

Perspectives énergétiques canadiennes
**La décarbonation du transport hors route
dans les trajectoires vers la carboneutralité**
3^e édition



Auteurs
Simon Langlois-Bertrand
Normand Mousseau

Auteurs

Simon Langlois-Bertrand,

Ph. D. - Associé de recherche, Institut de l'énergie Trottier

Normand Mousseau,

Ph. D - Directeur scientifique, Institut de l'énergie Trottier ;

professeur de physique, Université de Montréal

Révision

Louis Beaumier, MASc

Graphisme et mise en page

Norman Terrault

À propos de l'Institut de l'énergie Trottier (IET)

L'IET a été créé en 2013 grâce à un don exceptionnel de la Fondation familiale Trottier à Polytechnique Montréal.

Depuis, l'IET prend part à tous les débats énergétiques au pays. À l'origine de grandes réflexions collectives, l'équipe mobilise les savoirs, analyse les données, vulgarise les enjeux et recommande des plans d'action justes et efficaces. L'IET contribue également à la recherche et à la formation universitaires. Son indépendance lui confère une neutralité essentielle à l'approche collaborative qu'il préconise et facilite le travail avec les acteurs les plus aptes à faire avancer la transition énergétique, tout en lui permettant d'être librement critique lorsque cela s'avère pertinent.

Alors que le mandat initial d'une durée de dix ans arrivait à échéance, la Fondation familiale Trottier a choisi de renouveler sa confiance à l'égard de l'IET et d'accorder un nouveau don. L'IET s'étant forgé un statut d'institution incontournable et au vu de la portée de ses actions, il a été jugé souhaitable de prolonger son mandat. L'équipe pourra ainsi continuer d'offrir des avis fondés sur la science et d'enrichir le dialogue sociétal, ceci afin de faire progresser la façon dont nous produisons, convertissons, distribuons et utilisons l'énergie.

Clause de non-responsabilité

Responsibility for the content of this report lies solely with its authors.

La responsabilité du contenu de ce rapport incombe exclusivement à ses auteurs. Toutes les précautions raisonnables ont été prises par les auteurs pour vérifier la fiabilité du matériel contenu dans cette publication. Ni les auteurs ni aucune personne agissant en leur nom ne peuvent être tenus responsables de l'utilisation qui pourrait être faite de ces informations.

Citation

Langlois-Bertrand, S., Mousseau, N. (2025). La décarbonation du transport hors route dans les trajectoires vers la carboneutralité. Dans Langlois-Bertrand, S., Mousseau, N., Beaumier, L. (Eds.), Canadian Energy Outlook, 3e édition, Institut de l'énergie Trottier - Polytechnique Montréal.

© 2025 Institut de l'énergie Trottier, Polytechnique Montréal.

version 20250507

ISBN : 978-2-924597-28-6

Résumé

La décarbonation de l'économie canadienne afin d'atteindre l'objectif de carboneutralité d'ici 2050 nécessite des transformations rapides et profondes de toutes les sources d'émissions du pays. Dans le cadre des efforts visant à accélérer la décarbonation et la mise en œuvre de trajectoires vers la carboneutralité pour l'ensemble du Canada, le transport hors route (voir encadré ES.1) a jusqu'à présent été largement négligé. Cette omission s'explique en partie par la nature vaste et éclectique du secteur, qui est souvent utilisé comme catégorie résiduelle dans les analyses de la demande énergétique et des émissions de GES. Par conséquent, les services fournis dans la catégorie hors route varient considérablement, allant des très gros engins utilisés dans les carrières aux souffleurs de feuilles portatifs.

Encadré ES.1 – Définition du terme “ hors route ”

Nous entendons par “ transport hors route ” les équipements mobiles ou portatifs, qui comprennent la machinerie mobile, mais aussi les véhicules non immatriculés pour circuler sur la voie publique. Cette catégorie est présente dans tous les secteurs de l'industrie (par exemple, les asphalteuses), les services résidentiels et récréatifs (par exemple, les souffleurs de feuilles), l'agriculture (par exemple, les tracteurs agricoles) et les activités commerciales (par exemple, les équipements pour pelouse et jardin), y compris les aéroports et l'administration publique.

Malgré ce manque d'attention, les émissions de la catégorie du transport hors route dans le Rapport d'inventaire national (RIN) du Canada représentaient 28,8 % (56,4 Mt.CO₂éq) des émissions totales du secteur des transports à l'échelle nationale en 2022. De plus, dans la dernière édition des Perspectives énergétiques canadiennes (Langlois-Bertrand et al. 2024), les projections à l'horizon 2050 montrent une augmentation de 13 % de ces émissions dans le scénario de référence, ce qui en ferait la principale source d'émissions du secteur des transports au milieu du siècle, légèrement devant le transport routier. Dans les scénarios atteignant la carboneutralité en 2050 modélisés dans ce même rapport, ce rôle accru est encore plus dominant en termes relatifs : malgré une forte réduction des émissions du transport hors route (-57 % d'ici 2050), leur part relative augmente pour représenter 57 % des émissions totales restantes du transport. Cette croissance reflète à la fois le coût élevé de nombreuses solutions à faible intensité de carbone dans le secteur, les limites des solutions

technologiques disponibles pour aller de l'avant, ainsi que l'absence de mesures politiques et réglementaires pour orienter les transformations nécessaires.

Le présent document est destiné à servir de base de discussion sur les stratégies de décarbonation du transport hors route au Canada afin de faire de ce secteur un contributeur clé à la trajectoire vers la carboneutralité. Il présente d'abord un profil détaillé des sources d'émissions du transport hors route. S'appuyant sur les informations recueillies lors d'une analyse de la littérature institutionnelle et universitaire sur la décarbonation hors route et enrichi par des conversations menées récemment par l'IET avec des experts du domaine impliqués dans la décarbonation des véhicules et des machines hors route, il donne ensuite un aperçu de certains des principaux défis et opportunités associés à l'élaboration d'une feuille de route pour la décarbonation dans chaque sous-secteur pour les besoins du transport hors route.

L'examen se concentre sur les options de décarbonation pour des sous-secteurs spécifiques ainsi que sur les défis associés à certaines technologies électriques. Les descriptions ne se veulent pas exhaustives, mais visent plutôt à présenter plusieurs tendances et idées clés du transport hors route liées aux questions les plus pressantes auxquelles sont confrontées les organisations et les gouvernements qui tentent de décarboner leurs activités ou leurs secteurs dans leur ensemble. Comme la plupart des documents disponibles s'attardent à un contexte hors Canada, les contributions additionnelles issues des échanges avec des experts ont servi de base pour discuter de certains aspects ou formes de ces défis dans le contexte plus spécifique des secteurs canadiens.

En rassemblant ces informations, il est possible d'identifier des questions transversales dans la conception des politiques de décarbonation des transports hors route dans le contexte canadien. Par exemple, un premier défi consiste à déterminer si une **technologie de remplacement** qui ne produit pas d'émissions tout en offrant des conditions viables pour le service offert **est facilement disponible**. Un autre défi est que les équipements non émetteurs peuvent présenter **des contraintes et des exigences supplémentaires**, telles que l'autonomie et le temps de recharge pour les équipements électriques. En outre, les sources d'énergie alternatives pour propulser les nouveaux équipements peuvent nécessiter des infrastructures additionnelles importantes.

Par conséquent, l'élaboration d'une approche stratégique pour la décarbonation du transport hors route doit tenir compte du fait que les services fournis par les équipements hors route sont très diversifiés, ce qui rend nécessaire une évaluation comparative de ces défis, de leur importance pour des services hors route spécifiques, des opportunités dans certains contextes canadiens et des avantages de chaque option au-delà de la réduction des émissions de GES et de la contribution à une trajectoire carboneutre pour le Canada. Une fois cette évaluation réalisée, nous proposons de concevoir l'approche stratégique à l'aide d'un processus d'apprentissage par étapes. Une telle approche devrait donner la priorité aux opportunités immédiates, en concevant des projets pilotes ciblés de manière à maximiser les possibilités d'apprentissage pour les activités hors route, et identifier les domaines où les trajectoires de décarbonation sont les plus difficiles à court et moyen terme et où une exploration approfondie permettra de clarifier les besoins.

Dans cette optique, les étapes de cette approche devraient suivre quatre principes généraux :

- 1) Maximiser l'électrification lorsque cela est possible : parmi les différentes options de changement de source d'énergie, le passage du diesel à l'électricité est la plus compatible avec les objectifs de zéro émission nette.
- 2) Explorer d'autres sources d'énergie à faible intensité de carbone en fonction des avantages connexes potentiels et de la disponibilité des infrastructures à proximité.
- 3) Anticiper les besoins en matière de collecte d'informations sur les options technologiques et partager ces informations avec les acteurs et les parties prenantes concernés.
- 4) Lancer des projets pilotes pour tester les options. Sur la base de l'évaluation comparative des options spécifiques de décarbonation et des trois critères ci-dessus, les projets pilotes doivent être choisis et conçus de manière à maximiser le potentiel d'apprentissage et à avoir des retombées sur d'autres secteurs où les options de décarbonation sont confrontées à des défis similaires.

Table des matières

Résumé	III
1. Introduction	1
2. Profil du secteur du transport hors route	2
2.1 Définir le hors route	2
2.2 Comparaison avec la classification selon les secteurs économiques	5
2.3 Ventilation des émissions de GES	6
2.4 Ventilation de la consommation d'énergie	7
3. Défis et opportunités dans les différents secteurs	8
3.1 Extraction minière et extraction de pétrole et de gaz	9
3.2 Secteur commercial, institutionnel et de l'administration publique	10
3.3 Construction	11
3.4 Foresterie	12
3.5 Agriculture	13
3.6 Résidentiel et récréatif	13
4. Conclusion	14
5. Références	17



1. Introduction

La décarbonation de l'économie canadienne en vue d'atteindre l'objectif de carboneutralité d'ici 2050 nécessite des transformations rapides et profondes de toutes les sources d'émissions. La production et la consommation d'énergie étant directement responsables de plus de 80 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) du pays, la plupart des efforts de réduction des émissions se sont jusqu'à présent concentrés sur la transformation du système énergétique. Ces efforts comprennent des initiatives visant à remplacer les sources d'énergie existantes par des sources non émettrices, à réduire l'empreinte GES des opérations de transport et de distribution de l'énergie et à rendre l'utilisation de l'énergie plus productive.

Si les défis associés aux voies de transformation visant à mettre en place un système énergétique carboneutre ne manquent pas, le secteur des transports attire souvent l'attention en raison de sa forte dépendance à l'égard de l'infrastructure associée aux carburants fossiles, ainsi que des contraintes et des obstacles à des transformations profondes liés au coût et à la technologie des solutions de remplacement.

À ce jour, la majeure partie de l'attention politique et publique consacrée à la décarbonation du secteur des transports s'est concentrée sur le transport routier. Il y a certainement de bonnes raisons pour cette priorité : la décarbonation du transport de passagers est déjà possible à grande échelle étant donné la disponibilité et le coût relativement faible des véhicules électriques. De même, les technologies à zéro émission pour le transport routier de marchandises, bien que moins matures, plus coûteuses et peu présentes à l'échelle commerciale, sont largement connues. Cependant, il est difficile de décarboner les sous-secteurs du transport lourd en dehors du routier, en particulier le transport maritime et aérien, étant donné le niveau de préparation technologique des sources de carburant alternatives. Par conséquent, l'attention se concentre sur la promotion d'innovations qui pourraient avoir un impact à plus long terme.

Parallèlement, le transport hors route a jusqu'à présent été largement négligé dans les efforts de décarbonation. L'une des raisons de cet oubli est la nature large et éclectique du secteur, qui est largement utilisé comme catégorie résiduelle lors de l'analyse de la demande d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre. Par conséquent, les services exacts fournis dans la catégorie hors route varient considérablement, allant de machineries de très grande taille dans les carrières jusqu'aux souffleurs de feuilles portatifs.

Bien que la définition du transport hors route varie,¹ dans le présent rapport, nous référerons à l'équipement mobile ou portatif, ce qui inclut non seulement la machinerie mais aussi les véhicules qui ne sont pas immatriculés pour être utilisés sur les routes publiques.² Cette catégorie est présente dans tous les secteurs de l'industrie (par exemple, les asphalteuses), les services résidentiels et récréatifs (par exemple, les souffleurs de feuilles), l'agriculture (par exemple, les tracteurs agricoles) et les opérations commerciales (par exemple, les équipements d'entretien du gazon), y compris les aéroports et l'administration publique.³

Malgré ce manque d'attention, les émissions de la catégorie du transport hors route dans le Rapport d'inventaire national (RIN) du Canada représentaient 28,8 % (56,4 Mt.CO₂éq.) des émissions totales du secteur des transports à l'échelle nationale en 2022. De plus, dans la dernière édition des Perspectives énergétiques canadiennes (Langlois-Bertrand et al. 2024), les projections jusqu'en 2050 montrent une croissance de 13 % de ces émissions dans le scénario de référence, ce qui en fait la principale source d'émissions du secteur des transports, légèrement plus importante que le transport routier. Dans les scénarios carboneutres modélisés dans ce même rapport, ce rôle accru est encore plus dominant en termes relatifs : malgré une forte réduction des émissions du transport hors route (-57 % d'ici 2050), leur part relative augmente pour représenter 57 % du total des émissions restantes du secteur des transports. Compte tenu de la nature de cet exercice de modélisation, cette croissance reflète une combinaison du coût élevé de nombreuses solutions à faible émission de carbone dans le secteur, une limitation des solutions technologiques disponibles pour décarboner, ainsi qu'un manque de mesures politiques et réglementaires pour orienter les transformations nécessaires.

Ce rapport est destiné à servir de document de référence pour des discussions sur les stratégies visant à décarboner le transport hors route au Canada et à en faire un contributeur clé à une trajectoire carboneutre. Il présente d'abord un profil détaillé des sources d'émissions du transport hors route, suivi d'un aperçu de certains des principaux défis et possibilités intrinsèques à l'élaboration d'une feuille de route de décarbonation dans chaque secteur pour les besoins du transport hors route. Une liste de propositions pour concevoir une stratégie de décarbonation conclut le rapport.

¹ Voir la section 2.1 du présent rapport.

² Pour une approche similaire, voir USDOE-USEPA (2024).

³ Le Tableau 1 fournit une liste plus complète des équipements et des véhicules.

⁴ Cela comprend les émissions provenant de l'exploitation des pipelines.

⁵ Nous tenons à remercier tout particulièrement Environnement et changement climatique Canada pour son aide et sa contribution, notamment pour les données essentielles à l'élaboration des profils sectoriels détaillés de GES pour les services hors route présentés ci-dessous.

2. Profil du secteur du transport hors route

2.1 Définir le hors route

Les définitions du transport hors route varient considérablement dans les discussions sur ce type de transport. Ces différences peuvent être en partie attribuées aux définitions génériques parfois utilisées, qui font référence au hors route simplement comme des véhicules conçus spécialement pour circuler en dehors des routes publiques. Même dans certaines définitions légales, comme celle du Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, le terme fait référence à des véhicules utilisés à la fois pour le travail et les loisirs et conçus pour être principalement hors route et utilisés dans des environnements difficiles tels que des routes et des chemins non publics (CCHST 2025). Un autre exemple est l'interprétation proposée dans le Règlement sur la sécurité des véhicules automobiles, qui définit les véhicules hors route comme étant principalement utilisés à des fins récréatives ou pour le transport de biens ou d'équipements exclusivement sur des emprises routières non aménagées, des marais, des terres ouvertes ou d'autres surfaces non préparées (Canada 2021).

Le règlement canadien sur les émissions des petits moteurs hors route à allumage commandé (DORS/2003-355) définit les moteurs hors route de manière plus large comme un moteur qui est "capable d'être transporté ou déplacé, soit par lui-même dans ou sur une machine conçue pour être ou capable d'être transportée ou déplacée, qui est autopropulsé, qui sert un double objectif en se propulsant lui-même et en remplissant une autre fonction, ou qui est conçu pour être propulsé tout en remplissant sa fonction" (Canada 2025).

Tableau 1 – Exemples d'équipements dans les différentes catégories de transport non routier

Secteur GIEC	Secteur économique	Équipement	
Agriculture et foresterie	Agriculture	<ul style="list-style-type: none"> • Tracteurs agricoles • Pulvérisateurs • Motoculteurs • Faucheuses 	<ul style="list-style-type: none"> • Presses à balles • Kits d'irrigation • Andaineuses
	Foresterie	<ul style="list-style-type: none"> • Déchiqueteuses • Scies à chaîne 	<ul style="list-style-type: none"> • Débusqueuses
Commercial et institutionnel	Commercial et autre institutionnel	<ul style="list-style-type: none"> • Scies à chaîne • Matériel pour gazon • Unités hydroélectriques • Tondeuses à gazon • Souffleurs/aspirateurs à feuilles • Groupes électrogènes commerciaux légers • Laveuse à pression pour locaux commerciaux légers • Pompes commerciales légères • Soudeurs commerciaux légers • Fendeurs à bois 	<ul style="list-style-type: none"> • Autres équipements de pelouse et de jardin • Motoculteurs à fraise rotative • Déchiqueteuses • Souffleuses à neige • Taille-bordure • Compresseurs d'air • Déchiqueteuses/broyeuses de souches • Tracteurs de pelouse et de jardin • Faucheuses à moteur arrière
	Administration publique		
Industrie manufacturière, mines et construction	Total extraction minière, pétrolière et gazière	<ul style="list-style-type: none"> • Appareils de forage • Scies à béton/industrielles • Équipement de broyage • Équipement de pavage • Compacteurs • Balayeuses/récureuses • Compacteurs • Élévateurs • Asphaltées • Mélangeurs de ciment et de mortier • Bétonnières motorisées • Grues • Autres équipements de construction 	<ul style="list-style-type: none"> • Motobasculateurs/Tenders • Excavateurs • Rouleaux • Chariots élévateurs tout terrain • Chargeurs à pneus • Chargeurs à direction différenciée • Équipement de revêtement • Tracteurs/chargeurs/pelleteuses • Tranchoirs • Asphaltée diesel • Appareils de forage diesel • Mélangeurs de ciment et de mortier diesel • Tracteurs à chenilles

2. PROFIL DU SECTEUR DU TRANSPORT HORS ROUTE

De même, en ce qui concerne les émissions de GES en particulier, l'étendue de la catégorie du transport hors route est plus large à au moins deux égards : (1) elle décrit les véhicules et les machines qui ne sont pas immatriculés pour être utilisés sur les routes publiques et (2) elle utilise le terme "équipement mobile" par opposition à "véhicule" pour permettre l'inclusion de plusieurs types d'équipement qui ne sont pas attachés à des bâtiments ou à des sites, mais qui ne sont néanmoins pas des véhicules de manière conventionnelle (par exemple, les tondeuses à gazon, les scies à chaîne, etc.). Compte tenu de l'objet du présent rapport, pour être cohérent avec cette approche, nous utilisons cette définition plus large de la catégorie, comme le font d'autres discussions similaires sur le transport hors route pour les trajectoires de décarbonation (USDOE-USEPA 2024). Dans ce contexte, les véhicules sont un sous-ensemble de l'équipement.

Dans le RIN, les catégories d'émissions de GES du GIEC divisent les sources d'émissions hors route en six sous-catégories : agriculture et sylviculture, commerce et institutions, fabrication, exploitation minière et construction, résidentiel et autres⁶. Les émissions rapportées par secteur économique dans le RIN sont classifiées différemment. Bien qu'une liste complète et exhaustive des équipements de chaque catégorie dépasse la portée de ce document, nous fournissons une liste d'exemples pour chaque sous-catégorie d'équipement hors route (Tableau 1), en indiquant à la fois la catégorie dur GIEC et le secteur économique auquel elles appartiennent dans les tableaux du RIN.

Secteur GIEC	Secteur économique	Équipement	
Industrie manufacturière, mines et construction	Construction	<ul style="list-style-type: none"> • Appareils de forage • Scies à béton/industrielles • Équipement de broyage • Équipement de pavage • Compacteurs • Asphaltées • Mélangeurs de ciment et de mortier • Bétonnières motorisées • Grues • Tracteurs à chenilles • Motobasculeurs • Excavateurs 	<ul style="list-style-type: none"> • Autres équipements de construction • Rouleaux • Chariots élévateurs tout terrain • Chargeurs à pneus • Chargeurs à direction différenciée • Équipement de revêtement • Tracteurs/chargeurs/pelleteuses • Tranchoirs • Asphaltées diesel • Appareils de forage diesel • Mélangeurs de ciment et de mortier diesel
	Fer et acier	<ul style="list-style-type: none"> • Chariots élévateurs • Climatisation/réfrigération industrielle • Autres équipements industriels • Autres équipements de manutention 	<ul style="list-style-type: none"> • Balayeuses/récureuses • Tracteurs de terminal • Balayeuses/récureuses • Tracteurs/chargeurs/pelleteuses • Nacelles élévatrices à moteur diesel
	Ciment	<ul style="list-style-type: none"> • Chariots élévateurs • Réfrigération industrielle • Autres équipements industriels • Autres équipements de manutention • Balayeuses/récureuses 	<ul style="list-style-type: none"> • Tracteurs de terminal • Balayeuses/récureuses • Tracteurs/chargeurs/pelleteuses • Nacelles élévatrices à moteur diesel
	Produits chimiques	<ul style="list-style-type: none"> • Chariots élévateurs • Réfrigération industrielle • Autres équipements industriels • Autres équipements de manutention • Balayeuses/récureuses 	<ul style="list-style-type: none"> • Tracteurs de terminal • Balayeuses/récureuses • Tracteurs/chargeurs/pelleteuses • Nacelles élévatrices à moteur diesel

⁶ Ces émissions sont rapportées dans le Tableau A9-2 dans Canada (2024).

2. PROFIL DU SECTEUR DU TRANSPORT HORS ROUTE

Secteur GIEC	Secteur économique	Équipement	
Industrie manufacturière, mines et construction	Pâtes et papiers	<ul style="list-style-type: none"> • Chariots élévateurs • CA industriel/réfrigération • Autres équipements de manutention • Autres équipements industriels • Balayeuses/récureuses 	<ul style="list-style-type: none"> • Tracteurs de terminal • Balayeuses/récureuses • Tracteurs/chargeurs/pelleteuses • Nacelles élévatrices à moteur diesel
	Autres activités manufacturières	<ul style="list-style-type: none"> • Chariots élévateurs • Climatisation/réfrigération industrielle • Autres équipements industriels • Autres équipements de manutention. 	<ul style="list-style-type: none"> • Balayeuses/récureuses • Tracteurs de terminal • Balayeuses/récureuses • Tracteurs/chargeurs/pelleteuses • Nacelles élévatrices à moteur diesel
	Fonte et affinage de métaux non ferreux	<ul style="list-style-type: none"> • Chariots élévateurs • Climatisation/réfrigération industrielle • Autres équipements industriels • Autres équipements de manutention. 	<ul style="list-style-type: none"> • Balayeuses/récureuses • Tracteurs de terminal • Balayeuses/récureuses • Tracteurs/chargeurs/pelleteuses • Nacelles élévatrices à moteur diesel
	Sables bitumineux	<ul style="list-style-type: none"> • Chenilles • Excavateurs • Classificateurs 	<ul style="list-style-type: none"> • Camions hors route • Chargeuses à pneu
Résidentiel	Résidentiel et récréatif	<ul style="list-style-type: none"> • Scies à chaîne • Tondeuses à gazon • Souffleurs/aspirateurs à feuilles • Matériel de pelouse et de jardinage 	<ul style="list-style-type: none"> • Motoculteurs à fraise rotative • Taille-bordures • Tracteurs de pelouse et de jardin • Faucheuses à moteur arrière • Souffleuses à neige
Autres	Résidentiel et récréatif	<ul style="list-style-type: none"> • Véhicules tout-terrain • Véhicules de karting • Voiturettes de golf • Motos tout-terrain 	<ul style="list-style-type: none"> • Motoneiges • En-bords • Hors-bords • Véhicules nautiques à moteur
	Commerces et autres institutions	<ul style="list-style-type: none"> • Véhicules utilitaires 	<ul style="list-style-type: none"> • Véhicules tout-terrain
	Administration publique	<ul style="list-style-type: none"> • Véhicules utilitaires 	<ul style="list-style-type: none"> • Véhicules tout-terrain
	Lignes aériennes canadiennes	<ul style="list-style-type: none"> • Équipement de soutien dans les aéroports 	
	Chemins de fer	<ul style="list-style-type: none"> • Entretien des voies ferrées 	

2.2 Comparaison avec la classification selon les secteurs économiques

Dans le RIN du Canada, la catégorisation du transport hors route constitue l'une des principales différences entre la classification par secteur du GIEC et la classification des émissions par secteur économique, tel que présenté dans les Tableaux A9–2 et A10–2, respectivement (Canada 2024). En général, cette dernière associe les émissions du transport hors route au secteur économique responsable de l'équipement qui les produit, alors que le RIN les classe d'abord dans les émissions du transport, puis les désagrège par secteur.

Une autre complication est l'utilisation de la catégorie "Autres" dans la classification du GIEC, qui est divisée en "Résidentiel et récréatif", "Commercial et Institutionnel" et "Administration publique", en plus d'inclure les "Lignes aériennes canadiennes" et les "Chemins de fer". L'utilisation des trois premières de ces sous-catégories crée une certaine confusion avec les catégories du GIEC, car chacune d'entre elles se trouve non seulement dans la catégorie principale, mais aussi dans une sous-catégorie de la catégorie "Autres". Par exemple, certaines émissions provenant d'équipements résidentiels sont classées dans la catégorie "Résidentiel" du GIEC, tandis que d'autres sont classées dans la sous-catégorie "Résidentiel et récréatif" de la catégorie "Autres".

Le Tableau 2 présente la correspondance entre les catégories d'émission du transport hors route selon le GIEC et les catégories d'émissions par secteur économique.

Tableau 2 – Correspondance entre la ventilation selon les secteurs du GIEC et la classification par secteur économique

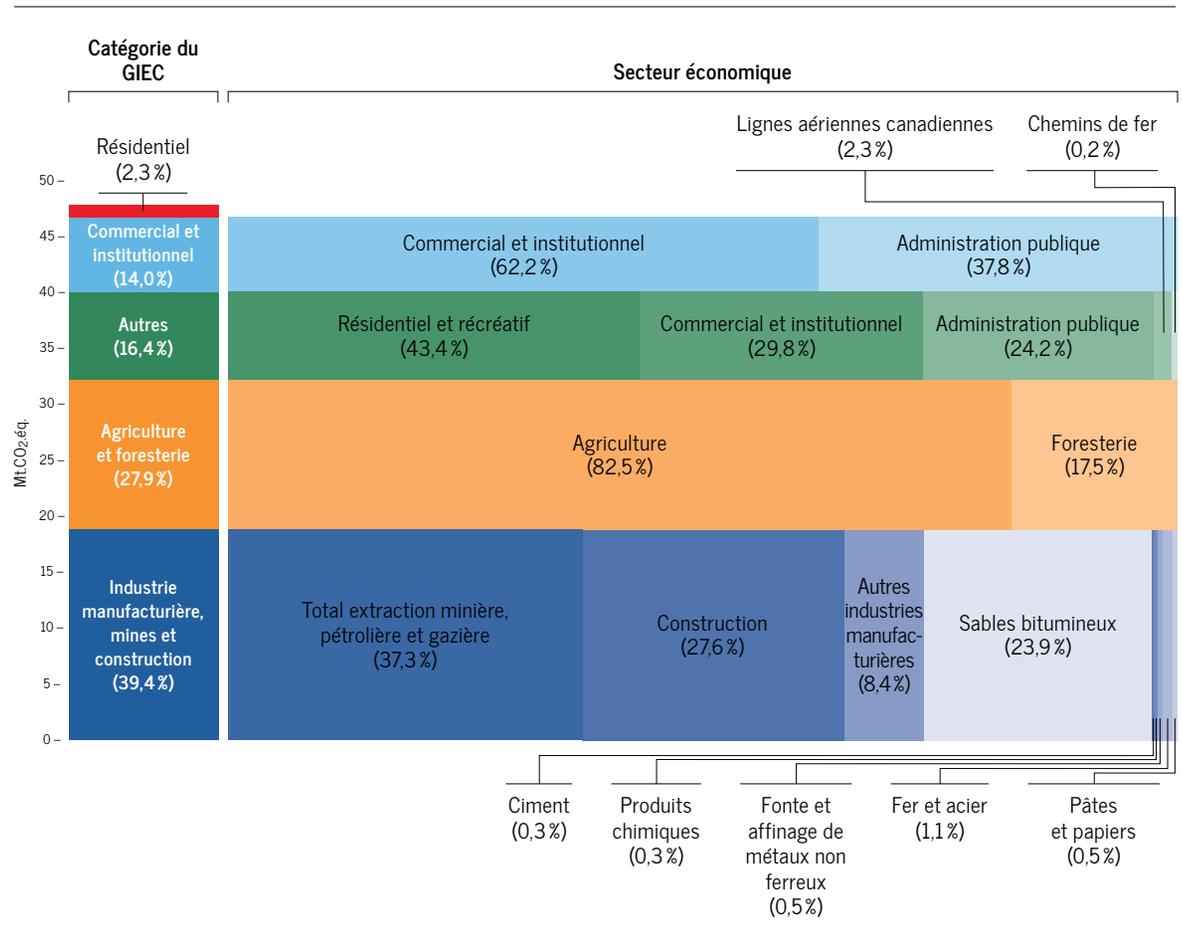
Secteur économique	Catégorie du GIEC				
	Agriculture et foresterie	Commercial et institutionnel	Industrie manufacturière, mines et construction	Résidentiel	Autres
Résidentiel et récréatif				X	X
Commercial et institutionnel		X			X
Administration publique		X			X
Lignes aériennes canadiennes					X
Chemins de fer					X
Agriculture	X				
Foresterie	X				
Total extraction minière, pétrolière et gazière			X		
La construction			X		
Fer et acier			X		
Ciment			X		
Produits chimiques			X		
Pâtes et papiers			X		
Autres industries manufacturières			X		
Fonte et affinage de métaux non ferreux			X		
Sables bitumineux			X		

2.3 Ventilation des émissions de GES

La figure 1 présente la ventilation à haut niveau des émissions dues au transport hors route dans la classification du GIEC, ainsi que la ventilation de chaque catégorie d'émissions du GIEC en fonction de la classification par secteur économique. Les principales sources d'émissions hors route sont l'industrie manufacturière, l'exploitation minière et la construction (39,4%), ainsi que l'agriculture et la foresterie (27,9%), le reste étant presque également réparti entre les secteurs " autres " (16,4%) et le secteur commercial et institutionnel (14,0%). La catégorie résidentielle est négligeable dans cette catégorisation (2,3%).

Une ventilation plus poussée selon la classification des secteurs économiques fournit des détails utiles. Par exemple, la ventilation de l'agriculture et de la foresterie en ses deux composantes montre que l'agriculture est en fait responsable de 82,5% des émissions de cette catégorie, soit 23,0% des émissions totales des véhicules hors route. Une autre ventilation utile des émissions industrielles hors route montre que dans la catégorie fabrication, exploitation minière et construction, l'exploitation minière et l'extraction de pétrole et de gaz (y compris les sables bitumineux) sont responsables de 61,2% des émissions totales, les sables bitumineux produisant à eux seuls 23,9% des émissions totales. La construction est une autre source importante, avec 27,6% des émissions de l'industrie manufacturière, de l'exploitation minière et de la construction. La plupart des autres secteurs industriels n'émettent qu'une très faible part du total.

Figure 1 – Émissions du transport hors route, ventilation des catégories du GIEC par secteur économique (2022)



Note : les pourcentages dans la section de gauche (catégories du GIEC) représentent la part du total des émissions du transport hors route; dans la section de droite (secteurs économiques), chaque ligne montre la distribution des émissions de la catégorie GIEC selon le secteur économique.

2. PROFIL DU SECTEUR DU TRANSPORT HORS ROUTE

Compte tenu de ces éléments, il est utile d'examiner la ventilation par secteur économique uniquement, qui fournit une classification plus intuitive regroupant les catégories en secteurs et activités plus facilement identifiables. Comme le montre la figure 2, les émissions totales hors route du secteur résidentiel et récréatif représentent 9 % des émissions hors route, les émissions du secteur commercial, institutionnel et de l'administration publique en représentant 23 %. L'agriculture représente une part similaire (23 %) qui est également similaire à l'extraction minière, pétrolière et gazière (y compris les sables bitumineux), qui atteint 24 %.

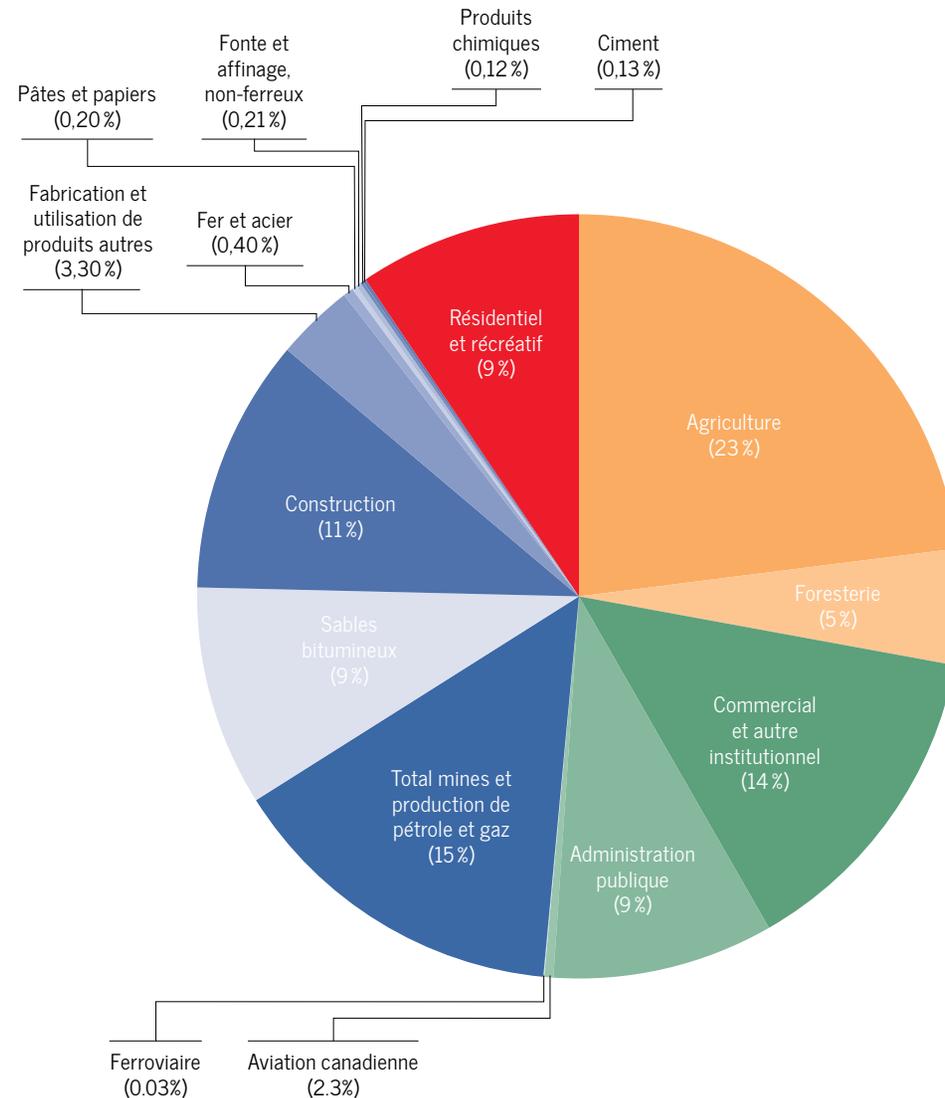
2.4 Ventilation de la consommation d'énergie

Étant donné que la base de données utilisée pour établir les profils a été conçue principalement à des fins de déclaration des émissions, les données et les parts présentées ci-dessous se limitent aux équipements qui utilisent des sources d'énergie émettrices de GES. Ces sources comprennent le biodiesel, le diesel, l'éthanol, les huiles et lubrifiants, l'essence, le gaz naturel et le propane.

Dans l'ensemble de la catégorie du transport hors route du GIEC, un total de 661 TJ d'énergie provenant de sources émettrices a été utilisé en 2022. Cette énergie provient principalement du diesel (72,3 %) et de l'essence (23,4 %).

Si l'on décompose le bouquet de carburants dans chacune des sous-catégories du GIEC pour le transport non routier, le diesel domine plus fortement dans les secteurs de l'industrie manufacturière, de l'exploitation minière et de la construction (90,0 % pour 2022), ainsi que de l'agriculture et de la foresterie (96,8 %), tandis que l'essence est plus importante dans les catégories commerciale et institutionnelle (46,5 %), résidentielle (95,8 %) et des autres transports (83,7 %).

Figure 2 – Émissions hors route par secteur économique (2022)



3. Défis et opportunités dans les différents secteurs

Cette section présente les informations recueillies à partir d'une analyse de la littérature institutionnelle et universitaire sur la décarbonation du transport hors route, étayée par des conversations au cours des récents travaux de l'IET avec des experts du domaine impliqués dans la décarbonation des véhicules et de la machinerie hors route. L'examen se concentre sur les options de décarbonation en général ainsi que sur la question spécifique des technologies basées sur l'électricité. Les descriptions suivantes ne se veulent pas exhaustives, mais visent plutôt à présenter plusieurs tendances et idées clés en matière de décarbonation du transport hors route, en rapport avec les questions les plus pressantes auxquelles sont confrontés les organisations et les gouvernements qui tentent de décarboner leurs activités ou leurs secteurs dans leur ensemble. Étant donné que la plupart des documents disponibles examinent un contexte non canadien, les contributions supplémentaires issues des échanges avec les experts ont servi de base à l'examen de certaines parties ou formes de ces défis dans le contexte plus spécifique des secteurs canadiens.

L'aperçu ci-dessous tente de répondre aux questions suivantes :

- Quel est le potentiel des technologies basées sur l'électricité pour décarboner le transport hors route dans chaque secteur ?
- Quelle est la disponibilité commerciale des équipements à faible teneur en carbone nécessaires ?
- Dans quelle mesure faudrait-il modifier les pratiques pour adopter les technologies décarbonées ou les modes de fonctionnement alternatifs à faible émission de carbone ?
- Dans quelle mesure le Canada est-il dépendant d'acteurs étrangers pour ces efforts de décarbonation ?
- D'une manière générale, quels sont les principaux défis liés à la mise en œuvre de solutions visant à décarboner le transport hors route dans le secteur ?

3.1 Extraction minière et extraction de pétrole et de gaz

Les perspectives de décarbonation des activités minières souterraines ont radicalement changé depuis environ deux ans, période au cours de laquelle le rôle prépondérant de l'électrification semble se confirmer. Outre la baisse du coût des batteries au cours des derniers mois et des dernières années (Ranggård et Öhmark 2024), l'exploitation des sites miniers souterrains fait de l'électricité une option intéressante pour plusieurs raisons. Premièrement, l'infrastructure de distribution d'électricité à l'intérieur du site et l'infrastructure de transmission d'électricité vers le site sont souvent déjà en place et nécessiteraient des améliorations relativement modestes pour permettre l'utilisation de véhicules électriques. Étant donné que l'exploitation minière souterraine est déjà largement électrifiée au Canada, la poursuite de l'électrification des véhicules et des machines concerne plus particulièrement les options relatives aux véhicules. L'installation de l'équipement de recharge est relativement simple et les systèmes d'échange de batteries sont moins exigeants en termes de logistique.

Deuxièmement, l'utilisation d'engins et de véhicules électriques réduit les besoins de ventilation des sites souterrains en raison de l'absence d'émissions polluantes, ce qui réduit fortement la demande d'électricité pour cette ventilation et les coûts associés. Le surcoût de l'électrification est donc beaucoup plus faible que le simple coût supplémentaire des véhicules électriques (IGO, Perenti & ABB 2024). Il en résulte une augmentation plus gérable de la demande d'électricité pour le site, compte tenu de la grande quantité de machinerie électrique déjà en place.

Les perspectives de décarbonation de l'exploitation minière à ciel ouvert sont très différentes en raison de contraintes et de besoins divers. Comme il n'y a pas d'avantage lié à la réduction des besoins de ventilation, le coût des batteries et des véhicules électriques à batterie rend la prime d'électrification beaucoup plus élevée que dans les mines souterraines. Les solutions alternatives telles que les lignes caténaïres posent également des problèmes, étant donné que les routes ne sont pas pavées et que la stabilité verticale et, par conséquent, la fiabilité sont problématiques. En général, comme le site d'extraction change et se déplace au fil du temps, l'infrastructure de ravitaillement ou de recharge doit être relativement mobile.

Certains équipementiers déploient des solutions pour relever ces défis. Le système de transfert d'énergie dynamique de Caterpillar en est un exemple : il recharge les véhicules pendant qu'ils roulent à l'aide d'un petit caténaire latéral. Comme le système nécessite moins de stabilité et utilise des poteaux plus petits et enfoncés moins profondément dans le sol, son infrastructure peut être déplacée plus facilement à intervalle de quelques années par exemple.

Plus généralement, bien que plusieurs fabricants proposent déjà des modèles électriques pour les gros équipements, la plupart des grands producteurs sont des fabricants mondiaux situés à l'étranger, tels que Caterpillar et Sanvic. Il existe quelques équipementiers canadiens, mais ils sont actuellement de taille plus modeste (MacLean Engineering, par exemple).

Points clés:

- Les exigences opérationnelles de l'exploitation minière pour les équipements non routiers sont contraignantes car les opérations se font souvent en continu 24 heures sur 24 et sept jours sur sept.
- Si l'électrification des véhicules est plus difficile que celle des autres équipements, le contexte de l'exploitation minière souterraine réduit à la fois le coût et les défis logistiques de leur électrification; la possibilité d'installer des stations d'échange de batteries en divers endroits de la mine rend également inutiles les groupes motopropulseurs hybrides (au lieu des systèmes entièrement électriques).
- L'électrification présente plusieurs avantages supplémentaires pour l'exploitation minière souterraine, notamment la réduction des problèmes de santé liés aux émissions et au bruit ; des analyses de coûts quantifiées peuvent également aider à démontrer la valeur du passage à l'électrification aux sociétés minières qui hésitent encore.
- Étant donné que les efforts de décarbonation en sont à un stade moins avancé dans l'exploitation minière à ciel ouvert, aucune technologie dominante n'est encore disponible pour les véhicules ; les conditions relatives aux opérations pétrolières et gazières, qui constituent une très grande partie des émissions hors route de ce secteur, peuvent différer de celles applicables à d'autres types d'exploitations à ciel ouvert.

3.2 Secteur commercial, institutionnel et de l'administration publique

Les activités du secteur commercial et institutionnel ainsi que de l'administration publique utilisent une grande variété d'équipements et de véhicules pour les services hors route. Comme dans d'autres secteurs, le défi de la décarbonation pour de nombreux véhicules est avant tout lié aux conditions d'exploitation. Au niveau municipal, par exemple, les perspectives et les tendances en matière d'électrification de l'aménagement paysager (pour les bâtiments et les parcs) se développent rapidement, l'équipement disponible et la durée de vie plus longue des batteries pour des machines encore plus grandes étant plus facilement accessibles. En revanche, les opérations nécessitant des véhicules lourds pour des tâches telles que le ramassage de la neige souffrent de l'indisponibilité des véhicules électriques. Bien que les véhicules de déneigement électrique soient, eux, plus facilement disponibles, les défis logistiques posés par la durée des opérations (presque continues pendant la journée pendant plusieurs jours d'affilée, dans certains cas) demeurent. Les fabricants locaux et les équipementiers d'installations de recharge sont également rares.

Dans l'administration publique, les préoccupations en matière de sécurité publique limitent également les efforts de décarbonation, en particulier lorsque l'on envisage l'électrification complète des véhicules. Les opérations de déneigement, par exemple, impliquent non seulement des besoins opérationnels continus qui sont parfois difficiles à prévoir, mais les véhicules et les équipements doivent également être prêts à l'emploi à tout moment. L'incapacité à répondre à ces exigences implique des risques de sécurité pour le public en termes d'utilisation du réseau de transport routier. Dans ce contexte, le recours à l'échange de batteries et la recharge très rapide semblent inévitables. Il en va de même pour les transports publics, où les exigences en matière de résilience sont bien supérieures à celles des autres services fournis par le réseau, ce qui rend nécessaire la mise en place de plans d'urgence en cas de panne de courant.

La décarbonation du transport hors route dans l'administration publique implique également de répondre aux besoins des travaux publics. Certaines options sont désormais disponibles pour les petits équipements alimentés à l'électricité, tels que les camions-nacelles, les pelleuses et les mini-chargeuses. Les batteries répondent aussi en partie au besoin de contrepoids de certains de ces véhicules. La ville de Toronto s'est également associée à Mack pour développer un camion à ordures électrique et à Siemens pour des stations de recharge adaptées.

Une dynamique nord-américaine se développe actuellement, dans laquelle les grandes et moyennes villes échangent fréquemment et de manière répétée des résultats de tests et des expériences. Cette dynamique inclut le réseau mondial de villes C40, où la ville de New York, par exemple, a proposé une stratégie de décarbonation du transport hors route.

La plupart des véhicules lourds urbains sont fabriqués à l'étranger, bien que certains accessoires (les bennes pour les camions à benne, par exemple) soient disponibles localement. Les fabricants locaux d'autobus urbains électriques restent également limités, surtout après la faillite de Lion Electric au Québec.

Points clés :

- Si l'électrification des besoins hors route dans le secteur commercial et institutionnel est possible, elle est compliquée par la très grande variété de véhicules et d'équipements ; il est nécessaire à très court terme d'aider les opérateurs en établissant un catalogue de ce qui est disponible, y compris des options d'équipement de charge avec la participation des services publics.
- Ce qui précède vaut également pour l'administration publique, qui a déjà connu une électrification limitée de véhicules de construction relativement petits ; cependant, étant donné que les services fournis par les autorités publiques impliquent souvent des exigences de résilience beaucoup plus élevées pour des enjeux de sécurité publique, une planification minutieuse de la résilience est nécessaire pour accompagner la décarbonation de ces équipements.
- La mise en commun des ressources en utilisant les collaborations existantes au niveau des villes pour favoriser les essais et le développement de modèles est importante à court terme, en particulier pour les gros véhicules pour lesquels les options sont actuellement plus limitées.
- Peu d'informations sur l'état d'avancement des efforts de décarbonation sont disponibles pour le secteur commercial, si ce n'est que, comme pour les industries manufacturières, une grande partie des besoins en véhicules hors route concerne les chariots élévateurs ; des avantages connexes importants en termes de réduction du bruit, en particulier à l'intérieur des bâtiments, ont également été constatés.

3.3 Construction

Les tentatives de décarbonation du transport hors route dans le secteur de la construction ont été jusqu'à présent extrêmement limitées et restent essentiellement des initiatives au niveau de l'État ou de la municipalité. Par exemple, des zones de construction sans émissions sont prévues à Toronto, à l'instar de celles prévues en Californie, en Norvège et en Finlande ou, plus récemment, à New York.

Jusqu'à présent, aucun fabricant d'engins de chantier non routiers ne s'est distingué au niveau mondial. La plupart des modèles sont développés en partenariat avec les villes pour des applications et des conditions d'exploitation spécifiques (voir la discussion ci-dessus sur l'administration publique). En tout état de cause, d'après les informations recueillies pour le présent rapport, aucun fabricant canadien n'a déployé de modèles électriques ni développé d'équipement de recharge mobile susceptible de s'adapter à la nature temporaire de la plupart des chantiers de construction.

La taille et la nature temporaire des chantiers de construction constituent un défi important pour la décarbonation des équipements hors route en construction. Les chantiers de courte durée, par exemple, peuvent ne pas avoir facilement accès à l'électricité (en raison du manque d'espace ou des coûts fixes qui y sont associés). Ce défi ne doit cependant pas être surestimé : les grands chantiers sont généralement de plus longue durée et disposent généralement de plus d'espace pour des équipements supplémentaires tels que des stations d'échange de batteries ou des chargeurs temporaires ; les connexions directes au réseau présentent également un coût supplémentaire plus faible en termes relatifs. Ce dernier point s'explique en partie par le fait que les chantiers de construction sont généralement situés à proximité du réseau, en particulier dans les zones urbaines, ce qui fait en sorte que les besoins supplémentaires en électricité sont gérables. Par conséquent, une approche visant à standardiser la connexion pour les sites à court terme pourrait être développée.

Enfin, bien qu'un grand nombre de types d'équipements soient utilisés en construction, seuls quelques-uns sont responsables d'une grande partie des émissions totales, ce qui permet une approche ciblée.

Points clés :

- Les défis de l'électrification liés aux exigences opérationnelles dans le secteur de la construction dépendent davantage des conditions du site que du type de véhicule : les sites plus petits et à court terme tels que les rénovations de maisons individuelles peuvent bénéficier d'une standardisation permettant une connexion rapide, peu coûteuse et à court terme au réseau pour les besoins du site ; les besoins sont également typiquement pour des équipements plus petits que ceux des sites plus importants.
- La disponibilité d'équipements à faible émission de carbone est actuellement très limitée pour les grands sites ; la constitution d'un catalogue de modèles pour les acteurs privés et la mise en place de sites d'essai et de projets devraient être une priorité pour déterminer la meilleure façon de procéder au fil du temps.
- Dans tous les cas, les heures de fonctionnement sont généralement plus courtes, ce qui permet la flexibilité nécessaire pour la recharge, tout en offrant des avantages en termes de réduction du bruit dans les zones habitées.

3.4 Foresterie

Les émissions des véhicules et des machines constituent part importante de l'empreinte GES de la sylviculture, bien que la part du transport hors route soit inférieure à celle du transport routier. Jusqu'à présent, la plupart des efforts de décarbonation se sont concentrés sur l'amélioration de la logistique des transports et/ou l'augmentation de l'utilisation des biocarburants, avec des impacts relativement limités sur les émissions de gaz à effet de serre. Plus récemment, certaines initiatives ont examiné la possibilité d'électrifier le transport du bois sur de longues distances, avec ou sans l'aide d'un logiciel d'optimisation des itinéraires qui peut permettre aux flottes de transport de tirer parti de la topologie du terrain et d'utiliser la technologie de freinage régénératif pour charger les batteries des camions chargés lorsqu'ils descendent la pente depuis le site d'abattage (après avoir remonté la pente à vide, ce qui nécessite moins d'énergie de la part de la batterie embarquée). Par exemple, RFP développe un camion planétaire électrifié avec un partenaire au Québec pour l'une de ses routes forestières où la proximité d'une infrastructure d'électricité renouvelable peut faciliter les installations de recharge le long de la route. En outre, FPIInnovations teste une remorque hybride ; certaines entreprises s'intéressent aux véhicules autonomes ; et d'autres poids lourds électriques ou hybrides sont en cours de développement, certains par des entreprises canadiennes en démarrage comme Edison Motors.

Bien qu'une partie de ce transport s'effectue sur route, un problème compliquant davantage les efforts de décarbonation du segment hors route est que le reste de l'équipement (sur site) ne peut pas profiter des conditions plus favorables des routes forestières utilisées pour transporter les billes de la forêt aux scieries. Une fois que les véhicules quittent ces routes, le terrain n'est pas pavé, ce qui complique considérablement l'alimentation et le fonctionnement des équipements de recharge. Les stations mobiles de ravitaillement en hydrogène pourraient être utiles, mais leur disponibilité pour des essais est actuellement limitée. Bien que certaines entreprises finlandaises et suédoises produisent des abatteuses électriques, leur indisponibilité au Canada et l'absence d'accès au réseau dans de nombreuses régions d'abattage ont limité leur mise à l'essai et leur déploiement.

Points clés :

- L'accès à des équipements à faible émission de carbone, comme les abatteuses, est compliqué par les contraintes de la chaîne d'approvisionnement et la disponibilité limitée des modèles.
- Une stratégie de décarbonation unique pour les besoins hors route de la foresterie ne serait pas souhaitable : une feuille de route avec des options dépendant de catégories de conditions de site pourrait être rapidement élaborée pour commencer à tester l'équipement dans différentes conditions.

3. DÉFIS ET OPPORTUNITÉS DANS LES DIFFÉRENTS SECTEURS

3.5 Agriculture

Bien que les informations recueillies sur les options hors route dans le secteur agricole soient plus limitées, les défis de la décarbonation sont bien connus. Les besoins importants en infrastructures pour distribuer l'électricité ou les carburants à faible teneur en carbone sur les sites agricoles, la gamme de véhicules et les heures de fonctionnement, et plus généralement le coût des équipements à faible teneur en carbone existants, restent des contraintes importantes.

Points clés :

- Comme dans l'industrie forestière, les options de décarbonation pour les gros véhicules et équipements du secteur agricole dépendent largement de l'emplacement des sites et des zones environnantes : lorsque le réseau a une capacité suffisante et accessible à proximité, une infrastructure supplémentaire pour fournir l'énergie nécessaire à la recharge est plus économique et devrait être explorée ; dans les zones plus éloignées ou lorsque la capacité du réseau est limitée, une évaluation plus complète des options disponibles est nécessaire, l'une d'entre elles étant les carburants liquides durables qui pourraient être produits localement à partir de résidus.
- Étant donné qu'aucune information sur la disponibilité d'équipements et de véhicules à faible émission de carbone n'a été obtenue dans le cadre de ce projet, une étude plus approfondie est nécessaire pour évaluer les options disponibles pour le secteur.
- Les longues heures d'utilisation des véhicules pendant des jours consécutifs à des périodes clés de l'année, combinées aux longues distances à parcourir jusqu'à la base, ajoutent aux défis logistiques auxquels sont confrontées les options électrifiées (recharge ou échange de batteries).

3.6 Résidentiel et récréatif

Les équipements résidentiels et récréatifs sont très éclectiques, bien qu'une grande partie d'entre eux soient de petite taille et bénéficient déjà d'options électriques (souffleuses à neige, tondeuses à gazon, véhicules à quatre roues, etc.) La décarbonation des véhicules récréatifs s'accompagne souvent de problèmes supplémentaires liés à l'isolement géographique (aucun réseau disponible dans les régions éloignées, par exemple) et aux habitudes des utilisateurs.

Points clés :

- La disponibilité d'équipements électriques pour les services résidentiels hors route, combinée à des besoins en énergie ou à des heures de fonctionnement additionnels négligeables, permet une décarbonation rapide avec les réglementations et/ou les incitatifs appropriés ; la réduction du bruit local et de la pollution atmosphérique s'ajoute aux avantages d'une telle transformation.
- La décarbonation des équipements récréatifs doit être examinée de plus près, étant donné que les obstacles liés aux habitudes personnelles et les complexités propres aux lieux éloignés (notamment la nécessité d'une longue portée par temps froid) subsistent.

4. Conclusion

En combinant ces idées, il est possible d'identifier un certain nombre de questions transversales dans la conception des politiques de décarbonation du transport hors route dans le contexte canadien. Un premier défi consiste à savoir s'il **existe une technologie de remplacement** non émettrice offrant des conditions acceptables pour le service offert. La majeure partie de la fabrication de certains types d'équipements, en particulier les machines et les véhicules lourds, a lieu à l'étranger, ce qui peut impliquer de s'appuyer sur des chaînes d'approvisionnement complexes et de faire face à des retards dans l'obtention de l'équipement, ainsi que de devoir s'assurer que l'équipement est conforme à la réglementation canadienne. Ces contraintes s'ajoutent à la tâche ardue qui consiste à déterminer la disponibilité des modèles pour les acteurs plus modestes tels que les exploitants de petites entreprises et les coordinateurs de flottes municipales.

Outre les problèmes liés à la chaîne d'approvisionnement, l'utilisation d'équipements non polluants s'accompagne souvent de **contraintes et d'exigences supplémentaires**, telles que l'autonomie et le temps de charge des équipements fonctionnant à l'électricité et remplaçant les moteurs diesel. La nécessité de garantir un certain temps de fonctionnement minimal pour certains équipements crée au mieux une contrainte logistique supplémentaire pour les utilisateurs, qui doivent planifier avec soin des temps de charge longs et fréquents. Au pire, il faut doubler l'équipement, ce qui entraîne une pression à la hausse sur le coût de la transformation.

En plus du défi précédent, dans de nombreux cas, **les sources d'énergie alternatives** pour propulser les équipements hors route nécessitent des **infrastructures supplémentaires importantes**, qui peuvent être nécessaires pour fournir suffisamment d'énergie pour charger les équipements et les véhicules ou pour distribuer des carburants alternatifs tels que les biocarburants ou l'hydrogène pour les équipements non électriques. En outre, certaines de ces infrastructures doivent subir des déplacements ou des retraits fréquents, comme sur les chantiers de construction ou dans les mines à ciel ouvert.

Compte tenu de tout ce qui précède, un point de départ essentiel pour l'élaboration d'une approche stratégique de la décarbonation du transport hors route est de procéder à une évaluation comparative de ces défis, de leur importance pour des services hors route spécifiques, des possibilités offertes dans certains contextes canadiens et des avantages de chaque option au-delà de la réduction des émissions de GES et de la contribution à une trajectoire nette zéro pour le Canada. Le Tableau 3 donne un exemple d'une telle grille.⁶

Tableau 3 – Grille d'évaluation des solutions de décarbonation

Secteur	Exemple d'application/ technologie	Disponibilité de la technologie/ modèle	Besoins en nouvelles infrastructures ou en modifications	Impact induit sur la sécurité / exigences en matière de résilience	Réduction du bruit	Autres avantages liés à la réduction des polluants
Agriculture	Tracteurs agricoles VEB ⁷ (de petite à moyenne taille)	Certains modèles sont disponibles mais le déploiement est limité	Important, en particulier pour les régions éloignées ou isolées du réseau électrique	De longues heures et des journées continues de fonctionnement pendant les périodes de pointe	Peu susceptible d'être déterminant	Important du fait du remplacement du diesel
Exploitation minière	Transporteurs souterrains VEB	Disponible mais déploiement limité	Importants en termes d'équipements de recharge, mais les besoins supplémentaires en énergie sont généralement faibles pour les sites déjà électrifiés.	Non négligeable, mais une certaine flexibilité est possible dans les sites typiques	Élevé	Réduction du besoin de ventilation souterraine
Construction	VEB pour les grands équipements sur site en milieu urbain	Certains modèles sont disponibles mais le déploiement est limité	Plusieurs options pour déployer la recharge, y compris la connexion directe au réseau	Les heures d'opération peuvent permettre des modifications logistiques moins importantes en fonction des besoins de recharge.	Élevé, en particulier dans les quartiers résidentiels existants, bien que le bruit reste important pendant les opérations	Élevé
Administration publique	VEB pour la collecte des ordures ménagères	Certains modèles sont disponibles dans le cadre de partenariats	Important, nécessite une planification logistique minutieuse des sites de recharge	Important, mais prévisible	Très élevé	Élevé
Résidentiel	Matériel de jardinage électrifié	Élevé	Adapté aux installations existantes	Aucun	Non négligeable, mais le bruit reste important pendant l'opération	Élevé, y compris l'élimination de la nécessité de stocker des produits pétroliers

⁶ Cette grille a été élaborée en adaptant l'approche présentée dans Meadowcroft et collaborateurs (2021), où une évaluation similaire des diverses options de décarbonation dans les différents secteurs est résumée dans des tableaux utilisant un même type de code couleur.

⁷ Véhicule électrique à batterie.

4. CONCLUSION

Étant donné que l'impact en termes de coûts est complexe d'une application à l'autre, il n'est pas inclus dans le tableau 3, même s'il s'agit d'une considération essentielle pour les parties prenantes impliquées dans les efforts de décarbonation, comme nous l'avons vu dans la section précédente. Par ailleurs, la grille proposée doit être comprise comme suit :

- Chaque ligne représente une option potentielle de décarbonation des services : elle est ensuite accompagnée d'une perspective codée par couleur sur cinq dimensions.
- La première dimension fait référence au niveau de disponibilité de la technologie dans l'état actuel des marchés au Canada, par exemple si plusieurs modèles sont connus et déjà déployés.
- La deuxième dimension concerne le besoin d'infrastructures supplémentaires de production, de transport et de distribution d'énergie qui seraient nécessaires à la mise en œuvre de l'option de décarbonation.
- La troisième dimension concerne les problèmes de sécurité qui peuvent être associés à l'option, ce qui peut nécessiter des considérations difficiles en matière de résilience (par exemple, si une panne d'électricité crée un risque supplémentaire pour la sécurité publique du fait que les VEB ont remplacé les véhicules à carburant).
- La quatrième option concerne le co-bénéfice spécifique de la réduction du bruit, qui peut être particulièrement important dans les environnements intérieurs, fermés et/ou densément peuplés.
- La cinquième option concerne les avantages supplémentaires en matière de réduction de la pollution et leur importance dans le contexte donné du service : par exemple, le remplacement des moteurs diesel par des moteurs électriques réduit les émissions de polluants au-delà des GES, bien que cet avantage soit plus important dans les environnements intérieurs et de façon générale, où les préoccupations en matière de santé liées à ces polluants sont plus élevées.

Le code couleur proposé est vert lorsque la transformation aurait un effet positif sur les critères de la colonne (avec des variantes pâle ou foncée pour montrer l'importance du changement positif), jaune lorsqu'il y a des indices ou des développements qui suggèrent qu'elle pourrait être positive mais pas sans progrès significatifs ou conditions spécifiques, et rouge si l'impact du changement pour les critères donnés serait négatif - en d'autres termes, s'il suscite surtout des inquiétudes.

La grille ne contient que quelques exemples à titre d'illustration. La première étape de la phase suivante consisterait à étendre cette grille au plus grand nombre possible de services dans tous les secteurs. Cela pourrait se faire, par exemple, en consultant les acteurs clés et les parties prenantes de chaque secteur après avoir exploré l'état des lieux, sur la base de leur expérience. Des critères d'importance supplémentaire pourraient également être ajoutés.

Une fois qu'une grille plus complète aura été élaborée, nous suggérons qu'elle soit utilisée pour développer une approche stratégique, selon les quatre principes généraux suivants :

- 1) Maximiser l'électrification dans la mesure du possible :** parmi les différents changements de source d'énergie possibles, le passage du diesel à l'électricité est le plus compatible avec les objectifs de zéro net. L'électrification devrait donc être la première option considérée lors d'un survol des différentes options et des différents secteurs.
- 2) Explorer d'autres sources d'énergie à faible teneur en carbone en fonction des avantages connexes potentiels et de la disponibilité des infrastructures à proximité.** Par exemple, dans certains cas, l'infrastructure électrique manquante est importante ou l'électrification présente trop de lacunes. Si les ressources en biomasse sont facilement disponibles et le resteront dans une telle opération - par exemple dans les exploitations agricoles avec des taux élevés de résidus qui pourraient être transformés en carburants liquides durables - le véritable potentiel, les coûts et les défis d'une solution dérivée mise à l'échelle devraient être rapidement évalués et cartographiés.

4. CONCLUSION

- 3) Anticiper la collecte d'informations sur les technologies et partager ces informations avec les acteurs et les parties prenantes concernés. La disponibilité des technologies et des modèles pour des services spécifiques est parfois difficile à déterminer sans une coordination à grande échelle des efforts des parties prenantes, ce qui complique la conception des plans de transformation. Comblant cette lacune et rendre l'information largement disponible pourrait accélérer les transformations.
- 4) Lancer des projets pilotes pour tester les options. Sur la base de la grille et des trois critères ci-dessus, les projets pilotes devraient être choisis et conçus de manière à maximiser le potentiel d'apprentissage et à s'étendre à d'autres secteurs où les options de décarbonation sont confrontées à des défis similaires. Par exemple, l'essai de BEV lourds dans des sites miniers où les véhicules sont utilisés pendant de longues heures et des journées consécutives dans une zone géographique circonscrite pourrait aider à recueillir des informations utiles pour les municipalités qui envisagent de passer aux BEV pour leurs propres opérations demandant de longues heures et des journées consécutives (les opérations de déneigement et de ramassage de neige, par exemple). Les planificateurs municipaux pourraient s'inspirer de l'expérience des essais de la première application ci-dessus en ce qui concerne la logistique d'une telle transformation, où les préoccupations en matière de sécurité sont différentes de celles du déneigement, par exemple. La planification de projets pilotes dans cette optique permettrait de maximiser les avantages, même au-delà de la zone d'opération d'un projet test spécifique.

5. Références

- Canada (2021). Véhicules hors route - Sont-ils réglementés ?
Gouvernement du Canada : Transports Canada. [En ligne] <https://tc.canada.ca/fr/transport-routier/importer-vehicule/vehicules-hors-route-sont-ils-reglementes>
- Canada (2024). Rapport d'inventaire national 1990-2022: Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada. Environnement et changement climatique Canada.
- Canada (2025). Règlement sur les émissions des petits moteurs hors route à allumage commandé (DORS/2003-355).
Gouvernement du Canada.
- CCOHS (2025). Véhicules hors route. Gouvernement du Canada : Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail. [En ligne] https://www.cchst.ca/oshanswers/safety_haz/off_road_safety.html
- IGO, Perenti and ABB (2024). Making electrified underground mining a reality: lessons from Cosmos electrification study.
- Langlois-Bertrand, S., Mousseau, N., Vaillancourt, K., Bourque, M. 2024. Trajectoires pour un Canada carboneutre - Horizon 2060. Dans Langlois-Bertrand, S., Mousseau, N., Beaumier, L. (Eds.), Perspectives énergétiques canadiennes 3^e édition, Institut de l'énergie Trottier - Polytechnique Montréal. [En ligne] <https://iet.polymtl.ca/fr/perspectives-energetiques>
- Meacowcroft, J. et collaborateurs (2021). Trajectoires vers la carboneutralité : Un outil d'aide à la décision. Transition Accelerator Reports Vol. 3, Iss. 1. Pg 1-108 ISSN 2562-6264.
- Ranggård, J., Öhmark, O. (2024). Whitepaper Electrification Open Pit Mining. Mintes Electrification Program.
- USDOE-USEPA (2024). A Market and Technology Assessment for Off-Road Vehicle & Equipment Energy and Emissions Innovation. U.S. Department of Energy and U.S. Environmental Protection Agency.
- Shao, Z., Li, Jinjian (2023). Incentivizing zero-emission off-road machinery. International Council on Clean Transportation.