge, de l'ordre de plusieurs heures, comparés au temps de ravitaillement en carburant, de l'ordre de quelques minutes, et le poids supplémentaire de la batterie, qui a un impact sur la capacité de charge utile du camion, peuvent poser des problèmes et être source d'inefficacité pour les opérations.

Les camions à caténares (*overhead catenary trucks* [OCT]) ont également un RAC de 1,1 et une VAN de 294 millions de dollars. Malgré le coût d'investissement élevé pour la mise en place de l'infrastructure, cet investissement est amorti grâce à des coûts d'exploitation nettement inférieurs. Il existe plusieurs déploiements pilotes réussis de camions à caténares en Europe et un en Californie, dans le cadre du *Clean Transportation Program*.⁶ L'Amérique du Nord accuse un retard par rapport à l'Europe en ce qui a trait à l'utilisation de cette technologie pour le transport routier. Le coût d'investissement initial de l'infrastructure et le manque de banc d'essai pourraient constituer un facteur limitant pour son déploiement sur le corridor autoroutier.

⁴ Énergir, 2023. *Nouveaux raccordements 100 % renouvelables*, Énergir-U, Document 1 déposé à la Régie de l'énergie, Cause tarifaire 2023-2024, R-4213-2022, www.regie-energie.qc.ca/fr/participants/dossiers/R-4213-2022/doc/R-4213-2022-B-0279-DemAmend-Piece-2023_08_31.pdf

⁵ Dagher, R., et al., 2023. *Biomasse et carboneutralité : Élaboration d'une grille d'évaluation – État des lieux au Canada*, Institut énergie Trottier et l'Accélérateur de transition, <https://iet.polymtl.ca/biomasse-et-carboneutralite/>

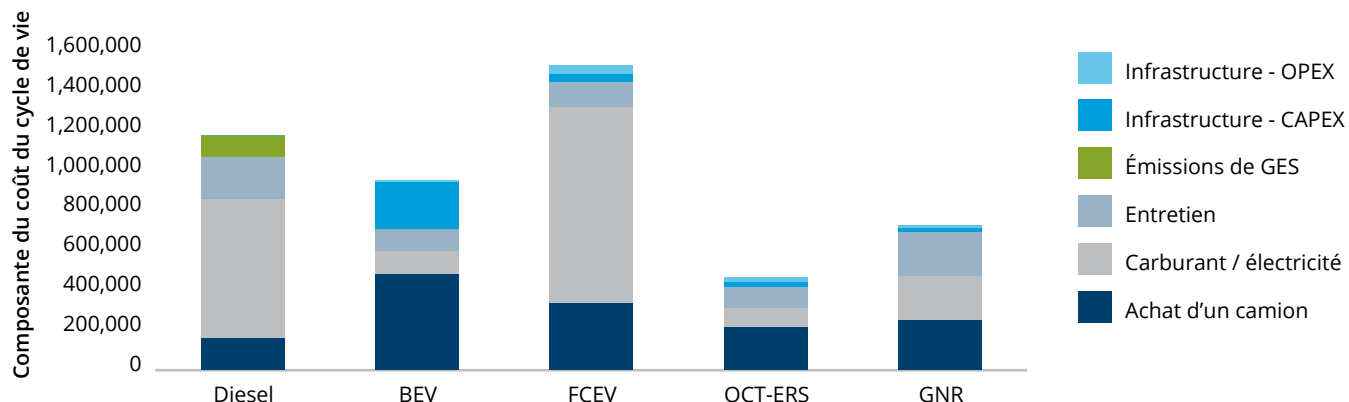
⁶ Impulitti, J., Lehmann, M., 2019. *Electric Truck Pantograph Retrofit Project*, rapport de projet final du Clean Transportation Program préparé pour la California Energy Commission par le South Coast Air Quality Management District, novembre 2019 | CEC-600-2019-059, www.energy.ca.gov/sites/default/files/2021-05/CEC-600-2019-059.pdf.

Les camions à pile à combustible à hydrogène vert (fuel cell electric vehicle [FCEV]) n'atteignent pas une VAN positive ou un RAC supérieur à 1. L'utilisation d'hydrogène vert dans le transport lourd accuse un retard sur le rythme de commercialisation à grande échelle face à d'autres technologies, principalement les BEV. Les défis à relever sont notamment le manque d'infrastructures de ravitaillement, le coût élevé de l'hydrogène vert et les prix d'achat élevés pour les nouveaux véhicules, en raison de leur disponibilité limitée en Amérique du Nord. À l'heure actuelle, ces facteurs se traduisent par une logique économique mitigée, mais qui devrait s'améliorer au fur et à mesure que la technologie, les approvisionnements et l'offre d'hydrogène vert vont évoluer.

Perspective « véhicule »

En ce qui a trait aux véhicules, les résultats suggèrent que les camions à caténaires constituent la meilleure option. Cela s'explique par la longévité de l'infrastructure caténaire (lignes aériennes). Le graphique 2 compare le coût total de possession (CTP) de chaque technologie pour un camion individuel sur un cycle de vie de 10 ans, y compris le coût d'infrastructure proportionnel. Les camions propulsés au GNR et au BEV arrivent en deuxième position en termes de coût total de possession, avant les camions diesel. Le FCEV est l'option la plus coûteuse à l'heure actuelle.

GRAPHIQUE 2. PERSPECTIVE VÉHICULE - COMPARAISON DU COÛT DU CYCLE DE VIE DES TECHNOLOGIES CARBONEUTRES PAR RAPPORT AU DIESEL (DURÉE DE VIE DE 10 ANS)



Source : CPCS, 2023

Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été réalisée pour évaluer l'influence de différents facteurs sur le prix futur des véhicules et des infrastructures (ex., niveau de maturité technologique, hypothèses sur les exigences en matière d'infrastructure, volatilité des prix de l'énergie, innovations, demande) (voir graphique 10). Globalement, les résultats de la sensibilité sont favorables au GNR, qui a le potentiel d'atteindre un RAC de 4,3 et une VAN de 2,6 milliards de dollars si le prix des camions au GNR diminue de 25 %. Les camions électriques à batterie et les camions à caténaires montrent également une forte viabilité économique. Les scénarios de flotte BEV sont les plus sensibles au taux d'actualisation, au prix d'achat des camions et au prix du diesel. Les scénarios de flotte à caténaires sont également sensibles à ces paramètres, mais dans une moindre mesure. Enfin, la technologie de l'hydrogène ne permet pas d'obtenir une VAN positive ou un RAC supérieur à 1. Le scénario le plus favorable est celui où le prix de l'hydrogène vert diminue de 50 % par rapport au prix utilisé dans le scénario de base.

Émissions de GES évitées et demande d'énergie

Compte tenu des projections actuelles de la demande de transport longue distance de classe 8 sur le corridor A20-H401, les émissions de GES évitées par la mise en œuvre d'un scénario net zéro sont de l'ordre de 2,8 Mt CO₂e/an à l'horizon 2050. La demande totale d'énergie pour la flotte de camions est estimée à environ

4,2 PJ (scénario GNR), 261 millions de kg (scénario hydrogène vert) et entre 3 et 4 TWh (scénarios caténaire et BEV) (voir tableau 21). D'autres études sont nécessaires pour déterminer les incidences sur la demande d'énergie.

Limites

Le rapport présente de manière transparente plusieurs limites qui pourraient servir de base à l'approfondissement de cette étude dans le cadre de travaux futurs. Il s'agit notamment d'une analyse plus détaillée des besoins et des coûts en infrastructures, d'une évaluation plus large des flux du réseau de fret (ex., les routes secondaires liées au corridor A20-H401), de la prévision des prix futurs des véhicules, des carburants et de l'électricité, et de l'inclusion d'autres avantages non économiques tels que le bruit et la pollution de l'air. Il faut reconnaître que chaque technologie évaluée peut présenter des avantages uniques pour la décarbonation de différents segments du marché du transport routier longue distance. Au fur et à mesure que des données additionnelles seront disponibles et que les paramètres et coûts des véhicules et infrastructures vont s'améliorer, il sera justifié de réexaminer l'analyse du transport routier longue distance et d'élargir l'analyse afin d'y inclure des données et informations notées comme étant des limites dans cette étude.

Table des matières

Résumé	I
Mandat.....	1
Introduction.....	2
Approche canadienne de la décarbonation du fret routier.....	4
Vue d'ensemble des technologies carboneutres.....	6
Défis technologiques, maturité et disponibilité.....	8
Modèle et méthodologie.....	13
Approche de la modélisation.....	13
Portée et limites de l'analyse.....	14
Sources de données et hypothèses.....	17
Paramètres techno-économiques des technologies de camion.....	18
Scénarios de déploiement et adoption de la technologie.....	21
Hypothèses sur l'infrastructure de ravitaillement et de recharge.....	24
Résultats de la modélisation et analyse.....	30
Viabilité économique des technologies.....	30
Perspective « véhicule ».....	33
Facteurs influençant la viabilité économique.....	35
Perspectives sur la demande énergétique totale.....	37
Conclusion et recommandations.....	38
Annexe 1 Exemples de partenariats stratégiques.....	40
Annexe 1 Exemples d'adopteurs précoces au Canada.....	42
Annexe 3 Sources de données.....	44
Annexe 4 Analyse de sensibilité.....	46

Mandat

Dans le cadre d'un partenariat de recherche, le gouvernement du Québec a mandaté la Chaire en gestion du secteur de l'énergie de HEC Montréal pour réaliser, en collaboration avec CPCS, une étude de deux ans comparant quatre technologies de décarbonation des camions longue distance de classe 8, en mettant l'accent sur le corridor de l'Autoroute 20 – Highway 401 (A20-H401) entre les villes de Québec et Windsor. Ce corridor de 1 300 km compte les plus importants flux de camionnage longue distance au Canada, car il dessert les principaux centres de population de l'Ontario et du Québec, ainsi que les États-Unis. Les types de propulsion carboneutre envisagés comprenaient les camions électriques à batterie, les camions électriques à caténaire (avec batterie), les camions à pile à combustible à l'hydrogène et les camions au gaz naturel renouvelable (GNR).

Le projet comprend cinq étapes :

- Étape 1 :** Identifier les technologies class 8 carboneutres à évaluer
- Étape 2 :** Revue de la littérature des paramètres techno-économiques
- Étape 3 :** Validation des données par une consultation d'experts
- Étape 4 :** Définir les paramètres de fonctionnement pour la simulation
- Étape 5 :** Analyses coûts-bénéfices et de sensibilité

Pour soutenir le développement du modèle, près de 60 experts ont été réunis dans le cadre d'un atelier virtuel (étape 3 : 25-27 avril 2023) afin de valider l'approche de modélisation et les paramètres techno-économiques recueillis à partir de la revue de la littérature (étapes 1 et 2) effectuée. Les points saillants des tables rondes ont été résumés dans un rapport intitulé **Décarbonation du camionnage longue distance dans l'est du Canada : Partie 1 - Résumé d'un atelier tenu les 25, 26 et 27 avril 2023**⁷.

CPCS a piloté les simulations (étapes 4 et 5) examinant le déploiement potentiel des technologies de camionnage carboneutre. L'analyse a été conçue de manière à répondre aux questions suivantes :

1. Quel est l'ordre de grandeur des besoins en matière d'investissements en infrastructures, d'acquisition de flottes ainsi que de coûts d'exploitation et d'entretien ?
2. Comment se comparent la faisabilité des scénarios impliquant les technologies considérées pour le corridor A20-H401 ?

L'étude est un premier pas vers une approche plus ouverte et inclusive. Elle vise à fournir des données et des hypothèses transparentes sur les technologies, avec des références complètes, afin de permettre à d'autres d'utiliser et de mettre à jour les données et le modèle de simulation développé. Les résultats peuvent être utilisés dans des travaux futurs, y compris un examen des technologies dans le cadre d'une approche plus systémique de la décarbonation du fret longue distance (ex., optimisation de la logistique du fret, de l'intermodalité et des modèles commerciaux)⁸ et pour évaluer les impacts des différents choix technologiques sur la demande globale d'électricité et d'énergie pour atteindre les objectifs de réduction des GES sur la base de différents scénarios de trajectoire (ex., l'Initiative du *Carbon Free Corridor* de l'Université de Windsor; calibrage de modèle E3, tel que le *North American Times Energy Model* (NATEM), avec les données de la simulation; contribution de données à la plateforme ouverte du Carrefour de modélisation énergétique du Canada).

⁷ Whitmore, J., Pineau, P.-O., Roberts, N., 2023. <https://energie.hec.ca/decarbonizing-long-haul-trucking-in-eastern-canada>

⁸ Comité sur les changements climatiques, 2023. *Décarbonation du transport lourd de marchandises Construire une voie durable*, préparé pour le Gouvernement du Québec, <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/org/comite-consultatif-changements-climatiques/avis/decarbonation-transport-lourd.pdf>

Introduction

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) provenant du camionnage longue distance constituent l'un des plus grands défis à relever pour atteindre les objectifs climatiques, compte tenu de la complexité du secteur et de la nécessité d'une interopérabilité à l'échelle de l'Amérique du Nord. Au Canada, les poids lourds utilisés pour le transport de marchandises représentent environ 24 % des émissions globales du secteur des transports. Au Québec et en Ontario, le secteur du fret représente environ 9 % des émissions totales. Cependant, le défi est aggravé par la croissance rapide des émissions des camions lourds : 67 % au Québec et 61 % en Ontario entre 1990 et 2019⁹.

Atteindre des objectifs de carboneutralité d'ici 2050 impose une action concertée et décisive, étant donné que la mondialisation et l'augmentation des flux commerciaux, accélérés par le commerce électronique, continueront d'accroître la demande de biens et, par conséquent, les émissions de GES. Il est donc urgent d'examiner les possibilités d'inverser ces tendances.

Le déploiement des technologies carboneutres pour les camions nécessite une planification à long terme en raison des infrastructures et coûts impliqués. L'absence d'études comparatives interrégionales transparentes et rigoureuses des différentes technologies carboneutres pour le transport routier de marchandises dans les corridors clés du Québec et de l'Ontario, et plus largement dans le contexte nord-américain, limite l'efficacité des actions gouvernementales et privées dans ce secteur. À ce jour, peu d'études ont évalué la faisabilité associée au potentiel des technologies de décarbonation du camionnage longue distance dans le contexte de l'est du Canada.

En l'occurrence, la Chaire en gestion du secteur de l'énergie de HEC Montréal et CPCS ont réalisé, en collaboration avec le gouvernement du Québec, une étude de potentiel techno-économique comparant la faisabilité des technologies de classe 8 (plus de 27 215 kg) pour décarboner le camionnage longue distance, en mettant l'accent sur le corridor de l'Autoroute 20 – Highway 401 (A20-H401), qui relie les villes de Québec, Montréal et Toronto, jusqu'au poste frontalier de Windsor-Détroit¹⁰. Ce corridor de 1 300 km est l'un des plus fréquentés par les camions dans l'est du Canada (voir le graphique 3 et l'encadré 1), ce qui constitue un bon point de départ pour délimiter la portée de l'étude.

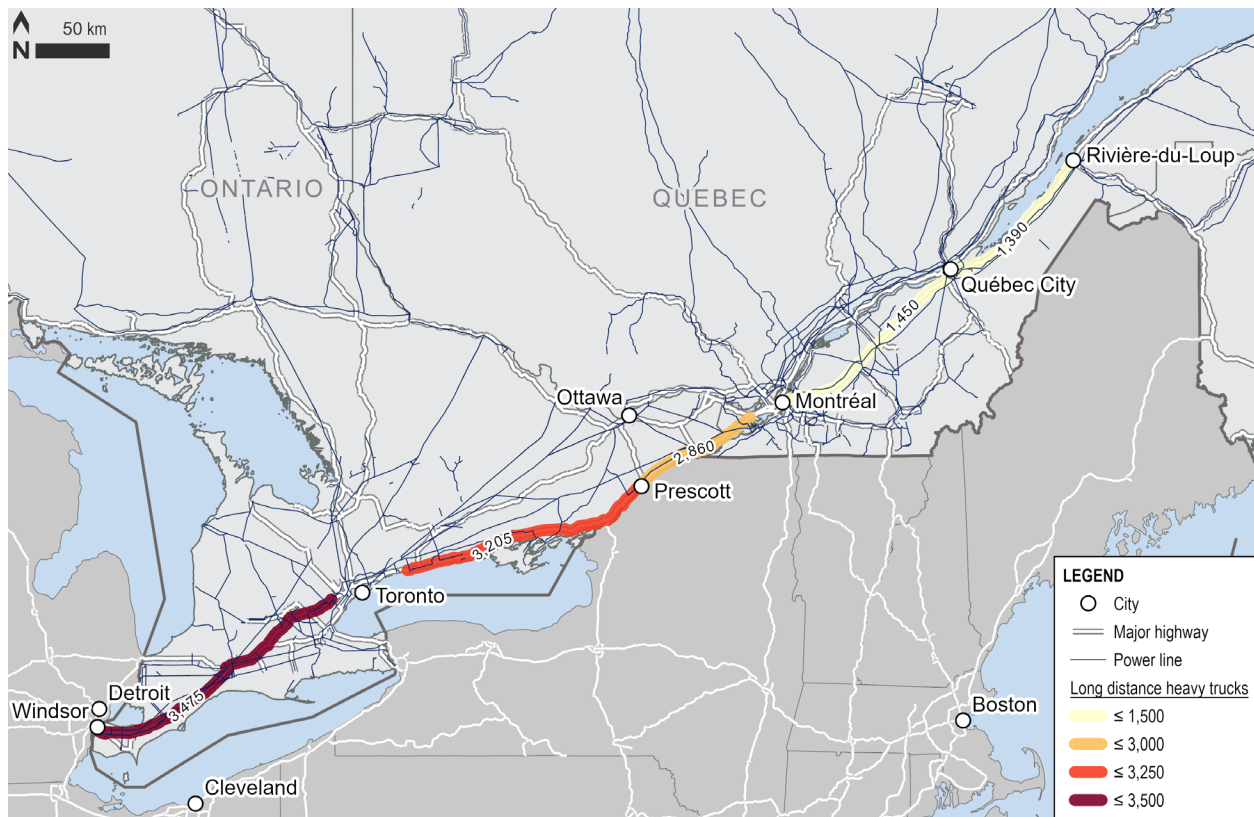
L'étude vise à combler les lacunes en matière de données et à réduire certains des risques associés aux choix technologiques et logistiques en fournissant des informations plus complètes basées sur un examen des coûts et des questions technologiques associées. L'étude vise également à fournir des données et des hypothèses transparentes sur les technologies, avec des références complètes, afin de permettre à d'autres d'utiliser et de mettre à jour les données et le modèle de simulation pour d'autres études potentielles.

La section suivante fait un survol de l'approche des gouvernements fédéral, québécois et ontarien en matière de décarbonation du transport routier de marchandises et propose une vue d'ensemble des quatre technologies carboneutres couvertes par l'étude. La section d'après présente les paramètres techno-économiques et l'approche méthodologique utilisés pour l'analyse des coûts, y compris la portée et les limites de l'étude. Les résultats des simulations et de l'analyse de sensibilité sont résumés dans les dernières sections.

⁹ ECCC, 2023. *Rapport d'inventaire national 1990-2021 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada*. Annexe 12 - Tableaux des émissions de gaz à effet de serre des provinces et territoires par secteur économique canadien, 1990-2021, Environnement et Changement climatique Canada.

¹⁰ BTS, 2022. *Border Crossing/Entry Data*, US Department of Transportation - Bureau of Transportation Statistics, www.bts.gov/browse-statistical-products-and-data/border-crossing-data/border-crossingentry-data

GRAPHIQUE 3. VOLUMES DE POIDS LOURDS À LONGUE DISTANCE (SENS UNIQUE) SUR DES SEGMENTS DU CORRIDOR A20-H401



Source : Analyse de CPCS basée sur les données du ministère des Transports de l'Ontario (MTO) et du ministère des Transports et de la mobilité durable du Québec (MTMDQ) par le biais de leurs portails de données ouvertes.

ENCADRÉ 1. CARACTÉRISTIQUES STRATÉGIQUES DU CORRIDOR A20-H401

- Connexions avec les principaux centres de fret aérien¹¹ :
 - L'aéroport Pearson de Toronto est la plus grande plateforme de fret aérien du Canada, avec plus de 300 000 tonnes par année.
 - Aéroports internationaux Montréal-Trudeau et Mirabel, avec un trafic de plus de 160 000 tonnes par année.
 - L'aéroport international de Hamilton est orienté vers le fret aérien intérieur, avec 122 000 tonnes par année.
- Connexion à la plateforme de transport maritime :
 - Le port de Montréal est le deuxième port à conteneurs du Canada, avec une manutention de 41 millions de tonnes par année, dont 1,7 million de conteneurs équivalents vingt pieds (EVP) par année¹².
- Connexions avec des installations intermodales (y compris ferroviaires), des entrepôts et des centres de distribution qui permettent le transport de marchandises dans les principales zones de population du Canada.
- Relie le commerce transfrontalier entre le Canada et les États-Unis à la frontière Windsor-Detroit (ponts Ambassador et Gordie Howe), avec plus de 1,4 million de passages de camions par année¹³.

¹¹ Statistique Canada, 2020. *Tableau 23-10-0254-01 - Trafic aérien des marchandises aux aéroports canadiens, annuel*

¹² Analyse par CPCS des données des Transports au Canada, 2021. Tableau M17, chiffres préliminaires.

¹³ BTS, 2022. *Border Crossing/Entry Data*, US Department of Transportation - Bureau of Transportation Statistics, www.bts.gov/browse-statistical-products-and-data/border-crossing-data/border-crossing-entry-data

Approche canadienne de la décarbonation du fret routier

La réforme du secteur du transport routier longue distance, tant sur le plan technologique que logistique, sera essentielle pour parvenir à la carboneutralité d'ici 2050¹⁴. Malgré l'urgence, peu de politiques fédérales ont commencé à inverser les tendances à la hausse en matière d'émissions. Outre la taxe fédérale sur le carbone, qui devrait passer à 170 dollars par tonne d'ici à 2030, le gouvernement s'est appuyé sur trois initiatives clés pour tenter de réduire les émissions du transport routier de marchandises. Il s'agit de l'amélioration des normes pour les poids lourds, de la subvention des technologies et des carburants alternatifs, et de l'introduction d'une norme sur les carburants propres avec des niveaux minimums de biocarburants dans le diesel et l'essence.

L'élaboration de normes pour les émissions et les moteurs est complexe pour plusieurs raisons, notamment parce que le Canada, dont le marché est relativement petit par rapport à celui des États-Unis, suit en grande partie les normes américaines. Les progrès sont encore ralentis par la nécessité de démontrer la compatibilité des nouvelles normes avec les conditions hivernales du Canada.¹⁵ Enfin, certaines provinces autorisent des poids par essieu plus élevés, ce qui permet aux poids lourds de transporter une charge utile plus importante que leurs homologues américains, ce qui complique encore le trafic transfrontalier et la normalisation du transport par camion.

Auparavant, le soutien aux technologies alternatives était principalement axé sur les camions au gaz naturel, en raison de leur autonomie et de leur temps de ravitaillement comparables au diesel. Pour les moteurs au gaz naturel, le carburant est peu coûteux et abondant, mais les camions ont un coût d'achat supplémentaire, et les infrastructures et services de ravitaillement ne sont pas encore très répandus. Des études indépendantes montrent que la conversion au gaz naturel ne réduirait les émissions de GES que de 3 à 10 % environ, du puits à la roue, par rapport aux camions diesel^{16,17}.

L'hydrogène présente des défis supplémentaires du côté de l'offre. Actuellement, il est principalement obtenu par reformage à la vapeur du gaz naturel, qui libère du CO₂ (hydrogène gris). Le processus peut être rendu plus propre en captant et en stockant les émissions (hydrogène bleu), ou en utilisant de l'électricité renouvelable pour produire de l'hydrogène à partir de l'eau par électrolyse (hydrogène vert). Toutefois, les technologies de captage, d'utilisation et de stockage du carbone ont actuellement des taux de réussite limités, et les procédés de production d'hydrogène bleu et vert augmentent le coût de production par rapport à l'hydrogène fabriqué à partir du gaz naturel.

L'accent est désormais mis sur la politique et les programmes fédéraux visant à décarboner le secteur des véhicules moyens et lourds, dans le prolongement des progrès déjà réalisés pour les véhicules légers. En 2023, le gouvernement fédéral a publié un *Plan d'action du Canada pour un transport routier propre*, qui fixe un objectif de vente de 35 % du total des nouveaux véhicules moyens et lourds vendus d'ici à 2030 et de 100 % d'ici à 2040 (pour un sous-ensemble de types de véhicules en fonction de la faisabilité).¹⁸ Le Programme d'incitatifs pour les véhicules moyens et lourds zéro émission (*iVMLZE*) prévoit un financement fédéral de 547,4 millions de dollars sur une période de quatre ans pour aider à combler l'écart entre le prix d'achat des véhicules à zéro émission et celui des véhicules à moteur à combustion traditionnel.

¹⁴ Gouvernement du Canada, 2022. *Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité*, page web consultée le 1^{er} août 2023, www.canada.ca/en/services/environment/weather/climatechange/climate-plan/net-zero-emissions-2050/canadian-net-zero-emissions-accountability-act.html

¹⁵ Sénat du Canada, 2017. *La décarbonisation des transports au Canada*, Rapport du Comité sénatorial permanent de l'énergie, de l'environnement et des ressources naturelles, juin 2017. Extrait de https://sencanada.ca/content/sen/committee/421/ENEV/reports/TransportationReport_FINAL_f.pdf

¹⁶ Mottschall, M., Kasten, P., Rodriguez, F., 2020. *Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective*, ICCT et Oko-Institute, étude commandée par l'Agence fédérale allemande de l'environnement, https://theicct.org/sites/default/files/publications/LNG-in-trucks_May2020.pdf

¹⁷ O'Connell, A. et al., 2023. *A Comparison of the Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of European Heavy-Duty Vehicles and Fuels*, Livre blanc, <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/02/lca-ghg-emissions-hdv-fuels-europe-feb23.pdf>

¹⁸ Transports Canada, 2023. *Plan d'action du Canada pour un transport routier propre*, gouvernement du Canada, https://tc.canada.ca/sites/default/files/2023-03/ROAD-04-ON-%20ROAD-%20ACTION-%20PLAN-REPORT_FR_V05.pdf

Le gouvernement fédéral a publié le Règlement sur les carburants propres (RCP) afin d'obliger les fournisseurs de carburants liquides à réduire progressivement l'intensité carbone de ces derniers. Cette mesure devrait permettre de réduire de 15 % l'intensité carbone des carburants liquides utilisés au Canada d'ici à 2030 par rapport aux niveaux de 2016¹⁹. Pour favoriser l'innovation au moindre coût, le RCP met en place un marché de crédit. Le gouvernement a également annoncé qu'il investirait 1,5 milliard de dollars dans un Fonds pour les combustibles propres afin d'accroître le soutien à la production nationale de carburants à faible teneur en carbone et à leur adoption, tels que l'hydrogène et les biocarburants²⁰.

Le gouvernement fédéral a publié une *Stratégie canadienne pour l'hydrogène*, en décembre 2020, afin d'accélérer le développement de projets d'hydrogène « propre ». Le budget 2023 a introduit un crédit d'impôt à l'investissement pour l'hydrogène propre basé sur des niveaux d'intensité carbone similaires à la loi américaine sur la réduction de l'inflation (*Inflation Reduction Act*) afin d'orienter le niveau de soutien aux projets d'hydrogène propre. Le crédit d'impôt sera remboursable et progressivement supprimé après 2030. Il est proposé que le niveau d'intensité de carbone le plus bas qui remplit toutes les conditions d'éligibilité bénéficie d'un crédit d'impôt à l'investissement d'au moins 40 %²¹.

En mai 2023, les gouvernements fédéraux du Canada et des États-Unis ont annoncé la création du premier corridor pour l'approvisionnement en carburants de remplacement entre le Canada et les États-Unis. L'initiative vise à fournir une infrastructure de recharge normalisée pour les véhicules électriques à tous les 80 km, entre Kalamazoo (Michigan) et la ville de Québec. Au moins une borne de recharge rapide à courant continu (CC) avec connecteurs pour le système de charge combiné (CCS) doit être installée à chaque endroit.

Pour sa part, le Québec dispose de deux programmes importants visant à réduire les émissions de GES des véhicules lourds :

1. Le programme Écocamionnage, doté de 77,8 millions de dollars, apporte un soutien financier à l'achat de camions électriques à batterie, au gaz naturel et à pile à combustible à hydrogène (jusqu'à 175 000 \$ par camion), ainsi qu'à des projets de démonstration²²;
2. Le programme Transportez vert, qui dispose d'un budget de 29,4 millions de dollars, finance l'installation de bornes de recharge rapide.

En 2022, le gouvernement du Québec a publié sa *Stratégie sur l'hydrogène vert et la bioénergie*²³, suivi d'une annonce de financement pour le développement des deux filières. En Ontario, le gouvernement doit encore mettre en œuvre des mesures de soutien similaires pour compléter les programmes fédéraux, mais il a également publié une *Stratégie ontarienne relative à l'hydrogène bas carbone*²⁴.

Les initiatives fédérales et provinciales sont importantes, mais ne suffisent pas à placer le Canada sur une voie claire vers un transport routier de marchandises sans émissions. Le manque de coordination entre les gouvernements et au sein de ceux-ci en ce qui concerne les mesures et le partage des données nuit à l'efficacité de ces actions. La mise en œuvre d'une approche globale visant à améliorer la coordination transfrontalière des

¹⁹ Gouvernement du Canada, 2021 *Qu'est-ce que le Règlement sur les combustibles propres ?*, page web consultée le 1er août 2023, www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/gestion-pollution/production-energie/reglement-carburants/reglement-combustibles-propres/apropos.html

²⁰ Gouvernement du Canada, 2022. *Fonds pour les combustibles propres*, page web consultée le 1er août 2023, <https://ressources-naturelles.canada.ca/changements-climatiques/lavenir-vert-canada/fonds-pour-les-combustibles-propres/23738>

²¹ Finances Canada, 2022. *Consultation sur le crédit d'impôt à l'investissement pour l'hydrogène propre*, gouvernement du Canada, www.canada.ca/fr/ministere-finances/programmes/consultations/2022/consultation-sur-le-credit-dimpot-a-linvestissement-pour-lhydrogene-propre.html

²² Lemieux, A., 2023. *Perspectives et initiatives québécoises en matière de décarbonation du transport routier de marchandises*, MEIE, Gouvernement du Québec, présentation du 25 avril 2023, https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2023/04/4-LEMIEUX-MTMD_PPT.pdf

²³ Gouvernement du Québec, 2022. *Stratégie québécoise sur l'hydrogène vert et les bioénergies*, www.quebec.ca/gouvernement/politiques-orientations/strategie-hydrogene-vert-bioenergies

²⁴ Gouvernement de l'Ontario, 2023. *Stratégie ontarienne relative à l'hydrogène bas carbone*, www.ontario.ca/fr/page/strategie-ontarienne-relative-lhydrogene-bas-carbone

projets pilotes de collaboration afin d'évaluer sur une base commune les performances des technologies de classe 8 à zéro émission nette, qui favorise l'investissement et le partage des risques associés à la démonstration et au déploiement de nouvelles technologies, améliorerait les actions des gouvernements (voir les exemples d'initiatives de partenariat à l'annexe 1).

Vue d'ensemble des technologies carboneutres

Les simulations réalisées dans le cadre de cette étude examinent le potentiel de déploiement de quatre technologies à grande échelle pour décarboner les camions longue distance de classe 8 selon une trajectoire compatible avec l'atteinte des objectifs de carboneutralité d'ici 2050. Le tableau 1 résume les principales caractéristiques de chaque technologie de camionnage carboneutre retenues dans le cadre de cette étude.

L'analyse des coûts des technologies sera comparée à ceux d'un camion diesel dans le cadre d'un scénario de référence de type statu quo (*business-as-usual* [BAU]). Les quatre technologies peuvent être considérées carboneutres pour les raisons suivantes :

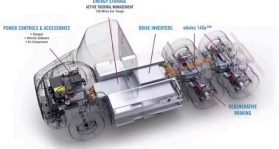


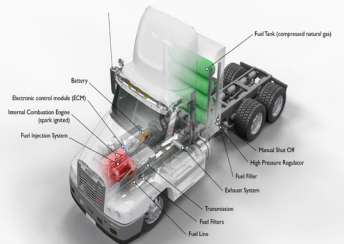
(1) Les **camions électriques à batterie (*battery electric vehicle* [BEV])** et (2) le **système de transmission par caténaires (lignes aériennes) (*overhead catenary trucks* [OCT]) avec batterie pour l'extension de l'autonomie hors réseau** n'émettent pas de gaz d'échappement et peuvent être considérés comme zéro émission lorsque l'électricité provient d'une source d'énergie sans émissions (ex., hydroélectrique, nucléaire, solaire ou éolien).

(3) Les **camions électriques à pile à combustible à hydrogène vert (*fuel cell electric vehicle* [FCEV]) à hydrogène vert** n'émettent que de la vapeur d'eau (au point de combustion) en tant que sous-produit de la production d'électricité à partir de la réaction de la pile à combustible dans le moteur. Les FCEV peuvent être considérés comme une technologie carboneutre lorsque l'hydrogène est produit à partir de sources d'énergie non fossiles (hydrogène vert).

(4) Les **camions fonctionnant au gaz naturel renouvelable (GNR) comprimé** émettent des gaz d'échappement, mais ils peuvent être considérés comme carboneutres si la source en amont de la production du gaz provient de déchets (par opposition aux cultures destinées à la production de carburant ou la biomasse détournée d'autres utilisations). Sous ces conditions, la production et l'utilisation du GNR peuvent entraîner une réduction nette des émissions de méthane²⁵. Les installations de production de biocarburants offrent un impact neutre en carbone en recyclant et en réutilisant le gaz qui aurait été émis dans l'atmosphère, pouvant ainsi compenser les effets des émissions de GES.

²⁵ Cyr, T., Feldmann, J., Gasper, R., 2020. *Renewable Natural Gas as a Climate Strategy: Guidance for State Policymakers*, document de travail, World Resources Institute, <https://doi.org/10.46830/wriwp.19.00006>

TABLEAU 1. CARACTÉRISTIQUES DES TECHNOLOGIES CARBONEUTRES DE CLASSE 8

Technologie carboneutre	Caractéristiques principales
Batterie électrique²⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> Les chargeurs branchables sont utilisés pour fournir de l'énergie électrique qui est stockée dans les batteries à bord du véhicule. Les systèmes de contrôle de la puissance gèrent la décharge des batteries pour fournir de l'énergie électrique au système motopropulseur (ex., le(s) moteur(s) électrique(s) et les essieux moteurs). Les commandes de puissance gèrent également le freinage par récupération afin de récupérer l'énergie cinétique pendant le freinage et qui est convertie en énergie électrique et stockée dans les batteries du véhicule afin d'améliorer l'efficacité énergétique par rapport aux camions diesel.
Pile à combustible à hydrogène²⁷ 	<ul style="list-style-type: none"> Une station de ravitaillement en hydrogène fournit le carburant qui est stocké dans des réservoirs pressurisés à bord du véhicule. Le système de propulsion fonctionne lorsque l'hydrogène est libéré dans les piles à combustible par une réaction chimique qui produit de l'électricité, laquelle est stockée dans une petite batterie et se décharge pour alimenter le groupe motopropulseur électrique du véhicule (par exemple, les moteurs électriques, les essieux moteurs). L'efficacité des FCEV (environ 31 %) n'est que légèrement supérieure à celle des camions diesel (21 %) ²⁸.
Camion à caténaire²⁹ 	<ul style="list-style-type: none"> Les caténaires (lignes aériennes) fournissent de l'électricité directement aux camions équipés de pantographes déployables qui s'engagent et se désengagent automatiquement. En dehors des systèmes routiers électrifiés, les camions fonctionnent avec une petite batterie (comparativement aux BEV) pour permettre l'autonomie en cas de changement d'itinéraire ou de segments du premier ou du dernier kilomètre. Les camions à caténaires équipés d'une batterie offrent une utilisation de l'énergie parmi les plus efficaces (jusqu'à 76 %) par rapport au diesel, grâce à l'utilisation directe de l'électricité et à la recharge dynamique en cours de route qui élimine les temps d'arrêt liés à la recharge des BEV. ³⁰
Gaz naturel renouvelable comprimé³¹ 	<ul style="list-style-type: none"> Une station de ravitaillement en GNR comprimé fournit du carburant qui est stocké dans des réservoirs pressurisés à bord du véhicule. Le système de carburant régule la libération de la haute pression depuis les réservoirs de stockage, à travers les conduites de carburant pour l'injection dans le moteur à gaz naturel. Un système d'allumage par étincelles est utilisé pour brûler le gaz naturel et fournir de la puissance au système motopropulseur. Les fuites de méthane (du véhicule) sont plus importantes dans les camions au gaz naturel (3,6 à 6,3 g. éq. CO₂/mille) que dans les camions diesel (0,005 g. éq. CO₂/mille) ³². Des moteurs plus efficaces peuvent réduire les fuites, mais l'efficacité relative du moteur à injection directe à haute performance (HPDI) de 15 litres au gaz naturel reste inférieure d'environ 5,5 % à celle du diesel. ³³

²⁶ Bulk Transporter, 2020. *Peterbilt taking 579EV orders*, published on November 9, 2020, www.bulktransporter.com/equipment/article/21147170/peterbilt-taking-579ev-orders

²⁷ OEM, 2020. *Freudenberg Developing Fuel Cells for Heavy-Duty Trucks*, published on September 9, 2020, www.oemoffhighway.com/electronics/power-systems/press-release/21174522/freudenberg-nok-freudenberg-developing-fuel-cells-for-heavy-duty-trucks

²⁸ Siemens, 2017. *Climate Friendly Road Freight Factsheet – What's the best strategy for climate-friendly road freight transportation?*, PDF, <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:760942b4-5661-43c1-b9f8-079741d12e6e/smo-factsheet-road-freight-transport-ehighway.pdf>

²⁹ Electrical Review, 2020. *Think tank proposes railway-style catenary lines to power electric trucks*, published on July 29, 2020, <https://electricalreview.co.uk/2020/07/29/think-tank-proposes-railway-style-catenary-lines-to-power-electric-trucks/>

³⁰ Impulitti, J., Lehmann, M., 2019. *Electric Truck Pantograph Retrofit Project*, Final project report of the Clean Transportation Program prepared for the California Energy Commission by the South Coast Air Quality Management District, November 2019 | CEC-600-2019-059, p.51, www.energy.ca.gov/sites/default/files/2021-05/CEC-600-2019-059.pdf

³¹ Alternative Fuels Data Center, 2023. *How Do Compressed Natural Gas Class 8 Trucks Work?*, US Department of Energy – Energy Efficiency & Renewable Energy, web page accessed on August 1, 2023, <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-natural-gas-class-8-trucks-work>

³² Dominguez-Faus, R., 2017. *Climate, Energy Transition and the Use of Natural Gas in Freight Transportation: Pros and Cons*, Chair in Energy Sector Management webinar Series, https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2017/04/Dominguezfaus_HECMontreal_NGT_Final.pdf

³³ Dominguez-Faus, R., 2015. *The Carbon Intensity of NGV C8 Trucks*, UC Davis Institute of Transportation Studies, <https://steps.ucdavis.edu/wp-content/uploads/2017/05/Dominguezfaus-The-Carbon-Intensity-of-NGVS.pdf>

Défis technologiques, maturité et disponibilité

L'horizon temporel pour la commercialisation et le déploiement à grande échelle des technologies carboneutres est difficile à définir. De nombreux facteurs y contribuent. Toutefois, la difficulté d'obtenir des informations de la part des fabricants et des propriétaires de flottes, l'offre limitée de camions et d'essais au Canada et le manque d'infrastructures de ravitaillement en carburant ou de recharge sont les plus importants³⁴.

Au Canada, la mise en œuvre des efforts de décarbonation dans le secteur du camionnage commercial en est encore à ses débuts. Les premiers à l'adopter sont généralement de grands propriétaires de flottes bien financées et ayant accès à des capitaux³⁵. À l'heure actuelle, on ne sait pas quelle technologie - ou technologies - s'imposera sur le marché comme option préférable.

La fiabilité et le coût sont des facteurs clés dans la décision d'adopter ou non une nouvelle technologie. Les camions carboneutres dotés de composants plus simples et plus faciles à entretenir, sont également privilégiés. Le secteur du transport routier hésite à adopter une nouvelle technologie en l'absence d'une analyse de rentabilité viable ou de politiques réglementaires favorisant l'adoption. L'attitude attentiste de l'industrie conduit à une « course à la deuxième place » - une tendance à être le deuxième à adopter une nouvelle technologie pour réduire les risques et apprendre des premiers adoptants (voir les exemples à l'annexe 2).

Les pionniers du marché américain sont susceptibles d'influencer l'orientation de la technologie au Canada, car les commandes importantes passées par les opérateurs de flottes privées, tels qu'Amazon et Walmart, permettent d'augmenter la production de véhicules en offrant plus de certitude aux constructeurs de camions.

Chaque option technologique a ses forces et faiblesses. Toutefois, pour atteindre les objectifs de carboneutralité d'ici 2050, il ne suffit pas qu'une technologie soit disponible, il faut aussi qu'elle soit évolutive. La définition de la solution la plus efficace pour une flotte donnée dépend de multiples facteurs, notamment la distance moyenne des opérations et le cycle d'utilisation, l'état du marché, l'efficacité des ressources, la résilience et les capacités des chaînes d'approvisionnement et de l'infrastructure, la flexibilité, les coûts d'investissement et d'exploitation, ainsi que les valeurs, les objectifs et la formation de l'utilisateur final.

L'efficacité énergétique sera également un facteur important à prendre en compte dans le processus décisionnel, étant donné la concurrence des utilisations des carburants de substitution et de l'électricité dans d'autres secteurs (ex., l'industrie, le secteur maritime, l'aviation, la construction, le transport de passagers). Chaque technologie carboneutre aura des rendements différents qui peuvent avoir un impact sur la demande globale d'énergie associée à l'utilisation des carburants de substitution et de l'électricité³⁶ (voir le graphique 4).

Les conditions hivernales froides impliquent également une plus grande consommation d'énergie en raison de la résistance plus élevée et du chauffage des cabines. Cependant, les impacts peuvent être gérés lorsqu'ils sont planifiés dans les opérations logistiques. Les camions peuvent également être soumis à des limitations de charge afin de réduire la détérioration des routes. Les différences de limites de charge entre les juridictions peuvent avoir un impact sur l'optimisation du facteur de charge et le déploiement de la technologie carboneutre.

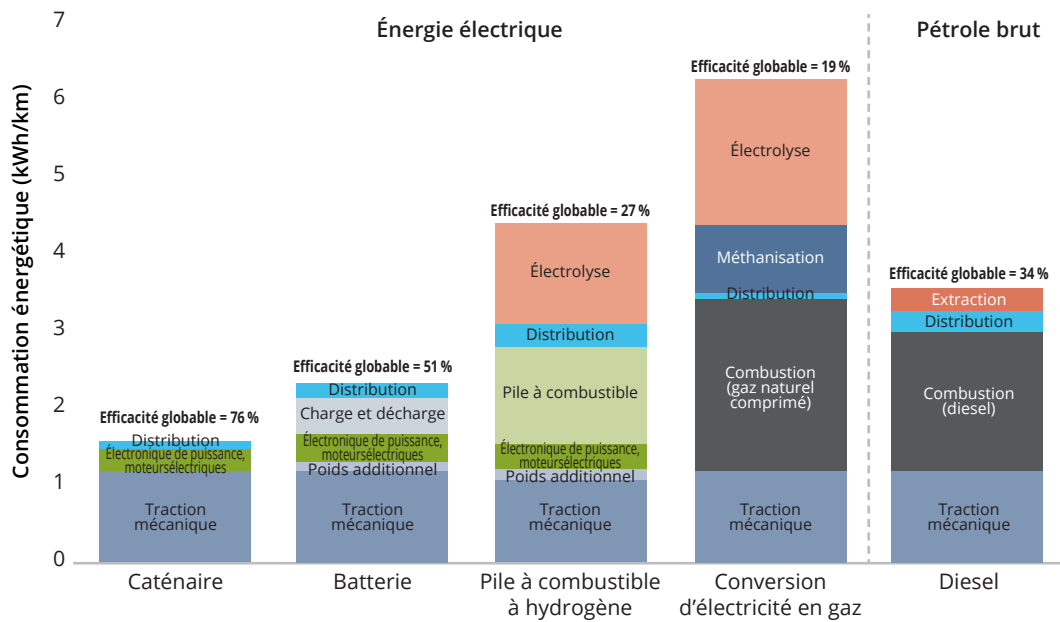
Les facteurs suivants peuvent avoir un impact sur le niveau de maturité et la viabilité des différentes technologies carboneutres envisagées dans cette étude.

³⁴ Whitmore, J., Pineau, P.-O., Roberts, N., 2023.

³⁵ Institut Pembina, 2022. *In-person Workshop to inform an MHDV Strategy*, www.pembina.org/event/toronto-person-workshop-inform-mhdv-strategy

³⁶ Impulitti, J., Lehmann, M., 2019. *Electric Truck Pantograph Retrofit Project*, rapport de projet final du Clean Transportation Program préparé pour la California Energy Commission par le South Coast Air Quality Management District, novembre 2019 | CEC-600-2019-059, www.energy.ca.gov/sites/default/files/2021-05/CEC-600-2019-059.pdf

GRAPHIQUE 4. COMPARAISON DE L'EFFICACITÉ DU « PUIXS À LA ROUE » DE DIVERS SYSTÈMES DE PROPULSION DE CAMION



Source : Graphique 36 dans Impulitti et Lehmann, 2019 [p.51]. (Graphique original de Siemens AG Deutschland).

Camions roulant au gaz naturel renouvelable comprimé

L'utilisation du gaz naturel comprimé dans les flottes de camions est une technologie relativement mûre, les premiers à l'avoir adoptée, comme le Groupe Robert, ayant fait l'expérience de l'exploitation de ces camions sur les routes entre les villes de Québec et Toronto au cours de la dernière décennie. À cet égard, il n'y aurait pas de courbe d'adoption significative pour passer au GNR en tant que carburant carboneutre si celui-ci est produit à partir de sources durables et rendu plus largement disponible. Les émissions de méthane du véhicule sont plus élevées dans les camions au gaz naturel que dans les camions au diesel³⁷. Un nouveau moteur 15L de Cummins peut réduire les fuites et répondre à certaines critiques concernant la puissance inférieure des anciens modèles de camions au gaz naturel³⁸. Toutefois, on estime que l'efficacité relative du moteur HPDI au gaz naturel demeure inférieure à environ 5,5 % comparativement à celle d'un moteur diesel³⁹.

Il existe 281 projets de production de GNR en Amérique du Nord, dont 180 sont en construction alors que 296 autres sont en planification. L'offre de GNR produit de manière durable (c'est-à-dire à partir de déchets et sans détourner la biomasse d'autres usages) est limitée⁴⁰ par rapport au gaz conventionnel, mais peut augmenter avec les nouveaux sites de production, au fur et à mesure qu'ils deviendront opérationnels. Le gouvernement du Québec a fixé une exigence minimale de 10 % de la distribution de gaz de la province d'ici 2030. En 2023, le GNR représentait environ 2 % du réseau gazier québécois. Les sites de production les plus importants sont les décharges industrielles. Cependant, plus de 85 % du GNR produit au Québec est exporté vers les États-Unis en raison de conditions de marché plus favorables⁴¹.

³⁷ Dominguez-Faus, R., 2017. *Climat, transition énergétique et utilisation du gaz naturel dans le transport de marchandises : Pros and Cons*, Chair in Energy Sector Management webinar Series», https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2017/04/Dominguezfaus_HECMontreal_NGT_Final.pdf

³⁸ Cummins a déjà livré un camion GNC 15L au Groupe Robert et testera le véhicule en 2023, selon la communication du Groupe Robert sur LinkedIn, www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7082370275798872066/

³⁹ Dominguez-Faus, R., 2015. *The Carbon Intensity of NGV C8 Trucks*, UC Davis Institute of Transportation Studies, <https://steps.ucdavis.edu/wp-content/uploads/2017/05/Dominguezfaus-The-Carbon-Intensity-of-NGVS.pdf>

⁴⁰ Dagher, R., et coll., 2023. *Biomasse et carboneutralité : Élaboration d'une grille d'évaluation – État des lieux au Canada*, Institut énergie Trottier et L'Accélérateur de la transition, <https://iet.polymtl.ca/biomasse-et-carboneutralite/>

⁴¹ Whitmore, J., Pineau, P.-O., 2023. *État de l'énergie au Québec 2023*, Chaire en gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal, préparé pour le gouvernement du Québec, <https://energie.hec.ca/eeq/>

L'infrastructure d'approvisionnement entre les villes de Québec et Windsor compte 13 stations GNC d'accès public, avec une distance maximale entre les stations de 250 km. Seulement six de ces stations proposent du GNR⁴². Selon la disponibilité des approvisionnements, toutes pourraient potentiellement proposer l'achat de GNR si elles étaient soutenues par une demande de la part des clients de flotte de camion ou si le gouvernement exigeait que les stations proposent du GNR dans les stations de gaz naturel.

Camions électriques à caténaire

Les camions électriques à caténaire n'ont pas encore été testés sur les routes canadiennes. Cependant, la technologie est déjà mature dans d'autres applications de transport (ex., les tramways, les trains légers et les trains de voyageurs régionaux électrifiés). Il existe plusieurs déploiements pilotes réussis de camions à caténaires en Europe, et un en Californie dans le cadre du *Clean Transportation Program*⁴³. En Suède, Siemens et Scania se sont associés sur une autoroute électronique de 2 km au nord de Stockholm pour tester des camions caténaires diesel-hybride électrique⁴⁴. L'Allemagne teste la technologie sur un segment de 10 km de l'autoroute A5 près de Francfort avec des camions à caténaires hybrides diesel⁴⁵ et, au Royaume-Uni, le ministère des Transports (DfT) envisage de tester des systèmes routiers électriques sur un tronçon de 20 km près de Scunthorpe⁴⁶.

La technologie offre l'avantage de réduire la taille, le poids, le coût et le temps de recharge des batteries par rapport aux camions à batterie (BEV). Elle est plus efficace sur le plan énergétique que les autres modes de propulsion, car elle nécessite moins d'énergie par kilomètre et évite les pertes d'énergie dans le cycle de charge de la batterie.

Certaines caractéristiques de conception de l'infrastructure caténaire, largement utilisée pour le rail, doivent être adaptées aux applications de transport routier longue distance. Les applications ferroviaires bénéficient d'une voie de guidage fixe, tandis que les camions peuvent se déplacer plus librement (ex., changer de voie) et dépendent de l'opérateur pour maintenir la position du camion sous les fils de contact aériens. Cela peut augmenter le risque d'endommagement et d'usure de la caténaire. Pour atténuer ces risques, des systèmes de « géofencing » sont utilisés pour suivre la position du camion et s'assurer que le pantographe n'est levé que lorsque le camion est positionné sous les fils de contact. Les camions sont également équipés d'un système d'aide au maintien de la trajectoire pour aider le conducteur à maintenir la position latérale du camion sous la caténaire. Les pantographes sont également équipés de différents types de capteurs (ex., de position et de tension) pour mesurer leur comportement de contact et leur position par rapport aux caténaires. Par exemple, si les forces de contact sont en dehors d'une plage spécifiée ou si les bandes de carbone du pantographe sont usées en dessous d'un certain niveau d'acceptation, le système détectera cette usure et le pantographe se rétractera automatiquement.

Les lignes aériennes fonctionnent également à une tension plus élevée (environ 600 V) afin de minimiser les pertes d'énergie sur de longues distances, ce qui pose des problèmes de sécurité lorsque les lignes passent au-dessus des voies publiques. Pour résoudre ce problème, la détection des ruptures de fils et un système automatique de mise à la terre peuvent être mis en œuvre pour éviter l'exposition accidentelle à la haute tension. En Allemagne, les services d'urgence sont formés pour intervenir en cas d'incident à proximité des caténaires, de la même manière qu'en cas d'incident avec un métro léger, un trolleybus ou d'autres systèmes de

⁴² RNCAN, 2023. *Localisateur de stations de recharge et de stations de ravitaillement en carburants de remplacement*, page web consultée le 4 août 2023, https://natural-resources.canada.ca/energy-efficiency/transportation-alternative-fuels/electric-charging-alternative-fuelling-stationslocator-map/20487#/analyze?fuel=CNG&cng_vehicle_class=HD&show_map=true&cng_psis=3600&country=CA&cng_fill_type=Q&cng_has_rng=true

⁴³ Impulitti, J., Lehmann, M., 2019. *Electric Truck Pantograph Retrofit Project*, rapport de projet final du Clean Transportation Program préparé pour la California Energy Commission par le South Coast Air Quality Management District, novembre 2019 | CEC-600-2019-059, www.energy.ca.gov/sites/default/files/2021-05/CEC-600-2019-059.pdf.

⁴⁴ Siemens, 2016. *World's first eHighway opens in Sweden*, Communiqué de presse, publié le 22 juin 2016, <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/worlds-first-ehighway-opens-sweden#:~:text=For%20the%20next%20two%20years%2C%20a%20Siemens%20catenary,with%20Siemens%2C%20to%20operate%20under%20the%20catenary%20system.>

⁴⁵ Kane, M., 2020. *Germany: A5 Autobahn Gets Catenary Overhead Lines For xEV Trucks*, InsideEVs, publié le 22 août 2020, <https://insideevs.com/news/440388/germany-a5-autobahn-catenary-overhead-lines-trucks/>

⁴⁶ Commercial Fleet, 2021. *UK 'electric road' study part of £20m electric truck trials*, publié le 27 juillet 2023, www.commercialfleet.org/news/truck-news/2021/07/27/uk-road-to-be-electrified-in-20m-electric-truck-trials

transport électrifiés. En général, les aspects de sécurité et les mesures d'atténuation concernant les systèmes de caténaires sont bien compris et pris en compte⁴⁷.

La glace sur les caténaires peut provoquer des arcs électriques (saut d'électricité entre le pantographe et la caténaire), mais les mesures de dégivrage sont considérées comme matures étant donné que la technologie a plus d'un siècle d'utilisation et d'expérience dans les climats froids.

Camions électriques à batterie

Les camions électriques à batterie gagnent du terrain en s'imposant comme des alternatives viables pour les trajets de courte distance avec retour à la base (ex., le transport de marchandises et le service de premier/dernier kilomètre). Pour les transports longue distance, le poids de la batterie sera un facteur limitant, car il réduit la capacité de charge. Le temps de charge (max. 350 kW) est plus long que pour les autres propulsions, et l'autonomie est inférieure à 500 km. Les entreprises de transport et de logistique (T&L) et les flottes privées s'orientent toutes deux dans cette direction. Des fabricants tels que Tesla, Freightliner et Peterbilt s'efforcent d'améliorer l'autonomie et le temps de charge.

Les charges exploitées par les flottes représentent un coût élevé, mais offrent de meilleures possibilités de gestion de l'exploitation des BEV pour la recharge. Des entreprises en démarrage, des projets pilotes et des centres de stations partagées sont également en cours de déploiement. Toutefois, pour que les camions BEV soient utilisés dans le transport longue distance, il faudra déployer des stations de recharge d'accès public et les placer stratégiquement là où les activités de camionnage se croisent avec les activités de recharge afin de garantir que l'offre puisse répondre à la demande.⁴⁸ Pour les systèmes de recharge par mégawatt⁴⁹, les camions devront supporter des tensions (1 500 V) et des courants plus élevés que ceux actuellement disponibles. Des normes transfrontalières seront nécessaires pour ces infrastructures de recharge. Le *corridor de carburants alternatifs entre le Canada et les États-Unis*, récemment annoncé, qui vise à installer des infrastructures de recharge pour VE à tous les 80 km, pourrait accélérer les possibilités d'électrification des camions de classe 8.

Les défis technologiques dans le contexte des climats froids sont considérés comme gérables (à des températures supérieures à -20° C) lorsqu'ils sont planifiés dans les opérations logistiques. Cependant, les conditions hivernales très froides peuvent entraîner une consommation d'énergie plus élevée (environ 20 %) en raison de la résistance à l'air plus importante et du chauffage de la cabine. Ces problèmes peuvent être résolus si le véhicule est branché sur un chargeur au dépôt afin de maintenir la température de la batterie avant son utilisation.

Par rapport aux camions diesel, certains paramètres des BEV ont déjà atteint la parité (par exemple, la sécurité, les diagnostics à distance), tandis que la plupart devraient être atteints d'ici 2025-2030. La parité pour le coût initial, le temps de ravitaillement/recharge et la maturité globale seront atteints à plus long terme. Plusieurs propriétaires de parcs de véhicules, tels que Loblaw's et Kruger Energy, ont déjà testé des modèles au Québec et ont fait des dépôts pour des camions supplémentaires (voir l'annexe 2).

En août 2023, le gouvernement fédéral a annoncé qu'il investira 1,5 million de dollars pour établir un banc d'essai de camionnage zéro émission dans la région de Montréal. Le projet, lancé avec FPInnovations, représente le plus important des investissements visant à soutenir les travaux sur les applications routières des véhicules moyens et lourds dans le cadre du Programme de camionnage zéro émission. Il se concentrera sur la collecte de données de performance en conditions réelles d'au moins cinq véhicules électriques à batterie exploités par un

⁴⁷ Siemens, 2023. Communication personnelle par courrier électronique, 10 juillet 2023

⁴⁸ Dimatulac, T., et al, 2023. *Modeling the Grid Impact of Long Haul Electric Vehicles (LHEVs) in Ontario*, Carbon Free Corridor, University of Windsor, présentation du 25 avril 2023, https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2023/04/12-VANI-UW_PPT.pdf

⁴⁹ Kane, M., 2022. *CharIN Launches Megawatt Charging System (MCS) In North America*, InsideEVs, publié le 19 octobre 2022, <https://insideevs.com/news/617089/charin-megawatt-charging-system-north-america/>

minimum de trois flottes entre mars 2024 et mars 2025. Le projet instrumentera et surveillera la façon dont les camions de classe 8 à batterie électrique se comportent dans des conditions réelles par rapport aux camions à moteur diesel effectuant un travail similaire sur les mêmes itinéraires. Le rapport final sera remis en mars 2025⁵⁰.

Camions à pile à combustible à hydrogène

Les camions à pile à hydrogène offrent l'avantage d'une plus grande autonomie que les BEV. Toutefois, leur adoption n'en est qu'à ses débuts, la disponibilité des véhicules et des carburants verts à base d'hydrogène étant limitée. Il n'existe qu'une seule station d'accès public offrant de l'hydrogène à proximité du corridor A20-H401, située dans la ville de Québec. Une station non commerciale, accessible uniquement à un certain nombre de clients, se trouve à Mississauga, en Ontario⁵¹.

La technologie de production d'hydrogène vert existe, mais elle ne représente qu'une très petite partie de la production mondiale d'hydrogène (moins de 1 %, le reste étant principalement produit à partir de combustibles fossiles). Le coût de production varie considérablement en fonction du processus de production, et sa distribution constitue un défi en raison de sa faible densité énergétique par volume. Il est très léger par rapport aux autres combustibles. Comme le gaz naturel, l'hydrogène peut être comprimé ou liquéfié pour augmenter sa densité énergétique volumétrique, mais même liquéfié, sa densité (8,74 MJ par litre) est environ quatre fois inférieure à celle du diesel et deux fois moins élevée que celle du gaz naturel liquéfié. Pour liquéfier l'hydrogène, sa température doit être abaissée à -253°C, ce qui nécessite plus d'énergie et des coûts supplémentaires que le gaz naturel, qui se liquéfie à des températures de -162°C⁵².

La contribution de l'hydrogène à la décarbonation du transport routier longue distance dépendra des innovations et des compromis qui seront faits entre l'efficacité énergétique globale, les coûts et la logistique liés à la recharge des véhicules. Le programme *Alberta Zero Emissions Truck Electrification Collaboration* (AZETEC) est à ce jour le seul projet pilote canadien de camions à émissions nulles sur de longues distances. Il existe toutefois des projets pilotes notables ailleurs en Amérique du Nord. La Californie avance à grands pas dans cette direction avec plusieurs projets de démonstration à plus grande échelle. À l'heure actuelle, seuls quelques prototypes et preuves de concept de FCEV sont disponibles et il n'y a pas encore de commercialisation à grande échelle.

Des avancements ont été réalisés dans le développement de l'infrastructure nécessaire pour fournir le carburant ou l'électricité aux technologies carboneutres mentionnées ci-dessus, ainsi que des déploiements pilotes à petite échelle dans des flottes de camions commerciaux. Les premiers utilisateurs ont surtout déployé des camions à hydrogène sur des trajets courts.

⁵⁰ Smith, J., 2023. « \$3 million invested in zero-emission trucking projects including new testbed », *Truck News*, publié le 31 août 2023, www.trucknews.com/sustainability/3-million-invested-in-zero-emission-trucking-projects-including-new-testbed/1003177774/

⁵¹ RNCAN, 2023. *Electric Charging and Alternative Fuelling Stations Locator*, page web consultée le 45 août 2023.

⁵² Whitmore, J., Pineau, P.-O., 2023. *État de l'énergie au Québec 2023*, Chaire en gestion du secteur de l'énergie. HEC Montréal.

Modèle et méthodologie

Approche de la modélisation

Notre modèle permet de simuler les technologies carboneutres sur le corridor A20-H401, dans sa plus grande étendue possible de Rivière-du-Loup dans la province de Québec jusqu'à Windsor à la frontière entre l'Ontario et les États-Unis. Il est basé sur un modèle coûts-avantages en Excel et s'appuie sur des données réelles de flux de camions extraites d'un système d'information géographique (SIG). La méthodologie de modélisation s'appuie sur une analyse antérieure de la technologie caténaire diesel-hybride pour les camions de classe 8 sur le même corridor, réalisée par CPCS et HEC Montréal⁵³.

L'ensemble de l'itinéraire étudié a été divisé en huit segments, comme illustré au tableau 2 ci-dessous (voir aussi le graphique 3).

TABEAU 2. SEGMENTS D'AUTOROUTE DU CORRIDOR A20-H401 UTILISÉS DANS LA SIMULATION

Segment d'autoroute	Longueur (km)
1. Windsor – Toronto	321
2. Toronto (zone urbaine)	97
3. Toronto – Prescott	288
4. Prescott – Montréal	146
5. Montréal (agglomération)	72
6. Montréal – Québec	215
8. Québec City (agglomération)	38
9. Québec – Rivière-du-Loup	167

Source : Distances à partir de Google Maps

Le simulateur calcule, pour chaque année sur un horizon de 30 ans, les coûts de chaque technologie carboneutre par rapport à un scénario de référence « statu quo » dans lequel le parc de camion resterait entièrement propulsé au diesel. La simulation prend en compte les éléments suivants :

- Dépenses d'investissement et d'exploitation (CAPEX et OPEX) pour les camions de classe 8 sans émissions;
- Économies de carburant par rapport aux camions diesel;
- Réduction des coûts d'entretien par rapport aux camions diesel;
- Dépenses d'investissement et d'exploitation (CAPEX et OPEX) pour les infrastructures de recharge et de ravitaillement;
- Émissions de GES évitées (calculées selon le système fédéral de tarification du carbone), par rapport aux camions diesel.

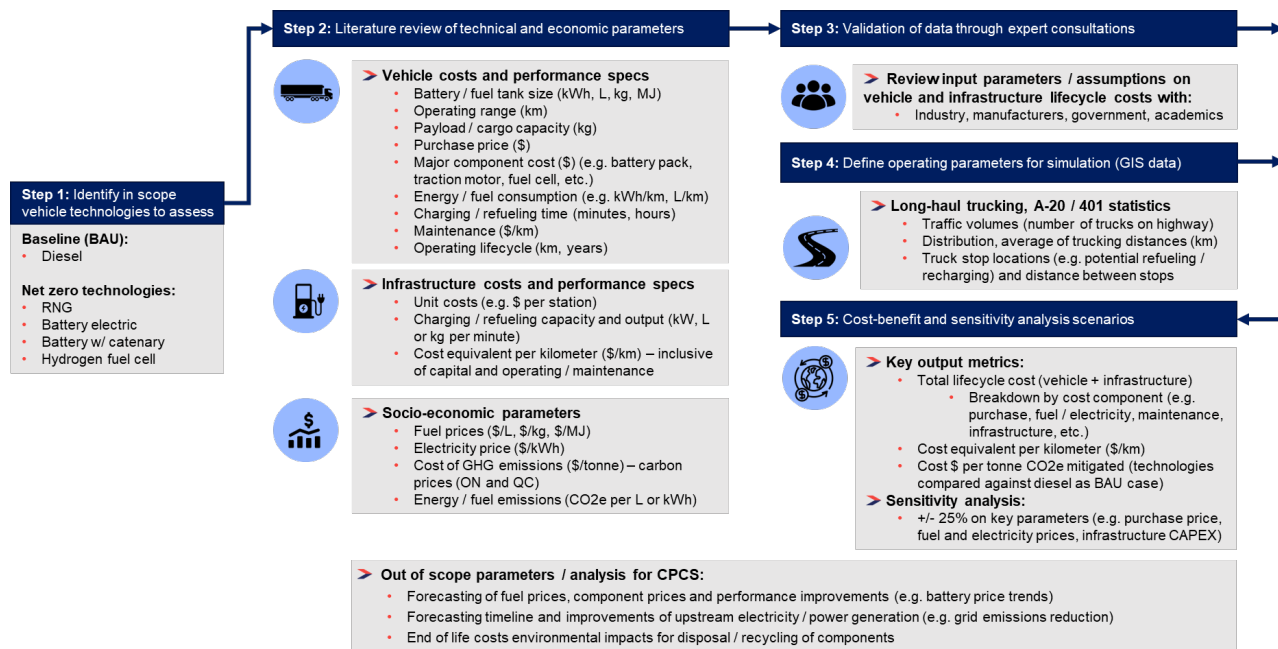
⁵³ Kayser-Bril, C., Ba, R., Whitmore, J., Kinjarapu, A., 2021. *Decarbonization of long-haul trucking in Eastern Canada : Simulation of the e-Highway technology*, CPCS et Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal, <https://energie.hec.ca/canada-ehighway/>

Les technologies carboneutres de la classe 8 sont analysées selon deux scénarios :

1. **Scénario de statu quo** dans lequel tous les camions demeurent au diesel jusqu'en 2050;
2. **Scénario de transition carboneutre** dans lequel tous les camions passent à un parc carboneutre entièrement homogène d'ici à 2050, en suivant les scénarios d'adoption du parc et l'échelonnement supposé des infrastructures détaillées dans la section « *Données et hypothèses* » ci-dessous. Des scénarios distincts sont élaborés pour l'adoption de chacune des technologies suivantes : (1) BEV; (2) FCEV; (3) OCT; (4) RNG.

Le graphique 5 donne un aperçu de l'approche de modélisation, des paramètres pris en compte et des éléments hors champ. Les limites sont décrites dans une section distincte ci-dessous.

GRAPHIQUE 5. RÉSUMÉ DE L'APPROCHE DE MODÉLISATION



Source : CPCS, 2023.

Portée et limites de l'analyse

Les éléments suivants n'entrent pas dans le champ d'analyse de la modélisation, mais sont importants pour une vision systémique et pourraient être inclus dans de futures études.

1. Analyse des itinéraires supplémentaires (routes / autoroutes) reliant le corridor A20-H401.

La présente étude porte exclusivement sur l'A20-H401. Une analyse plus poussée pourrait inclure l'élargissement du champ d'application au-delà du corridor afin de mieux comprendre une perspective plus systémique sur les paires origine-destination du camionnage long-courrier dans l'ensemble de l'Ontario, du Québec et au-delà de la frontière avec les États-Unis. Cela permettrait d'approfondir l'analyse sur la manière dont l'infrastructure énergétique pourrait être mise en place au Canada et aux États-Unis pour soutenir le camionnage longue distance à zéro émission (par exemple, les paires origine-destination et les possibilités d'implanter au mieux les infrastructures de recharge ou de ravitaillement, y compris en dehors du corridor, pour soutenir l'exploitation des itinéraires de camionnage longue distance).

- 2. Impact du poids des véhicules sur l'entretien des routes.** Les BEV sont généralement plus lourds que les véhicules à moteur à combustion comparables. L'exploitation de camions BEV plus lourds aura un impact direct sur le coût de l'entretien des routes, qui augmente d'une puissance de quatre (x^4) en fonction du poids du véhicule.⁵⁴ Dans le prolongement de cette étude, l'impact du coût des BEV sur l'entretien des routes pourrait être étudié plus avant et modélisé dans l'analyse.
- 3. Avantages supplémentaires liés à l'atténuation des polluants atmosphériques.** La présente étude porte sur la quantification des avantages de l'atténuation des émissions de dioxyde de carbone et de GES équivalents (CO_2 e). Une analyse plus poussée pourrait explorer les avantages de l'atténuation des polluants atmosphériques tels que les particules (PM), les oxydes d'azote (NOx) et autres, en établissant un lien entre la qualité de l'air et la santé respiratoire.
- 4. Coûts et considérations liés à la fin de vie.** La présente étude n'examine pas les options, la faisabilité et les coûts associés à la fin de vie des véhicules et des infrastructures (par exemple, l'élimination ou le recyclage des batteries lithium-ion). Plusieurs technologies émergentes qui ciblent les considérations de fin de vie pour les nouvelles technologies à zéro émission, mais les données sur les coûts et les démonstrations de faisabilité sont actuellement limitées.
- 5. Disponibilité de l'approvisionnement en énergie renouvelable.** Cette étude part du principe qu'il pourrait y avoir suffisamment de GNR, d'hydrogène vert et d'électricité renouvelable pour répondre à la demande d'énergie de tous les camions longue distance de classe 8 circulant sur le corridor. Une analyse plus poussée pourrait envisager un examen plus approfondi des contraintes en matière de production et d'approvisionnement en énergie (ex., l'offre d'énergie renouvelable est-elle suffisante ? Ou comment la demande d'énergie pour le camionnage longue distance serait-elle en concurrence avec les demandes au sein du secteur des transports, comme l'aviation et la marine, et avec d'autres secteurs).
- 6. Prévision des prix de l'énergie.** Cette étude utilise les prix actuels de l'énergie et s'appuie sur une analyse de sensibilité des paramètres clés de l'analyse (y compris les prix de l'énergie) pour examiner comment les changements de prix peuvent avoir un impact sur la viabilité économique globale des différentes technologies. Une autre approche consisterait à établir une prévision détaillée des prix de l'énergie. Cependant, les prix de l'énergie sont volatils et il est donc difficile d'établir des prévisions précises à long terme.
- 7. Prévision des prix des composants et des améliorations des performances.** Cette étude utilise les coûts actuels des véhicules et des infrastructures et suit la même approche qu'une analyse de sensibilité (comme indiqué ci-dessus pour les prix de l'énergie) pour évaluer l'impact des futurs changements de prix des composants ou des améliorations des performances (par exemple, une baisse des prix des batteries ou des piles à combustible) sur les résultats et la viabilité économique globale des différentes technologies. Une autre approche consisterait à élaborer une prévision détaillée à long terme des prix des composants. Toutefois, compte tenu du stade précoce de maturité technologique et de la gamme des prix actuels disponibles (par exemple, les camions BEV d'une autonomie de 800 km (500 miles) coûtent entre 350 000 et 622 000 dollars)⁵⁵, il n'existe pas d'année de référence solide pour établir des prévisions détaillées à long terme.
- 8. Analyse détaillée des types d'infrastructures et des coûts.** Cette étude comprend une évaluation de haut niveau des coûts des infrastructures, basée sur l'échelonnement des estimations des coûts de référence en fonction de la demande totale d'énergie. Il existe une large gamme d'estimations de coûts pour certaines infrastructures en raison de la variation de la technologie. Par exemple, les stations de ravitaillement en hydrogène peuvent être construites pour produire de l'hydrogène sur place

⁵⁴ La quatrième loi de puissance a été établie par l'American Association of State Highway Officials entre 1958 et 1961 (Highway Research Board 1962).

⁵⁵ ICCT, 2022. *A meta-study of purchase costs for zero-emission trucks*, <https://theicct.org/publication/purchase-cost-zero-trucks-feb22/#> :- :text=Cette étude revoit la littérature sur le coût de l'autonomie comme fonction de la capacité totale de la batterie

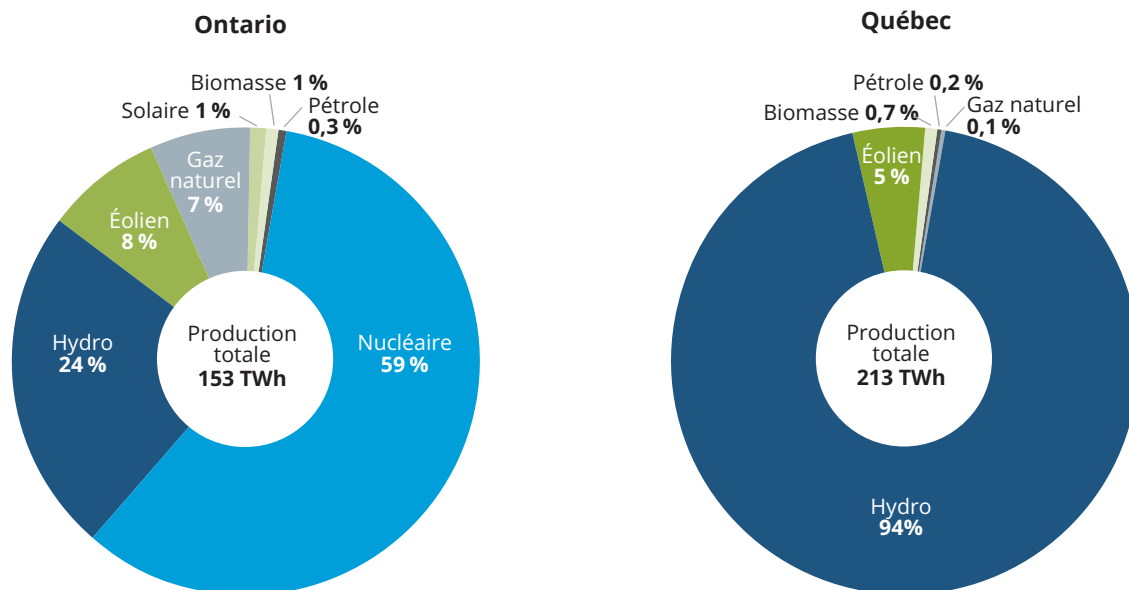
par électrolyse avec une source d'énergie renouvelable ou recevoir l'hydrogène «vert» d'une source extérieure (par exemple, livré à la station de ravitaillement par camion dans une remorque à tubes gazeux comprimés ou une remorque de ravitaillement en hydrogène liquéfié, ou fourni par pipeline).

Comme l'infrastructure de ravitaillement en hydrogène au Canada n'en est qu'à ses débuts, on ne sait pas exactement quel pourrait être le mode prédominant d'approvisionnement en hydrogène «vert» le long du corridor A20-H401. En outre, il pourrait y avoir un mélange de différents types de stations de ravitaillement le long du corridor (à déterminer), ce qui influencerait l'estimation des coûts. Actuellement, il existe une station publique de ravitaillement en hydrogène sur le territoire de la ville de Québec et aucune en Ontario⁵⁶.

9. Coûts et émissions de GES associés à l'énergie en amont. La présente étude ne tient pas compte du coût de l'infrastructure de transport et de distribution (T&D) en amont qui sera nécessaire pour transférer l'énergie du point de production/génération au site de ravitaillement ou de recharge. Il s'agit notamment de tout réseau de distribution par pipeline pour l'hydrogène et/ou le GNR, ainsi que de toute mise à niveau du réseau électrique T&D pour alimenter les stations de recharge rapide ou les lignes caténaies. Les avantages des améliorations apportées à l'infrastructure T&D en amont profiteront probablement à de multiples parties prenantes (et pas seulement aux exploitants de flottes de camions). Il peut donc s'avérer difficile : a) d'évaluer le coût de cette infrastructure et b) d'attribuer avec précision une partie de ce coût au champ d'application de la présente analyse. La portée de cette analyse est limitée à l'infrastructure au point de chargement et ravitaillement qui sera construite directement au profit de la flotte de camions.

10. La trajectoire de décarbonation de la production d'électricité. En outre, cette étude ne prévoit pas la trajectoire de décarbonation de l'ensemble de la production d'électricité en Ontario et au Québec. Toutefois, la production d'électricité en Ontario et au Québec est en grande partie non émettrice⁵⁷ (voir le graphique 6).

GRAPHIQUE 6. PROFILS DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN ONTARIO ET AU QUÉBEC



Source : Régulateur de l'énergie du Canada, 2021.

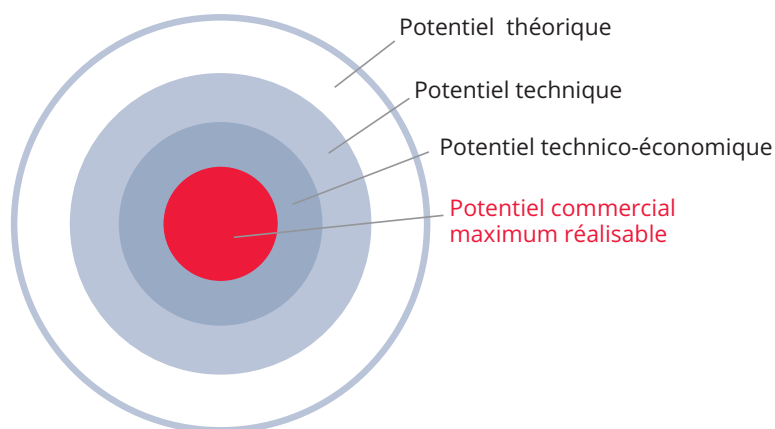
⁵⁶ Ressources naturelles Canada, 2022. *Localisateur de stations de recharge électrique et de carburants alternatifs*, <https://natural-resources.canada.ca/energy-efficiency/transportation-alternative-fuels/electric-charging-alternative-fuelling-stationslocator-map/20487#/find/nearest?fuel=HY>

⁵⁷ Régulateur de l'énergie du Canada, 2021. *Profils énergétiques provinciaux et territoriaux*, <https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/energy-markets/provincial-territorial-energy-profiles/provincial-territorial-energy-profiles-ontario.html>

11. Autres facteurs en amont de la chaîne d’approvisionnement énergétique. Cette étude n’évalue pas d’autres éléments de la chaîne d’approvisionnement énergétique, qui pourraient être importants pour fournir une perspective plus holistique de la durabilité des différentes technologies carboneutres. Il s’agit notamment de la chaîne d’approvisionnement en minéraux essentiels pour les batteries des véhicules électriques, de l’utilisation des terres pour la production d’électricité renouvelable (par exemple, les parcs solaires et éoliens) et de la production de biocarburants.

12. Potentiel commercial maximum réalisable. L’analyse n’évalue que le potentiel techno-économique, c’est-à-dire la partie du potentiel technique pour laquelle les coûts d’exploitation et d’infrastructure de la technologie carboneutre la rendent économiquement viable pour les exploitants dans les conditions de prix actuelles, avant de prendre en considération tout obstacle à l’adoption, à l’approvisionnement en énergie ou au marché (voir graphique 6-1). D’autres études devront analyser le « potentiel commercial maximum réalisable », qui tient compte de facteurs de marché supplémentaires, notamment les prix et la disponibilité de l’offre des carburants carboneutres, la concurrence pour l’utilisation finale de ces carburants et de l’électricité propre, le degré d’intervention des pouvoirs publics et la tarification du carbone.

GRAPHIQUE 6-1. LIMITES DE L’ÉVALUATION DES CAMIONS CARBONEUTRES



Source : graphique basé sur J. Harvey Consultant et Associés, 2017.

Sources de données et hypothèses

CPCS et la Chaire ont collaboré à une revue de littérature approfondie de la documentation afin de consolider les paramètres de modélisation et ont mené un exercice de validation de ces paramètres dans le cadre d’ateliers interactifs organisés du 25 au 27 avril 2023 avec des experts de l’industrie, du gouvernement et du milieu universitaire⁵⁸. La section suivante présente un aperçu des sources de données et des hypothèses utilisées dans les simulations.

Flux de camions

La simulation est basée sur les flux de poids lourds de classe 8 effectuant des trajets longue distance sur le corridor A20-H401. Des informations spécifiques et actualisées n’étant pas directement disponibles à partir des sources de données existantes, nous avons développé une méthodologie pour parvenir à une estimation précise, détaillée dans les paragraphes suivants.

⁵⁸ Whitmore, J., P.-O. Pineau, P.-O., Roberts, N. 2023. *Décarbonation du camionnage longue distance dans l’est du Canada : Partie 1 - Synthèse de l’atelier des 25, 26 et 27 avril 2023*, préparé par la Chaire en gestion du secteur de l’énergie - HEC Montréal pour le gouvernement du Québec, <https://energie.hec.ca/decarbonizing-long-haul-trucking-in-eastern-canada/>

Notre analyse porte sur les camions de classe 8 qui effectuent des trajets longue distance dans le corridor entre les villes de Québec et Windsor. Il s'agit d'une distinction importante, en particulier dans les zones urbaines immédiates entourant Toronto, Montréal et Québec, car dans ces centres, de nombreux camions de classe 8 effectuent des trajets de courte distance.

Les informations sur le trafic de camions ont été obtenues auprès du ministère des Transports de l'Ontario (MTO) et du ministère des Transports et de la mobilité durable du Québec (MTMDQ) par le biais de leurs portails de données ouverts. Le MTO et le MTMDQ fournissent tous deux des informations sur le trafic journalier annuel moyen et la part modale des camions sur leurs autoroutes respectives (voir le tableau 3).

Nous avons supposé que pour chaque segment, le débit journalier moyen annuel (DJMA) de camions vers le milieu du segment (loin de tout centre de population important) serait représentatif des camions long-courriers pour toute la longueur du segment. Cependant, les DJMA camions du MTO et du MTMDQ définissent les véhicules lourds comme des véhicules transportant des biens et des personnes et incluent les véhicules de plus de 4 500 kg dans leurs rapports sur les DJMA camions. Il s'agit généralement de véhicules appartenant à la classe 3 et plus, qui comprend les camions légers, moyens et lourds, ainsi que les autobus.

Pour ne retenir que les classes 8 et supérieures, nous nous sommes tournés vers des corridors similaires en Amérique du Nord pour lesquels un comptage plus granulaire des camions est disponible. Nous avons constaté que, loin de tout centre de population important, la part des poids lourds est relativement stable et varie entre 66 % et 80 %. Nous avons retenu 75 % pour l'étude.

En ce qui a trait à l'évolution du trafic de camions, une croissance annuelle de 1 % a été considérée pour l'ensemble de l'exercice de modélisation.

TABLEAU 3. FLUX ANNUELS DE CAMIONS LOURDS LONGUE DISTANCE (SENS UNIQUE) DE CLASSE 8

Segment d'autoroute	Flux de camions longue distance de classe 8
1. Windsor – Toronto	1,308,000
2. Toronto (city area)	1,257,000
3. Toronto – Prescott	1,206,000
4. Prescott – Montréal	1,075,000
5. Montréal (city area)	810,000
6. Montréal – Québec City	544,000
8. Québec City (city area)	534,000
9. Québec City – Rivière-du-Loup	523,000

Sources : Analyse de CPCS basée sur les données du MTO et du MTMDQ ; Analyse de CPCS basée sur les données du MTO et du MTMDQ via leurs portails de données ouverts. Les valeurs sont arrondies au millier le plus proche.⁵⁹

Paramètres techno-économiques des technologies de camion

Cette section présente une vue d'ensemble des principaux paramètres et hypothèses techno-économiques utilisés dans l'analyse des coûts. Les données de modélisation et les hypothèses maintenues constantes (quelle que soit la technologie évaluée) sont présentées dans le tableau 4 ci-dessous. Il s'agit, par exemple, des taux d'actualisation, des années de référence de la modélisation et des prix du carbone. Les paramètres définissant la base de référence des camions diesel sont énumérés dans le tableau 5, tandis que les tableaux suivants fournissent les paramètres et les hypothèses utilisés pour analyser les quatre technologies carboneutres de la classe 8 : les véhicules électriques à batterie (Tableau 6); pile à hydrogène (Tableau 7); caténaire (Tableau 8) et le gaz naturel renouvelable (Tableau 9).

⁵⁹ Le MTMDQ et le MTO fournissent le débit journalier annuel moyen (DJMA) et la part modale des camions pour différentes années. CPCS a appliqué un taux de croissance de 1 % par an, basé sur les données historiques du trafic, pour estimer le DJMA des camions jusqu'en 2022.

Tous les coûts sont exprimés en dollars canadiens. La valeur médiane est utilisée pour modéliser tout paramètre d'entrée exprimé sous la forme d'une fourchette de valeurs. La section suivante présente les résultats d'une analyse de sensibilité appliquée à la valeur médiane.

TABLEAU 4. PARAMÈTRES GÉNÉRAUX DE MODÉLISATION CONSTANTS POUR TOUTES LES TECHNOLOGIES

Paramètres	Valeur (unité)	Sources / notes d'hypothèse
Taux d'actualisation (réel)	10 %	Alignement sur les orientations publiées par le MTMDQ (<i>Guide de l'analyse avantages-coûts des projets publics en transport routier - 2016</i>)
Année de référence de la modélisation	2022	Dernière année complète achevée au moment de l'analyse
Année de l'horizon de modélisation	2050	Aligner l'horizon de modélisation sur l'objectif net zéro en 2050
Prix du carbone (2022)	50 \$ / t éq. CO ₂ e	Gouvernement du Canada - Prix fédéral du carbone
Augmentation annuelle du prix du carbone	15 \$ / t éq. CO ₂	Augmentation linéaire jusqu'à 170 \$ / t CO ₂ e d'ici à 2030 et maintien supposé à 170 \$ / t CO ₂ e par an par la suite ⁶⁰
Facteur d'émissions diesel	2,6 kg éq. CO ₂ /L	Rapport d'inventaire national 2017 de Ressources naturelles Canada
Prix de l'électricité	5-13 ¢/kWh	Comparaison par Hydro Québec des prix de l'électricité (2022) pour Montréal et Toronto, en supposant une consommation de l'ordre de 400 à 3 060 MWh/mois avec une demande de l'ordre de 1 MW à 5 MW [10]
Cycle de vie des camions de classe 8	10 ans	Estimation des associations provinciales de transporteurs routiers de l'Ontario et du Québec
Kilométrage annuel moyen des camions (total)	95 000 km	D'après les statistiques des flottes de camions de l'Ontario et du Québec
Kilométrage annuel moyen des camions (sur autoroute)	76 000 km	Hypothèse : 80 % du kilométrage annuel total, sur la base des statistiques du kilométrage des autoroutes par rapport à celui des autres routes ⁶¹
Charge utile moyenne des camions	20 tonnes	Gouvernement du Canada - Tendances et statistiques 2018 de SmartWay
Prix de l'énergie (CA\$)		
Diesel	1,96 \$/L	NRCan - Average Daily Retail Prices for Diesel [4]
Électricité	5-13 ¢/kWh	Hydro-Québec comparaison des prix de l'électricité (2022) pour Montréal et Toronto, en supposant une consommation de l'ordre de 400 à 3,060 MWh/mois avec une demande de l'ordre 1 MW to 5 MW [10]
Hydrogène vert	9,5 \$ - 13,5 \$ kg d'H ₂	NREL, « Spatial and Temporal Analysis of the Total Cost of Ownership for Class 8 Tractors and Class 4 Parcel Delivery Trucks » (2021) [24]
GNR	15,80 \$ - 16,34 \$/GJ (0,59 \$ - 0,61 \$/m ³)	Énergir Québec [28]

Sources : voir également l'annexe 3.

⁶⁰ Gouvernement du Canada, 2021. *Mise à jour de l'approche pancanadienne de la tarification de la pollution par le carbone 2023-2030*, www.canada.ca/en/environnement-climate-change/services/climate-change/pricing-pollution-how-it-will-work/carbon-pollution-pricing-federal-benchmark-information/federal-benchmark-2023-2030.html

⁶¹ Hypothèse déduite des informations de l'Office of Highway Policy des États-Unis, qui utilise le rapport entre le kilométrage des routes inter-États et celui des autres routes aux États-Unis comme approximation d'un rapport similaire appliqué au contexte canadien du camionnage longue distance sur le corridor H401-A20. Référence : FHWA, 2018. *Annual Vehicle Distance Traveled in Miles and Related Data - 2015*, US Department of Transportation, <https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/statistics/2015/vm1.cfm>.

TABLEAU 5. PARAMÈTRES ET HYPOTHÈSES DE LA MODÉLISATION DE RÉFÉRENCE POUR LES CAMIONS DIESEL DE CLASSE 8

Paramètres	Valeur (unité)	Sources / notes d'hypothèses
Efficacité énergétique	35 - 40 L/100km (13 - 15 MJ/km)	Administration fédérale des autoroutes des États-Unis (FHWA) [1] ICCT, « Zero emissions trucks : Une vue d'ensemble des technologies de pointe et de leur potentiel » (2013) [2] ICCT, « Efficiency technology Potential for heavy-duty diesel Vehicles in the United States through 2035 » (2021) [3]
Prix du diesel	1,96 \$/L	RNCan - Prix de détail quotidiens moyens du diesel [4]
Prix d'achat	125 000 \$ - 205 000 \$	ICCT, « A Meta-study of purchase costs for zero-emission trucks » (2021) [5]
Coût d'entretien	0,22 \$/km	Pedinotti-Castelle, M, Pineau, P.-O. et Amor, B, 2022. Décarbonation du transport routier de marchandises au Québec. HEC Montréal - Tableau A-7 [19]

Sources : voir l'annexe 3.

TABLEAU 6. PARAMÈTRES ET HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION DES CAMIONS À BATTERIE ÉLECTRIQUE (BEV) DE CLASSE 8

Paramètres	Valeur (unité)	Sources / notes d'hypothèses
Taille de la batterie (portée)	850 - 900 kWh (~800 km)	Conformément aux estimations préliminaires concernant le camion semi-remorque de Tesla [31]
Consommation d'énergie	1,15 - 1,52 kWh/km (4,1 - 5,5 MJ/km)	Earl <i>et al.</i> , 2018. Analyse des camions électriques à batterie longue distance dans l'UE : Place de marché et perspectives technologiques, économiques, environnementales et politiques [8] ATRI, « Charging Infrastructure Challenges for the U.S. Electric Vehicle Fleet » (2022) [9]
Prix d'achat	430 000 \$ - 575 000 \$	ICCT, « A Meta-study of purchase costs for zero-emission trucks » (2021). D'après le National Renewable Energy Laboratory (Hunter <i>et al.</i> , 2021), les camions ont une autonomie d'environ 800 km (500 miles) [5]
Coût d'entretien	0,08 \$ - 0,147 \$/km	California Air Resources Board « Advanced Clean Trucks Total Cost of Ownership Discussion Document » (2019) [6] Université de Californie Davis, « A Comparison of Zero-Emission Highway Trucking Technologies. Institute of Transportation Studies » (2018) [7]

Sources : voir l'annexe 3.

TABLEAU 7. PARAMÈTRES ET HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION POUR LES CAMIONS À PILE COMBUSTIBLE À HYDROGÈNE VERT (FCEV) DE CLASSE 8

Paramètres	Valeur (unité)	Sources / notes d'hypothèses
Consommation d'énergie	0,07 - 0,11 kg/km (8,4 - 12,2 MJ/km)	ICCT, « A Meta-study of purchase costs for zero-emission trucks » (2021) [5] InsideEVs, « Daimler Presents GenH2 Truck Fuel-Cell Concept Truck » (2020) [13] Hyundai, « Hyundai XCIENT Fuel Cell Heads to Europe for Commercial Use » (2020) [15]
Coût de l'hydrogène vert	9,5 - 13,5 kg d'H ₂	NREL, « Spatial and Temporal Analysis of the Total Cost of Ownership for Class 8 Tractors and Class 4 Parcel Delivery Trucks » (2021) [24]
Prix d'achat	\$328,000 - \$351,000	ICCT, « A Meta-study of purchase costs for zero-emission trucks » (2021). D'après le National Renewable Energy Laboratory (Hunter <i>et al.</i> , 2021), les camions ont une autonomie d'environ 800 km (500 miles) [5]
Coût d'entretien	0,117 \$ - 0,147 \$/km	California Air Resources Board, « Advanced Clean Trucks Total Cost of Ownership Discussion Document » (2019) [6]

Sources : voir l'annexe 4.

TABLEAU 8. PARAMÈTRES ET HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION POUR LES CAMIONS À CATÉNAIRE (OCT) DE CLASSE 8

Paramètres	Valeur (unité)	Sources / notes d'hypothèses
Taille de la batterie (portée)	130 - 260 kWh (100 - 200 km)	StratON, « Assessment and deployment strategies for catenary-bound heavy-duty vehicles » (2020) [27]
Consommation d'énergie	1,1 kWh/km (3,9 MJ/km)	Essais sur le terrain de chariots caténares de Siemens en Allemagne [26]
Prix d'achat	190 000 \$ - 250 000 \$	StratON, « Assessment and deployment strategies for catenary-bound heavy-duty vehicles » (2020) [27]
Coût d'entretien	0,08 \$ - 0,147 \$/km	L'hypothèse est que les camions BEV et OCT devraient avoir des coûts d'entretien similaires, la principale différence étant l'ajout du pantographe (entretien minimal) ⁶² [26]

Sources : voir l'annexe 3.

TABLEAU 9. PARAMÈTRES ET HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION DES CAMIONS AU GAZ NATUREL RENOUVELABLE (GNR) DE CLASSE 8

Paramètres	Valeur (unité)	Sources / notes d'hypothèse
Consommation d'énergie	1,451 GJ/100km (14,5 MJ/km)	Pedinotti-Castelle. M, Pineau, P.-O. and Amor. B, 2022. Decarbonization of road freight transportation in Québec. HEC Montréal – Table A-7 [19]
Prix d'achat	+90 000 \$	Énergir [28] (incremental cost versus a comparable diesel truck)
Coût d'entretien	0,23/km \$ ⁶³	Pedinotti-Castelle. M, Pineau, P.-O. and Amor. B, 2022. Decarbonization of road freight transportation in Québec. HEC Montréal – Table A-7 [19]

Sources : voir l'annexe 3.

Scénarios de déploiement et adoption de la technologie

L'analyse modélise un plan de transition pour les camions longue distance diesel de classe 8, qui seront progressivement retirés du parc de camions par le biais de remplacements sur le cycle de vie et seront remplacés par une technologie carboneutre. En résumé, l'approche suivante est utilisée pour développer les plans d'adoption du parc pour chaque technologie :

- Déterminer les remplacements annuels en fonction du cycle de vie.** Calcul du nombre de camions qui, chaque année, doivent être remplacés en fin de vie. Il est supposé que la répartition de l'âge de la flotte soit cohérente et que, sur la base d'un cycle de vie moyen de 10 ans, 10 % de la flotte soit remplacée chaque année.
- Déterminer la part de croissance de la flotte.** Calcul du nombre de nouveaux camions ajoutés à la flotte en fonction d'un taux de croissance annuel supposé de 1 %.
- Calcul du total des achats annuels de camions** en additionnant les résultats de l'achat de remplacement du cycle de vie n° 1 et de l'achat de croissance n° 2.
- Calcul du nombre de camions carboneutres ajouté au parc** en multipliant les achats annuels de camions par le pourcentage supposé des ventes de nouveaux véhicules utilisant la technologie carboneutre. Il convient de noter que la méthodologie de modélisation prend en considération les cibles fédérales pour les VMLZE en tant qu'étapes clés dans le développement de la courbe d'adoption annuelle construite à partir du pourcentage des ventes de nouveaux véhicules comme étant carboneutre.

⁶² L'entretien du pantographe nécessite le contrôle et le remplacement (si nécessaire) des bandes de carbone tous les 6 à 12 mois lors du contrôle d'entretien régulier.

⁶³ L'entretien devrait être comparable à celui d'un camion diesel (légèrement plus élevé en raison des qualifications requises pour le personnel d'entretien, des outils spécialisés pour l'entretien des réservoirs de gaz comprimé et des systèmes de carburant).

L'étape clé est que 100 % des VMLZE vendus d'ici 2040 ne produiront pas d'émissions. Une augmentation exponentielle jusqu'à cet objectif de 2040 est supposée. Par conséquent, l'ensemble de la flotte de camions est modélisé pour passer à zéro émission nette d'ici 2050, en supposant qu'un camion longue distance de classe 8 a un cycle de vie moyen de 10 ans.⁶⁴

- 5. Calculer la part restante de diesel dans le parc** en soustrayant le nombre de camions carboneutres achetés du nombre total de camions achetés sur une base annuelle et calculer le nombre total cumulé de camions diesel par rapport aux camions nets zéro pour chaque année suivante de la période de modélisation en répétant les étapes 1 à 4 décrites ci-dessus.

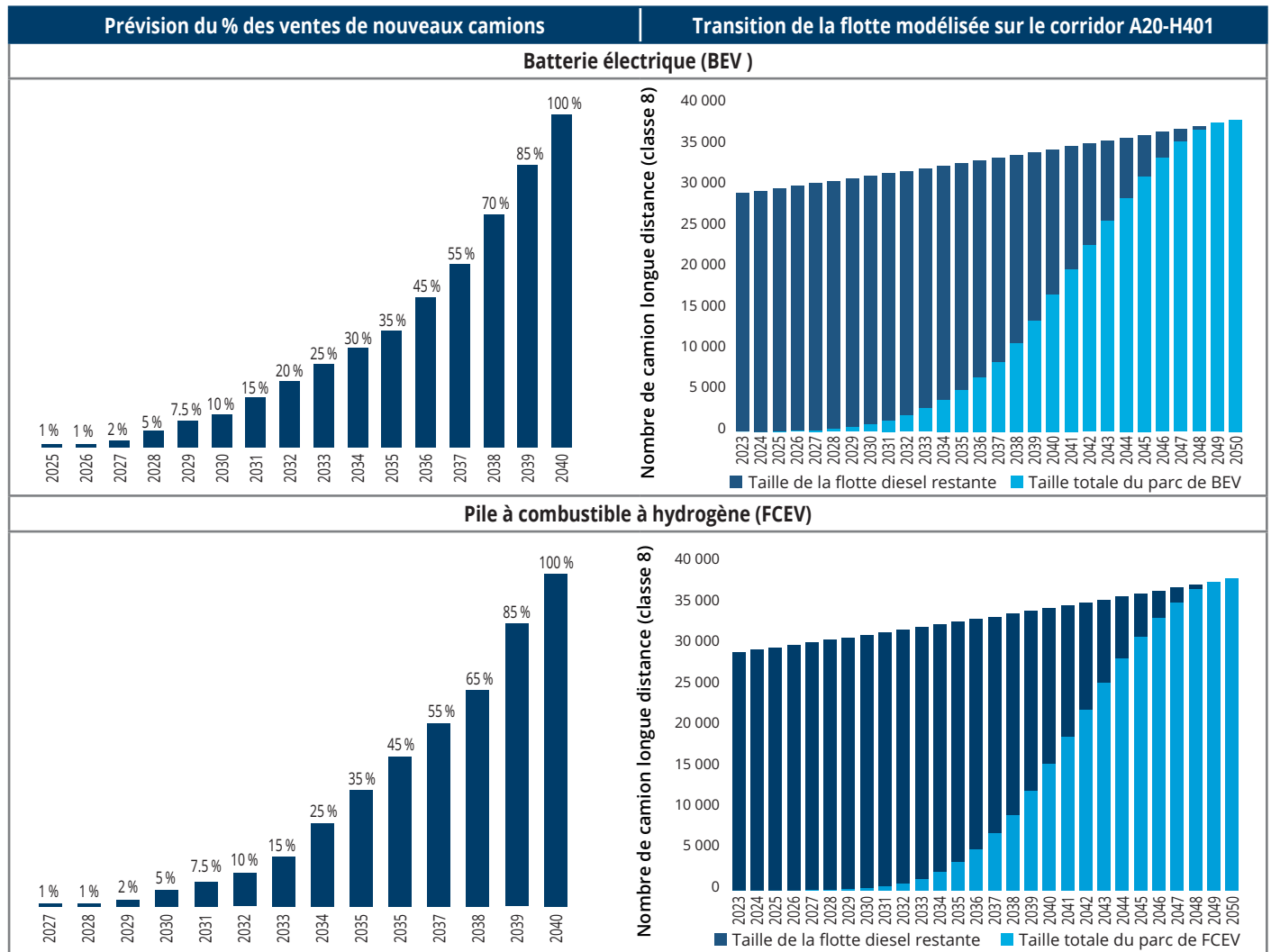
En outre, les plans d'adoption du parc automobile comportent un élément de modélisation de la maturité technologique en tenant compte du fait que certaines technologies carboneutres sont plus mûres et disponibles sur le marché (ex., le gaz naturel) et pourraient donc être adoptées plus rapidement (pourcentage des ventes de véhicules neufs/des remplacements du parc automobile) au cours des premières années par rapport aux technologies qui en sont encore aux premiers stades du développement et de l'essai de véhicules pilotes. Par exemple, l'introduction de camions fonctionnant au GNR dans le parc automobile pourrait commencer dès 2024, alors que l'adoption notable des FCEV devrait commencer plus tard (ex., 2027), car la production commerciale a encore besoin de temps avant de prendre de l'ampleur.

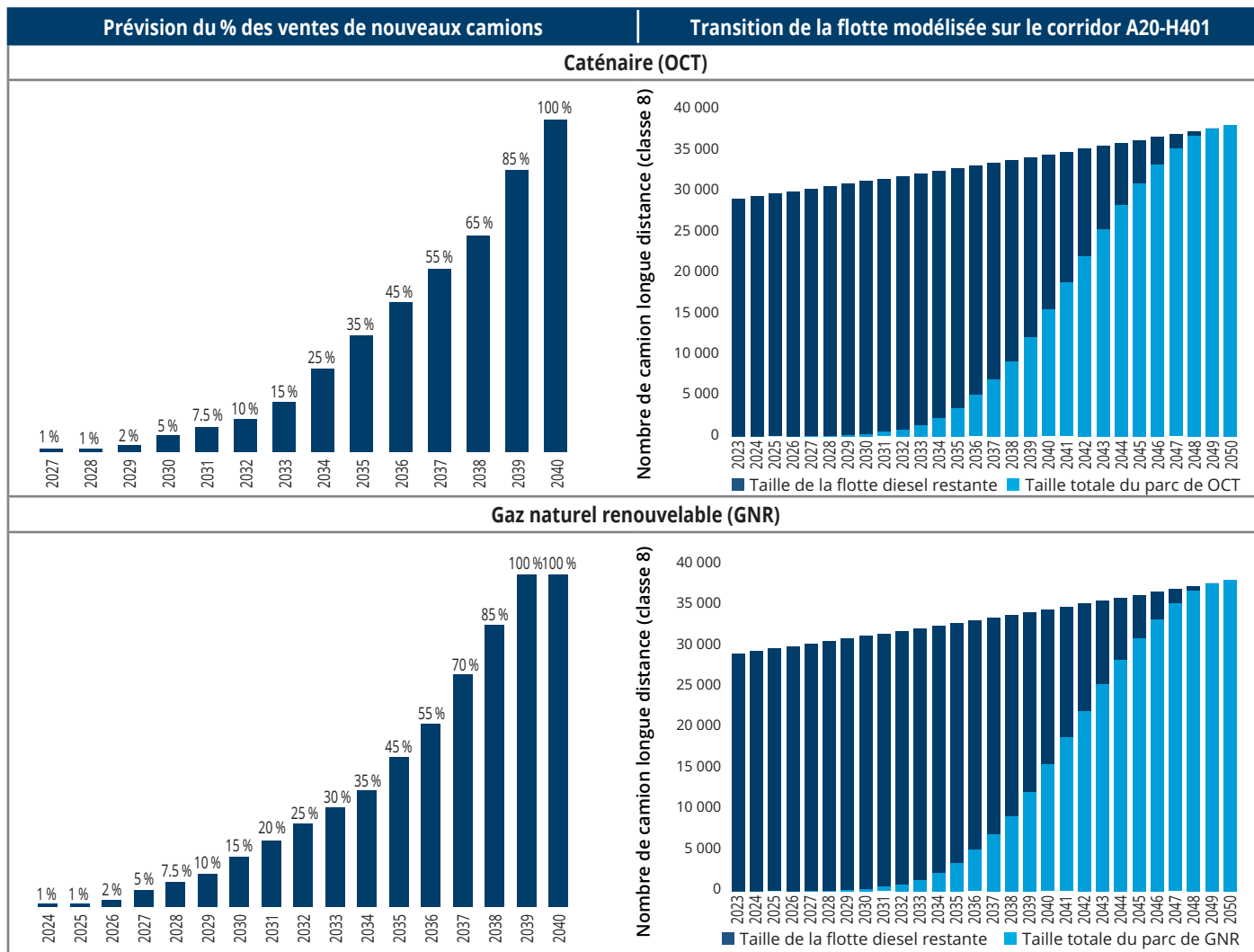
L'adoption des camions à caténaire (OCT) est également supposée commencer plus tard, car un délai sera nécessaire pour mettre en place l'infrastructure le long des différents segments d'autoroute avant que ces camions puissent fonctionner. La section suivante détaille les hypothèses utilisées pour la distribution et l'estimation des coûts de l'infrastructure de ravitaillement et de recharge.

⁶⁴ Il convient de noter que la part des ventes de nouveaux véhicules dans le sous-segment des camions longue distance de la classe 8 du marché des véhicules à haut rendement énergétique est susceptible d'être inférieure à l'objectif intermédiaire pour l'ensemble du segment de marché (35 % des véhicules à haut rendement énergétique vendus d'ici à 2030 ne produisant pas d'émissions). Les camions long-courriers de la classe 8 ont plus de défis opérationnels à relever pour passer aux véhicules à zéro émission que d'autres véhicules du marché des VMLZE, qui seront probablement adoptés plus tôt et contribueront ainsi plus largement à atteindre l'objectif de ventes pour 2030 (par exemple, les camions de taille moyenne et les camions utilisés pour des trajets plus courts ou régionaux et les flottes de retour au point de départ).

L'approche de la modélisation pour la transition de la flotte est illustrée au graphique 7, pour l'ensemble du corridor.

GRAHIQUE 7. SCÉNARIOS DE DÉPLOIEMENT POUR DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES CARBONEUTRES





Source : CPCS, 2023

Hypothèses sur l'infrastructure de ravitaillement et de recharge

L'approche de modélisation pour l'échelonnement et l'établissement des coûts à haut niveau de l'infrastructure énergétique d'appui est résumée ci-dessous. L'évaluation de l'infrastructure repose sur le plan de transition de la flotte pour chaque technologie. Cela permet d'estimer l'infrastructure, étant donné que des stations de charge et de ravitaillement ou des caténaires devront être installées et prêtes à répondre aux besoins énergétiques du parc avant qu'ils ne se matérialisent (ex., installation de caténaires avant que les premiers camions OCT ne commencent à circuler sur un tronçon d'autoroute et l'installation de stations de ravitaillement en hydrogène pour répondre à la consommation annuelle d'hydrogène du parc).

Infrastructure de recharge rapide des batteries électriques

Les étapes suivantes sont proposées pour fournir une estimation de haut niveau pour le dimensionnement et le coût de l'infrastructure de recharge rapide dans l'analyse :

- 1. Estimer la demande d'énergie pour la flotte de camions BEV** opérants le long du corridor (calculée sur la base du nombre de camions BEV, du kilométrage annuel par camion et de la consommation moyenne d'énergie en kWh/km). Le résultat est la demande totale en kWh/an.

2. **Estimer la production d'énergie d'un seul chargeur rapide** (350 kW) sur la base de 24 heures par jour, 365 jours par an et d'un taux d'utilisation du chargeur de 20 %.⁶⁵ Avec une station de recharge rapide de 350 kW, il faudrait plus de deux heures pour recharger complètement une batterie de la taille requise pour le transport longue distance, prise en compte dans cette analyse (~850 à 900 kWh). Les exploitants de flottes devront donc probablement procéder à des changements opérationnels importants pour tenir compte des temps de charge. Toutefois, des travaux sont en cours pour réduire les temps de charge grâce à des initiatives telles que la charge de mégawatt.⁶⁶
3. **Calculer le nombre de stations de recharge rapide** en divisant la demande énergétique totale du parc par la production supposée d'une station de recharge rapide.
4. **L'installation des stations de recharge des camions électriques doit être échelonnée** de manière à ce que la capacité de l'infrastructure (par exemple, la production d'énergie du réseau de recharge rapide) soit installée avant que la demande de la flotte de camions BEV n'atteigne ce niveau. Un délai de deux ans est supposé pour tenir compte des stations de recharge, de l'équipement connexe et de la construction/installation afin d'étendre le réseau de recharge avant que le parc de camions BEV se matérialise.

Un résumé des données d'entrée et des hypothèses de la modélisation de l'infrastructure BEV est présenté au Tableau 10. Tous les coûts sont exprimés en dollars canadiens.

TABLEAU 10. HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION DE L'INFRASTRUCTURE DE RECHARGE DES BATTERIES ÉLECTRIQUES

Paramètres	Valeur (unité)	Sources / notes d'hypothèse
Puissance de sortie du chargeur rapide	350 kW (Niveau 3)	Par hypothèse, elle correspond à la puissance nominale la plus élevée des chargeurs rechargeables actuellement disponibles au Canada ⁶⁷
Coût du capital (équipement et installation)	181 000 \$ - 298 000 \$	American Transportation Research Institute (2022) ⁶⁸ [11]
Coût annuel d'entretien	545 \$ / chargeur	US Department of Energy (2022) ⁶⁹ [12]
Utilisation de stations de recharge rapide	20 %	PwC, "Electric vehicles and charging infrastructure" (2023) [33]
Cycle de vie du chargeur	10 ans	Hypothèse, Département américain de l'énergie (2022) [34]

Sources : voir l'annexe 3.

Stations de ravitaillement en hydrogène vert

Une approche similaire est suivie pour fournir une estimation de haut niveau sur le dimensionnement et le coût de l'infrastructure de ravitaillement en hydrogène pour le parc de FCEV dans le cadre de son scénario d'adoption.

1. **Estimer la demande d'énergie pour la flotte de camions FCEV** opérant le long du corridor (calculée sur la base du nombre de camions FCEV, du kilométrage annuel par camion et de la consommation d'énergie moyenne en kg/km). Le résultat est une demande totale d'hydrogène en kg/an.
2. **Échelonner l'estimation du coût de l'infrastructure verte de ravitaillement en hydrogène** en fonction du coût et de la distribution typique d'une grande station de ravitaillement commerciale et de la demande totale d'énergie du parc de FCEV.

⁶⁵ PwC, 2023. *Véhicules électriques et infrastructure de recharge : un nouvel état d'esprit?* www.pwc.com/us/en/industrial-products/publications/assets/pwc-electric-vehicles-charging-infrastructure-mindset.pdf

⁶⁶ CharIN, 2023. *Système de charge mégawatt (MCS)*, <https://www.charin.global/technology/mcs/>

⁶⁷ ABB, 2023. *Terra HP Charger - Up to 350 kW*, <https://new.abb.com/ev-charging/high-power-charging>

⁶⁸ ATRI, 2022. *Charging Infrastructure Challenges for the U.S. Electric Vehicle Fleet*, <https://truckingresearch.org/2022/12/charging-infrastructure-challenges-for-the-u-s-electric-vehicle-fleet/>

⁶⁹ Alternative Fuels Data Center, 2023. *Charging Infrastructure Operation and Maintenance*, https://afdc.energy.gov/fuels/electricity_infrastructure_maintenance_and_operation.html

Il convient de noter qu'il existe un degré élevé d'incertitude dans l'estimation de la fourchette des coûts d'investissement pour les stations de ravitaillement en hydrogène. Le CAPEX peut varier considérablement en fonction de la méthode de livraison et du modèle commercial de la station de ravitaillement (par exemple, hydrogène produit sur place par électrolyse, livré par pipeline ou par camion-citerne). Un point médian de la fourchette de coûts est utilisé dans l'analyse, accompagné d'une analyse de sensibilité pour tenir compte de la variabilité de ce paramètre.

3. L'installation de l'**infrastructure de ravitaillement en hydrogène vert doit être** échelonnée de manière à ce que la capacité de l'infrastructure (par exemple, la capacité de production des stations de ravitaillement) soit installée avant que la demande du parc de camions FCEV ne se matérialise. Un délai de deux ans est supposé.

Un résumé des données d'entrée et des principales hypothèses de la modélisation de l'infrastructure de l'hydrogène est présenté au tableau 11. Tous les coûts sont exprimés en dollars canadiens.

TABLEAU 11. HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION DE L'INFRASTRUCTURE DE RAVITAILLEMENT EN HYDROGÈNE VERT

Paramètres	Valeur (unité)	Sources / notes d'hypothèse
Coût d'une station de ravitaillement en H ₂ (CAPEX)	2 000 \$ - 5 000 \$ par kg H ₂ dispensé par jour	Transport & Environment, « How to decarbonise long-haul trucking in Germany. An analysis of available vehicle technologies and their associated costs » (2021) [15] Département américain de l'énergie, « Hydrogen Fueling Stations Cost, Hydrogen Program Record » (2020) [17] L'extrémité inférieure de la fourchette correspondrait à une station utilisant de l'hydrogène livré, tandis que l'extrémité supérieure correspondrait à une station produisant de l'hydrogène sur place. Utiliser le point médian de la fourchette pour tenir compte de l'incertitude et de la variabilité des dépenses d'investissement pour l'hydrogène gazeux par rapport à l'hydrogène liquide livré ou à la production sur site
Entretien des stations de ravitaillement en hydrogène	0,50 \$ par kg	Les coûts d'entretien sont exprimés par kg d'hydrogène distribué. L'estimation provient d'un expert de l'industrie formulée lors des ateliers du projet [30]
Cycle de vie des stations de ravitaillement en hydrogène	20 ans	Hypothèse, Change Energy Services durée de vie typique utilisée dans la modélisation des coûts du cycle de vie des stations de ravitaillement en hydrogène [30]

Sources : voir l'annexe 3.

Infrastructure de transmission par caténaire

Les spécifications du véhicule modélisé pour les camions OCT comprennent un bloc-batterie capable de fournir une autonomie d'environ 150 km, ce qui est suffisant pour que les camions se déconnectent de la caténaire et fonctionnent sur batterie uniquement pour de courts segments d'autoroute à travers les zones urbaines et pour les connexions de premier/dernier kilomètre en dehors de l'autoroute vers les centres logistiques.

L'installation d'infrastructures caténares le long des tronçons d'autoroute traversant les zones urbaines a été exclue de la simulation. La plupart des trajets longue distance ne partent pas des villes elles-mêmes, mais plutôt de centres logistiques situés à la périphérie des villes. En outre, le coût de la construction et de l'entretien de l'infrastructure est susceptible d'être sensiblement plus élevé et plus complexe dans les zones densément bâties. Le tableau 12 présente un résumé des segments d'autoroute pour lesquels l'infrastructure caténaire installée est modélisée dans l'analyse.

TABLEAU 12. SEGMENTS D'AUTOROUTE ÉQUIPÉS DE CATÉNAIRES

Segment d'autoroute	Longueur (km)	Flux de camions longue distance de classe 8	Inclure / exclure
Windsor – Toronto	321	1 308 000	Inclure
Toronto (agglomération)	97	1 257 000	Exclure
Toronto – Prescott	288	1 206 000	Inclure
Prescott – Montréal	146	1 075 000	Inclure
Montréal (agglomération)	72	810 000	Exclure
Montréal – Québec	215	544 000	Inclure
Québec City (agglomération)	38	534 000	Exclure
Québec – Rivière-du-Loup	167	523 000	Inclure

Sources : Distances tirées de Google Maps, analyse par CPCS des données sur les flux de camions du MTO et du MTMDQ.

L'analyse suppose une installation progressive de l'infrastructure caténaire, plutôt que de supposer que l'infrastructure est entièrement construite avant que les premiers camions de l'OCT ne commencent à opérer. L'installation est priorisée en fonction des segments routiers les plus fréquentés, afin de maximiser l'utilité de l'infrastructure caténaire au cours des premières années, lorsque la flotte de camions OCT commencera à s'agrandir. Le tableau 13 résume les hypothèses de phasage, en alignant le calendrier d'installation de l'infrastructure sur le plan d'adoption supposé de la flotte (par exemple, en veillant à ce que la capacité de l'infrastructure soit construite avant que les camions OCT ne commencent à circuler sur l'autoroute).

TABLEAU 13. HYPOTHÈSES RELATIVES AUX PHASES DE DÉPLOIEMENT DE L'INFRASTRUCTURE DES CATÉNAIRES

Segment d'autoroute	Priorité	Période d'installation des infrastructures ⁷⁰	OCT taille de la flotte par année d'achèvement
Windsor – Toronto	1	2024 – 2027	31 camions (2027)
Toronto – Prescott	2	2028 – 2031	526 camions (2031)
Prescott – Montréal	3	2028 – 2031	526 camions (2031)
Montréal – Québec	4	2032 – 2035	3 470 camions (2035)
Québec – Rivière-du-Loup	5	2036 – 2039	12 137 camions (2039)

Source : CPCS, 2023.

⁷⁰ L'infrastructure caténaire pour chaque segment d'autoroute identifié est censée être installée / construite sur une période de 4 ans avec des CAPEX répartis de manière égale sur les 4 années. Par exemple, le segment Windsor-Toronto sera construit à 25 % en 2024, 2025 et 2026 et mis en service en 2027, les 25 % restants étant achevés. Cela permettra de soutenir la transition du parc vers les camions OCT à partir de 2027, 31 camions devenant opérationnels cette année-là, conformément au plan d'adoption du parc supposé.

Le tableau 14 énumère les données d'entrée et les hypothèses utilisées pour calculer le coût des dépenses d'investissement (CAPEX) pour l'installation de l'infrastructure caténaire et pour l'entretien annuel. Tous les coûts sont exprimés en dollars canadiens.

TABLEAU 14. HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION DE L'INFRASTRUCTURE DES CATÉNAIRES

Paramètres	Valeur (unité)	Source / notes d'hypothèse
CAPEX (le prix comprend les deux sens de circulation)	2,4 - 4,8 \$M	CPCS et Chaire en gestion du secteur de l'énergie - HEC Montréal, « Décarbonation du camionnage longue distance dans l'est du Canada - Simulation de la technologie e-Highway sur le corridor autoroutier A20-H401 » (2021) [18] L'estimation des coûts repose sur l'hypothèse d'une puissance installée pour la caténaire comprise entre 2 MW/km et 4 MW/km
Coûts d'entretien	2 % des dépenses d'investissement	CPCS et Chaire en gestion du secteur de l'énergie - HEC Montréal, « Décarbonation du camionnage longue distance dans l'est du Canada - Simulation de la technologie e-Highway sur le corridor autoroutier A20-H401 » (2021) [18] Hypothèse basée sur les coûts d'entretien typiques des infrastructures électriques
Cycle de vie de l'infrastructure caténaire	50 ans	Hypothèse, expertise de CPCS en matière d'infrastructures similaires dans le secteur du transport ferroviaire électrifié de passagers ⁷¹

Sources : voir l'annexe 3.

Infrastructures de ravitaillement en gaz naturel renouvelable

L'approche permettant d'obtenir une estimation à haut niveau de la taille et du coût de l'infrastructure de ravitaillement en GNR est analogue à celle présentée pour l'infrastructure de ravitaillement en hydrogène. Toutefois, la fourchette des dépenses d'investissement pour une station de ravitaillement en GNR est beaucoup plus étroite que pour une station de ravitaillement en hydrogène, en raison de la maturité de la technologie du gaz naturel comprimé et de son utilisation dans les flottes de véhicules lourds, y compris les grands routiers. Par conséquent, l'étalement des coûts de l'infrastructure GNR est plus sûr.

- 1. Estimer la demande d'énergie pour le parc de camions de GNR** opérant le long du corridor (calculée sur la base du nombre de camions de GNR, du kilométrage annuel par camion et de la consommation moyenne d'énergie MJ/km). Le résultat est la demande totale de GNR en MJ/an.
- 2. Évaluer le coût estimé de l'infrastructure de ravitaillement en GNR** en fonction du coût et de la production typiques d'une grande station de ravitaillement commerciale, de sa production quotidienne de GNR et de la demande totale d'énergie du parc de véhicules au GNR.
- 3. L'installation de l'infrastructure de ravitaillement en GNR doit** être échelonnée de manière que la capacité de l'infrastructure (ex., la capacité de production des stations de ravitaillement) soit installée avant que la demande du parc de camions au GNR ne passe à l'échelle supérieure, afin de répondre à la demande d'énergie à ce niveau. Un délai de deux ans est supposé.

⁷¹ Au Royaume-Uni, certains systèmes de caténaires ont plus de 75 ans. Certains composants peuvent nécessiter un remplacement plus tôt dans leur cycle de vie. Par exemple, les fils conducteurs peuvent durer environ 20 ans (ou plus, selon l'utilisation) et les supports (mâts) peuvent durer 50 ans ou plus.

Un résumé des données de modélisation et des principales hypothèses utilisées pour l'infrastructure de ravitaillement en GNR est présenté dans le tableau suivant Tableau 15. Tous les coûts sont exprimés en dollars canadiens.

TABLEAU 15. HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION DE L'INFRASTRUCTURE GNR

Paramètres	Valeur (unité)	Source / notes d'hypothèse
Coût d'une station de ravitaillement en GNR (CAPEX)	10,7 - 12 \$ par MJ/jour	Département américain de l'énergie, « Costs Associated with Compressed Natural Gas Vehicle Fueling Infrastructure » (2014) [29]
Entretien des stations de ravitaillement en GNR	0,03 \$ par m ³	Les coûts d'entretien sont exprimés par mètre cube (m ³) de GNR distribué. ⁷² Estimation d'un expert de l'industrie lors d'ateliers de travail sur le projet [30]
Cycle de vie des stations de ravitaillement en GNR	20 ans	Hypothèse, durée de vie typique de Change Energy Services utilisée dans la modélisation des coûts du cycle de vie des stations de ravitaillement en gaz naturel [30]

Sources : voir l'annexe 3.

⁷² Valeur tirée d'une communication personnelle avec Ry Smith (Change Energy Services). Basé sur ses 30 ans d'expérience dans la conception, le développement et l'assistance à l'exploitation de stations de ravitaillement de véhicules au GNC et au H2. Bien qu'il n'y ait pas de rapport officiel, les enseignements ont été intégrés dans le modèle d'évaluation techno-économique de Change Energy Services, qui comprend : (1) des indemnités pour les inspections hebdomadaires et les services de maintenance préventive (pièces et main-d'œuvre comprises) ; (2) des indemnités pour les révisions majeures et mineures de l'équipement déclenchées par les heures de fonctionnement ; (3) les heures de fonctionnement sont calculées sur la base des taux de consommation. Il convient de noter que, comme pour toute nouvelle technologie, il est probable qu'il y aura des coûts supplémentaires au cours des premières années de déploiement, au fur et à mesure de l'élaboration de nouvelles procédures d'exploitation normalisées.

Résultats de la modélisation et analyse

Viabilité économique des technologies

Les principales mesures utilisées pour comparer la viabilité économique et l'attrait des différentes technologies carboneutres dans le cadre de leurs scénarios de transition sont décrites ci-dessous.

- **La valeur actuelle nette (VAN)** est la différence entre la valeur actuelle de tous les bénéfices et de tous les coûts. Les bénéfices et les coûts des années futures sont convertis en valeur actuelle en appliquant le taux et la formule d'actualisation. Cette approche tient compte de la valeur temporelle de l'argent (y compris des avantages monétaires), le mécanisme d'actualisation tenant compte de la plus grande incertitude quant à la matérialisation des avantages et des coûts à mesure que l'on s'éloigne dans le temps (par exemple, les avantages se produisant en 2030 seront moins bien évalués en termes de valeur actualisée que les mêmes avantages se produisant en 2025). Une VAN supérieure à zéro indique que les avantages du scénario sont supérieurs à ses coûts.
- **Le ratio avantages-coûts (RAC)** est calculé comme le rapport entre les avantages et les coûts, en utilisant leur valeur actuelle sur la période de modélisation (2022 - 2050). Un RAC supérieur à un indique que les avantages du scénario sont supérieurs à ses coûts. Un RAC plus élevé est une mesure d'un résultat plus bénéfique.
- **Le taux de rendement économique (TRE)** est un indicateur de la viabilité économique. Il s'agit d'une mesure des bénéfices nets d'un projet (ou d'un scénario), exprimée en pourcentage de l'investissement initial. Il peut être considéré comme le taux de rendement annuel généré par un projet, à l'instar d'un taux d'intérêt. Contrairement à un taux de rendement interne (TRI) financier qui compare les coûts aux recettes du projet, un taux de rendement économique compare les coûts à des avantages sociétaux plus larges (tels que la réduction des émissions de GES), qui sont convertis en chiffres en dollars pour les besoins de l'analyse. Un taux de rentabilité économique plus élevé indique que le projet (ou le scénario) est plus avantageux.

Les mesures économiques sont analysées sous deux angles différents. La première est une **perspective « corridor »** qui permet d'évaluer le coût d'investissement total et les avantages de la décarbonation de l'ensemble de la flotte de camions longue distance de classe 8 opérant le long du corridor A20-H401. Cette perspective peut être utile aux pouvoirs publics pour évaluer les coûts d'investissement.

La seconde est la **perspective « véhicule »**, qui se concentre sur la comparaison du coût total du cycle de vie d'un seul camion, ce qui peut être plus illustratif pour les propriétaires et les opérateurs de flottes, en supportant la prise de décision si une infrastructure de soutien est en place.

Perspective « corridor »

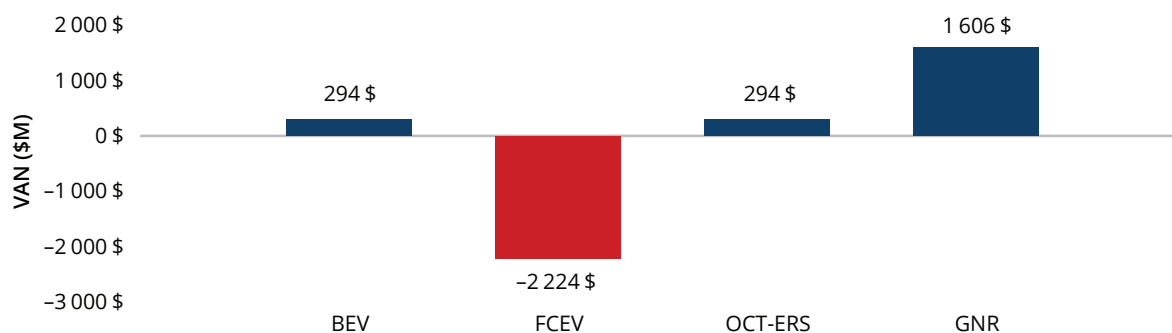
Le tableau 16 et le graphique 8 présentent un résumé des paramètres économiques calculés en tant que résultats de la modélisation pour chacun des scénarios d'adoption de la technologie «zéro net» au cours de la période de modélisation allant de 2022 à 2050.

TABLEAU 16. STATISTIQUES SOMMAIRES DE L'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE PAR TECHNOLOGIE

Technologie	VAN (\$M)	Bénéfices (millions de dollars)	Coûts (millions de dollars)	RAC	TRE
Batterie électrique (BEV)	294 \$	3 380 \$	3 086 \$	1,1	4,0 %
Pile à combustible à hydrogène vert (FCEV)	-2 224 \$	870 \$	3 094 \$	0,3	N/A ⁷³
Caténaire électrique avec bloc-batterie (OCT)	294 \$	3 115 \$	2 821 \$	1,1	0,9 %
Gaz naturel renouvelable (GNR)	1 606 \$	2 903 \$	1 297 \$	2,2	29,4 %

Source : CPCS, 2023.

GRAPHIQUE 8. COMPARAISON SOMMAIRE DE LA VAN (2022 CA\$ EN MILLIONS) PAR TECHNOLOGIE



Source : CPCS, 2023.

Les principales conclusions de l'analyse (en l'absence de toute analyse de sensibilité et de disponibilité des approvisionnements) peuvent être résumées comme suit :

- 1. Le scénario GNR présente les résultats économiques les plus favorables avec la VAN la plus élevée de 1 606 millions de dollars et un RAC de 2,2.** Ces résultats positifs s'expliquent par le coût différentiel relativement faible de l'achat d'un camion fonctionnant au GNR par rapport à un camion fonctionnant au diesel, par la maturité de la technologie GNR (qui permet une adoption plus rapide) et par les économies réalisées sur les coûts d'exploitation du carburant GNR par rapport au diesel.
- 2. Les camions électriques à batterie (BEV) (ex aequo avec les camions caténaires) affichent la deuxième performance la plus favorable, avec un RAC de 1,1 et une VAN positive de 294 millions de dollars.** Les économies substantielles réalisées sur les coûts de carburant et d'entretien pendant la durée de vie des camions de classe 8 permettent de compenser le prix d'achat plus élevé des BEV. Les paramètres clés qui empêchent actuellement une meilleure performance du scénario d'adoption des BEV sont le coût d'achat élevé des camions BEV et le coût de l'infrastructure de recharge rapide.

⁷³ Le TRE ne peut pas être calculé car le scénario d'adoption du FCEV a une VAN négative.

3. Les camions caténares ont également un RAC de 1,1 et une VAN de 294 millions de dollars.

Malgré le coût élevé de la construction de l'infrastructure caténaire, cet investissement est récupéré grâce aux coûts d'exploitation nettement inférieurs des camions OCT, qui consomment de l'électricité plutôt que du carburant diesel, et aux coûts d'entretien inférieurs, en raison d'un groupe motopropulseur électrique simplifié.

4. Le scénario hydrogène (FCEV) n'a pas une VAN positive et présente un RAC inférieur à 1.

Les principaux facteurs à l'origine de ce résultat sont le coût élevé de l'hydrogène vert en tant que carburant alternatif, le coût d'investissement des camions FCEV et l'infrastructure de ravitaillement en carburant. En outre, l'état de maturité technologique et de disponibilité commerciale des camions FCEV est tel que le début de l'adoption est modélisé pour débiter plus tard (par rapport à d'autres technologies, soit 2027 contre 2025). Ce démarrage tardif de la courbe d'adoption fait perdre les avantages liés à la réduction des émissions de gaz à effet de serre au cours des premières années.

La source des avantages et des coûts supplémentaires pour chaque technologie carboneutre (par rapport au diesel) est présentée au tableau 17. Toutes les technologies s'accompagnent d'une augmentation des coûts pour le parc de véhicules (achat de camions) et l'infrastructure de ravitaillement en carburant et de recharge.

Les principaux avantages sont les économies de coûts opérationnels (par rapport au diesel) sur le carburant et l'entretien des véhicules, ainsi que la réduction des émissions de GES (dont le prix est fixé en fonction du prix fédéral du carbone). On dénote deux exceptions, soit le prix de l'hydrogène vert, qui entraîne une augmentation des dépenses opérationnelles pour le carburant, par rapport au diesel et, un coût d'entretien plus élevé pour les camions GNR que pour le diesel.

TABLEAU 17. RÉSUMÉ DES AVANTAGES ET DES COÛTS DES TECHNOLOGIES CARBONEUTRES PAR RAPPORT AU DIESEL

Composant	BEV	FCEV	OCT-ERS	GNR
Achat d'un camion	Coût	Coût	Coût	Coût
Entretien des camions	Bénéfice	Bénéfice	Bénéfice	Coût
Énergie (combustible ou électricité)	Bénéfice	Coût	Bénéfice	Bénéfice
Émissions de GES	Bénéfice	Bénéfice	Bénéfice	Bénéfice
Infrastructure	Coût	Coût	Coût	Coût
Entretien des infrastructures	Coût	Coût	Coût	Coût

Source : CPCS, 2023.

Une ventilation des différents coûts et avantages liés au parc de camions et à l'infrastructure est présentée au tableau 18 pour les différents scénarios d'adoption d'un parc de véhicules sur le corridor A20-H401 (2022 à 2050), y compris le scénario de base qui consiste à continuer à exploiter un parc de véhicules fonctionnant uniquement au diesel. Il convient de noter que les résultats « diesel » dans les scénarios de technologie carboneutre sont dus au parc diesel résiduel en exploitation avant qu'il ne soit progressivement éliminé par le biais de remplacements sur l'ensemble du cycle de vie d'ici à 2050.

TABLEAU 18. VAN DÉTAILLÉE (2022 CA\$ EN MILLIONS) DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS DE FLOTTE

VAN (2022 \$M)	Scénario de la flotte				
	Diesel	BEV	FCEV	OCT	GNR
Achats de camions	5 581 \$	8 376 \$	6 971 \$	6,019 \$	6 459 \$
<i>Diesel</i>	5 581 \$	4 144 \$	4 266 \$	4,266 \$	3 970 \$
<i>Alternative ZEV</i>	-	4 232 \$	2 704 \$	1,752 \$	2 489 \$
Entretien du parc automobile	5 395 \$	4 989 \$	5 093 \$	5,029 \$	5 438 \$
<i>Diesel</i>	5 395 \$	4 556 \$	4 640 \$	4,640 \$	4 437 \$
<i>Alternative ZEV</i>	-	433 \$	453 \$	389 \$	1 001 \$
Énergie (carburant / électricité)	18 024 \$	16 265 \$	19 053 \$	16,276 \$	15 839 \$
<i>Diesel</i>	18 024 \$	15 222 \$	15 502 \$	15,502 \$	14 824 \$
<i>Alternative ZEV</i>	-	458 \$	3 550 \$	340 \$	1 015 \$
Infrastructures	-	291 \$	675 \$	2,383 \$	374 \$
<i>Capital</i>	-	288 \$	521 \$	1,999 \$	324 \$
<i>Entretien</i>	-	3 \$	154 \$	383 \$	51 \$
Total	28 999 \$	29 336 \$	31 791 \$	29,273 \$	28 111 \$
<i>La flotte</i>	28 999 \$	29 045 \$	31 117 \$	26,890 \$	27 737 \$
<i>Infrastructure</i>	-	291 \$	675 \$	2,383 \$	374 \$
Émissions de GES					
<i>Émissions totales de GES (MtCO₂e)</i>	71,4	43,1	44,4	44,4	40,6
<i>Émissions de GES atténuées (MtCO₂e)</i>		28,3	27,0	27,0	30,9
<i>Coût des émissions de GES</i>	3 106 \$	2 476 \$	2 538 \$	2 538 \$	2 387 \$

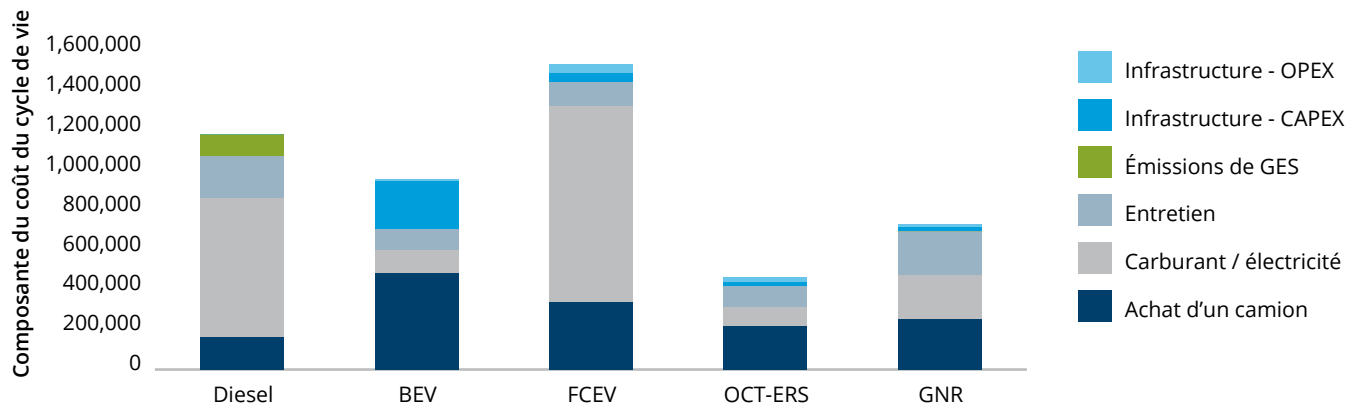
Source : CPCS, 2023.

Perspective « véhicule »

L'analyse suivante compare les coûts du cycle de vie d'un seul camion longue distance de classe 8 sur sa durée de vie typique de 10 ans⁷⁴.

Le coût de l'infrastructure est inclus en l'amortissant sur son cycle de vie prévu et sur l'utilisation estimée de l'infrastructure. Par exemple, le coût de l'infrastructure caténaire appliquée à un camion OCT est estimé comme suit : le coût total de l'infrastructure caténaire amorti sur 50 ans et proportionné à un camion en divisant le coût amorti par 38 000 camions (le nombre total de camions opérant sur le corridor en 2050 qui utiliseraient l'infrastructure annuellement, si une transition de 100 % vers les camions OCT avait lieu).

GRAPHIQUE 9. COMPARAISON DU COÛT DU CYCLE DE VIE DES TECHNOLOGIES CARBONEUTRES PAR RAPPORT AU DIESEL (DURÉE DE VIE DE 10 ANS)



Source : CPCS, 2023.

⁷⁴ Estimation des associations provinciales de transporteurs routiers de l'Ontario et du Québec

Les coûts du cycle de vie indiqués dans le graphique 9 sont présentés à nouveau dans le tableau 19. Ce dernier présente également d'autres mesures telles que le coût total du cycle de vie exprimé par tonne-kilomètre (sur la base des charges moyennes des camions et des kilomètres du cycle de vie, voir les hypothèses du tableau 4) ainsi qu'un coût de réduction des émissions de GES. Le coût de réduction est calculé comme le coût différentiel de la technologie carboneutre (par rapport au diesel) divisé par la réduction des émissions de gaz à effet de serre sur la durée de vie de 10 ans du camion. Les résultats sont présentés avec et sans les coûts d'infrastructure.

TABLEAU 19. COMPARAISON DES COÛTS DU CYCLE DE VIE DES TECHNOLOGIES

Coût du cycle de vie	Technologie				
	Diesel	BEV	FCEV	OCT-ERS	GNR
Achat	165 000 \$	486 000 \$	339 500 \$	220 000 \$	255 000 \$
Entretien	209 000 \$	107 825 \$	125 400 \$	107 825 \$	218 500 \$
Carburant / électricité	698 250 \$	114 143 \$	983 250 \$	94 050 \$	221 550 \$
Émissions de GES	107 445 \$	0	0	0	0
Infrastructures	0	244 950 \$	83 743 \$	42 990 \$	32 520 \$
Coût sur cycle de vie (y compris le coût de l'infrastructure)					
Coût total	1, 179 695 \$	952 918 \$	1 531 893 \$	464 865 \$	727 569 \$
Coût annualisé	117 970 \$	95 292 \$	153 189 \$	46,487 \$	72 757 \$
Coût par tonne-km	0,62	0,50	0,81	0,24	0,38
Coût de la réduction	N/A	- 245 \$	380 \$	- 772 \$	- 488 \$
Coût sur le cycle de vie (à l'exclusion des coûts d'infrastructure)					
Coût total	1 179 695 \$	707 968 \$	1 448 150 \$	421 875 \$	695 050 \$
Coût annualisé	117 970 \$	70 797 \$	144 815 \$	42 188 \$	69 505 \$
Coût par tonne-km	0,96	0,57	1,17	0,34	0,56
Coût de la réduction	N/A	- 509 \$	290 \$	- 818 \$	- 523 \$

Source : CPCS, 2023.

Le coût sur le cycle de vie de toutes les technologies carboneutres est inférieur à celui du diesel, à l'exception de l'hydrogène (FCEV). Cela montre que, pour la plupart des technologies, il est possible de réaliser des économies sur le cycle de vie du véhicule tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. C'est ce que reflète le coût négatif de la réduction des émissions. Même si les émissions de GES n'étaient pas un coût, ces résultats montrent qu'il serait économiquement judicieux de passer à des technologies carboneutres dans les conditions actuelles analysées, à l'exception de l'hydrogène vert.

Les camions caténares (OCT) montrent le coût sur le cycle de vie le plus bas et bénéficient grandement de la possibilité de répartir les coûts d'infrastructures sur une durée de vie plus longue (50 ans) et sur un grand nombre de camions utilisant l'infrastructure, ce qui contribue à réduire le coût par camion. Dans la simulation du corridor pour les camions caténares, l'installation de l'infrastructure de support entraîne des coûts d'investissements initiaux considérables. Cette infrastructure aurait une durée de vie utile de 50 ans, dépassant donc l'horizon de modélisation de 2050. Cependant, comme la période de modélisation est limitée à 2050, les scénarios de camions caténares se voient attribuer la totalité du coût d'investissement de l'infrastructure, ce qui a une incidence sur leur performance économique (par exemple, la VAN et le TRE).

Les camions au GNR et au BEV se comparent également favorablement au diesel lorsque l'on tient compte des coûts du cycle de vie. Les économies de carburant et d'entretien permettent de compenser le prix d'achat initial plus élevé de ces camions.

Le coût élevé de l'hydrogène vert est l'un des principaux inconvénients de la technologie FCEV, car il représente actuellement une dépense de carburant plus élevée que celle du diesel. La réduction monétisée des émissions de GES et la réduction des frais d'entretien d'un camion FCEV ne suffisent pas à compenser le prix d'achat et les frais de carburant plus élevés sur le cycle de vie du véhicule.

Facteurs influençant la viabilité économique

Plusieurs paramètres de modélisation peuvent avoir un impact sur la viabilité économique et l'attrait d'une technologie particulière. Une analyse de sensibilité est incluse pour prendre en compte des facteurs tels que le niveau de maturité technologique, les hypothèses sur les besoins en infrastructures, la volatilité des prix de l'énergie, les innovations et les facteurs de la demande qui peuvent avoir un impact sur le prix futur des véhicules et des infrastructures. L'analyse de sensibilité permet d'obtenir une série de mesures potentielles des résultats économiques (ex., VAN, RAC, TRE) qui peuvent aider à démontrer la robustesse d'une technologie particulière à la variabilité des paramètres de coût. Les tableaux de l'annexe 4 résument les paramètres et les quatre scénarios de technologie carboneutre pour lesquels l'analyse de sensibilité est appliquée, tandis que le graphique 10 montre l'impact relatif de ces paramètres sur la viabilité économique.

Les résultats de la sensibilité sont plus favorables au GNR, qui a le potentiel d'atteindre un RAC de 4,3 et une VAN de 2,6 milliards de dollars dans le scénario où le prix des camions au GNR est inférieur de 25 % (191 250 dollars par rapport à l'hypothèse de base de 255 000 dollars). Le taux d'actualisation peut avoir un impact important sur la VAN du scénario GNR, portant la VAN à près de 7 milliards de dollars avec un taux d'actualisation de 3 %.

Les camions électriques à batterie et les camions caténaux font également preuve d'une solide viabilité économique, le RAC des scénarios d'adoption de ces technologies n'étant que légèrement inférieur à 1 dans la gamme d'analyses de sensibilité considérée. Les scénarios de flotte de BEV sont les plus sensibles au taux d'actualisation, au prix d'achat des camions BEV et au prix du diesel. Les scénarios de flotte caténaire sont également sensibles à ces paramètres, mais c'est le taux d'actualisation qui présente la plus grande sensibilité. Un taux d'actualisation plus faible permet aux avantages futurs en termes d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et de réduction des dépenses d'exploitation et d'entretien d'avoir un impact plus important sur la VAN et de compenser le coût d'investissement élevé de l'infrastructure caténaire.

Cependant, l'utilisation d'un taux d'actualisation plus faible est bénéfique pour les scénarios GNR, batterie électrique et caténaire, car les avantages futurs (par exemple, réduction des coûts de carburant et d'entretien, réduction des émissions de GES) sont moins fortement actualisés et ont donc plus d'impact sur l'augmentation de la valeur actualisée nette.

Cependant, la technologie de l'hydrogène n'atteint pas une VAN positive ou un RAC supérieur à 1. Le scénario le plus favorable est celui où le prix de l'hydrogène vert diminue de 50 % par rapport au prix utilisé dans le scénario de base (5,75 \$/kg par rapport à l'hypothèse de base de 11,50 \$/kg). Un RAC de 0,7 est obtenu dans ce cas. En outre, l'utilisation d'un taux d'actualisation plus faible (par exemple, 3 % ou 7 %) rend le scénario de l'hydrogène moins favorable. Les dépenses annuelles en carburant (hydrogène vert) sont plus importantes que celles en carburant diesel et constituent donc un désavantage pour les années ultérieures de la prévision, ce qui influe davantage sur la VAN en cas d'utilisation d'un taux d'actualisation plus faible.

GRAPHIQUE 10. SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES À LA VIABILITÉ ÉCONOMIQUE

Moins sensible

Plus sensible

Prix de l'électricité

Prix d'achat du camion

Taux d'actualisation

Prix du diesel

CAPEX des infrastructures

Prix de l'hydrogène vert
Prix du GNR

Source : CPCS, 2023..

Le tableau suivant résume le classement de chaque technologie en fonction de la valeur actualisée nette (VAN) pour chaque scénario de sensibilité (Tableau 20). Le GNR tend à être le plus performant, avec la VAN la plus élevée, tandis que l'hydrogène montre la VAN la plus faible. Le classement du BEV par rapport à la technologie caténaire varie en fonction du scénario.

TABLEAU 20. RÉSUMÉ DES SCÉNARIOS DE SENSIBILITÉ, CLASSEMENT DES TECHNOLOGIES EN FONCTION DE LA VALEUR ACTUALISÉE NETTE (VAN)

Scénario de sensibilité (%)	Classement des technologies en fonction de la VAN la plus élevée			
	1 ^{er}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}
Base de référence	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Achat de camions BEV +25	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Achat de camions BEV -25	GNR	BEV	Caténaire	FCEV
Achat de camions FCEV +25	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Achat d'un camion FCEV -25	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Achat d'un camion caténaire +25	GNR	BEV	Caténaire	FCEV
Achat d'un camion caténaire -25	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Achat de camions GNR +25	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Achat de camions GNR -25	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Carburant diesel +25	GNR	BEV	Caténaire	FCEV
Carburant diesel -25	Caténaire	GNR	BEV	FCEV
Électricité +25	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Électricité -25	GNR	BEV	Caténaire	FCEV
Combustible hydrogène +50	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Combustible hydrogène -50	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Carburant GNR +50	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Carburant GNR -50	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Infrastructures BEV +50	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Infrastructure BEV -50	GNR	BEV	Caténaire	FCEV
Infrastructure FCEV +50	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Infrastructure FCEV -50	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Infrastructures caténaires +50	GNR	BEV	Caténaire	FCEV
Infrastructure des caténaires -50	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Infrastructures de GNR +50	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Infrastructures de GNR -50	GNR	Caténaire	BEV	FCEV
Taux d'actualisation (à 3 %)	Caténaire	RNG	BEV	FCEV
Taux d'actualisation (à 7 %)	GNR	Caténaire	BEV	FCEV

Source : CPCS, 2023.

Perspectives sur la demande énergétique totale

Toute transition vers la carboneutralité pour les camions longue distance le long du corridor A20-H401 nécessitera des investissements substantiels en infrastructures pour répondre aux futures demandes d'énergie. Le tableau 21 illustre la demande d'énergie modélisée pour chaque technologie d'ici 2050, en comparaison avec la production d'énergie actuelle en Ontario et au Québec.

Dans l'ensemble, il existe des lacunes importantes et il est nécessaire d'augmenter considérablement la production de GNR et d'hydrogène vert. En ce qui concerne les camions électriques à batterie et les camions caténaux, la demande annuelle totale d'électricité de la flotte d'ici 2050 s'élèvera à environ 1 % de la production actuelle en Ontario et au Québec combinés, ce qui démontre la nécessité d'augmenter également les capacités de production, de transmission et de distribution d'électricité.

TABLEAU 21. ESTIMATION DE LA DEMANDE ÉNERGÉTIQUE TOTALE DE LA FLOTTE DE CAMIONS CLASSE 8 SUR L'A20-H401 D'ICI 2050

Technologie	Demande énergétique annuelle totale de la flotte d'ici 2050	Production d'énergie actuelle en Ontario	Production d'énergie actuelle au Québec	Production combinée ON + QC
Batterie électrique (BEV)	3,8 TWh	153 TWh	213 TWh	366 TWh
Pile à combustible à hydrogène vert (FCEV)	261 millions de kg ⁷⁵	Inconnu	185 millions de kg	Inconnu Canada : 3 000 millions de kg
Caténaire électrique avec bloc-batterie (OCT)	3,2 TWh	153 TWh	213 TWh	366 TWh
Gaz naturel renouvelable (GNR)	4,2 PJ	2,7 PJ	3,8 PJ	6,5 PJ

Sources : régulateur canadien de l'énergie, Whitmore et Pineau (2023) Régulateur de l'énergie du Canada, Whitmore et Pineau (2023) et Statistique Canada, 2023. Tableau 25-10-0029-01 - Offre et demande d'énergie primaire et secondaire en térajoules

⁷⁵ Équivalent à 14 TWh s'il est produit par électrolyse.

Conclusion et recommandations

L'analyse effectuée est soumise à plusieurs limitations. L'état d'avancement du déploiement de camions à zéro émission au Canada, en particulier le long du corridor A20-H401, en est à un stade très précoce, avec seulement quelques projets de démonstration.

Incertitude de la modélisation et tendances clés. Compte tenu de la maturité précoce des technologies évaluées et de l'analyse de haut niveau effectuée, il existe un large éventail de paramètres de coûts et de performances disponibles dans la recherche et la littérature. La présente étude a tenté de consolider et de documenter les principaux paramètres et hypothèses de modélisation de manière transparente, afin que les travaux futurs puissent s'appuyer sur cette analyse. Plusieurs domaines recommandés pour les travaux futurs sont décrits dans la section intitulée « *Portée et limites de l'analyse.* »

Possibilités d'analyse plus poussée avec des données améliorées. Cette étude n'a pas approfondi l'analyse détaillée des différents sous-segments de l'activité de camionnage longue distance le long du corridor A20-H401. Il est nécessaire d'améliorer la collecte et l'accessibilité de ces données afin de mieux comprendre le marché du camionnage en Ontario et au Québec. Cela permettra une évaluation plus personnalisée des technologies qui pourraient offrir la meilleure solution pour la décarbonation en fonction des segments uniques du marché (par exemple, comprendre les paires origine-destination des trajets, les marchandises et les biens transportés, les moyens d'optimiser les itinéraires et d'optimiser le facteur de charge des camions). Par exemple, les BEV pourraient être plus adaptés aux transports plus légers et aux chargements plus volumineux (par exemple, les produits d'épicerie), tandis que l'hydrogène pourrait être plus adapté aux transports plus lourds (par exemple, les poutrelles d'acier et autres matériaux de construction).

Recommandation pour une approche neutre sur le plan technologique. En raison de l'absence de données détaillées sur le marché du camionnage, il pourrait être préférable de conserver une approche neutre sur le plan technologique pour l'élaboration de politique à l'heure actuelle, car différentes technologies pourraient être mieux adaptées à la décarbonation de différents segments du marché du camionnage longue distance. Les scénarios présentés dans l'analyse supposent une transition homogène vers une technologie unique, alors que différentes technologies carboneutres contribueront à la transition.

Malgré les mises en garde susmentionnées et l'exercice de modélisation théorique de l'analyse, les résultats de chaque technologie permettent de tirer quelques conclusions :

- **Les camions au GNR** offrent une justification économique pour une place dans la transition carboneutre, en raison de la maturité de la technologie du gaz naturel. Toutefois, les camions fonctionnant au GNR continuent à émettre des gaz d'échappement et des émissions fugitives en amont liées au stockage et au transport du carburant GNR. En outre, la disponibilité à grande échelle et les limites de l'offre de GNR suscitent des inquiétudes, en particulier si la demande continue d'augmenter dans le secteur des transports et dans d'autres secteurs concurrents (ex., maritime, aviation, bâtiments et industries)^{76,77}.
- **Les camions à batterie électrique** continuent de faire l'objet d'investissements importants. Cela se traduit par des progrès dans la réduction du coût des batteries, l'amélioration de l'autonomie et des temps de charge, autant d'éléments qui contribueront à lever les obstacles à l'adoption de ce

⁷⁶ Énergir, 2023. *Nouveaux raccordements 100 % renouvelables*, Énergir-U, Document 1 déposé à la Régie de l'énergie, Cause tarifaire 2023-2024, R-4213-2022, www.regie-energie.qc.ca/fr/participants/dossiers/R-4213-2022/doc/R-4213-2022-B-0279-DemAmend-Piece-2023_08_31.pdf

⁷⁷ Dagher, R., et al., 2023. *Biomasse et carboneutralité : Élaboration d'une grille d'évaluation – État des lieux au Canada*, Institut énergie Trottier et l'Accélérateur de transition, <https://iet.polymtl.ca/biomasse-et-carboneutralite/>

type de véhicules. Le coût initial de l'achat d'un BEV et de l'infrastructure de recharge est encore prohibitif pour de nombreuses flottes. Toutefois, si l'on prend en compte le cycle de vie, les BEV peuvent afficher un coût total de possession inférieur à celui des camions diesel.

L'autonomie, la disponibilité commerciale, le temps de charge et l'infrastructure constituent des obstacles à l'adoption à grande échelle. En particulier, le temps de recharge d'un BEV peut être de l'ordre de deux heures, alors qu'il ne faut que quelques minutes pour faire le plein d'un camion diesel, hydrogène ou GNR. Cela peut donc poser des problèmes et nuire à l'efficacité des opérations. En outre, le poids supplémentaire de la batterie à bord d'un BEV peut réduire la capacité de charge utile du camion, ce qui entraîne à nouveau des changements opérationnels pour reconfigurer ou transporter une charge réduite. La demande d'énergie pour la recharge rapide d'un BEV pose également des défis importants au réseau électrique, aux systèmes de transmission et de distribution de l'énergie, en plaçant une demande élevée dans une zone de recharge très localisée et en contribuant aux défis de la gestion de la demande de pointe sur l'ensemble du système électrique.

- **Les camions à pile combustible à hydrogène vert** accusent un retard par rapport à la commercialisation à grande échelle d'autres technologies, notamment les BEV. Les FCEV offrent les avantages d'une plus grande autonomie et d'un temps de ravitaillement plus court que les BEV. Cependant, les obstacles à l'adoption de la technologie FCEV comprennent le manque d'infrastructures de ravitaillement en hydrogène, le coût élevé de l'hydrogène vert et les prix d'achat élevés des nouveaux véhicules en raison d'une disponibilité limitée en Amérique du Nord. Tous ces facteurs expliquent la faible justification économique (à l'heure actuelle) des FCEV, mais l'économie s'améliorera probablement à mesure que la technologie FCEV et l'offre d'hydrogène vert continueront à se développer.
- **Les camions à caténaire** ont fait l'objet de déploiements pilotes réussis en Europe et en Californie. Ils offrent des avantages significatifs en termes de réduction des coûts d'exploitation et d'entretien. En outre, les camions connectés à la caténaire peuvent fonctionner avec des batteries plus petites, ce qui réduit le prix d'achat du véhicule. Cependant, l'Amérique du Nord est en retard par rapport à l'Europe en termes d'expérience des infrastructures caténaire dans les applications routières. Le coût d'investissement initial de l'infrastructure et le manque d'essais pourraient être un facteur limitant pour son développement sur le corridor routier le plus fréquenté du Canada.

En résumé, les technologies carboneutres dans le secteur des transports progressent rapidement. À court terme, il est souhaitable de conserver une approche neutre sur le plan technologique, car diverses technologies peuvent chacune présenter des avantages uniques pour la décarbonation de différents segments du marché du transport routier longue distance. Au fur et à mesure que les données deviennent disponibles, que les spécifications et les coûts des véhicules et des infrastructures continuent de s'améliorer, il est justifié de réexaminer l'analyse du transport routier longue distance et d'élargir le champ de l'analyse pour inclure d'autres domaines d'intérêt qui ont été notés comme étant des limites dans cette étude.

Annexe 1 | Exemples de partenariats stratégiques

Système de charge mégawatt (MCS)

La Charging Interface Initiative (CharIN) est une organisation mondiale à but non lucratif qui travaille en collaboration avec des partenaires de l'industrie pour développer et tester un MCS harmonisé pour les véhicules commerciaux lourds à batterie électrique, notamment les camions électriques longue distance. Le siège de Daimler à Portland, dans l'Oregon, servira de terrain d'essai pour le MCS. La publication finale de la norme de charge est prévue pour 2024.⁷⁸

Projet allemand ELISA - Trafic lourd électrifié et innovant sur les autoroutes

ELISA est le premier projet de banc d'essai collaboratif en Allemagne permettant aux poids lourds électriques de recharger leurs batteries à l'aide de caténaires. Le projet est financé par le ministère fédéral allemand de l'Environnement et dirigé par un sous-département du ministère de l'économie, de l'énergie, des transports et du logement de la Hesse (Hessen Mobil) avec les partenaires industriels Siemens et ENTEGA AG. L'Institut de planification des transports et d'ingénierie du trafic (ITPTE) de l'Université technique de Darmstadt supervise la recherche scientifique associée.⁷⁹

La région de la Hesse connaît les embouteillages les plus importants de tous les États fédéraux allemands, avec un flux moyen de 2 millions de véhicules par jour. L'essai des deux côtés de l'autoroute, entre Francfort et Darmstadt, est long de 10 km et opérationnel depuis mai 2019. Il est prévu d'étendre ce tronçon à 17 km. Des essais approfondis sur le terrain auront lieu jusqu'à la fin de l'année 2022.⁸⁰ Toutes les données d'essai, telles que l'état de charge de la batterie, le taux de carburant et 148 autres paramètres, sont transmises via un enregistreur de données/capteur de toit sur le camion à la ligne aérienne et aux chercheurs de l'ITPTE. Ces données sont complémentées par des entretiens d'évaluation hebdomadaires avec les conducteurs.

Corridor de carburants alternatifs entre le Canada et les États-Unis

En mai 2023, les gouvernements fédéraux du Canada et des États-Unis ont annoncé la création du premier corridor de carburants alternatifs entre le Canada et les États-Unis. Ce corridor s'étend de Kalamazoo (Michigan) à la ville de Québec. Ce corridor sera doté d'une infrastructure de recharge pour VE tous les 80 km, comprenant au moins un chargeur rapide à courant continu (CC) avec des ports CCS (Combined Charging System) à chaque emplacement.

Le corridor passe par l'autoroute I-94, par le tunnel de Détroit jusqu'au côté canadien de la frontière, par l'autoroute 401 à travers Toronto, se connectant à l'autoroute 20 à travers Montréal et à l'autoroute 40 à travers la ville de Québec.

Le programme pilote AZETEC de l'Alberta

L'Alberta Zero-Emissions Truck Electrification Collaboration (AZETEC) est le premier projet pilote de technologie zéro émission sur longue distance au Canada. Ce projet pilote comprend deux camions à pile à hydrogène qui circuleront entre Calgary et Edmonton. L'autonomie des camions est estimée à 700 km. Les camions sont constitués d'un châssis Freightliner Cascadia de classe 8 équipé d'une pile à combustible fournie par Ballard Power Systems.

⁷⁸ Electric Autonomy, "CharIN stages North American launch of its universal charging standard for commercial heavy-duty electric vehicles" (2022) <https://electricautonomy.ca/2022/10/13/charin-megawatt-charging-system-standard-north-america/>

⁷⁹ Interreg Europe 2020, «Projet ELISA - trafic lourd électrifié et innovant sur les autoroutes» (2023) <https://www.interregeurope.eu/good-practices/project-elisa-electrified-innovative-heavy-traffic-on-highways>

⁸⁰ IWAR, «ELISA, Université technique de Darmstadt» (2023) https://www.iwar.tu-darmstadt.de/sur/forschung_sur/projekte_sur/elisa/index.en.jsp

L'AZETEC est dirigé par l'Alberta Motor Transport Association avec des partenaires de l'industrie. Bison Transport et Trimac Transport seront les opérateurs pendant les deux années d'essai. Suncor fournira l'hydrogène à deux installations d'Edmonton, détenues et exploitées par Air Products et Praxair.⁸¹

Blue Road Réseau de stations GNC

En 2011, la Route bleue a été mise en place en tant que premier réseau public de stations de ravitaillement en gaz naturel comprimé et liquéfié pour l'industrie du transport au Canada. Actuellement, il y a 13 stations entre Québec et Windsor, le long de l'autoroute 401 et de l'autoroute 20, dont 6 stations offrent du GNR.⁸² La distance maximale entre les stations est de 250 km.⁸³ Des stations supplémentaires continueront d'être installées de manière flexible et stratégique dans l'ensemble de l'Ontario et du Québec.

Fabrication de camions à pile à hydrogène

Dans l'ensemble, la disponibilité des camions à pile à hydrogène est très limitée, seule une poignée de modèles étant en cours de développement dans le cadre de programmes pilotes. Toutefois, plusieurs fabricants ont annoncé qu'ils s'associaient pour développer des camions à pile à hydrogène pour des applications longue distance. Ces partenariats sont les suivants :

- Le groupe Volvo et Daimler a créé une entreprise commune pour commercialiser la technologie des piles à combustible. Les premiers essais pilotes devraient commencer dans les trois prochaines années et la production à grande échelle est prévue à partir de 2025.⁸⁴
- Hino Trucks et Toyota ont annoncé un partenariat pour commencer à développer des camions à pile à hydrogène, en s'appuyant sur le châssis de camion de Hino et la technologie de pile à combustible de Toyota.⁸⁵
- Le ministère américain de l'Énergie a accordé une subvention à une collaboration entre Navistar et Cummins pour le développement d'un camion à pile à hydrogène, qui sera testé en Californie.⁸⁶

Collaborations sur les véhicules et les infrastructures de ravitaillement en carburant

Navistar a annoncé un partenariat stratégique avec General Motors et OneH2. Navistar développera un camion long-courrier doté de la technologie de pile à combustible de General Motors et OneH2 fournira l'infrastructure de ravitaillement en hydrogène. J.B. Hunt Transport Inc., une société privée de transport et de logistique aux États-Unis, sera la première à tester la technologie en 2023. Navistar prévoit de commercialiser le modèle de camion à hydrogène d'ici 2024.⁸⁷

⁸¹ CESAR, " \$15-million project to test hydrogen fuel in Alberta's freight transportation sector" (2019) <https://www.cesarnet.ca/blog/15-million-project-test-hydrogen-fuel-alberta-s-freight-transportation-sector>

⁸² Énergir, « La route bleue, un réseau de stations en pleine expansion » (2023) <https://www.cesarnet.ca/blog/15-million-project-test-hydrogen-fuel-alberta-s-freight-transportation-sector>

⁸³ RNCAN, « Electric Charging and Alternative Fuelling Stations Locator » (2023) https://natural-resources.canada.ca/energy-efficiency/transportation-alternative-fuels/electric-charging-alternative-fuelling-stationslocator-map/20487#/analyze?fuel=CNG&cng_vehicle_class=HD&show_map=true&cng_psis=3600&country=CA&cng_fill_type=Q&cng_has_rng=true

⁸⁴ Transport Topics, "Trucking Takes Initial Steps Toward a Zero-Emission Future" (2020) <https://www.ttnews.com/articles/trucking-takes-initial-steps-toward-zero-emission-future>

⁸⁵ Toyota, « Toyota and Hino to Jointly Develop Heavy-Duty Fuel Cell Truck » (2020) <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/32024083.html>

⁸⁶ Cummins, « Cummins and Navistar to collaborate on heavy-duty Class 8 truck powered by hydrogen fuel cells » (2020) <https://www.cummins.com/news/releases/2020/11/11/cummins-and-navistar-collaborate-heavy-duty-class-8-truck-powered-hydrogen>

⁸⁷ Navistar, 2012. Navistar Collaborates with General Motors And OneH2 To Launch Hydrogen Truck Ecosystem, <https://news.navistar.com/2021-01-27-Navistar-Collaborates-with-General-Motors-And-OneH2-To-Launch-Hydrogen-Truck-Ecosystem>

Annexe 2 | Exemples d'adopteurs précoces au Canada

TABEAU 22. LES PREMIERS À AVOIR ADOPTÉ LE CONCEPT DE CAMIONS CARBONEUTRES AU CANADA

Entreprise	Classification	Biographie de l'entreprise	Efforts de décarbonation
Kruger		Kruger est une entreprise québécoise de fabrication de papier qui possède une division énergie. Elle effectue des livraisons dans tout l'est du Canada à partir de son usine située près de Joliette. Kruger Énergie est propriétaire des camions, mais l'équipement est exploité par des entreprises tierces.	Kruger a reçu deux camions Peterbilt 579EVs BEV de classe 8 en septembre 2022. L'entreprise a versé des acomptes pour 65 camions électriques Peterbilt, Lion et Tesla. ⁸⁸ Les camions électriques font la navette 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 entre deux sites distants de 71 km. Kruger Energy souhaite partager son expérience avec d'autres (par exemple, la SAQ, Molson Coors, le Port de Montréal). ⁸⁹
Amazon	Private fleet operator	Le plus grand détaillant de commerce électronique d'Amérique du Nord. Amazon possède une flotte privée de camions long-courriers, de camionnettes de livraison pour le premier et le dernier kilomètre et d'autres véhicules pour gérer ses chaînes d'approvisionnement et son service de livraison express. Amazon prévoit de convertir sa flotte de livraison pour qu'elle fonctionne à 100 % à l'énergie renouvelable d'ici 2030 . ⁹⁰	Amazon prévoit d'acheter jusqu'à 2 500 camions électriques à batterie à Lion Electric Co d'ici à 2025. ⁹¹
Walmart	Opérateur de flotte privée	Le plus grand détaillant à grande surface d'Amérique du Nord et le troisième opérateur de flotte privée avec plus de 7 400 camions. ⁹²	Walmart a l'intention d' électrifier tous ses véhicules, y compris les camions longue distance, d'ici à 2040 . Walmart Canada a triplé ses réservations de semi-remorques Tesla à batterie électrique pour atteindre un total de 130 véhicules. ⁹³
Loblaws	Opérateur de flotte privée	Loblaws est le plus grand détaillant de produits alimentaires et pharmaceutiques du Canada. Loblaws possède et exploite des entrepôts, des centres de distribution et une flotte de camions pour le service du premier et du dernier kilomètre, dont 160 sont des camions à cabine. Loblaws s'est fixé pour objectif d'avoir une flotte carboneutre d'ici 2030 . ⁹⁴	En 2023, Loblaws a annoncé qu'elle mettrait en service son tout premier camion lourd Freightliner eCascadia entièrement électrique pour le transport des produits d'épicerie de son entrepôt de Boucherville. Les camions à batterie peuvent parcourir 370 km. ⁹⁵ Cinq camions électriques à batterie supplémentaires devraient être livrés en 2023/24.

⁸⁸ Bouchard, S., 2023, *Kruger Energy learning lessons from electric trucks*, Truck News, publié le 13 mars 2023, <https://www.trucknews.com/sustainability/kruger-energy-learning-lessons-from-electric-trucks/1003173524/>

⁸⁹ Baril, H., 2023. *Verdir le transport lourd, une boucle à la fois*, La Presse, publié le 19 janvier 2023, <https://www.trucknews.com/sustainability/kruger-energy-learning-lessons-from-electric-trucks/1003173524/>

⁹⁰ New York Post, « Amazon pledges 100 % renewable energy by 2030 » (2019) <https://nypost.com/2019/09/20/amazon-pledges-100-percent-renewable-energy-by-2030/>

⁹¹ Electrive, « Huge order for Lion Electric trucks from Amazon » (2021) <https://www.electrive.com/2021/01/11/huge-order-for-lion-electric-trucks-from-amazon/>

⁹² Transport Topics, « Walmart Aims to Eliminate Emissions From Its Fleet by 2040 » (2020) <https://www.ttnews.com/articles/walmart-aims-eliminate-emissions-its-fleet-2040>

⁹³ Transport Topics, « Trucking Takes Initial Steps Toward a Zero-Emission Future » (2020) <https://www.ttnews.com/articles/trucking-takes-initial-steps-toward-zero-emission-future>

⁹⁴ Les Compagnies Loblaw Ltée, « Les Compagnies Loblaw Ltée va de l'avant avec ses plans d'électrification de la flotte avec l'introduction du Freightliner eCascadia » (2021) <https://www.loblaw.ca/en/loblaw-companies-limited-moves-forward-with-plans-to-electrify-fleet-with-the-introduction-of-freightliner-ecascadia/>

⁹⁵ Transport Routier, 2023. Le premier camion lourd entièrement électrique de Loblaw arrive dans le grand Montréal, publié le 17 avril 2023, <https://www.transportroutier.ca/nouvelles/le-premier-camion-lourd-entierement-electrique-de-loblaw-arrive-dans-le-grand-montreal/>

Entreprise	Classification	Biographie de l'entreprise	Efforts de décarbonation
Bison Transport	Société T&L	La plus grande entreprise de camionnage longue distance au Canada avec une flotte de plus de 1 400 camions . ⁹⁶ Le siège de Bison Transport est situé à Winnipeg, au Manitoba.	Bison est l'un des deux opérateurs du projet pilote de transport routier à l'hydrogène AZETEC en Alberta. ⁹⁷ Bison a déployé deux camions Freightliner eCascadia à batterie électrique sur un itinéraire transfrontalier entre le terminal de Bison à Delta, en Colombie-Britannique, et le site d'un client dans l'État de Washington. ⁹⁸
Trimac Transport	Société T&L	Entreprise de transport de marchandises en vrac, dont le siège se trouve à Calgary, en Alberta. Trimac Transport possède et exploite environ 2 100 camions . ⁹⁹	Trimac est l'un des deux opérateurs du projet pilote de transport routier à l'hydrogène AZETEC en Alberta.
Logistique du groupe Pride	Société T&L	Le groupe Pride est spécialisé dans le transport de marchandises à température contrôlée et de produits pharmaceutiques. Il exploite environ 400 camions à travers le Canada et les États-Unis, en se concentrant sur les marchés de l'Ontario et du Québec. ¹⁰⁰	Le groupe Pride a passé la plus importante commande au Canada pour 100 camions électriques à batterie , Lion6 et Lion8 (modèles de classe 6 et 8), auprès de Lion Electric Co. ¹⁰¹
CNTL	Société T&L	CNTL, une filiale de CN Rail, assure le ramassage et la livraison de conteneurs intermodaux entre les terminaux du CN et les sites des clients. CNTL fait appel à plus de 1 000 propriétaires exploitants pour le transport de 1,5 million de conteneurs en provenance et à destination de 23 terminaux intermodaux au Canada. ¹⁰²	CNTL a acheté 50 camions électriques (classe 8) à Lion Electric Co pour le transport de conteneurs entre les installations intermodales et les sites des clients. ¹⁰³
Camionnage CP	Société T&L	Camionnage CP, basé dans le Grand Montréal, exploite une flotte de plus de 65 camions long-courriers et 150 camions de transport . ¹⁰⁴	Camionnage CP a annoncé l'achat d'un camion électrique à batterie pilote (Kenworth T680E) pour les opérations de dragage du port de Montréal. ¹⁰⁵
Groupe Metro Supply Chain	Société T&L	Metro Supply Chain Group, dont le siège se trouve à Vaughan, en Ontario, exploite un parc de véhicules pour la livraison du premier et du dernier kilomètre dans les principales zones urbaines et suburbaines du Canada.	Metro a commandé six camions électriques à batterie , trois à Lion Electric Co et trois à BYD, et prévoit d'acheter six camions électriques à batterie supplémentaires en 2022. ¹⁰⁶

Sources : Multiples, citées dans les notes de bas de page

⁹⁶ Trucking Monitor, « Top 15 Trucking Companies in Canada for 2022 » (2022) <https://www.truckingmonitor.com/top-canadian-trucking-companies/#:-:text=Top%2015%20Trucking%20Companies%20in%20Canada%20for%202022,...%208%20Mullen%20Trucking%20Corporation%20...%20More%20items>

⁹⁷ CESAR, « \$15-million project to test hydrogen fuel in Alberta's freight transportation sector » (2019) <https://www.cesarnet.ca/blog/15-million-project-test-hydrogen-fuel-alberta-s-freight-transportation-sector>

⁹⁸ Bison Transport, « Bison Transport Tests Full Battery Electric Vehicles (BEV) » (2021) <https://www.bisontransport.com/news/article/1/139>

⁹⁹ Trimble Transportation, « Trimac Transportation » (2022) <https://transportation.trimble.com/resources/case-studies/trimac-transportation-2>

¹⁰⁰ Pride Group Logistics, « Pride Group Logistics expands US presence with acquisition of Arnold Transportation Services, Inc. » (2022) <https://shipwithpride.com/en/pride-logistics-resources-news.php#:-:text=About%20Pride%20Group%20Logistics%3A%20Pride%20Group%20Logistics%20is,with%20terminals%20in%20Ontario%2C%20Quebec%2C%20Alberta%2C%20and%20Illinois.>

¹⁰¹ Truck News, « Lion Electric lands largest order with Pride Group » (2021) <https://www.trucknews.com/sustainability/lion-electric-lands-largest-order-with-pride-group/1003149939/>

¹⁰² CN, « CNTL Trucking Services » (2022) <https://www.cn.ca/en/our-services/trucking/cntl/>

¹⁰³ CN, « CN Launches New Pilot Project Using Electric Trucks » (2019) <https://www.cn.ca/en/news/2019/04/cn-launches-new-pilot-project-using-electric-trucks/>

¹⁰⁴ Camionnage CP, « Services de transport » (2022) <https://www.camionnagecp.com/transport>

¹⁰⁵ Electric Autonomy, « Kenworth electric truck coming to Canada after Camionnage order » (2021) <https://electricautonomy.ca/2021/09/11/kenworth-electric-truck-camionnage-canada/#:-:text=Camionnage%20CP%20has%20placed%20the%20%E2%80%9Cfirst%20order%E2%80%9D%20in,Port%20of%20Montreal%20to%20warehouses%20in%20the%20area.>

¹⁰⁶ Electric Autonomy, « Metro Supply Chain Group to deploy six electric trucks in 2021 with more to follow » (2021) <https://electricautonomy.ca/2021/04/16/metro-supply-chain-electric-trucks/>

Annexe 3 | Sources de données

- [1] Federal Highway Administration [FHWA], 2019. *Tableau VM-1 : Annual Vehicle Distance Traveled in Miles and Released Data - 2019*, Highway Statistics Series 2019, U.S. Department of Transportation, www.fhwa.dot.gov/policyinformation/statistics/2019/vm1.cfm (consulté le 13 octobre 2022).
- [2] Boer, E., Aarnink, S., Kleiner, F., Pagenkopf, J., 2013. *Zero emissions trucks : An overview of state-of-the-art technologies and their potential*, DELFT and CE Delft, commissioned by the ICCT., https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/CE_Delft_4841_Zero_emissions_trucks_Def.pdf
- [3] Buysse, C., Sharpe, B., Delgado, O., 2021. *Efficiency technology Potential for heavy-duty diesel Vehicles in the United States through 2035*, International Council on Clean Transportation, <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/12/efficiency-tech-potential-hdvs-us-2035-nov21.pdf>.
- [4] Ressources naturelles Canada, « Prix de détail mensuels du diesel en 2022 » (2022) https://www2.nrcan.gc.ca/eneene/sources/pripri/prices_bycity_e.cfm?productID=5&locationID=66&locationID=8&locationID=39&locationID=28&locationID=17&frequency=M&priceYear=2022&Redisplay=
- [5] Sharp, B., Basma, H., 2022. *A Meta-study of purchase costs for zero-emission trucks*, ICCT, <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/02/purchase-cost-ze-trucks-feb22-1.pdf>.
- [6] California Air Resources Board [CARB], 2019. *Document de discussion sur le coût total de possession des camions propres avancés. Preliminary Draft for Comment*, 22 février 2019, https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-06/190225tco_ADA.pdf
- [7] Zhao, H., Wang, Q., Fulton, L., Jaller, M., Burke, A., 2018. *Une comparaison des technologies de camionnage routier à zéro émission*. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, Research Report UC-ITS-2017-50, <https://escholarship.org/uc/item/1584b5z9>
- [8] Earl et al., 2018. *Analysis of long-haul battery electric trucks in the EU : Marketplace and technology, economic, environmental, and policy perspectives*, Amended paper (August 2018) originally presented at the 8th Commercial Vehicle Workshop in Graz, 17-18 May 2018, www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/20180725_T&E_Battery_Electric_Trucks_EU_FINAL.pdf.
- [9] American Transportation Research Institute [ATRI], 2022. *Charging Infrastructure Challenges for the U.S. Electric Vehicle Fleet*, décembre 2022, <https://truckingresearch.org/2022/12/06/charging-infrastructure-challenges-for-the-u-s-electric-vehicle-fleet/>.
- [10] Hydro-Québec, 2022. *Comparaison des prix de l'électricité*, <https://www.hydroquebec.com/business/customer-space/rates/comparison-electricity-prices.html>
- [11] American Transportation Research Institute [ATRI], 2022. *Charging Infrastructure Challenges for the U.S. Electric Vehicle Fleet*, décembre 2022, <https://truckingresearch.org/2022/12/06/charging-infrastructure-challenges-for-the-u-s-electric-vehicle-fleet/>
- [12] Département de l'énergie des États-Unis [DOE], 2022. *Charging Infrastructure Operation and Maintenance*, Alternative Fuels Data Center, page web, https://afdc.energy.gov/fuels/electricity_infrastructure_maintenance_and_operation.html (consulté le 5 octobre 2022).
- [13] Kane, K., 2020. « Daimler Presents GenH2 Truck Fuel-Cell Concept Truck », *InsideEvs*, article de presse publié le 17 septembre 2020, <https://insideevs.com/news/444480/mercedes-genh2-truck-fuel-cell-concept-truck/>.
- [14] Hyundai, 2020. *Hyundai XCIENT Fuel Cell Heads to Europe for Commercial Use*, communiqué de presse, 6 juillet 2020, www.hyundai.news/eu/articles/press-releases/hyundai-xcient-fuel-cell-heads-to-europe-for-commercial-use.html.
- [15] Transport & Environment, 2021. *How to ecarbonize long-haul trucking in Germany. Une analyse des technologies disponibles pour les véhicules et des coûts associés*, www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2021_04_TE_how_to_decarbonise_long_haul_trucking_in_Germany_final.pdf
- [16] Meillaud, L., 2020. « Une deuxième station à l'hydrogène prévue au Québec », *H2 Today*, Article de presse publié le 11 mars 2020, <https://hydrogentoday.info/une-deuxieme-station-a-lhydrogene-prevue-au-quebec/#:~:text=La%20toute%20premi%C3%A8re%20station%20publique%20de%20ravitailement%20en,%24%29%20et%20Ressources%20naturelles%20Canada%20%281%20million%20%24%29>
- [17] Koleva, M., Melania, M., 2020. *Hydrogen Fueling Stations Cost*, Hydrogen Program Record, U.S. Department of Energy, www.hydrogen.energy.gov/pdfs/21002-hydrogen-fueling-station-cost.pdf
- [18] Kayser-Bril, C., Ba, R., Whitmore, J., Kinjarapi, A., 2021. *Décarbonation du camionnage longue distance dans l'Est du Canada - Simulation de la technologie e-Highway sur le corridor autoroutier A20-H401*, CPCS et Chaire en gestion du secteur de l'énergie - HEC Montréal, <https://energie.hec.ca/canada-ehighway/>.
- [19] Pedinotti-Castelle, M., Pineau, P.-O., Amor, B., 2020. *Décarbonation du transport routier des marchandises au Québec : Scénarios de réduction des émissions de GES et électrification*, Chaire en gestion du secteur de l'énergie - HEC Montréal, Rapports d'étude, No 4 | 2020], <https://energie.hec.ca/cgse-hec-re042020/>
- [20] Moultak, M., Lutsey, N., Hall, D., 2017. *Transition vers des véhicules de transport de marchandises lourds à zéro émission*, https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Zero-emission-freight-trucks_ICCT-white-paper_26092017_vF.pdf.
- [21] Pollution Probe, "What Does the Future Hold for Natural Gas ?" (Quel est l'avenir du gaz naturel ?) (2019) https://www.pollutionprobe.org/wp-content/uploads/Future-of-Natural-Gas_November-2019_Summary.pdf
- [22] Ministère des Finances du Canada, 2021. *Fuel Charge Rates for Listed Provinces and Territories for 2023 to 2030*, Gouvernement du Canada, page Web, dernière modification le 3 mars 2021, www.canada.ca/en/departement-finance/news/2021/12/fuel-charge-rates-for-listed-provinces-and-territories-for-2023-to-2030.html (consulté le 1^{er} février 2023).

- ^[23] Ledna, C., et al. 2022. *Decarbonizing Medium- & Heavy-Duty On-Road Vehicles : Zero-Emission Vehicles Cost Analysis*, NREL, www.nrel.gov/docs/fy22osti/82081.pdf
- ^[24] NREL, C. Hunter et al. *Spatial and Temporal Analysis of the Total Cost of Ownership for Class 8 Tractors and Class 4 Parcel Delivery Trucks*, 2021, <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/71796.pdf>.
- ^[25] Burke, A., 2022. *Evaluation of the Economics of Battery-Electric and Fuel Cell Trucks and Buses : Methods, Issues, and Results*, Institute of transportation studies, UC Davis, <https://escholarship.org/content/qt1g89p8dn/qt1g89p8dn.pdf>
- ^[26] Åkerman, P. 2023 eHighway - Siemens Mobility (Allemagne) - Réunion
- ^[27] StratON. 2020. Stratégies d'évaluation et de déploiement pour les véhicules lourds reliés à des caténaires, <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf>
- ^[28] Doyon F. 2023 *Renewable natural gas (RNG) Decarbonize long-haul trucking today*, https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2023/04/7-DOYON-ENERGIR_PPT.pdf
- ^[29] Département de l'énergie des États-Unis. 2014 Costs Associated with Compressed Natural Gas Vehicle Fueling Infrastructure (Coûts associés à l'infrastructure de ravitaillement des véhicules au gaz naturel comprimé), <https://www.osti.gov/biblio/1156975/>
- ^[30] Smith R. 2023 Change Energy Services - Meeting
- ^[31] Bower G. 2021. InsideEVs *Tesla Semi 4680 Battery Pack Engineering Analysis*, <https://insideevs.com/news/521840/tesla-semi-480-battery-analysis/>
- ^[32] Khan M. et al. 2022 The Transition Accelerator, *Techno-economics of a new hydrogen value chain supporting heavy-duty transport*, <https://transitionaccelerator.ca/techno-economics-of-a-new-hydrogen-value-chain-supporting-heavy-duty-transport/>
- ^[33] PwC, 2023, *Electric vehicles and charging infrastructure*, <https://www.pwc.com/us/en/industrial-products/publications/assets/pwc-electric-vehicles-charging-infrastructure-mindset.pdf>

Annexe 4 | Analyse de sensibilité

TABLEAU 23. RÉSUMÉ DES PARAMÈTRES POUR L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Paramètres	Sensibilité	Raison d'être
Prix d'achat du camion	+/- 25 %	La poursuite de la recherche, du développement et de la commercialisation des technologies à zéro émission peut contribuer à faire baisser le prix des batteries, des piles à combustible et d'autres composants, ce qui pourrait avoir une incidence sur le prix futur des camions de classe 8. D'autre part, la concurrence d'autres juridictions pour l'achat de camions à zéro émission (par exemple, la Californie) peut avoir un impact sur la compétitivité du secteur et les prix d'achat en Ontario et au Québec.
Diesel	+/- 25 %	Les prix du diesel sont soumis à la volatilité de divers facteurs macroéconomiques du côté de la demande (par exemple, les conditions économiques et l'activité industrielle) et du côté de l'offre (par exemple, les décisions de l'OPEP en matière de production), qui peuvent tous deux avoir une incidence sur l'avenir des prix du diesel.
Électricité	+/- 25 %	Les prix de l'électricité sont complexes et dépendent de plusieurs facteurs, notamment l'heure d'utilisation, l'offre, la demande de pointe et la localisation. En outre, différentes structures tarifaires peuvent apparaître au fur et à mesure que la recharge des véhicules électriques se développe.
Hydrogène	+/- 50 %	Actuellement, la production d'hydrogène vert est limitée. La volatilité future des prix pourrait être due à des facteurs liés à l'offre et à la demande d'hydrogène vert en tant que source de carburant (par exemple, les limitations de l'offre et la concurrence avec d'autres modes de transport pour l'utilisation en tant que source de carburant).
RNG	+/- 50 %	Le GNR est actuellement disponible, bien qu'à une échelle limitée. La volatilité future des prix peut être due à des facteurs liés à l'offre et à la demande (par exemple, la disponibilité de l'offre et les cas d'utilisation concurrents pour le chauffage des bâtiments et pour d'autres modes de transport).
Infrastructure	+/- 50 %	On peut s'attendre à ce que les coûts d'infrastructure varient considérablement, car le déploiement de stations de ravitaillement en carburant alternatif et de recharge rapide est limité au Canada, en particulier le long du corridor de l'autoroute 401 - A20, pour servir de base à la mise à l'échelle des estimations de coûts fondées sur des références. De plus, différents modèles d'affaires, solutions d'infrastructure et conditions propres au site (p. ex. type de station de ravitaillement en hydrogène - section 2.2) contribueront à la variabilité de l'estimation des coûts futurs de l'infrastructure.
Taux d'actualisation	3 %, 7 %	Les lignes directrices du gouvernement fédéral suggèrent des taux d'actualisation inférieurs à 10 % dans certains cas d'évaluation de projets.

Source : CPCS, 2023.

TABLEAU 24. RÉSUMÉ DES SCÉNARIOS DE SENSIBILITÉ POUR LES BEV

Scénario	VAN (M \$)	RAC	TRE
Scénario de base	294 \$	1,1	4,0 %
Achat d'un camion +25 %	-764 \$	0,8	N/A
Achat d'un camion -25 %	1 352 \$	1,7	21,8 %
Carburant diesel +25 %	994 \$	1,3	12,1 %
Carburant diesel -25 %	-407 \$	0,9	N/A
Électricité +25 %	179 \$	1,1	2,5 %
Électricité -25 %	408 \$	1,1	5,4 %
Infrastructures +50 %	150 \$	1,0	1,9 %
Infrastructure -50 %	438 \$	1,1	6,2 %
Taux d'actualisation (à 3 %)	2 722 \$	1,3	11,1 %
Taux d'actualisation (à 7 %)	835 \$	1,2	6,9 %

Source : CPCS, 2023.

TABLEAU 25. RÉSUMÉ DES SCÉNARIOS DE SENSIBILITÉ POUR LES FCEV

Scénario	VAN (M \$)	RAC	TRE
Scénario de base	-2 224 \$	0,3	N/A
Achat d'un camion +25 %	-2 900 \$	0,2	N/A
Achat d'un camion -25 %	-1 548 \$	0,4	N/A
Carburant diesel +25 %	-1 593 \$	0,4	N/A
Carburant diesel -25 %	-2 854 \$	0,2	N/A
Hydrogène +50 %	-3 999 \$	0,2	N/A
Hydrogène -50 %	-449 \$	0,7	N/A
Infrastructures +50 %	-2 484 \$	0,3	N/A
Infrastructure -50 %	-1 964 \$	0,3	N/A
Taux d'actualisation (à 3 %)	-7 908 \$	0,3	N/A
Taux d'actualisation (à 7 %)	-3 741 \$	0,3	N/A

Source : CPCS, 2023.

TABLEAU 26. RÉSUMÉ DES SCÉNARIOS DE SENSIBILITÉ DES OCT

Scénario	VAN (M \$)	RAC	TRE
Scénario de base	295 \$	1,1	0,9 %
Achat d'un camion + 25	-143 \$	0,9	N/A
Achat d'un camion - 25	733 \$	1,3	2,1 %
Carburant diesel + 25	925 \$	1,3	2,5 %
Carburant diesel - 25	-336 \$	0,9	N/A
Électricité + 25	210 \$	1,1	0,6 %
Électricité - 25	380 \$	1,1	1,1 %
Infrastructures + 50	-896 \$	0,8	N/A
Infrastructure - 50	1,486 \$	1,9	6,2 %
Taux d'actualisation (à 3 %)	7,074 \$	2,2	7,7 %
Taux d'actualisation (à 7 %)	1,872 \$	1,5	3,7 %

Source : CPCS, 2023.

TABLEAU 27. RÉSUMÉ DES SCÉNARIOS DE SENSIBILITÉ AU GNR

Scénario	VAN (M \$)	RAC	TRE
Scénario de base	1 606 \$	2,2	29,4 %
Achat d'un camion + 25	985 \$	1,5	15,3 %
Achat d'un camion - 25	2 229 \$	4,3	50,3 %
Carburant diesel +50 %	2 569 \$	3,3	58,9 %
Carburant diesel -50 %	969 \$	1,9	24,9 %
RNG +50 %	1 099 \$	1,8	21,4 %
GNR -50 %	2 114 \$	2,6	36,9 %
Infrastructures +50 %	1 445 \$	2,0	22,2 %
Infrastructure -50 %	1 769 \$	2,6	42,0 %
Taux d'actualisation (à 3 %)	6 970 \$	2,7	38,2 %
Taux d'actualisation (à 7 %)	2 958 \$	2,4	33,0 %

Source : CPCS, 2023.