

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

Évaluation techno-économique de technologies
carboneutres sur le corridor A20-H401 entre
les villes de Québec et Windsor

● REMERCIEMENTS

RECHERCHE – CHAIRE DE GESTION DU SECTEUR DE L'ÉNERGIE

- **Johanne Whitmore**, chercheuse principale
- **Pierre-Olivier Pineau**, Professeur titulaire

MODÉLISATION - CPCS

- **Nicholas Robert**, Consultant principal
- **Mathieu Cyr**, VP associé - Canada

PARTNAIRE FINANCIER

- **Gouvernement du Québec**

COMITÉ INTERMINISTÉRIEL

- **Guillaume Paré**, MELCCFP
- Représentant du MELCCFP, MTMD, MEIE, MFQ

ATELIER DE VALIDATION (PARTIE 1)

- Près de **60 experts** des milieux du gouvernement, industriel et universitaire en provenance du Canada, des États-Unis et de l'Union européenne

RÉVISEURS (PARTIE 2)

- **Matteo Craglia**, International Transportation Forum-OECD
- **Simon Langlois-Bertand**, Institut énergie Trottier
- **Joe Lynch**, ministère des Transports de l'Ontario
- **Hajo Ribberink**, CanmetENERGY, Ressources naturelles Canada
- **Arthur Yip**, US National Renewable Energy Laboratory

● PLAN DE PRÉSENTATION

- 1 | Introduction
- 2 | Technologies carboneutres à l'étude
- 3 | Méthodologie, model, hypothèses et limites
- 4 | Résultats
- 5 | Discussion et conclusion
- 6 | Période de questions

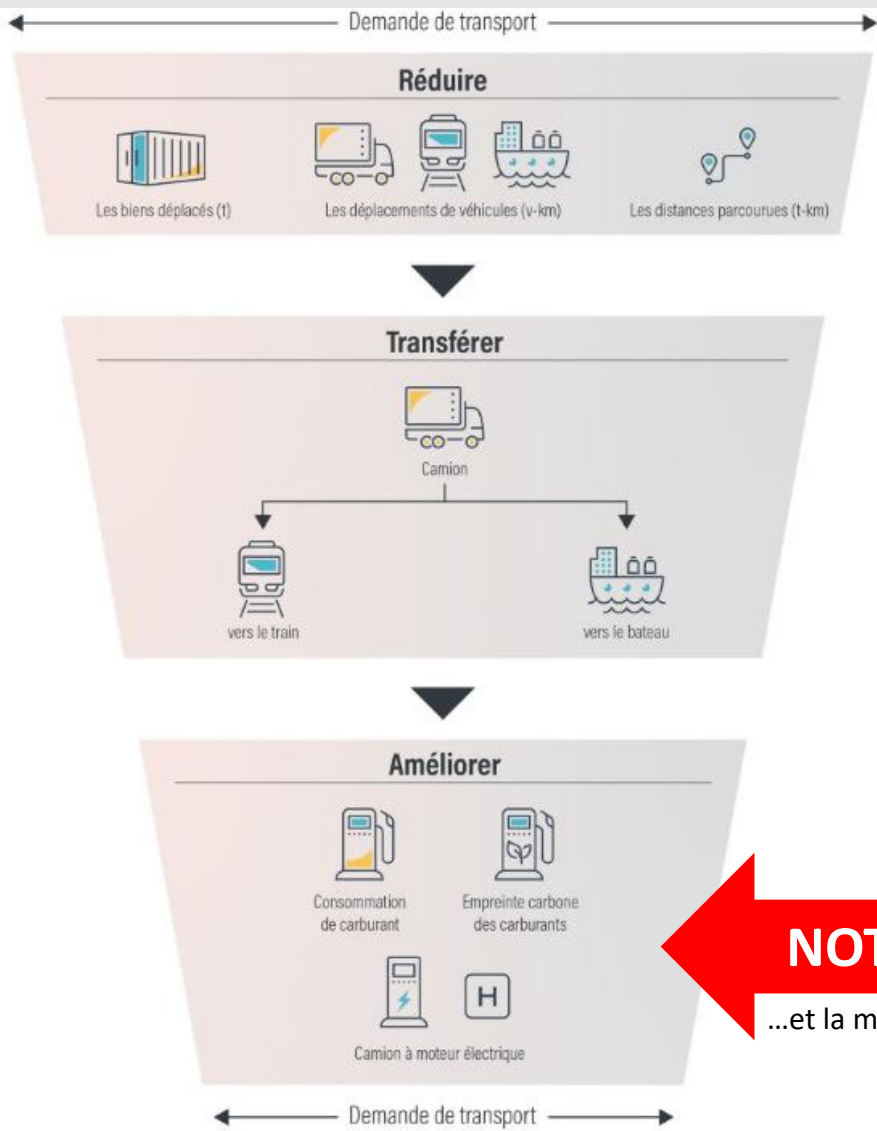
1 | INTRODUCTION

- Le transport de marchandises est l'un des secteurs les plus difficiles à décarboner
 - Les camions lourds de classe 8 représentent 24 % des GES du secteur des transports au Canada, et ce chiffre ne cesse d'augmenter depuis 1990
 - Complexe (chaînes logistiques, réglementations et trafic transfrontalier...)
 - Soutient les activités économiques quotidiennes
- Pour atteindre les **objectifs de carboneutralité du Canada d'ici 2050**, il faudra prendre des mesures décisives dans ce secteur, tant sur le plan technologique que logistique.
- Les **initiatives actuelles sont insuffisantes** pour placer le Canada, le Québec et l'Ontario sur la voie d'un transport routier de marchandises à émissions nettes ou nulles.

POURQUOI CETTE ÉTUDE ?

- Les initiatives visant à décarboner le transport routier de longues distances sont limitées en raison du **manque de transparence, de collaboration et d'études indépendantes**. Plusieurs incohérences au sein des gouvernements et entre eux. Souvent politisées, axées sur la technologie et dirigées par des intérêts particuliers.
- Peu d'études ont évalué la faisabilité associée au potentiel des technologies de décarbonation dans le secteur du camionnage longue distance le long des **principaux corridors autoroutiers** traversant les provinces canadiennes et les États-Unis.
- Contribuer à fournir des données et des hypothèses transparentes sur les technologies afin de **permettre à d'autres d'utiliser et de mettre à jour les données et le modèle pour des études ultérieures et des collaborations ouvertes**.
- Les résultats peuvent être utilisés dans le cadre d'une **approche plus systémique de la décarbonation** du transport longue distance pour évaluer l'impact de différents choix technologiques et intermodaux sur le réseau électrique, l'infrastructure, la demande d'énergie et la réalisation des objectifs de réduction de GES sur la base de différents scénarios.

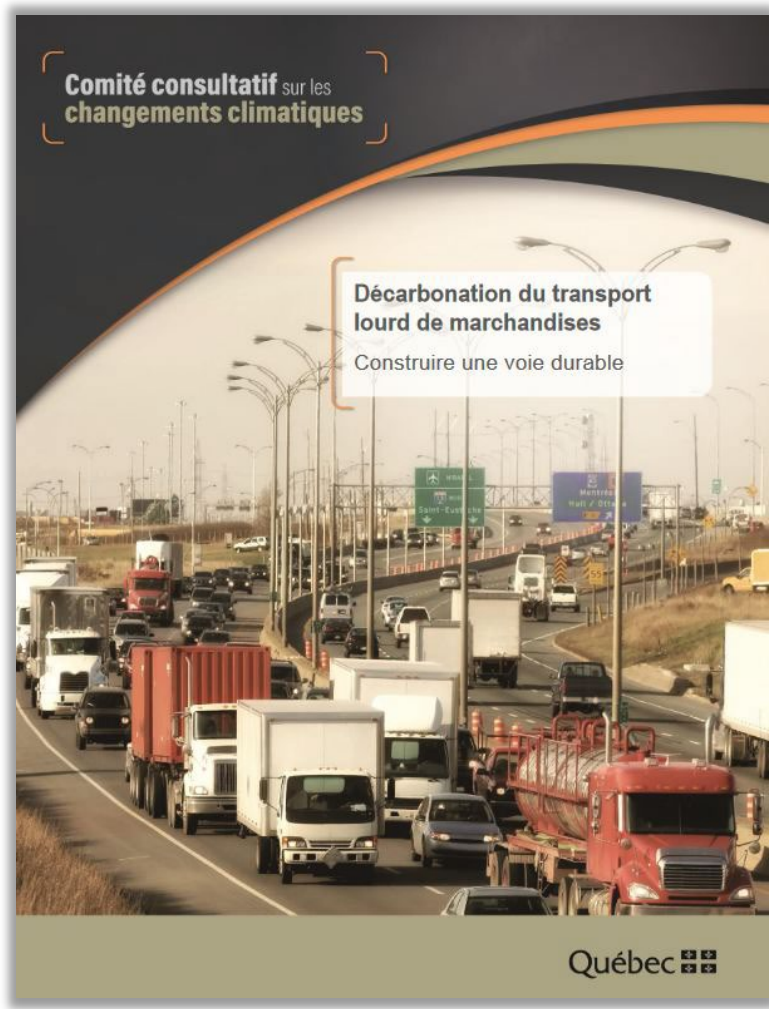
APPROCHE SYSTÉMIQUE | Réduire-transférer-améliorer



Le déploiement de camions carboneutres doit s'inscrire dans une stratégie visant à **réduire** la demande et à **transférer** les marchandises vers des modes de transport plus efficaces en énergie et GES

NOTRE ÉTUDE

...et la majorité des approches gouvernementales



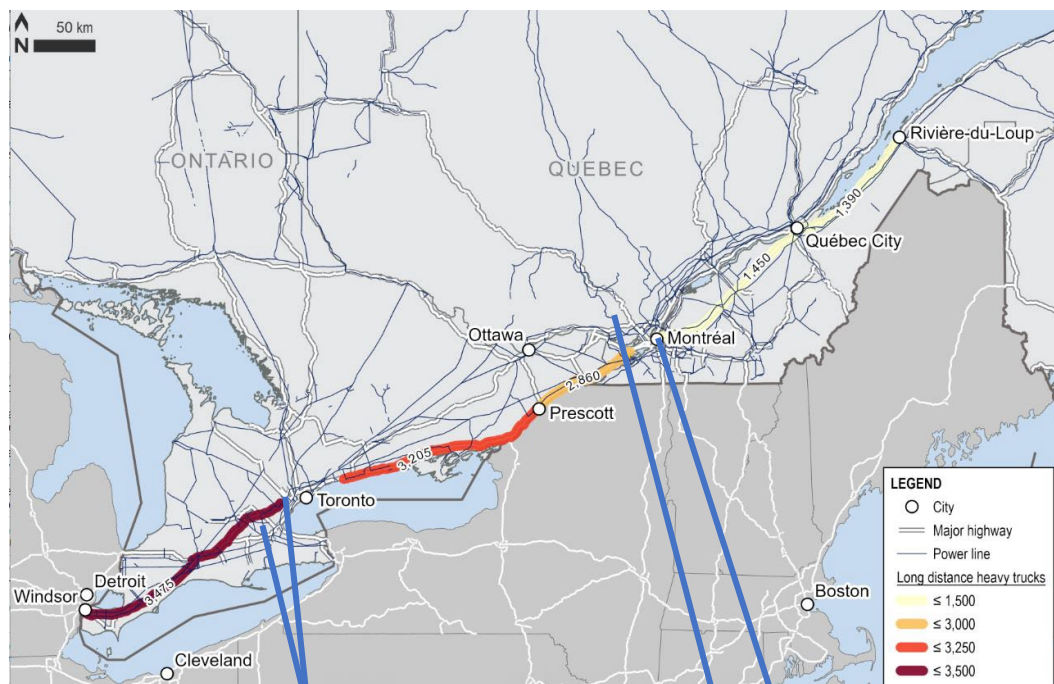
Comité du les changements climatiques du Québec
www.quebec.ca/gouvernement/ministeres-et-organismes/comite-consultatif-changements-climatiques/publications

MANDAT ET OBJECTIF

Réaliser une évaluation techno-économique comparant les technologies de classe 8 pour décarboner le transport routier longue distance (+500 km) sur le corridor autoroutier entre la Ville de Québec et Windsor.

1. Quel est l'ordre de grandeur en matière d'investissement pour les infrastructures, le renouvellement de la flotte ainsi que les coûts d'exploitation et d'entretien ?
2. Comment la faisabilité techno-économique se compare-t-elle pour les différentes technologies sur le corridor H401-A20 ?

IMPORTANCE DU CORRIDOR



Toronto Pearson
300 000 t/an

Hamilton Intl.
122 000 t/an



Port de Montréal
41 Mt/an (total)
1,7 M EVP



Montréal-Trudeau
81 000 t/an
Mirabel Intl.
79 000 t/an

Corridor highway 401 – Autoroute A20

- Corridor de camionnage longue distance le plus fréquenté du Canada
- Les plus grands centres de population du Canada
 - Région du Grand Toronto
 - Montréal
- Pôles pour les installations intermodales, l'entreposage et la distribution
- Liens transfrontaliers avec les États-Unis via Windsor-Detroit
 - Pont Ambassador
 - Pont Gordie Howe
- Dessert le port de Montréal (2^e port à conteneurs du Canada)
- Connexions avec les principales plates-formes de fret aérien :
 - Montréal-Trudeau et Mirabel Intl.
 - Toronto Pearson et Hamilton Intl.

PORTÉE DU PROJET

Étape 1

- Identifier les technologies de camion de classe 8 carboneutres à évaluer

Étape 2

- Revue de la littérature des paramètres techno-économiques

Étape 3

- Validation des données par une consultation d'experts (**Rapport 1**)

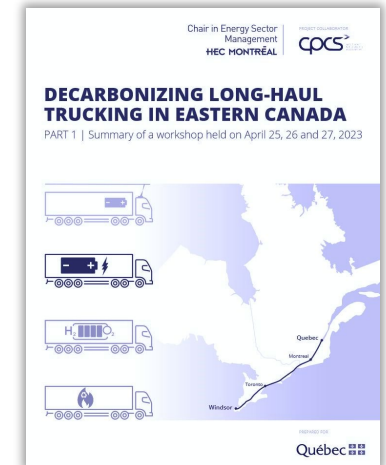
Étape 4

- Définir les paramètres de fonctionnement pour la simulation

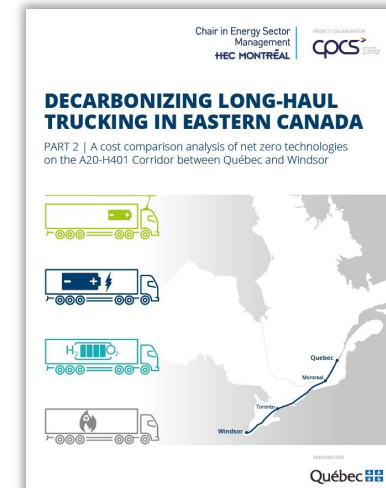
Étape 5

- Analyses coûts-bénéfices et de sensibilité + revue d'experts (**Rapport 2**)

RAPPORT 1 | Sommaire de l'atelier



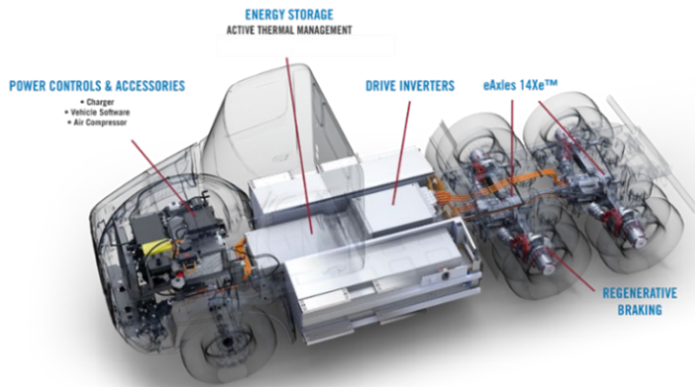
RAPPORT 2 | Résultats



2 | TECHNOLOGIES CARBONEUTRES

1. Camion à batterie électrique (BEV)
2. Camion électrique à pile à combustible à l'hydrogène vert (FCEV)
3. Camion à pantographe et caténares (OCT-ERS) avec bloc-batterie pour l'extension de l'autonomie
4. Camion au gaz naturel renouvelable comprimé (RNG)

BEV



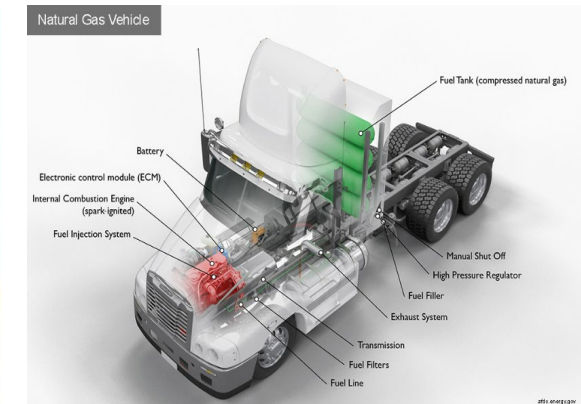
FCEV



OCT



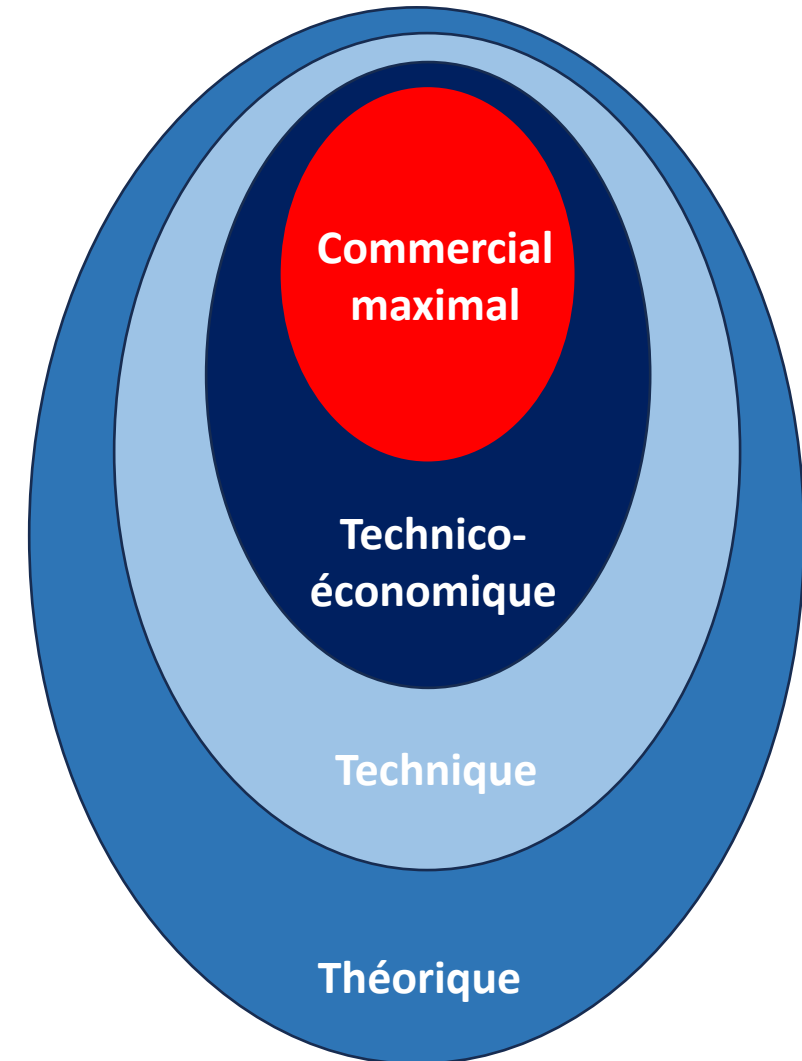
RNG



PORTÉE DE L'ÉVALUATION DU PROJET

- L'analyse n'évalue que le **potentiel technico-économique**, c'est-à-dire la portion du potentiel technique pour laquelle les coûts d'exploitation et d'infrastructure de la technologie carboneutre la rendent économiquement viable pour les opérateurs dans les **conditions de prix actuelles**, avant de prendre en considération toute limitation d'adoption, d'approvisionnement en énergie ou d'autres barrières commerciales.
- D'autres études sont nécessaires pour analyser le **potentiel commercial maximal** qui tient compte de facteurs de marché, dont :
 - Offre et la disponibilité de carburants carboneutres (GNR et H₂ vert)
 - Concurrence des utilisations finales des carburants et de l'électricité entre les secteurs (ex., transport routier, maritime et aérien; industrie; bâtiment)
 - Évolution des prix des carburants carboneutres et du carbone
 - Degré d'intervention des gouvernements

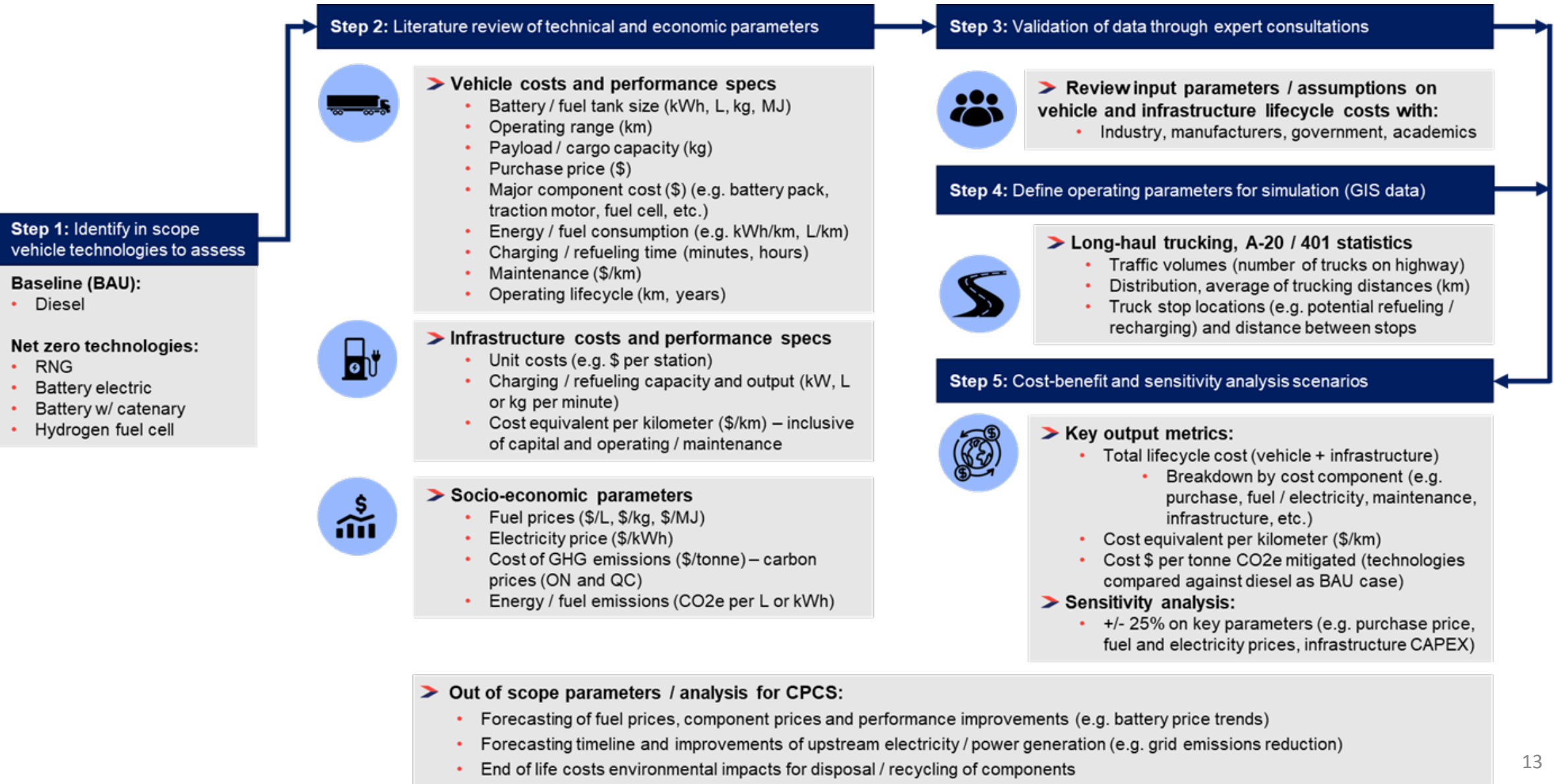
Portée des potentiels





3 | MÉTHODOLOGIE, MODÈLE ET HYPOTHÈSES

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE



Le modèle compare les coûts avec un scénario de base (diesel)

Paramètres techno-économiques des technologies carboneutres

Scénario / plan de transition de la flotte pour le déploiement et l'adoption par l'industrie

Simulateur Excel

Year	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Discount Rate Factor	1.0000	0.9091	0.8264	0.7513	0.6830	0.6209	0.5645	0.5132	0.4665	0.4241	0.3855
Inflation Rate Factor	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Federal Carbon Price	\$ 50.00	\$ 65.00	\$ 80.00	\$ 95.00	\$ 110.00	\$ 125.00	\$ 140.00	\$ 155.00	\$ 170.00	\$ 185.00	\$ 200.00
Fleet Purchases											
Diesel Purchase Price (Day Cab)	165,000										
BEV Purchase Price (Day Cab)	486,000										
BEV Truck Purchases	0	0	0	31	31	65	159	240	319	479	61
Diesel Truck Purchases	2,882	3,175	3,172	3,146	3,148	3,117	3,025	2,949	2,872	2,714	2,561
BEV Fleet Purchases	0	0	0	15,066,000	15,066,000	31,590,000	77,274,000	116,640,000	155,034,000	232,794,000	310,554,000
Diesel Fleet Purchases	4,143,957,642	4,143,957,642	4,143,957,642	4,143,957,642	4,143,957,642	4,143,957,642	4,143,957,642	4,143,957,642	4,143,957,642	4,143,957,642	4,143,957,642
Total Fleet Purchases	4,143,957,642	4,143,957,642	4,143,957,642	4,158,023,642	4,158,023,642	4,174,547,642	4,221,231,642	4,260,591,642	4,295,991,642	4,328,745,642	4,359,508,642
Fleet Maintenance											
Diesel O&M Costs	0.22										
BEV O&M Costs	0.11										
Annual highway kilometers	76,000										
Total BEV Fleet Size	0	0	0	31	62	127	286	526	845	1,324	1,963
Remaining Diesel Fleet Size	28,823	29,113	29,403	29,667	29,933	30,168	30,311	30,378	30,368	30,200	29,876
BEV Fleet Maintenance	0	0	0	267,406	534,812	1,095,502	2,467,036	4,537,276	7,288,970	11,420,824	16,932,838
Diesel Fleet Maintenance	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865
Total BEV Maintenance	0	0	0	267,406	534,812	1,095,502	2,467,036	4,537,276	7,288,970	11,420,824	16,932,838
Total Diesel Maintenance	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865	4,556,216,865

Coûts
Véhicules, infrastructures
OPEX, dont l'électricité

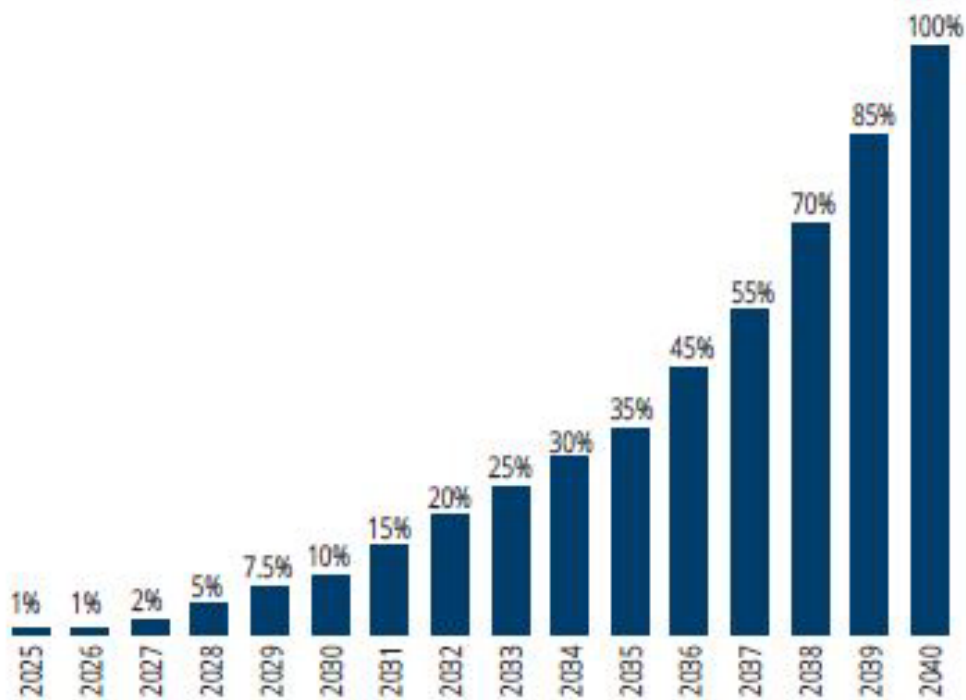
Bénéfices
Économies sur le carburant et
l'entretien, émissions CO₂ évitées

Indicateurs économiques
VAN (M\$), TRI (%), coût de réduction (\$ tCO₂e)

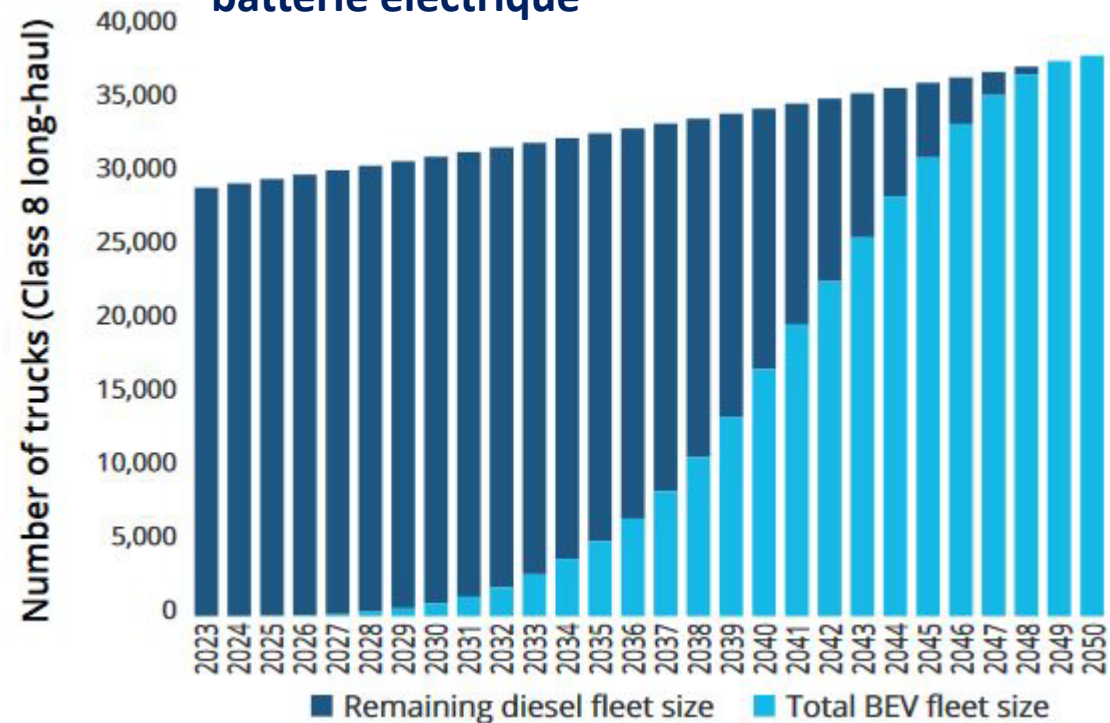
HYPOTHÈSES | Courbe d'adoption

EXEMPLE BEV

Prévision des ventes de nouveaux camions

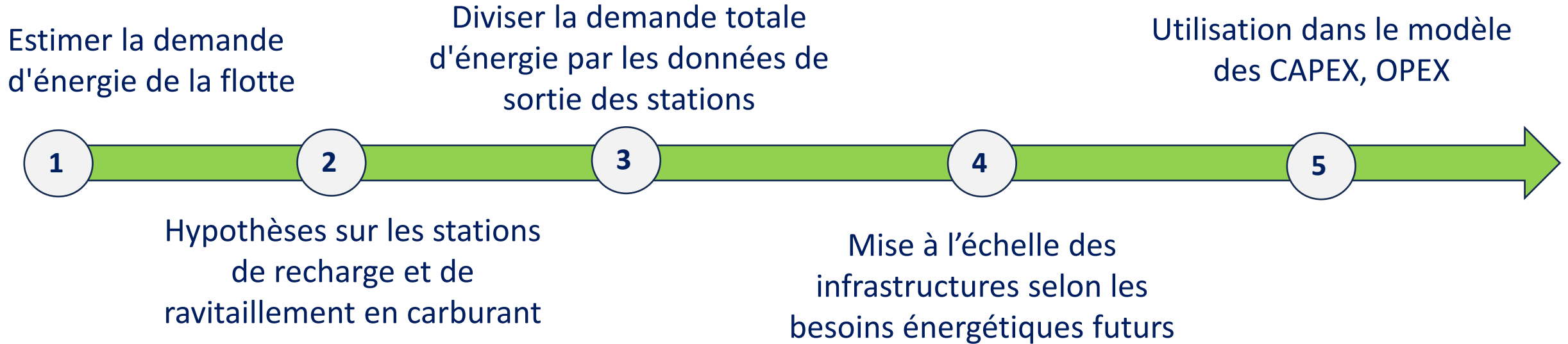


Modélisation de la transition de la flotte des camions à batterie électrique



- **Durée de vie moyenne des camions** : 10 ans, renouvellement de la flotte de 10 % par an;
- **Taux de croissance** annuel de 1 % de la taille de la flotte, sur la base des tendances passées;
- Correspondance avec les **objectifs fédéraux** : 100% de VZÉ vendus.

HYPOTHÈSES | Déploiement progressif



EXEMPLE CATÉNAIRE

Déploiement progressif des caténaires : les segments à fort trafic en priorité

Segment autoroutier	Priorité	Période de déploiement des infrastructures	Taille de la flotte OCT à l'année finale du déploiement
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)

HYPOTHÈSES | Prix de l'énergie

Prix d'énergie pour les différentes technologies		
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'H₂	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 \$/m³)	Énergir Québec [28]

LIMITES DE L'ANALYSE

1. Analyse des routes secondaires reliées au corridor A20-H401
2. Impact du poids des camions sur l'entretien des routes
3. Bénéfices en matière d'atténuation des polluants atmosphériques
4. Coûts et autres considérations liés à la fin de vie
5. Disponibilité de l'approvisionnement en énergie renouvelable
6. Prévion des prix de l'énergie
7. Prévion des prix des composants et de l'amélioration des performances
8. Analyse détaillée des types d'infrastructures et de leurs coûts
9. Coûts et GES associés à l'énergie en amont
10. Voie de décarbonation de la production d'électricité
11. Autres facteurs en amont de la chaîne d'approvisionnement

4 | RÉSULTATS

DEUX PERSPECTIVES

Chaque technologie carboneutre a été évaluée sous deux perspectives :

1. PERSPECTIVE « CORRIDOR »

Comparaison d'une trajectoire d'adoption progressive pour tous les camions longue distance de classe 8 circulant sur le corridor, avec une transition vers la technologie carboneutre correspondante d'ici 2050.

2. PERSPECTIVE « CAMION »

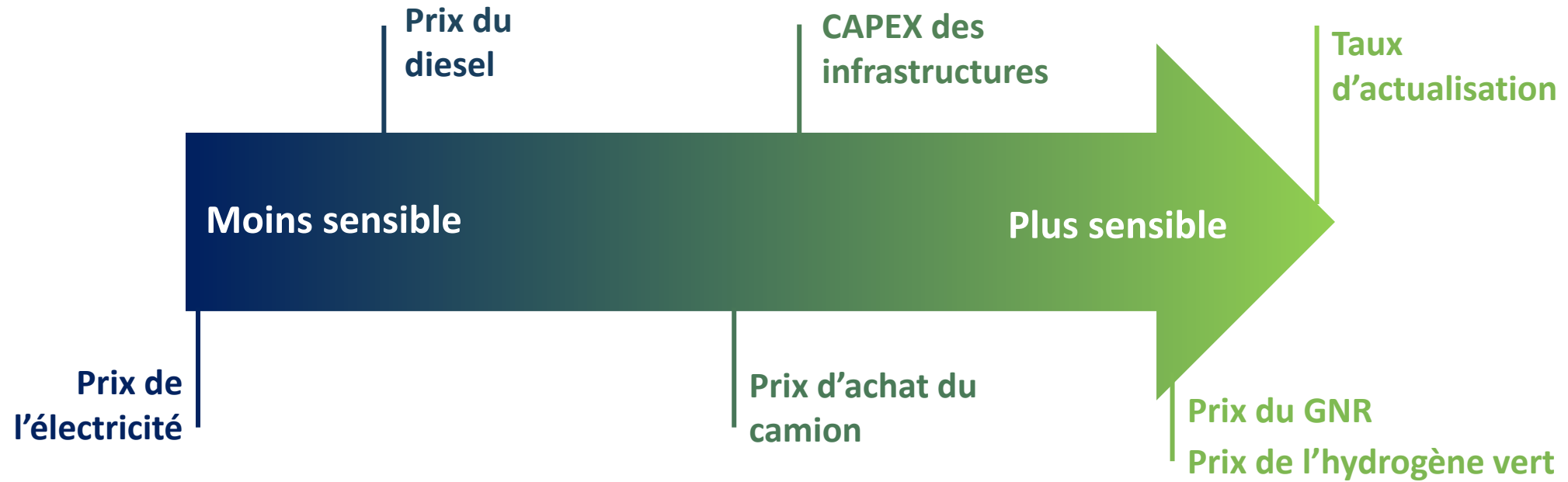
Évaluation du coût total du cycle de vie d'un seul camion long distance de classe 8 sur sa durée de vie typique de 10 ans.

PERSPECTIVE « CORRIDOR »

Technologies	VAN	Avantages	Coûts	RCA	TRI
Batterie électrique	294 M\$	3,380 M\$	3,086 M\$	1,1	4 %
Pile à combustible à hydrogène vert	-2,224 M\$	870 M\$	3,094 M\$	0,3	N/A ^[1]
Caténaire électrique avec bloc-batterie	294 M\$	3,115 M\$	2,821 M\$	1,1	0,9 %
GNR	1,606 M\$	2,903 M\$	1,297 M\$	2,2	29,4 %

- **Le GNR, le BEV et l'OCT ont tous un potentiel de coûts négatifs de réduction des GES**, ce qui signifie que des économies peuvent être réalisées en mettant en œuvre ces technologies par rapport aux camions diesel.
- **GNR** : Sur la base d'une évaluation **strictement économique**, les camions au GNR ont eu tendance à obtenir les meilleurs résultats dans les hypothèses de base
 - VAN positive : 1,6 G\$; BCR : 2,2
- **BEV et OCT** : Les camions à batterie et à caténaire affichent les 2^e performances les plus favorables
 - VAN positive : 294 M\$; BCR : 1,1
- **FCEV** : Les camions à **hydrogène vert n'atteignent pas** une VAN positive ou un BCR supérieur à 1

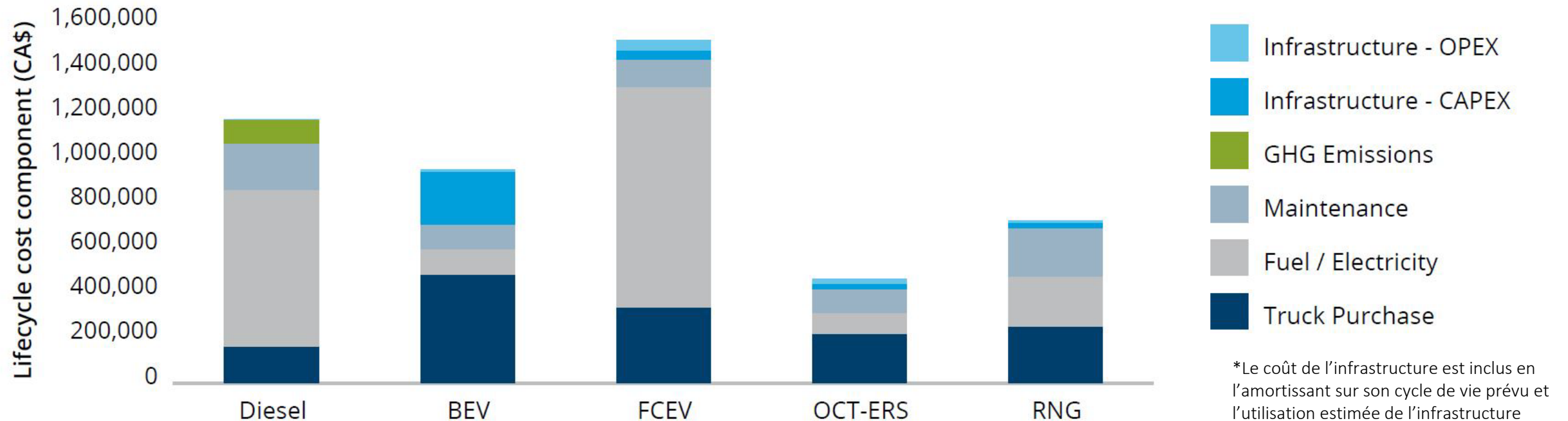
PERSPECTIVE «CORRIDOR » | SENSIBILITÉ



PARAMÈTRES

- Prix d'achat du camion +/- 25 %
- Prix du diesel +/-25 %
- Prix de l'électricité +/-25 %
- Prix de l'hydrogène vert +/-50 %
- Prix du GNR +/-50 %
- Infrastructure +/-50 %
- Taux d'actualisation (3 % et 7 %)

PERSPECTIVE « CAMION »



- **Le coût sur l'ensemble du cycle de vie des technologies carboneutres est inférieur à celui du diesel, à l'exception de l'hydrogène (FCEV) en raison du coût élevé de l'hydrogène vert, du véhicule et des stations de ravitaillement.**
- **Les camions à caténaire (OCT-ERS) ont le coût le plus faible par camion, sur l'ensemble du cycle de vie.**
- **L'utilisation des caténaires permet de répartir les coûts d'infrastructure sur une durée plus longue (50 ans) et sur un grand nombre de camions utilisant l'infrastructure, ce qui contribue à réduire le coût par camion.**

GES ÉVITÉS ET DEMANDE ÉNERGÉTIQUE

- Les **émissions de GES évitées** pour rendre le corridor A20-H401 carboneutre, compte tenu des projections actuelles de la demande de transport longue distance de classe 8, sont de l'ordre de **2,8 Mt CO₂e/an** d'ici à 2050.
- **Perspectives de la demande d'énergie**
 - GNR et FCEV : manque important de données et d'approvisionnement d'H₂ vert et GNR de sources durables
 - BEV et OCT : d'ici 2050, la demande d'énergie représentera environ 1 % de la production d'électricité actuelle en Ontario et au Québec
 - D'importantes améliorations de l'infrastructure de transport et de distribution de l'électricité seront nécessaires

Estimation de la demande énergétique totale de la flotte de camions classe 8 sur l'A20-H401 d'ici 2050

Class 8 truck technologies	Demande énergétique annuelle totale de la flotte d'ici à 2050	Production d'énergie actuelle en ON	Production d'énergie actuelle au QC	Production combinée ON + QC
BEC	3.8 TWh	153 TWh	213 TWh	366 TWh
FCEV	261 millions kg <small>(ég à 14 TWh so produit à partir d'électrolyze)</small>	N.d.	185 million kg	N.d. <small>Canada: 3 000 million kg</small>
OCT-ERS	3,2 TWh	153 TWh	213 TWh	366 TWh
GNR	4,2 PJ	2,7 PJ	3,8 PJ	6,5 PJ



**5 | DISCUSSION
ET CONCLUSION**

DISCUSSION | AVANTAGES ET DÉFIS (1)

Technologies	Avantages	Défis
Batterie électrique	<ul style="list-style-type: none">• Économies sur le carburant et l'entretien• Coût global inférieur sur l'ensemble du cycle de vie• VAN et TRI positifs• Efficacité énergétique élevée	<ul style="list-style-type: none">• Poids supplémentaire de la batterie a une incidence sur la charge utile et l'usure de la route• Impact du temps de charge (~heures) sur l'efficacité• Demande d'énergie localement élevée pour la charge rapide• Capital initial pour les camions, l'infrastructure• Disponibilité commerciale / maturité
GNR	<ul style="list-style-type: none">• Maturité technologique• Autonomie, temps de ravitaillement, charge utile similaires à ceux du diesel• Interchangeabilité avec le GNC• Économies sur le carburant et l'entretien• Coût global inférieur sur l'ensemble du cycle de vie• VAN et TRI positifs	<ul style="list-style-type: none">• Approvisionnements limités de GNR de source durable• Concurrence avec d'autres usages finaux• Émissions fugitives en amont associées au stockage et au transport du GNR• Émissions au niveau du tuyau d'échappement

DISCUSSION | AVANTAGES ET DÉFIS (2)

Technologies	Avantages	Défis
Caténaire avec bloc-batterie	<ul style="list-style-type: none">• Maturité technologique dans transport sur rail et collectif urbain• Moins de contraintes d'autonomie et de charge utile (par rapport au BEV)• Économies sur le carburant et l'entretien• Coût global inférieur sur l'ensemble du cycle de vie• VAN et TRI positifs• Meilleure efficacité énergétique	<ul style="list-style-type: none">• CAPEX élevé• Moins testé dans le contexte nord-américain qu'en Europe
Pile à combustible à l'hydrogène vert	<ul style="list-style-type: none">• Autonomie• Temps de ravitaillement,• Charge utile similaires à ceux du diesel	<ul style="list-style-type: none">• Coût élevé et disponibilité de l'hydrogène vert• Disponibilité commerciale / maturité des véhicules et des stations-service• Coûts initiaux élevés pour les camions et l'infrastructure• Pas de rentabilité (VAN et TRI négatifs)• Faible efficacité énergétique• Compétition d'usages finaux

CONCLUSION |

Réduire les GES fait gagner de l'argent. Le GNR, les camions à batterie et les camions à caténaire présentent tous un potentiel de réduction des coûts sur l'ensemble du cycle de vie.

Les camions à caténaire ont le potentiel de réduire les coût d'opération. Si les investissements en infrastructure sont réalisés, les coûts d'opérations sont sensiblement réduits pour les opérateurs de véhicules.

Perspective de long terme et coordination requise. Quelle que soit la technologie carboneutre choisie, un leadership gouvernemental accru est requis pour le déploiement.

Évolution rapide des technologies. Besoin d'actualiser l'analyse au fur et à mesure que les spécifications des véhicules et des infrastructures s'améliorent.

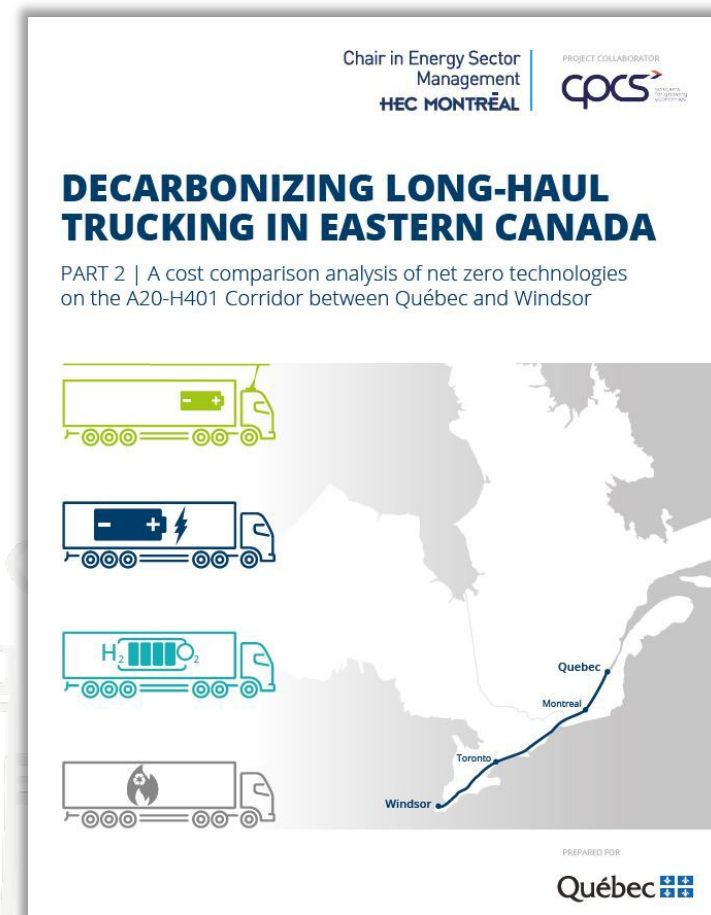
Incertitudes de la modélisation et tendances clés. Il existe un éventail de paramètres de coût et de performance, compte tenu de la maturité des technologies, qui demeure à un stade précoce.

Amélioration à l'accès et la transparence des données et études, et d'essais sur le terrain. Cela permet de mieux prendre en compte le marché du transport routier et d'effectuer une évaluation du potentiel des technologies selon les réalités du marché.

Nécessité d'une approche plus systémique (réduction-transfert-amélioration) qui tienne compte du potentiel commercial maximal. (ex., disponibilité du GNR et d'H2 vert ; concurrence pour l'utilisation finale des carburants carboneutres entre secteur)

Téléchargez les rapports (parties 1 et 2), la
présentation et le simulateur Excel :

energie.hec.ca/decarbonizing-long-haul-trucking-in-eastern-canada





Nick Roberts : nroberts@cpcs.ca

Mathieu Cyr : mcyr@cpcs.ca

Site web cpcs.ca

Chaire de gestion
du secteur de l'énergie
HEC MONTRÉAL

Johanne Whitmore : johanne.whitmore@hec.ca

Pierre-Olivier Pineau : pierre-olivier.pineau@hec.ca

Site web energie.hec.ca

LinkedIn [@Chaire Énergie - HEC Montréal](#)



6 | Questions