Flotte
rechargeable
Camions lourds

Étude sur le potentiel d'électrification de camions lourds à moteur diesel
Rapport phase 2 –Papineau Transport International

Par : Philippe Louisseize, ing.
Révision : Charles Trudel, ing. et Mathieu Chevigny

Date : Lundi le 16 mai 2023 | Version révisée : 1 août 2023

Institut du véhicule innovant

Table des matières

1. Faits saillants 6
2. Méthodologie 7
3. Méthodologie : Scénarios d'électrification 9
4. Limites de l'analyse 11
5. Présentation de l'entreprise 12
6. Véhicules analysés 13
7. Analyse du camion 3720074 18
8. Scénario d'électrification pour le camion 3720074 21
9. Analyse du camion 3720079 26
10. Scénario d'électrification pour le camion 3720079 29
11. Analyse du camion 3722053 33
12. Scénario d'électrification pour le camion 3722053 36
13. Conclusions et recommandations 40
14. Sources des données 42
15. Informations et contact 43
16. Remerciements 44

Attribution, pas d'utilisation commerciale, partage dans les mêmes conditions

(CC BY-NC-SA) : Cette licence permet à d'autres personnes de remixer, arranger et adapter l'œuvre à des fins non commerciales tant que le crédit à l'auteur est attribué en citant son nom et que les nouvelles œuvres sont diffusées selon les mêmes conditions. Pour consulter le code juridique encadrant cette licence, visitez creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.fr

Liste des tableaux

Tableau 1 : Énergie nominale vs. Utilisable d'un camion électrique à différents stades de vie 10
Tableau 2 : Information de base sur l'utilisation des véhicules de Papineau International 14
Tableau 3 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 3720074 19
Tableau 4 : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 3720074 20
Tableau 5 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 3720074..... 24
Tableau 6 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 3720074 24
Tableau 7 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 3720079 27
Tableau 8 : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 3720079 28
Tableau 9 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 3720079..... 31
Tableau 10 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 3720079 31
Tableau 11 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 3722053 34
Tableau 12 : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 3722053 35
Tableau 13 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 3722053..... 38
Tableau 14 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 3722053 39
Tableau 15 : Recommandation d'électrification des camions de Papineau International 40

Liste des figures

Figure 1 : Échelle de dénivelé allant du plus petit dénivelé au plus grand 8
Figure 2 : Camions utilisés durant la période d'instrumentation, dans l'ordre de gauche à droite : Camions 3720074, 3722053, 3720079..... 13
Figure 3 : Fréquence des livraisons du camion 3720074 dans un rayon de 25 et 50 km de Papineau International..... 18
Figure 4 : Fréquence des livraisons du camion 3720079 dans un rayon de 25 et 50 km de Papineau International..... 26
Figure 5 : Fréquence des livraisons du camion 3722053 dans un rayon de 25 et 50 km de Papineau International..... 33

Liste des graphiques

Graphique 1 : Répartition des kilométrages quotidiens par camion 15
Graphique 2 : Répartition des vitesses - Papineau International..... 16
Graphique 3 : Heures par jour au dépôt, journées actives seulement 17
Graphique 4 : Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 372007420
Graphique 5 : Journées de mesure du camion 3720074, en ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh)..... 21
Graphique 6 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 3720074 22
Graphique 7 : Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 3720074..... 23
Graphique 8 : Émissions sur la vie du camion 3720074, Diesel vs. Électrique..... 25
Graphique 9 : Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 372007928
Graphique 10 Journées de mesure du camion 3720079, en ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh)..... 29
Graphique 11 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 3720079 30
Graphique 12 : Moments des déplacements et arrêts du camion 3720079 31
Graphique 13 : Émissions sur la vie du camion 3720079, Diesel vs. Électrique..... 32
Graphique 14 : Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 3722053 35
Graphique 15 : Journées de mesure du camion 3722053, en ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh)..... 36
Graphique 16 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 3722053 37
Graphique 17 : Moments des déplacements et arrêts du camion 3722053 38
Graphique 18 : Émissions sur la vie du camion 3722053, Diesel vs. Électrique..... 39

À PROPOS DE L'IVI

Cumulant plus de 25 ans d'expérience dans le développement de prototypes de véhicules électriques, autonomes et connectés, l'Institut du véhicule innovant (IVI) est un accélérateur d'innovation qui aide l'industrie québécoise à se positionner rapidement dans un marché en pleine croissance.

Au sein de l'IVI, le Groupe applications technologiques réalise des mandats de déploiement ou d'expérimentation de technologies, de formation et de sensibilisation afin de favoriser l'adoption de nouvelles technologies véhiculaires.

L'Institut du véhicule innovant est un Centre collégial de transfert de technologie (CCTT) affilié au Cégep de Saint-Jérôme. Il détient un statut d'organisme à but non lucratif (OBNL) et est accrédité comme centre de recherche par le CRSNG.

Le projet Flotte rechargeable – Camions à vise à soutenir gratuitement les propriétaires et exploitants de véhicules lourds à la venue de camions 100 % électriques sur le marché québécois.

L'objectif du projet "Flotte rechargeable - Camions lourds" est d'encourager les entreprises québécoises à prendre le virage de l'énergie propre et le rôle est de fournir aux gestionnaires les outils et les connaissances qui leur permettront de mettre en marche le plan d'électrification de leur parc de véhicules lourds.

Pour ce projet d'une durée de trois ans, l'IVI s'associe avec des partenaires de choix de l'écosystème des transports pour aller à la rencontre de transporteurs routiers, élaborer des rapports d'analyses de faisabilité pour une trentaine d'entreprises ciblées, en plus de coordonner des périodes d'essais de modèles de camions lourds électriques en condition réelle d'utilisation commerciale.

Ce projet est réalisé grâce à la participation financière du gouvernement du Québec dans le cadre du programme Action-Climat Québec afin de rejoindre les objectifs d'un Plan pour une économie verte 2030 et par le soutien des partenaires du projet.

Une subvention de 1 245 560 $ a été accordée pour la mise en œuvre de ce projet.

1. Faits saillants

Le présent rapport a pour but de mesurer la pertinence d'électrifier trois camions de la compagnie Papineau Transport International située à Saint-Jérôme.

L'analyse des déplacements dont les renseignements ont été collectés à l'aide d'appareils de télématique Go9 de Geotab a permis de déterminer les faits saillants suivants sur le potentiel d'électrification, dont les justifications détaillées se trouvent dans les sections suivantes :

65 % des journées se terminent en ayant parcouru moins de 250 km

92 % des arrêts de nuit au terminal durent 10 heures ou plus, ce qui laisserait assez de temps pour ajouter 1500 kWh par camion, via une borne de 150 kW

Camion 3720074 – Tracteur classe 8		Effet sur le potentiel d'électrification
Critère	**Valeur**	
Distances	Longues	-
Constance	Variées	-
Dénivelé	Faible	+
Recharge en journée	Non	-
Chargement	Lourd	-
Accessoires	Aucun	+

Estimation de consommation électrique en été	206 kWh / 100 km
Estimation de consommation électrique moyenne, sur 1 an	259 kWh / 100 km
Pénalité de chargement ?	Oui
Capacité nominale requise pour 90 % des journées sans recharger durant la journée	1173 kWh
Batterie disponible ?	Non

Camion 3720079 – Tracteur classe 8		Effet sur le potentiel d'électrification
Critère	**Valeur**	
Distances	Longues	-
Constance	Variées	-
Dénivelé	Faible	+
Recharge en journée	Non	-
Chargement	Lourd	-
Accessoires	Aucun	+

Estimation de consommation électrique en été	206 kWh / 100 km
Estimation de consommation électrique moyenne, sur 1 an	247 kWh / 100 km
Pénalité de chargement ?	Oui
Capacité nominale requise pour 90 % des journées	1015 kWh
Batterie disponible ?	Non

Camion 3722053 – Tracteur classe 8		Effet sur le potentiel d'électrification
Critère	**Valeur**	
Distances	Longues	-
Constance	Variées	-
Dénivelé	Faible	+
Recharge en journée	Non	-
Chargement	Lourd	-
Accessoires	Aucun	+

Estimation de consommation électrique en été	199 kWh / 100 km
Estimation de consommation électrique moyenne, sur 1 an	238 kWh / 100 km
Pénalité de chargement ?	Oui
Capacité nominale requise pour 90 % des journées	1302 kWh
Batterie disponible ?	Non

2. Méthodologie

Estimer la viabilité de l'électrification d'une route de transport local revient à déterminer les besoins énergétiques d'un camion et les comparer aux tailles de batteries offertes sur le marché. En deuxième lieu, il faut comprendre comment cette énergie peut être restituée à la batterie par le biais d'une infrastructure de recharge lorsque le camion est à l'arrêt. Ceci est généralement fait au terminal de l'entreprise la nuit, mais peut aussi bien avoir lieu le jour entre deux trajets, chez un client, ou même sur une borne de recharge publique.

Puisque l'analyse de la consommation de carburant d'un camion diesel renseigne peu sur la consommation électrique hypothétique de celui-ci, l'IVI a plutôt préconisé de décortiquer chaque déplacement et d'en traduire la dépense énergétique correspondante. Par exemple, le fait de monter un camion d'une masse déterminée à une hauteur connue demandera une énergie pouvant être calculée et convertie en kilowattheures (kWh). Il en va de même pour accélérer cette masse, vaincre la résistance du vent et du roulement des pneus et contrer les pertes du système de rouage.

Les données précises sur les déplacements ont été obtenues en instrumentant les camions d'appareils de télématique Geotab Go9. Bien que ceux-ci soient souvent utilisés pour le suivi des heures de conduite et de la consommation, il est aussi possible d'en extraire des données précises sur la position et la vitesse d'un véhicule à des intervalles de temps rapprochés.

La durée de la prise de mesures choisie est de trois mois pour s'assurer d'avoir un échantillon suffisant et représentatif des activités d'un camion.

Avant de se lancer dans une analyse détaillée des déplacements, une évaluation macroscopique des capacités des camions lourds électriques a été réalisée pour présélectionner des véhicules qui seraient plus susceptibles d'être candidats à l'électrification en considérant la technologie actuellement disponible sur le marché. Les critères retenus pour effectuer cette sélection sont les suivants :

- Rayon d'opération : 160 km environ, au maximum
- Retour à la base chaque jour
- Transport de marchandises
- Sévérité de l'application et accessoires disponibles sur le marché dans un horizon de 0 à 2 ans

Afin de considérer l'élévation parcourue par le camion évalué, l'IVI a mis en place un outil appelé l'indice de côte. Cet indice indique le dénivelé moyen positif en mètre pour chaque kilomètre parcouru par le véhicule. Voir la Figure 1.

Figure 1 : Échelle de dénivelé allant du plus petit dénivelé au plus grand

Le freinage régénératif pourra être utilisé lors de la descente des côtes parcourues dans le but de récupérer un peu d'énergie potentiel et la retourner à la batterie, mais ce n'est pas la totalité de cette énergie qui sera restituée.

Les besoins énergétiques obtenus grâce à l'analyse varient beaucoup d'une journée à l'autre, ce qui est normal pour un véhicule qui ne parcourt pas toujours la même route. Souvent les journées les plus longues peuvent être écartées, car jugées exceptionnelles ou non représentatives. Dans les projets menés par l'IVI précédemment, les recommandations émises visent à trouver une combinaison de batterie et d'infrastructure de recharge permettant de remplacer un véhicule à combustion par un véhicule électrique qui serait en mesure **d'accomplir les mêmes tâches pour au moins 90% des journées échantillonnées.**

3. Méthodologie : Scénarios d'électrification

À partir des informations recueillies et présentées à la section précédente, un scénario d'électrification a été élaboré pour chaque camion. Ceci consiste à estimer la quantité d'énergie requise pour effectuer l'entièreté des opérations quotidiennes normales de chaque camion durant l'analyse, et de déterminer quels seraient les besoins énergétiques quotidiens au courant d'une année entière. Ces besoins **aideront à recommander une batterie et les spécifications d'une infrastructure de recharge. Enfin, une analyse des bénéfices économiques et environnementaux est réalisée en tenant compte des paramètres retenus.**

Puisque le projet ne dispose pas d'une année entière pour effectuer la collecte de données, les besoins énergétiques ont été estimés pour la température réelle lors de la période d'instrumentation, mais aussi pour des températures de 20°C et -20°C. Ces températures ont été sélectionnées, car elles représentent respectivement une température où une batterie est à sa meilleure efficacité, et une température assez froide pour représenter une journée typique où un véhicule électrique aurait une autonomie minimale.

Les calculs financiers utilisent des hypothèses génériques à propos des prix des bornes de recharge et des tarifs d'Hydro-Québec. L'utilisation du tarif expérimental BR est posée comme hypothèse, avec un prix par kilowattheure reflétant l'utilisation d'une seule borne de recharge rapide pour un seul camion. Le déploiement subséquent d'autres bornes de recharge et d'autres camions affecterait le prix de l'énergie.

L'énergie requise calculée dans les trois scénarios ci-dessous est comparée aux capacités nominales d'énergie contenue dans les batteries, ou l'énergie totale. Cette valeur est utilisée, car c'est la spécification qui est le plus souvent annoncée par les manufacturiers de camions.

Malheureusement ce n'est pas l'entièreté de la capacité nominale qui peut servir à faire avancer le camion. D'emblée, les constructeurs y soustraient près de 10 % pour éviter d'endommager la batterie lors des cycles de recharge ou comme provision pour prévenir la dégradation. La capacité utilisable d'un camion neuf ayant une batterie d'une capacité hypothétique de 100 kWh serait donc d'environ 90 kWh.

Ensuite, l'IVI considère prudent de soustraire une marge de 5 % pour diminuer le stress de tomber en panne.

De cette capacité totale annoncée de 100 kWh, 85 kWh seront disponibles pour compléter les trajets du camion lors de sa mise en service. Ceci explique la différence qui peut être observée entre les capacités nominales affichées et l'énergie montrée sur certains graphiques.

De plus, le gestionnaire de flotte doit prévoir qu'une dégradation surviendra, ce qui diminuera la capacité de la batterie au fil de l'utilisation. Ainsi, après plusieurs années, une batterie vendue avec 100 kWh d'énergie nominale ne pourrait compléter que des trajets requérant un maximum de 75 kWh. Cette dégradation varie beaucoup selon les conditions, donc l'IVI préfère laisser le soin au gestionnaire de gérer la diminution de l'autonomie et les routes complétées.

Le Tableau 1 résume les capacités utilisables à différentes étapes de la vie du véhicule.

Tableau 1 : Énergie nominale vs. Utilisable d'un camion électrique à différents stades de vie

Capacité totale (nominale), telle qu'annoncer à la vente	Capacité réelle utilisable, camion neuf	Capacité avec marge confort, camion neuf	Capacité approximative restante avec marge de confort, long terme
100 kWh	**90 kWh**	**85 kWh**	**75 kWh**

4. Limites de l'analyse

Les données et analyses présentées dans ce rapport sont basées sur une modélisation réalisée par l'IVI. Bien que celle-ci soit effectuée avec le plus de rigueur possible, certaines variables ne peuvent être simulées de façon réaliste ou pratique. Il est donc à prévoir qu'il y aurait une différence, et une variation entre l'énergie estimée et l'énergie qui serait réellement utilisée pour les déplacements en camion électrique. Les résultats présentés ne constituent donc aucunement une garantie de l'exactitude de la consommation d'un camion électrique qui remplacerait un des camions diesel étudiés ni une garantie que le remplacement d'un des camions diesel étudiés est réellement possible sans perte de productivité ou sans effet pour l'entreprise, ses employés ou ses clients.

Les suggestions de tailles de batteries et les résultats rapportés sont valables au moment de la mise en service du véhicule. Il est important de considérer qu'une dégradation de la batterie surviendra au cours de la vie du véhicule. Cette dégradation est causée par le nombre de cycles de recharges et le temps écoulé depuis la fabrication. Durant les années suivant sa mise en service, une batterie devrait expérimenter une dégradation de 10 %, en moyenne. Ainsi, une batterie dont la capacité utilisable serait de 300 kWh en début de vie devrait être utilisée à 285 kWh (-5%) en début de vie, et aurait 225 kWh (-15%) utilisables après plusieurs années. Il faut donc prévoir qu'après quelques années d'opération, il ne sera peut-être plus possible de compléter les routes les plus longues sans prévoir d'ajustement tel qu'une séance de recharge additionnelle pendant la journée. Alternativement, choisir une batterie contenant plus d'énergie peut prémunir le gestionnaire de flotte contre ceci, si disponible.

De plus, les valeurs utilisées pour l'approximation des coûts des camions, du carburant et de l'électricité varieront grandement selon les équipements sélectionnés, la période d'amortissement, la complexité de l'installation, la consommation et la tarification électrique. Tous ces éléments affecteront l'estimation finale du calcul de rentabilité.

Les coûts d'installation électrique, d'assurance, d'achat d'infrastructure de recharge et même le prix d'achat des camions sont basés sur les meilleures approximations obtenues par l'IVI au moment d'écrire le rapport. Ceux-ci peuvent avoir changé au moment de la lecture ou d'un achat ultérieur. Il est donc nécessaire pour toute entreprise, incluant celle visée par le présent rapport, d'obtenir ses propres soumissions pour estimer avec précision sa rentabilité.

Malgré les meilleures estimations de l'IVI, si l'entreprise décide d'électrifier une route, elle doit comprendre qu'il est possible qu'il soit nécessaire d'apporter des ajustements pour éviter les pannes et interruptions de service, couvrir les besoins des journées les plus extrêmes, ou améliorer la rentabilité.

Puisque le présent projet a pour but d'informer le plus de gestionnaires de parcs de véhicules lourds possibles, donc d'offrir une analyse à plusieurs organisations, seulement trois (3) véhicules par entreprise sont étudiés. Il est donc important de considérer que les conseils résultants peuvent ne pas être représentatifs de l'ensemble des opérations du participant.

5. Présentation de l’entreprise

Papineau Transport International est une entreprise de transport, c’est-à-dire que les camions transportent les marchandises d’autres entreprises contre rémunération plutôt que leurs propres marchandises entre leurs usines ou magasins. Une majeure partie des produits transportés par Papineau International sont des matières recyclables triées, transportées entre des lieux de tri et ceux de transformation. L’entreprise transporte aussi des produits finis du papier, ainsi que d’autres produits dans une mesure non négligeable.

Les camions de Papineau International visitent typiquement plusieurs entreprises par jour, mais le chargement dans leur remorque est fréquemment dédié à un seul client. Des échanges de remorques sont la norme, plutôt que décharger celle-ci avant de repartir. L’entreprise effectue aussi des livraisons LTL (*Less Than Truck Load*), mais moins fréquemment. En majorité, les camions circulent avec une remorque chargée près du Poids Nominal Brut (PNB) autorisé. Le reste du temps, soit ils relocalisent une remorque vide, ou bien le tracteur se rend seul (*Bobtail*) à sa prochaine cueillette.

L’entreprise opère depuis 1948 et fait appel à 125 chauffeurs pour opérer ses 105 camions et 300 remorques. Alors que les camions observés circulent principalement dans le Grand Montréal, certains des camions de Papineau International peuvent se rendre partout en Amérique du Nord.

Les trois camions présentés ont été retenus parce qu’ils parcourent des routes assez courtes et régulières.

6. Véhicules analysés

Les trois camions retenus pour l'analyse sont les unités 3720074, 3720079 et 3722053. Il s'agit de trois tracteurs de classe 8.

Figure 2 : Camions utilisés durant la période d'instrumentation, dans l'ordre de gauche à droite : Camions 3720074, 3722053, 3720079

Ces camions ont été retenus, car ils répondaient aux critères généraux de sélection quant aux distances approximatives parcourues et au retour au dépôt la nuit.

Ceux-ci visitent les mêmes clients réguliers que la plupart des autres camions de l'entreprise, mais ils s'acquittent des transports locaux. Ce sont donc les trois camions qui parcourent les plus courtes distances de l'entreprise. En effet, la moyenne de distance hebdomadaire pour l'ensemble des véhicules de Papineau International est près de 2900 kilomètres par semaine, alors que les camions de l'analyse ont parcouru en moyenne autour de 2000 km par semaine.

Bien qu'il soit tentant d'appliquer les conclusions des trois camions présentés dans ce rapport à tout autre camion de la flotte, l'IVI préfère ne pas émettre de diagnostic ferme sur ceux-ci, car beaucoup de variables autres que ceux mentionnés précédemment influencent les simulations effectuées. Une étude approfondie de ces véhicules s'imposerait donc pour affirmer avec certitude le potentiel d'électrification des véhicules autres que ceux présentés dans ce document.

Certaines informations ont été jugées pertinentes à présenter de manière regroupée plutôt qu'individuellement par camion. Elles sont présentées immédiatement ci-bas. Des détails sont ensuite divisés par camion, pour bien comprendre leurs modes de fonctionnement et comment celui-ci impacterait la consommation électrique.

Quelques données saillantes ont été compilées dans un tableau résumé. Bien que ces données ne fournissent que très peu d'information sur la possible consommation d'un camion qui serait électrifié, elles permettent de comprendre les généralités des opérations de ces trois camions. Ces informations ne devraient pas receler d'importantes surprises pour les gestionnaires de Papineau International.

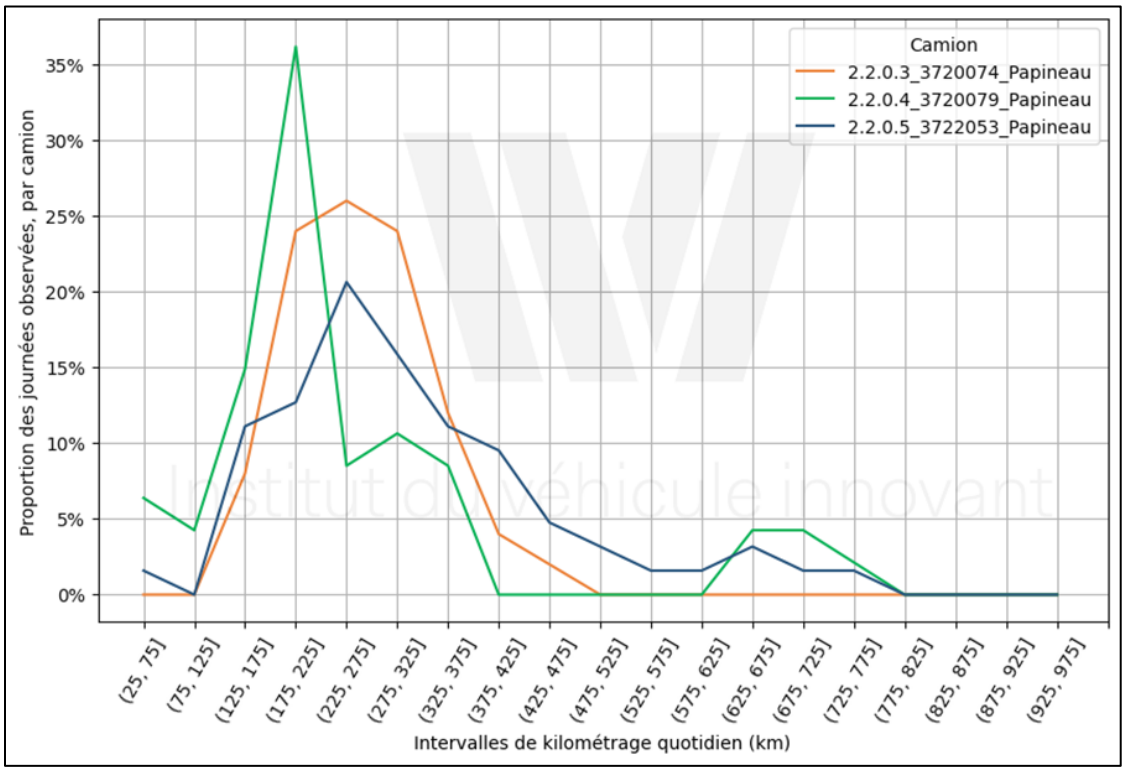
Tableau 2 : Information de base sur l'utilisation des véhicules de Papineau International

Camion #	3720074	3720079	3722053
Distance parcourue			
Durant le test	12 974 km	12 279 km	19 735 km
Annuellement (estimée)	51 894 km	49 118 km	78 942 km
Carburant			
Consommé durant le test	5 444 L	4 903 L	7 291 L
Consommé annuellement (estimé)	21 776 L	19 613 L	29 162 L
Consommation moyenne	41,7 L/100 km	40,0 L/100 km	36,5 L/100 km
Ralenti			
Temps par jour en moyenne	2,8 h	2,6 h	2,0 h
Carburant consommé au ralenti par jour	6,4 L	4,7 L	5,8 L
Carburant consommé par année (estimé)	1277 L	912 L	1429 L
Opérations			
Vitesse moyenne en déplacement	42 km/h	45 km/h	44 km/h
Nombre d'arrêts par jour	16	15	12
Nombre de jours actifs durant l'analyse	50 jours	48 jours	62 jours
Masse totale moyenne	30 645 kg	30 847 kg	30 483 kg

On y aperçoit, par exemple, que le camion 3722053 roule beaucoup plus que les deux autres, et tourne moins longtemps au ralenti. Il est aussi plus récent, ce qui peut expliquer en partie sa consommation plus basse. Les trois camions ont des opérations très similaires donc, les scénarios électriques risquent de se ressembler.

Le facteur le plus déterminant de la consommation électrique est la distance parcourue. Le graphique suivant montre la distribution des distances quotidiennes parcourues par camion.

Graphique 1 : Répartition des kilométrages quotidiens par camion

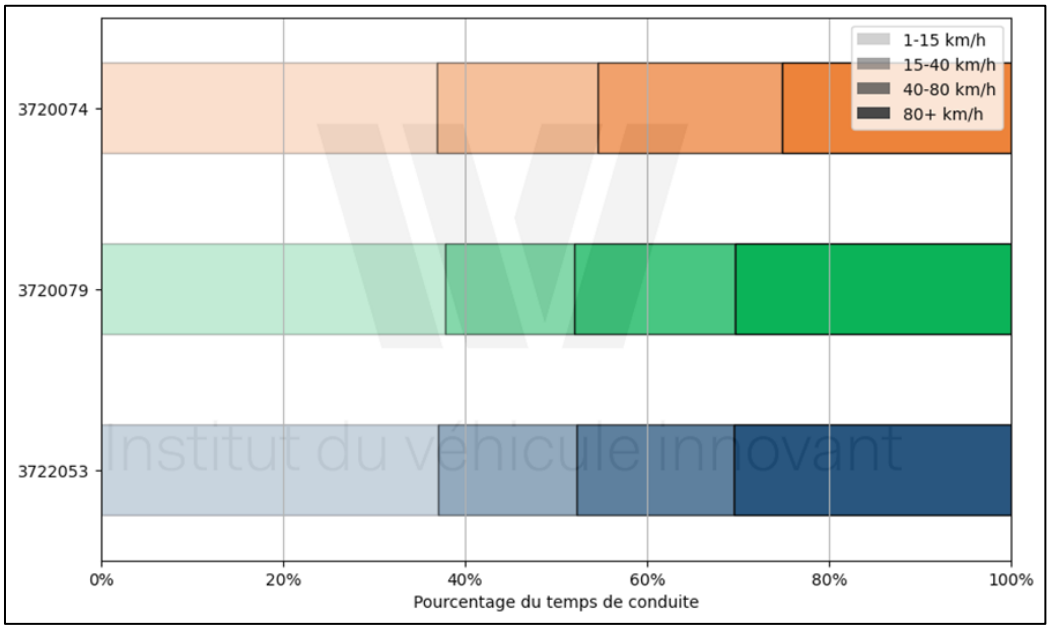


Le camion 3720079 a la plus grande concentration de courtes journées, parcourant environ 200 km le tiers des jours. Les deux autres camions parcourent fréquemment autour de 250 km par jour, mais ils ont une plus grande proportion de longues journées. Les camions 3720079 et 3722053 ont parcouru quelques fois entre 600 et 800 km par période de 24 heures.

Pour les trois camions, 45 % des journées dépassent 250 kilomètres.

Un autre facteur d'importance est la vitesse du véhicule. Le graphique suivant apporte plus de précisions sur la répartition du temps dans différentes plages de vitesses. De gauche à droite, les quatre dégradés de couleurs indiquent la proportion du temps de conduite passée entre 1 et 15 km/h, 15 – 40 km/h, 40 – 80 km/h, et finalement 80 km/h et plus. Ces divisions représentent respectivement des vitesses typiques pour un camion qui circulerait dans une cour, dans le trafic, en ville puis sur l'autoroute. Les bandes plus foncées représentent donc des moments à vitesse plus élevée.

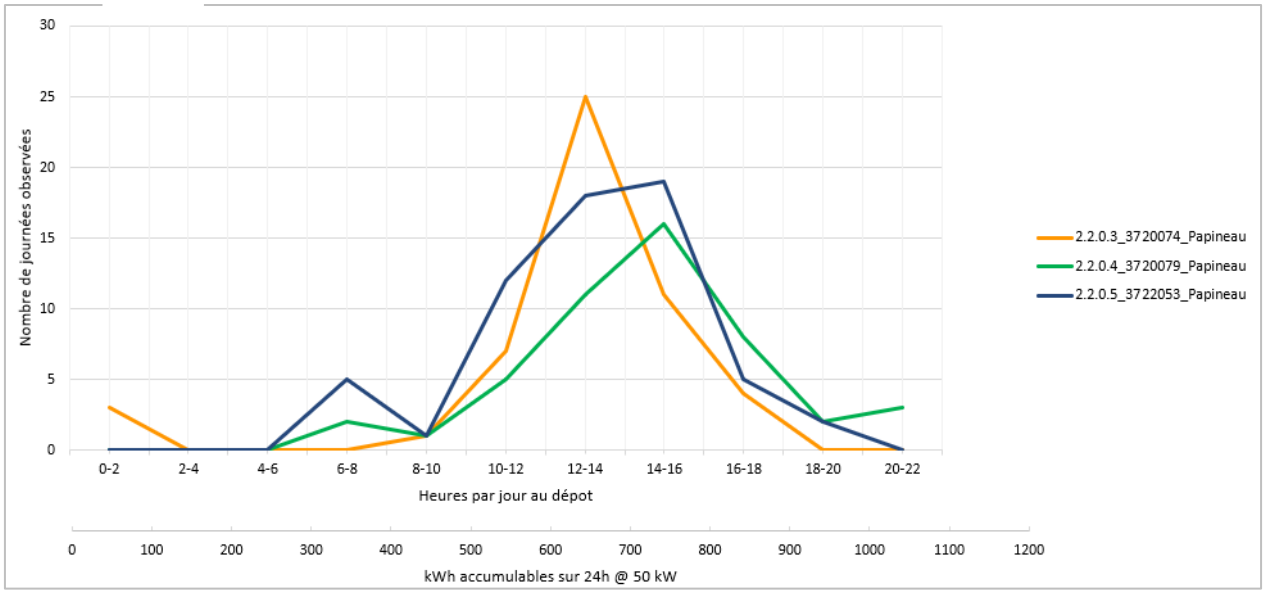
Graphique 2 : Répartition des vitesses - Papineau International



Le graphique 2 permet d'observer que les trois camions de Papineau International passent la majeure partie de leur temps d'utilisation soit à très basse vitesse, soit à plus de 80 km/h. Ce 30% de temps passé à haute vitesse causera une consommation élevée pour un véhicule électrique.

Le mode de ravitaillement des véhicules électriques est complètement différent de celui des véhicules à combustion interne. En effet, la méthode la plus efficace et la moins coûteuse pour les véhicules électriques consiste à charger le véhicule à la borne de recharge la plus lente possible, au dépôt, durant ses périodes d'inactivité. Il en va donc de soi que plus ce temps est long, plus la borne peut être lente. L'IVI préconise la sélection d'infrastructure de recharge la moins puissante possible pouvant satisfaire les besoins. De cette manière, l'infrastructure est moins coûteuse à acquérir, installer puis opérer. Les trois véhicules suivis reviennent au dépôt de Papineau la nuit. Ils disposent de plusieurs heures pour s'y recharger. Le Graphique 3 suivant montre la répartition des heures passées au terminal de Papineau International à l'arrêt, par période de 24h.

Graphique 3 : Heures par jour au dépôt, journées actives seulement



Ce graphique montre aussi une échelle de l'énergie pouvant potentiellement être restituée à la batterie durant les heures d'arrêt au dépôt, avec la barre en bas. Par exemple, un camion arrêté 10 heures et branché sur une borne de 50 kW pourrait théoriquement accumuler 500 kWh d'énergie dans la batterie. Ces valeurs pourront être comparées aux besoins quotidiens en énergie, pour prouver que la recharge au dépôt peut suffire aux besoins du camion.

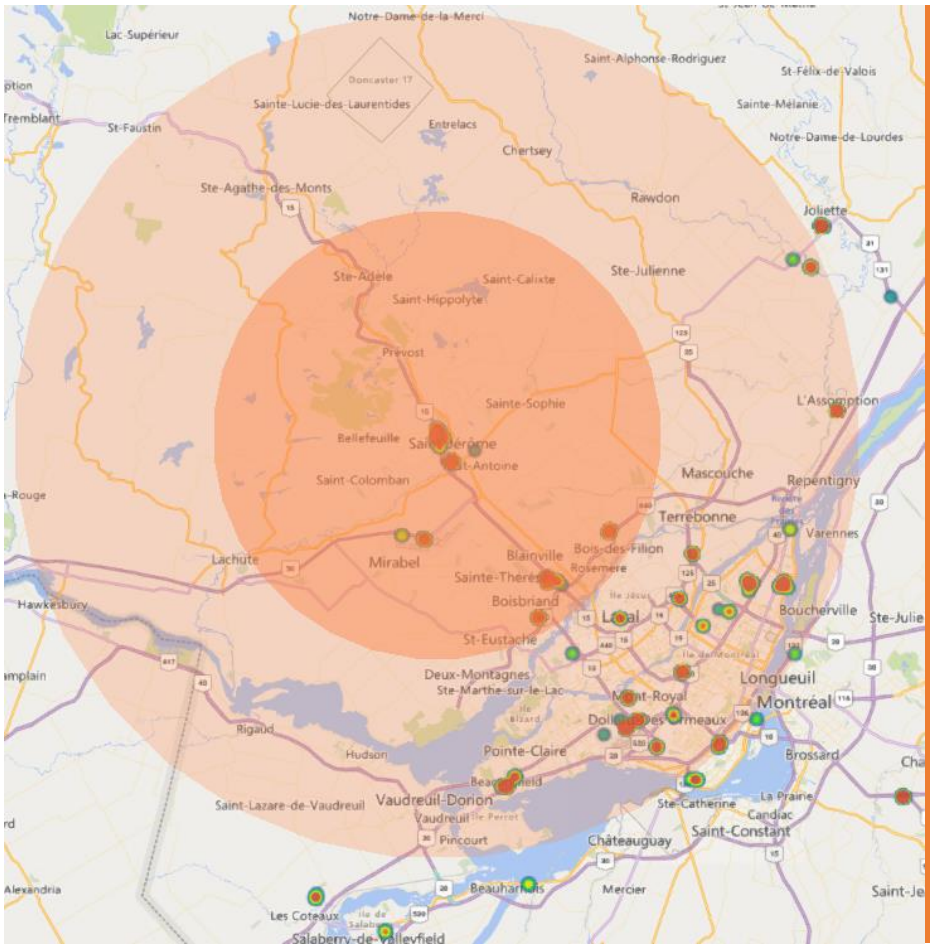
Les camions de Papineau International disposent le plus fréquemment de 14 heures pour recharger. À quelques occasions, ils passent significativement moins de temps au terminal, particulièrement pour le 3722053. Les journées où ces arrêts totalisent 10 heures et plus représentent quand même 92 % des jours mesurés.

Les pages suivantes présentent donc en détail l'analyse des déplacements de chaque camion, analyse qui conduira à déterminer leurs besoins énergétiques si ceux-ci étaient remplacés par des camions électriques, dans la seconde portion de ce rapport.

7. Analyse du camion 3720074

Le camion 3720074 est utilisé pour des livraisons de marchandises sèches à des entreprises. Il effectue des échanges et repositions de remorques dans le Grand Montréal et sa périphérie. Il circule souvent dans les zones industrielles de l'île de Montréal, en Montérégie, aux environs de Joliette et de Saint-Jérôme.

Il transporte des matières recyclables, des palettes et d'autres matériaux divers. Quatre clients constituent la moitié de ses arrêts. La carte suivante permet de visualiser la localisation et la fréquence des livraisons :



La presque totalité des livraisons sont effectuées entre 25 et 50 km du port d'attache. Seuls quelques points sont visités en dehors de cette zone, mais certains le sont à haute fréquence.

La couleur des points représente la fréquence des arrêts à un endroit. Ainsi, les zones plus rouges sont visitées très fréquemment.

Le véhicule ne revient à peu près jamais au dépôt durant la journée.

Figure 3 : Fréquence des livraisons du camion 3720074 dans un rayon de 25 et 50 km de Papineau International

Le camion 3720074 évolue principalement sur l'île de Montréal et dans la vallée du Saint-Laurent. Cette zone géographique n'est pas très montagneuse.

Cet indice de côtes à gravir indique que chaque kilomètre parcouru lui demande de monter un dénivelé positif de 1,9 mètre.

Le détail des distances parcourues chaque jour de l'analyse est présenté dans le tableau suivant. Celui-ci comporte trois sections pour couvrir l'entièreté des détails des déplacements du camion. En haut, la distance maximale, au 90e percentile, médiane et moyenne sont présentées, ainsi que l'écart-type (σ) et le Coefficient de Variation (CV).

Ensuite le graphique du centre montre les moyennes de déplacement pour chaque journée de la semaine.

Finalement, la section du bas est organisée en calendrier où les dates sont remplacées par la distance parcourue lors de cette journée, en kilomètres. Un dégradé de couleurs permet de visualiser quelles journées ont été plus intenses. Celles-ci ont une teinte plus foncée. Les journées en gris sont celles où le camion a parcouru moins de 20 km. Il est donc considéré que le camion a été inactif à ces moments.

Tableau 3 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 3720074

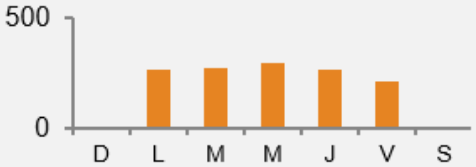
Dans la première section, la valeur qui aidera le plus le gestionnaire est probablement la distance au 90e percentile, qui est de 339 km en une journée. Cette distance constitue un objectif de la distance que devrait pouvoir compléter un camion électrique en une journée.

Il se pourrait aussi que les journées où la distance parcourue est au-delà de cette distance soient exceptionnelles et qu'elles puissent être exclues de l'analyse du scénario d'électrification.

L'observation de ces tableaux permet de constater qu'il y a beaucoup de journées dont la distance parcourue est assez près de la moyenne. Cependant, plusieurs des journées longues présentent un écart important par rapport à cette moyenne. Celles-ci sont relativement nombreuses aussi, il est donc impossible de les écarter de l'analyse.

Il est difficile de remarquer une tendance, outre que le camion est utilisé cinq jours par semaine, du lundi au vendredi. Les journées vers le milieu de la semaine semblent être un peu plus longues, mais la différence est faible par rapport aux lundis et vendredis.

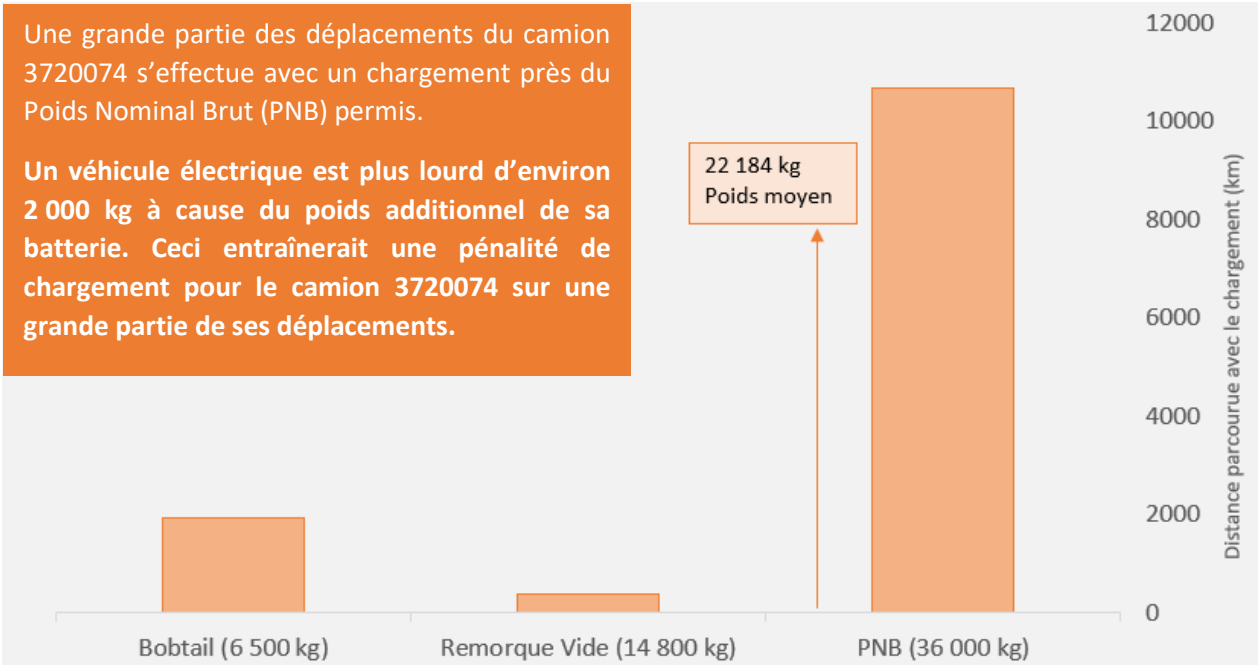
Max	441	km
90%	339	km
Med	260	km
Moy	261	km
σ	71	km
CV	27%	



	D	L	M	M	J	V	S
déc.	-	-	-	-	-	270	-
	-	188	127	335	388	160	-
	-	359	336	318	263	194	-
	-	-	-	-	-	-	-
janv.	-	-	308	287	179	209	-
	-	257	244	423	335	181	-
	-	275	280	338	311	203	-
	-	306	254	276	253	225	-
	-	186	292	210	189	231	-
févr.	-	300	441	236	250	295	-
	-	306	299	166	273	139	-
	-	240	180	345	197	195	-
	-	-	-	-	-	-	-
mars	-	-	-	-	-	-	-

L'énergie requise pour chaque accélération et chaque montée est directement proportionnelle à la masse totale du véhicule, incluant son chargement. Selon le gestionnaire de flotte de Papineau International, le camion 3720074 circule principalement avec une remorque à deux essieux, chargée près du Poids Nominal Brut (PNB) permis. Le poids total du véhicule avoisine donc 36 363 kg (80 000 lbs). Pour les besoins des simulations, un poids total de 36 000 kg fut considéré. À d'autres moments moins fréquents, le camion circule soit sans remorque (*Bobtail*), ou repositionne une remorque vide. Le Graphique 4 montre le chargement typiquement transporté.

Graphique 4 : Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 3720074



La durée de service prévue par Papineau International pour leurs camions est de cinq ans.

En résumé, l'analyse des déplacements du camion 3720074 permet de déterminer les grandes lignes qui affecteront son potentiel d'électrification des façons suivantes :

Tableau 4 : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 3720074

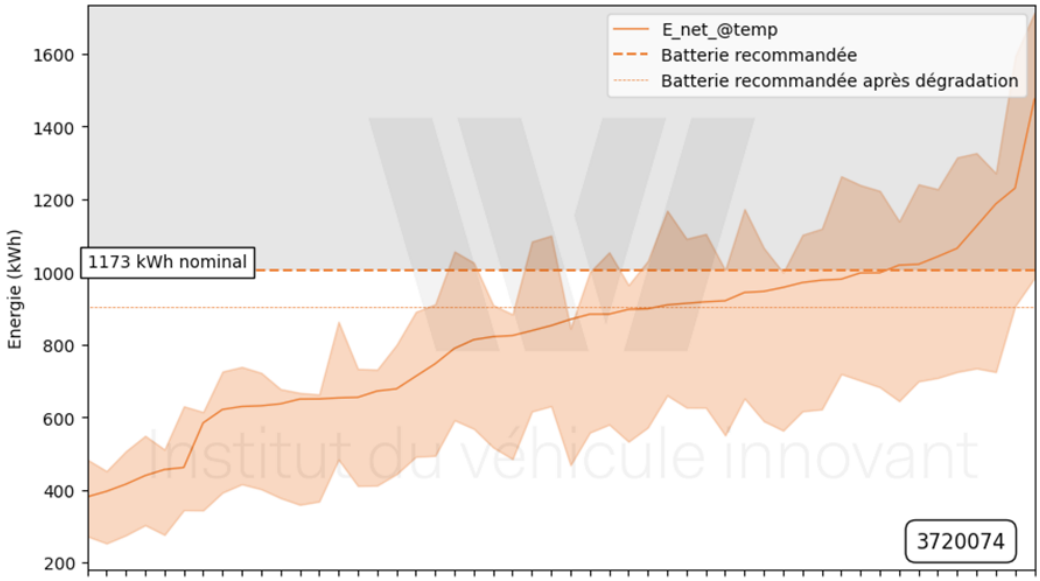
Critère	Valeur	Effet sur le potentiel d'électrification
Distances	Longues	-
Constance	Variées	-
Dénivelé	Faible	+
Recharge en journée	Non	-
Chargement	Lourd	-
Accessoires	Aucun	+

8. Scénario d'électrification pour le camion 3720074

La distance quotidienne, les montées, le chargement et autres mesures présentées dans les sections précédentes ont tous été utilisés pour évaluer une consommation d'énergie électrique quotidienne en kWh. Tous les trajets de chaque journée ont été regroupés pour obtenir un aperçu de l'énergie qui serait requise par période de 24h pour compléter l'entièreté de ces trajets.

Le Graphique 5 montre la distribution de ces énergies pour chaque journée durant la période d'instrumentation. Ces journées ont été réordonnées en ordre croissant de besoin énergétique quotidien. Ceci permet de mieux visualiser à quel point la configuration de batterie recommandée répondra au besoin.

Graphique 5 : Journées de mesure du camion 3720074, en ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh)



Guide d'interprétation du Graphique 5 :

- La courbe orange du graphique ci-dessus montre l'énergie requise simulée pour un camion électrique (en kWh) pour compléter chaque journée du test à la température extérieure réelle.
- L'aire orange montre la différence d'énergie pour une même journée s'il fait chaud (20°C) ou très froid. La valeur plus élevée représente l'énergie lors d'une journée froide (-20°C).
- La zone sous la ligne pointillée horizontale représente les journées où le camion dispose d'assez d'énergie pour compléter tous les trajets de la journée.
- Un camion avec une batterie de capacité nominale de 1173 kWh totaux disposerait de 1003 kWh avec marge de confort lorsque neuf (ligne horizontale pointillée épaisse), cette batterie permettrait au camion 3720074 d'effectuer 90 % de ses journées.
- La zone grise représente les journées impossibles à compléter sans recharger en cours de journée
- La fine ligne horizontale représente l'énergie après une dégradation de 10 %. Elle permet de comparer les journées qu'il sera possible de compléter à long terme.

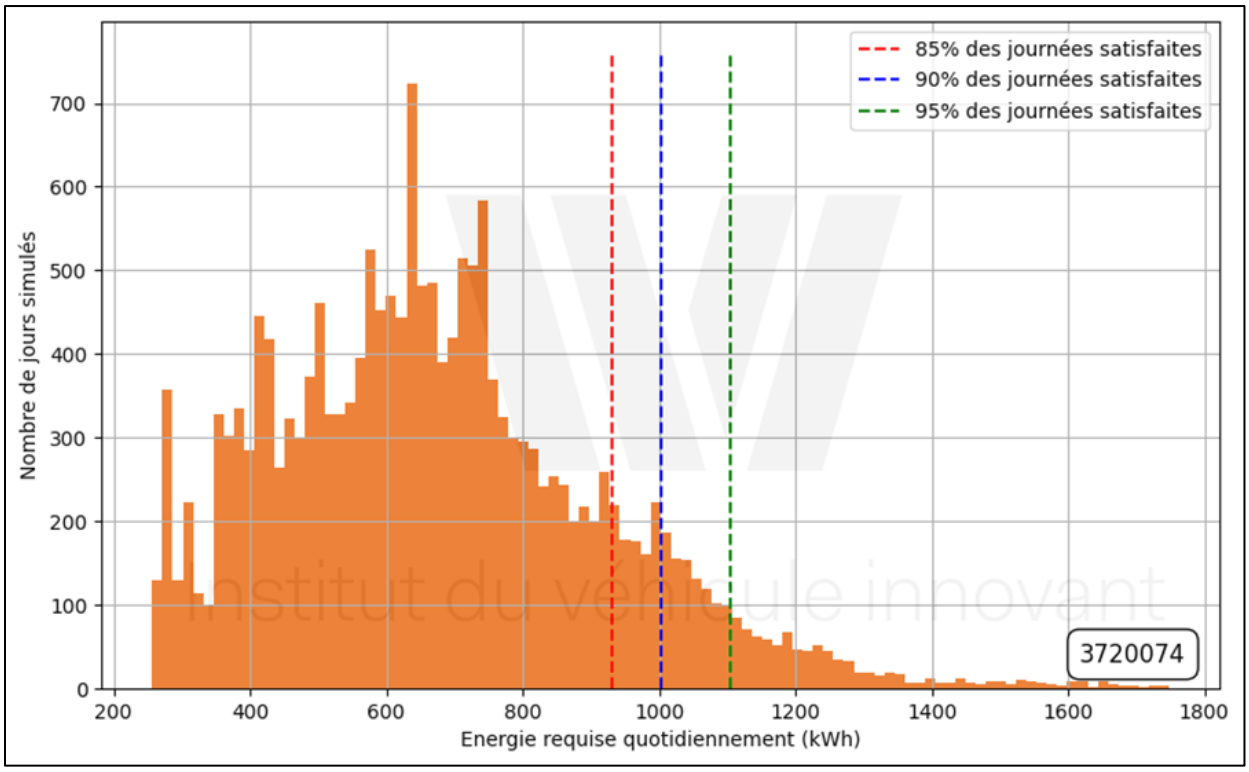
La consommation moyenne du camion à 20°C est estimée à 206 kWh / 100 km. Elle sera plus élevée en hiver, pouvant être jusqu'à 50 % supérieure lors des quelques jours de grands froids.

Comme la période d'acquisition de données s'est déroulée sur une durée de 3 mois, elle ne représente pas la consommation réelle pour toutes les saisons. Les mois d'été auront un besoin en énergie nettement inférieur au mois d'hiver. Une méthode a donc été développée afin d'estimer les besoins énergétiques pour le camion sur une année complète.

L'équipe de l'IVI a utilisé un API qui a identifié les valeurs de température moyenne pour chaque jour sur les 365 jours précédents, et ce selon la station météo la plus proche de l'entrepôt du participant. Ensuite, les données de consommations énergétiques générées pour chaque jour de l'analyse du camion ont été évaluées pour chacune des 365 températures obtenues. Cette méthode considère donc que chaque journée d'une année a des chances égales de se faire attribuer les routes et chargements de chacune des journées de l'échantillon. Les journées d'échantillons aberrantes par leurs besoins énergétiques normalisés à 20°C ont été retirées (plus de détails dans la section Méthodologie : Scénario d'électrification). Par exemple, pour un camion avec 40 jours de données valides, l'IVI a simulé 14 600 données, soit 365 multiplié par 40. Le Graphique 6 illustre la quantité d'énergie requise quotidiennement pour chacune de ces données.

Ensuite, trois lignes verticales indiquent la quantité de kWh nécessaire pour effectuer respectivement 85 %, 90 % et 95 % de ces journées. Ces lignes peuvent servir de guide pour le gestionnaire de flotte. Elles représentent un pourcentage de journées sur une année de travail qu'un camion électrique pourrait accomplir en une seule charge, sans recours à la recharge en cours de journée.

Graphique 6 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 3720074



Camion # 3720074

Freightliner Cascadia - 2020 | Tracteur Classe 8 – PNB 36 363 kg

Pour compléter l'entièreté des trajets d'une journée 90 % du temps sur une année complète, l'IVI estime que la batterie requise devrait avoir une capacité utilisable avec marge de 1003 kWh, ce qui équivaut à une batterie dotée d'une énergie nominale 1173 kWh.

Pour compléter 85 % des journées, la capacité nominale est de 1090 kWh.

Pour compléter 95 % des journées, la capacité nominale est de 1292 kWh.

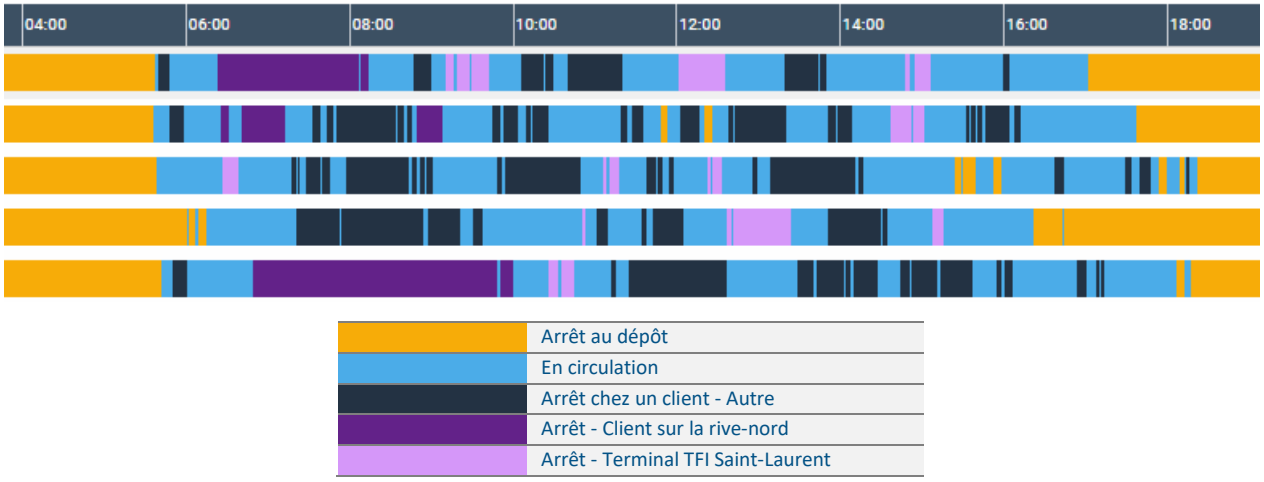
Les configurations de batteries offertes en 2023 pour les camions électriques de classes 8 vont d'environ 250 à 650 kWh. Puisque celle-ci constitue une importante partie du prix du véhicule, il est important de sélectionner la plus petite batterie qui répondra aux besoins énergétiques à long terme. À ce sujet, il est prudent de prévoir une dégradation de la batterie qui pourrait diminuer l'autonomie d'environ 10 % sur la durée d'utilisation du véhicule dans la flotte.

L'analyse des besoins énergétiques a permis de constater que de très nombreux déplacements ne pourront être complétés avec un véhicule électrique dans ce scénario, bien que la taille maximale de batterie offerte ait été sélectionnée.

Toutefois, le scénario montré précédemment ne tient pas compte des opportunités de recharge qui pourraient survenir durant la journée. Les camions étudiés dans le présent document visitent souvent les mêmes clients. Établir une entente avec certains d'entre eux pour y installer une infrastructure de recharge permettrait d'ajouter une quantité d'énergie pour réduire l'autonomie requise de la batterie.

Visualiser ces arrêts est possible avec le graphique suivant, où chaque bande horizontale représente un jour du lundi au vendredi, de bas en haut. L'échelle en haut du graphique représente l'heure de la journée. Les nuits ont été coupées, car il n'y avait aucun déplacement. La semaine du 16 au 20 janvier fut sélectionnée en exemple.

Graphique 7 : Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 3720074



Les zones mauve pâle sont des arrêts au terminal de la compagnie parente de Papineau, TFI à Saint-Laurent. Les zones mauve foncé, pour leur part, sont les arrêts au client le plus fréquemment visité par les trois camions testés.

Les simulations de l'IVI ont déterminé que ces arrêts ne permettraient malheureusement pas d'augmenter significativement le nombre de journées qu'il serait possible de compléter en camion électrique. Cette idée est toutefois à garder en tête, car elle pourrait permettre d'entamer l'électrification de cette route plus rapidement en tenant compte de l'augmentation de la capacité des batteries dans le futur.

Bien qu'une batterie suffisante ne soit pas disponible pour l'instant, le Graphique 5 permet quand même de mesurer l'énergie qui serait nécessaire pour électrifier la route du camion 3720074. En visant les besoins de 90 % des journées durant toute l'année, la capacité nominale nécessaire serait d'environ 1173 kWh, pour une énergie utilisée de 1003 kWh. Ceci ne considère pas l'option de recharger durant la journée chez un client.

Le Graphique 3 montre que le camion dispose presque toujours de plus de 8 heures par nuit. Pour remettre 1003 kWh d'énergie dans sa batterie en 10 heures, l'infrastructure de recharge installée devrait être en mesure de fournir une puissance effective moyenne de 100 kW. Il serait donc sage d'installer une borne d'une puissance légèrement supérieure, 120 kW par exemple. Les paramètres retenus pour un scénario d'électrification hypothétique du camion 3720074 seraient donc les suivants :

Tableau 5 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 3720074

Capacité nominale requise pour satisfaire 90% des journées	1173 kWh
Puissance de la borne de recharge	BRCC 120 kW
Batterie recommandée disponible sur le marché ?	Non

Les bénéfices financiers ne peuvent pas être calculés, puisqu'un camion disposant d'une batterie suffisante n'est pas actuellement disponible sur le marché. Seul un surcoût acceptable à l'achat peut être approximé, mais ceci ne tiendra pas compte de possibles augmentations de prix d'ici à ce qu'un tel camion devienne disponible. Il faut aussi tenir compte du fait que Papineau International conserve ses camions 5 ans. Ceux-ci doivent donc être rentabilisés bien avant ce moment. Le coût du diesel considéré est 2,00 $/L et le coût de l'électricité est fixé à 0,16 $/kWh.

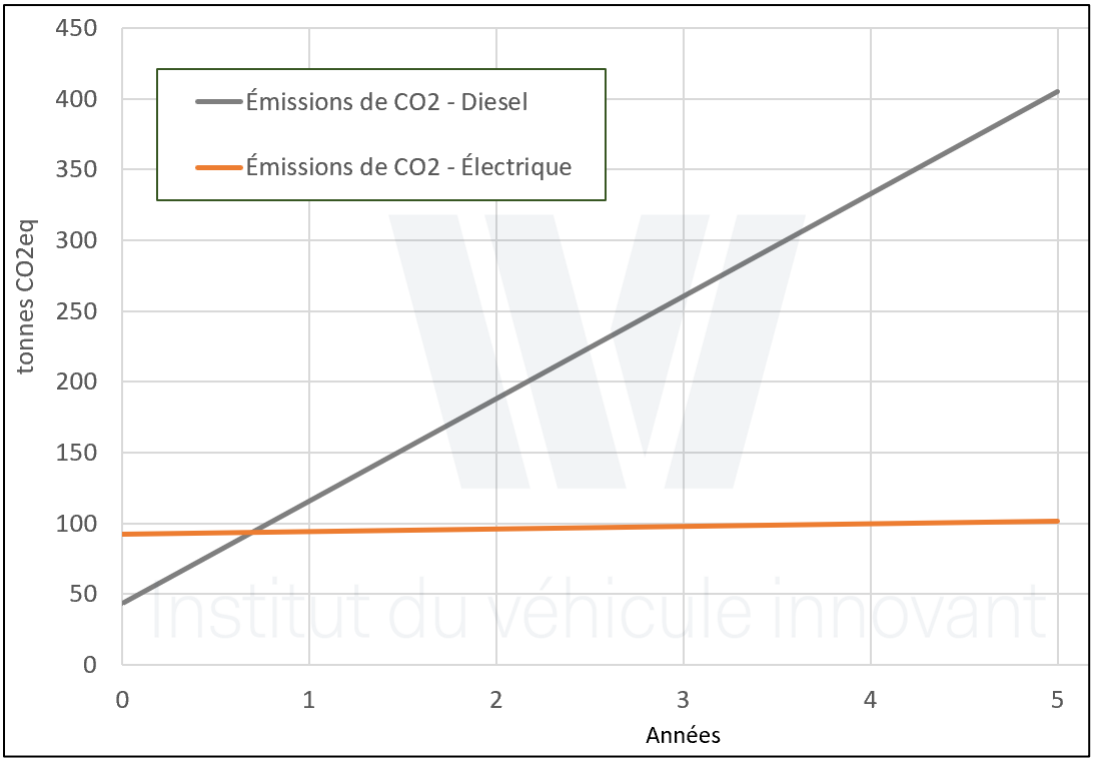
Tableau 6 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 3720074

Coût annuel de carburant avant électrification	44 362 $
Coût annuel d'électricité	17 630 $
Économie annuelle de coûts d'énergie	26 732 $
Économie potentielle après 5 ans	**133 660 $**

Un camion électrique devrait donc avoir un surcoût à l'achat inférieur à 130 000 $ incluant l'infrastructure de recharge et son installation. Le marché actuel est loin de s'approcher de ces paramètres.

À l'inverse de l'analyse économique, le bénéfice environnemental de l'électrification de cette route serait non négligeable. Le point d'équivalence des émissions de GES arriverait après environ 8 mois d'utilisation ou 36 180 km. Après 5 ans, ce véhicule aurait évité l'émission de 303 tonnes de CO2. Ces valeurs viennent des analyses indépendantes de l'IVI, basées sur des études de *l'International Council on Clean Transportation* (ICCT) et tiennent compte des émissions de GES de la production d'électricité par barrages hydro-électriques.

Graphique 8 : Émissions sur la vie du camion 3720074, Diesel vs. Électrique



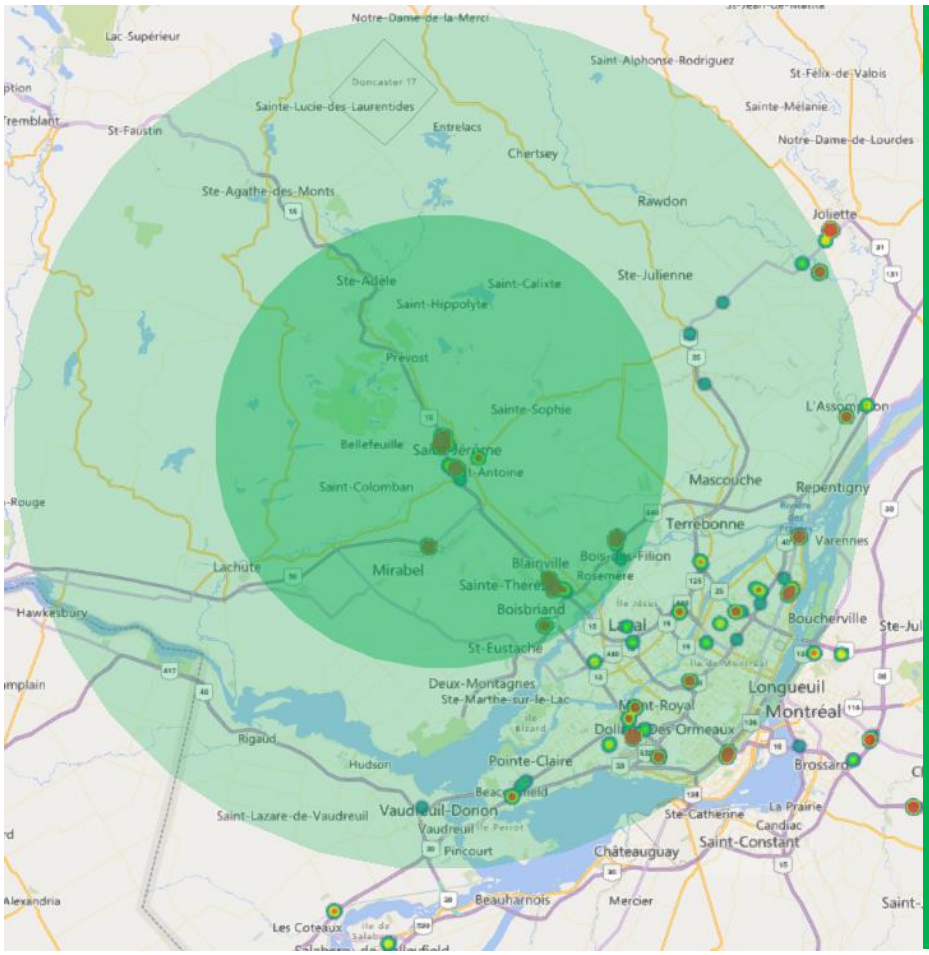
Le camion 3720074 ne représente pas une opportunité d'électrification pour le moment compte tenu de l'avancement du marché. Une forte augmentation de l'énergie embarquée sera nécessaire, ainsi qu'une diminution marquée des prix.

L'entreprise Papineau International pourrait aussi considérer garder ses camions électriques plus longtemps, considérant que l'entretien devrait être moins onéreux pour ces véhicules. Ceci aiderait à rentabiliser un tel investissement.

9. Analyse du camion 3720079

La distribution des arrêts, des clients et les marchandises transportées par le camion 3720079 sont très similaires au camion présenté précédemment, le 3720074. Le véhicule fait principalement des échanges de remorques avec des chargements variés, mais plus fréquemment à pleine capacité.

La carte suivante permet de visualiser la fréquence des arrêts à différents endroits. Plus les points sont gros et rouges, plus les arrêts du camion y sont fréquents :



Tout comme le camion 3720074, ce véhicule débute souvent sa route en quittant Saint-Jérôme pour se rendre à Montréal ou sur la rive-nord ou la rive-sud, donc à plus de 25 kilomètres.

Les points visités montrés sur cette carte sont extrêmement similaires à ceux sur la carte du camion précédent.

Le camion revient très rarement au terminal de Papineau International durant la journée. Il ne pourrait donc pas bénéficier de recharge entre ses livraisons.

Figure 4 : Fréquence des livraisons du camion 3720079 dans un rayon de 25 et 50 km de Papineau International

Dénivelé faible

2,2 m/km

Puisqu'il descend immédiatement jusqu'à l'île de Montréal et Laval, le camion 3720079 circule en majeure partie dans des endroits assez plats. Malgré ceci, il y a quand même 2,2 mètre de dénivelé positif par kilomètre à gravir.

Ce dénivelé est plus important que le camion 3720074. Certes, ses routes sont un peu différentes, mais aucune raison particulière n'explique ceci. À masse égale, une énergie supérieure serait requise pour parcourir la même distance, mais très peu.

Camion # 3720079

Freightliner Cascadia - 2020 | Tracteur Classe 8 – PNB 36 363 kg

Le détail des distances parcourues chaque jour de l'analyse est présenté dans les trois sections du tableau suivant. En haut se trouvent les distances principales de l'analyse et en bas, un calendrier des distances. Le dégradé des teintes permet de visualiser l'intensité des déplacements de chaque jour de plus de 20 km. Le graphique du milieu montre les moyennes de déplacement pour chaque journée de la semaine.

Tableau 7 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 3720079

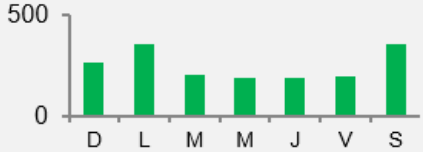
Ici, une grande variation peut être observée par le calendrier. Plus une case est foncée, plus la distance parcourue lors de cette journée est élevée.

Celui-ci semble rapporter deux histoires différentes. D'abord, il arrive souvent que le véhicule ne soit pas utilisé la semaine. Lorsque c'est le cas, il parcourt principalement des distances assez courtes. La plus longue journée de cette opération plus fréquente est 374 kilomètres.

À cinq reprises durant la période de collecte de données, il s'est rendu à La Tuque (non montré sur la carte de la Figure 4) pour faire une livraison. Ce sont les 5 journées aux cases foncées qui dépassent 600 km. La plupart de ces journées où le camion s'est rendu à La Tuque sont durant la fin de semaine ou un jour férié. Selon le gestionnaire de flotte, ce camion pourrait être amené à se rendre beaucoup plus fréquemment chez ce client à d'autres moments.

Si tel est le cas, la moyenne et le 90e percentile seraient significativement plus hauts.

Max	752	km
90%	374	km
Med	206	km
Moy	242	km
σ	176	km
CV	73%	



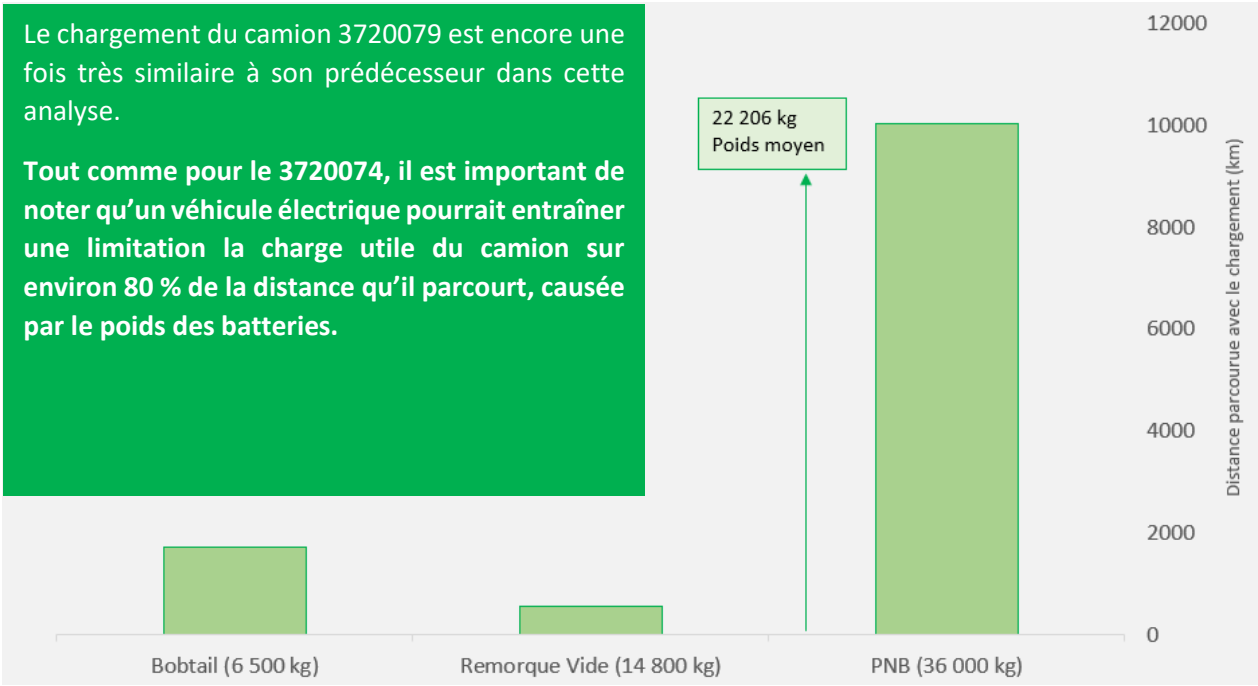
	D	L	M	M	J	V	S
déc.	-	-	-	-	33	232	197
	323	-	-	8	11	-	-
	-	-	22	-	249	135	-
	-	331	216	362	-	150	-
janv.	-	647	222	374	220	183	718
	-	198	649	203	169	190	103
	325	249	162	-	222	206	752
	152	-	-	-	316	193	702
	299	-	110	-	220	221	152
févr.	189	-	43	22	226	152	49
	-	-	-	-	175	-	-
	-	-	-	-	212	341	202
	322	-	-	-	-	-	-
mars	-	-	-	-	-	-	-

L'énergie requise pour les accélérations et montées varie fortement avec la masse totale du véhicule, incluant son chargement. Pour réaliser l'étude de sa consommation énergétique, le poids de la cargaison transportée a été noté pour chaque trajet. Le graphique suivant résume le chargement typiquement transporté.

Graphique 9 : Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 3720079

Le chargement du camion 3720079 est encore une fois très similaire à son prédécesseur dans cette analyse.

Tout comme pour le 3720074, il est important de noter qu'un véhicule électrique pourrait entraîner une limitation la charge utile du camion sur environ 80 % de la distance qu'il parcourt, causée par le poids des batteries.



En résumé, l'analyse des déplacements du camion 3720079 permet de déterminer les grandes lignes qui affecteront son potentiel d'électrification des façons suivantes :

Tableau 8 : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 3720079

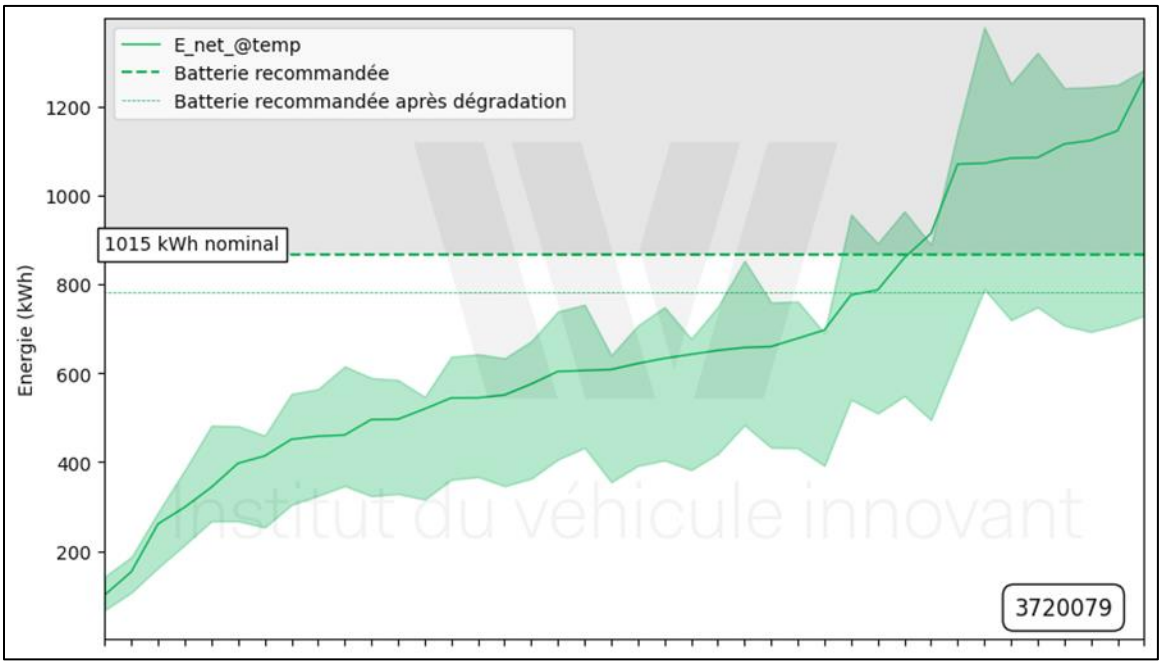
Critère	Valeur	Effet sur le potentiel d'électrification
Distances	Longues	-
Constance	Variées	-
Dénivelé	Faible	+
Recharge en journée	Non	-
Chargement	Lourd	-
Accessoires	Aucun	+

10. Scénario d'électrification pour le camion 3720079

La distance quotidienne, les montées, le chargement et autres mesures présentées dans la section précédente ont tous été utilisés pour évaluer une consommation d'énergie électrique quotidienne en kWh. Tous les trajets de chaque journée ont été regroupés pour obtenir un aperçu de l'énergie qui serait requise par période de 24h pour compléter l'entièreté de ces trajets.

Le Graphique 10 montre la distribution de ces énergies pour chaque journée de la période d'instrumentation. Ces journées ont été réordonnées en ordre croissant de besoin énergétique quotidien. Ceci permet de mieux visualiser à quel point la configuration de batterie répondra au besoin.

Graphique 10 Journées de mesure du camion 3720079, en ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh)



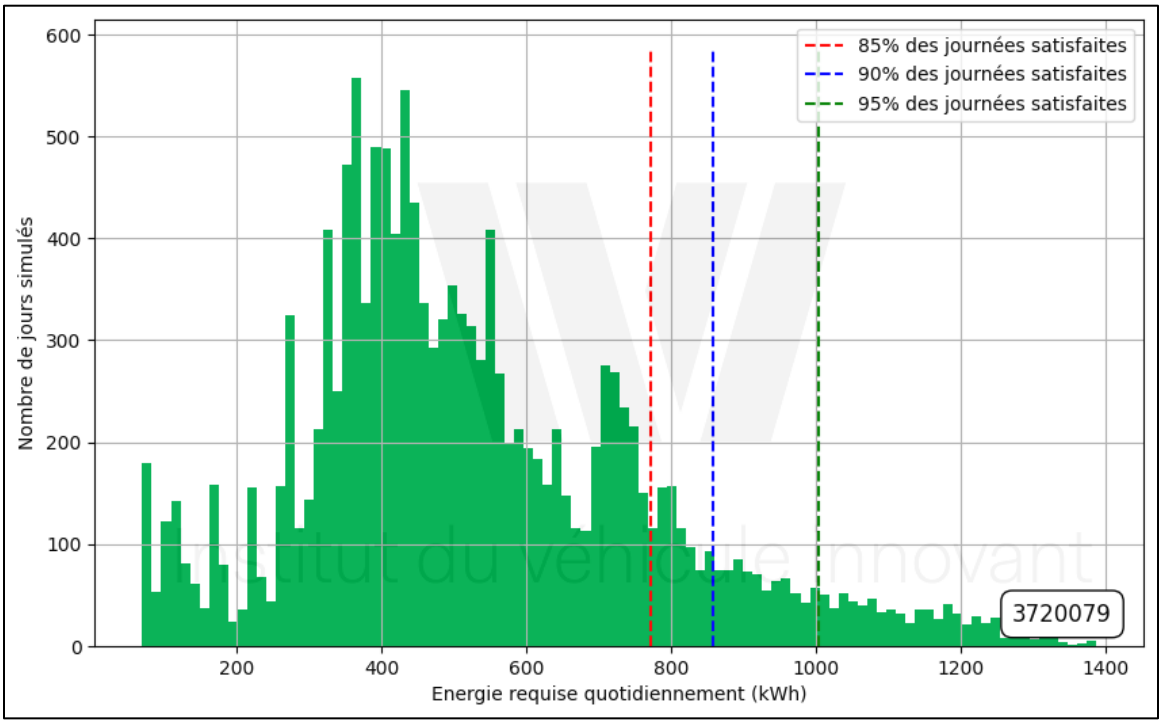
Guide d'interprétation du Graphique 10 :

- La courbe verte du graphique ci-dessus montre l'énergie requise simulée pour un camion électrique (en kWh) pour compléter chaque journée du test à la température extérieure réelle.
- L'aire verte montre la différence d'énergie pour une même journée s'il fait chaud (20°C) ou très froid. La valeur plus élevée représente l'énergie lors d'une journée froide (-20°C).
- La zone sous la ligne pointillée horizontale représente les journées où le camion dispose d'assez d'énergie pour compléter tous les trajets de la journée.
- Un camion avec une batterie de capacité nominale de 1015 kWh disposerait de 868 kWh avec marge de confort lorsque neuf (ligne horizontale pointillée épaisse), cette batterie permettrait au camion 3720079 d'effectuer 90 % de ses journées.
- La zone grise représente les journées impossibles à compléter sans recharger
- La fine ligne horizontale représente l'énergie après une dégradation de 10 %. Elle permet de comparer les journées qu'il sera possible de compléter à long terme.

La consommation moyenne du camion à 20°C est estimée à 206 kWh / 100 km. Elle sera plus élevée en hiver, pouvant être jusqu'à 50 % supérieure lors des quelques jours de grands froids.

Le Graphique 11. représente les tailles de batteries recommandées pour accomplir 85%, 90% ou 95% des journées d'une année, sans que le camion électrique n'ait recours à la recharge en cours de journée. Pour obtenir ce graphique, l'IVI a considéré que toutes les journées de l'année ont des chances égales de se faire attribuer les routes de l'une ou l'autre des journées valides de l'échantillon récolté. L'IVI a développé une méthode pour propager sur une année les données récoltées en trois mois. Cette méthode est expliquée en détail au-dessus du Graphique 6.

Graphique 11 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 3720079



Une batterie de 1015 kWh nominaux permettrait alors de réaliser 90 % des journées sur une année moyenne en un seul cycle de décharge de la batterie, tandis qu'une batterie de 914 et de 1190 kWh pourrait respectivement satisfaire 85 et 95 % des journées sur une année moyenne.

Les configurations de batteries offertes pour les tracteurs électriques de classe 8 vont d'environ 250 à 650 kWh. Puisque celle-ci constitue une importante partie du prix du véhicule, il est important de sélectionner la plus petite batterie qui répondra aux besoins énergétiques à long terme. À ce sujet, il est prudent de prévoir une dégradation de la batterie qui pourrait diminuer l'autonomie d'environ 10% sur la durée d'utilisation du véhicule.

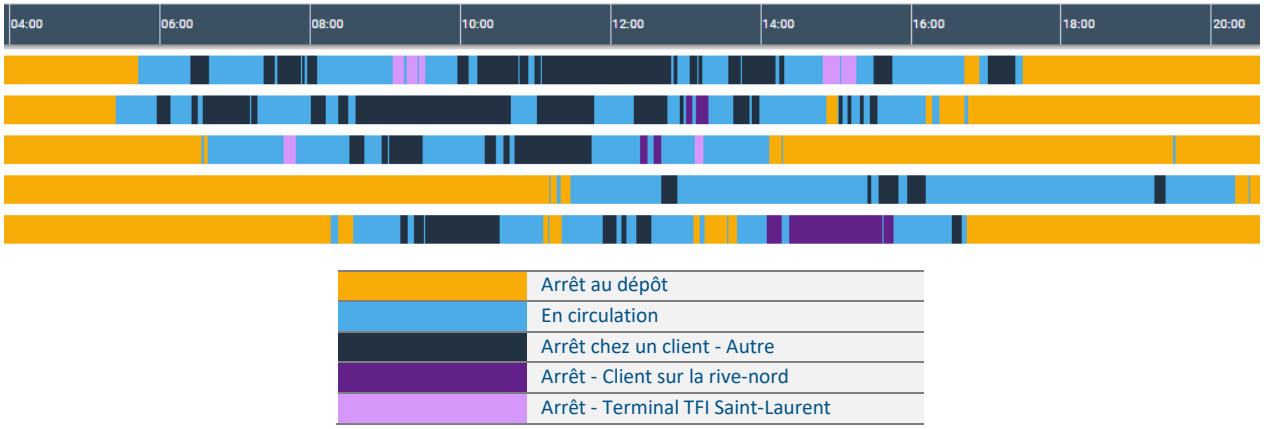
L'analyse des besoins énergétiques a permis de constater que tous les déplacements ne pourront être complétés avec un véhicule électrique dans ce scénario, bien que la taille maximale de batterie offerte ait été sélectionnée. Sur une année complète, 64 % des déplacements pourraient être réalisés par un camion électrique muni de la plus grosse batterie disponible sur le marché au moment d'écrire ce rapport.

Camion # 3720079

Freightliner Cascadia - 2020 | Tracteur Classe 8 – PNB 36 363 kg

Comme proposé précédemment pour le camion 3720074, proposer une entente avec les deux principaux lieux de livraison permettrait d'augmenter ce taux de réussite, mais seulement marginalement. Le graphique à bandes ci-dessous illustre les moments arrêtés au terminal de Papineau International, en route et arrêté chez des clients durant la semaine du 9 au 13 janvier 2023. On y observe que le véhicule a un horaire assez irrégulier et chargé. Malgré ceci, le total du temps passé au dépôt est assez régulier.

Graphique 12 : Moments des déplacements et arrêts du camion 3720079



Le Graphique 3 montre que le camion dispose presque toujours de plus de 8 heures par nuit. Pour remettre 868 kWh d'énergie dans sa batterie en 10 heures, l'infrastructure de recharge installée devrait être en mesure de fournir une puissance effective moyenne de 87 kW. Il serait donc sage d'installer une borne d'une puissance supérieure, 120 kW, par exemple. Les paramètres retenus pour un scénario d'électrification hypothétique du camion 3720079 seraient donc les suivants :

Tableau 9 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 3720079

Capacité nominale requise pour satisfaire 90% des journées	1015 kWh
Puissance de la borne de recharge	BRCC 120 kW
Batterie recommandée disponible sur le marché ?	Non

Les bénéfices financiers ne peuvent pas être calculés, puisqu'un camion disposant d'une batterie suffisante n'est pas actuellement disponible sur le marché. Seul un surcoût acceptable à l'achat peut être approximé, mais ceci ne tiendra pas compte de possibles augmentations de prix d'ici à ce qu'un tel camion devienne disponible. Il faut aussi tenir compte du fait que Papineau International conserve ses camions 5 ans. Ceux-ci doivent donc être rentabilisés bien avant ce moment. Le coût du diesel considéré est 2,00 $/L et le coût de l'électricité est fixé à 0,16 $/kWh.

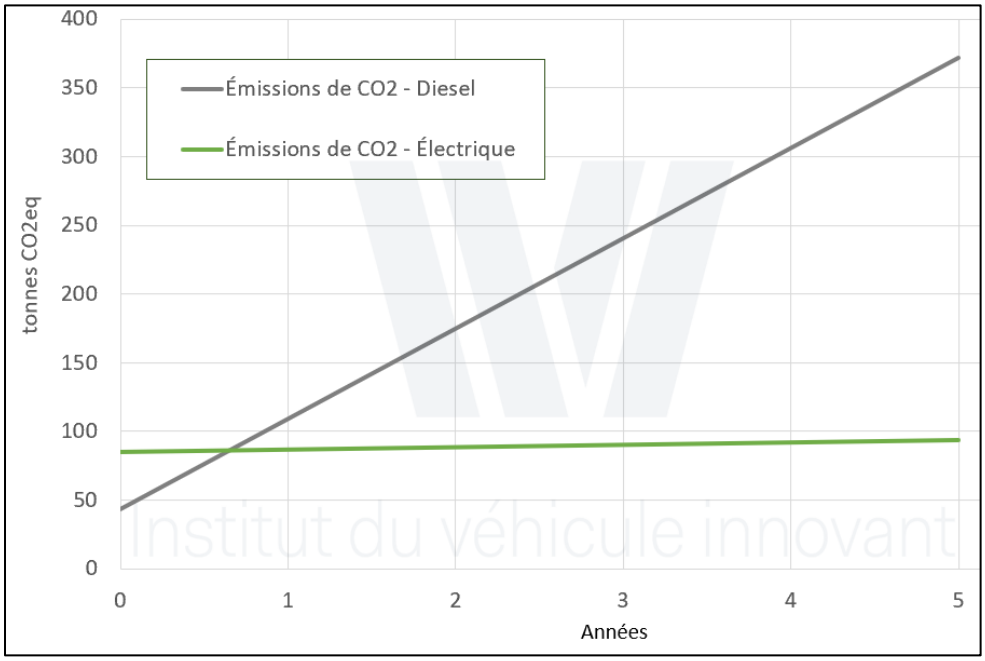
Tableau 10 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 3720079

Coût annuel de carburant avant électrification	40 277 $
Coût annuel d'électricité	16 697 $
Économie annuelle de coûts d'énergie	23 580 $
Économie potentielle après 5 ans	**117 900 $**

Un camion électrique devrait donc avoir un surcoût à l'achat inférieur à 117 900 $ incluant l'infrastructure de recharge et son installation, après l'application des incitatifs gouvernementaux. Le marché actuel est loin de s'approcher de ces paramètres.

À l'inverse de l'analyse économique, le bénéfice environnemental de l'électrification de cette route serait non négligeable. Le point d'équivalence des émissions de GES arriverait après environ 8 mois d'utilisation ou 32 842 km. Après 5 ans, ce véhicule aurait évité l'émission de 277 tonnes de CO2.

Graphique 13 : Émissions sur la vie du camion 3720079, Diesel vs. Électrique



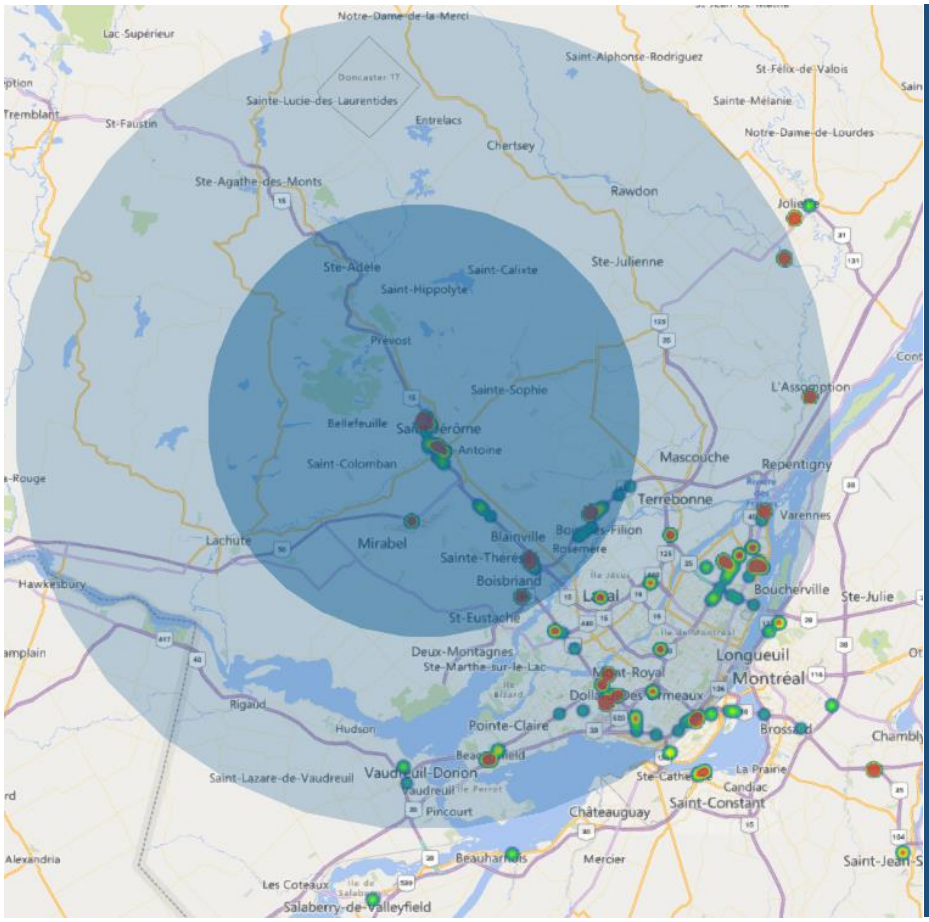
Le camion 3720079 ne représente pas une opportunité d'électrification pour le moment compte tenu de l'avancement du marché. Une forte augmentation de l'énergie embarquée sera nécessaire, ainsi qu'une diminution marquée des prix.

L'entreprise Papineau International pourrait aussi considérer garder ses camions électriques plus longtemps, considérant que l'entretien devrait être moins onéreux pour ces véhicules. Ceci aiderait à rentabiliser un tel investissement.

11. Analyse du camion 3722053

Encore une fois, les activités du camion 3722053 sont semblables aux deux camions précédents. Les clients sont similaires et donc plusieurs lieux de livraisons aussi. Ce camion est plus récent que les deux précédents et sa consommation est significativement plus basse. Cela pourrait expliquer qu'il semble être plus utilisé.

La carte suivante permet de visualiser la fréquence des arrêts à différents endroits. Plus les points sont gros et rouges, plus les arrêts du camion y sont fréquents :

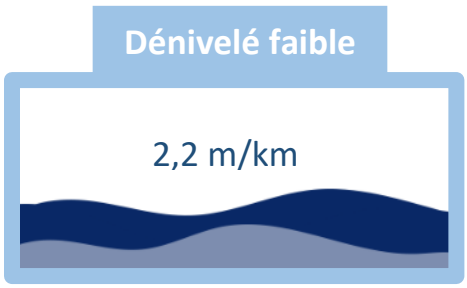


Le camion 3722053 part de Saint-Jérôme pour se rendre en lisière du rayon de 25 km, ou assez fréquemment plus près de 50 km du dépôt.

En comparant avec les cartes des deux autres camions présentés dans ce rapport, on voit qu'il y a une plus grande variété d'arrêts.

Ce véhicule ne revient que très rarement et peu longtemps au terminal de Papineau International durant la journée. Il arrive aussi qu'il ne revienne pas du tout et qu'il passe la nuit à un autre terminal.

Figure 5 : Fréquence des livraisons du camion 3722053 dans un rayon de 25 et 50 km de Papineau International



Le camion 3722053 circule principalement dans la vallée du Saint-Laurent, en Montérégie et en Ontario, qui sont des zones plutôt plates. Ceci amène le camion à gravir en moyenne 2,2 mètres de dénivelé positif par kilomètre.

L'énergie requise pour accomplir ceci peut être considérée comme étant dans la moyenne attendue. Aucun calcul ou précaution spéciale n'est à prendre.

Camion # 3722053

Freightliner Cascadia - 2022 | Tracteur Classe 8 – PNB 36 363 kg

Le no est présenté dans les trois sections du tableau suivant. En haut se trouvent les distances principales de l'analyse et en bas, un calendrier des distances. Le dégradé des teintes permet de visualiser l'intensité des déplacements de chaque jour de plus de 20 km. Le graphique du milieu montre les moyennes de déplacement pour chaque journée de la semaine.

Tableau 11 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 3722053

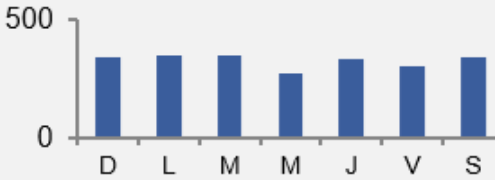
Le camion 3722053 est utilisé très intensément, probablement parce qu'il est plus récent et dispose de technologies plus récentes ayant pour effet de réduire la consommation de diesel.

Celui-ci roule tous les jours de la semaine, et plusieurs jours durant les fins de semaine. De plus, ses journées sont relativement longues, avec une moyenne de 322 kilomètres par jour. Cette moyenne est la plus élevée chez Papineau International.

Les très longs voyages, contrairement au camion 3720079, ne sont pas tous la fin de semaine ni vers La Tuque, mais assez variés, ce qui exclut l'hypothèse du remplacement et la possibilité d'ignorer ces journées dans l'analyse.

Les journées du 31 janvier et 1er février constitue une autre exception. Le camion a terminé sa première journée dans une halte routière près de Kingston en Ontario, sans possibilité de recharge durant toute la nuit. Il faudrait donc considérer que le camion aurait dû être en mesure de parcourir 1076 kilomètres avant de se recharger, dans ce cas.

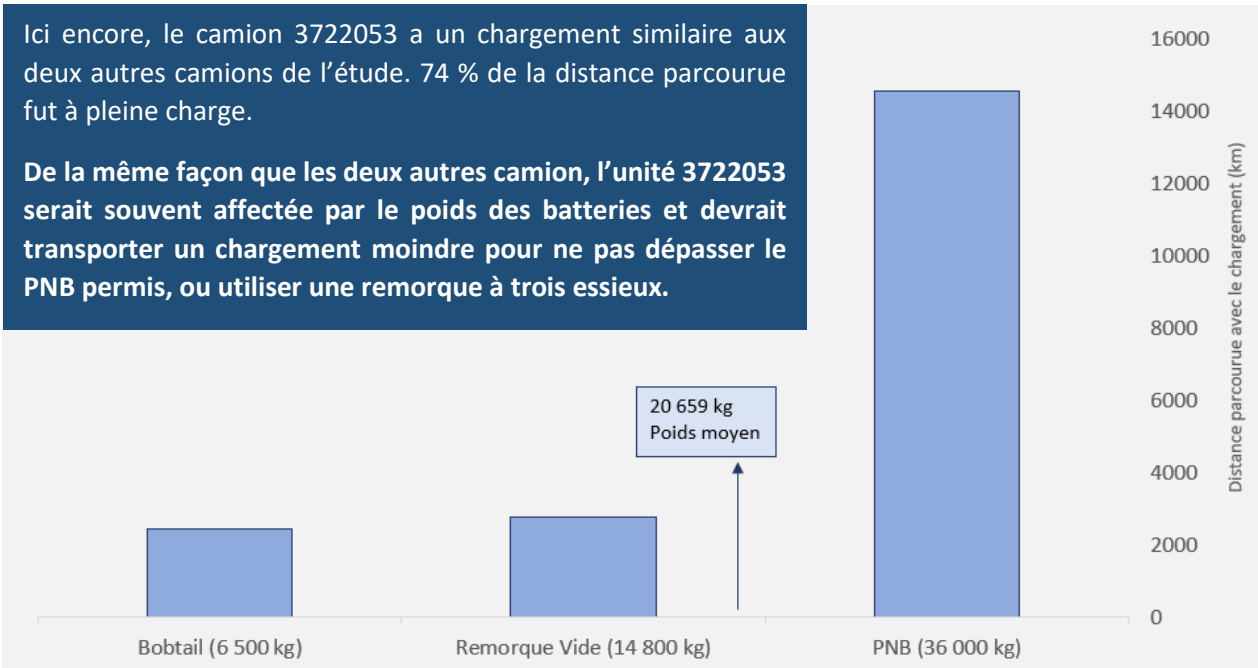
Max	753	km
90%	510	km
Med	288	km
Moy	322	km
σ	142	km
CV	44%	



	D	L	M	M	J	V	S
déc.	-	-	-	-	-	-	-
	-	429	397	227	444	292	281
	-	-	237	274	359	-	-
	-	-	-	151	341	301	-
janv.	-	390	337	251	129	308	-
	651	262	275	398	417	203	155
	-	283	536	384	314	338	-
	-	362	311	180	315	326	-
	144	487	605	471	261	645	753
févr.	-	513	224	235	255	178	173
	-	157	424	199	231	266	-
	-	226	311	235	699	148	-
	216	-	193	261	217	369	-
mars	-	-	-	-	-	-	-

L'énergie requise pour les accélérations et montées varie fortement avec la masse totale du véhicule, incluant son chargement. Pour réaliser l'étude de sa consommation énergétique, le poids de la cargaison transportée a été noté pour chaque trajet. Le graphique suivant résume le chargement typiquement transporté.

Graphique 14 : Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 3722053



En résumé, l'analyse des déplacements du camion 3722053 permet de déterminer les grandes lignes qui affecteront son potentiel d'électrification des façons suivantes :

Tableau 12 : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 3722053

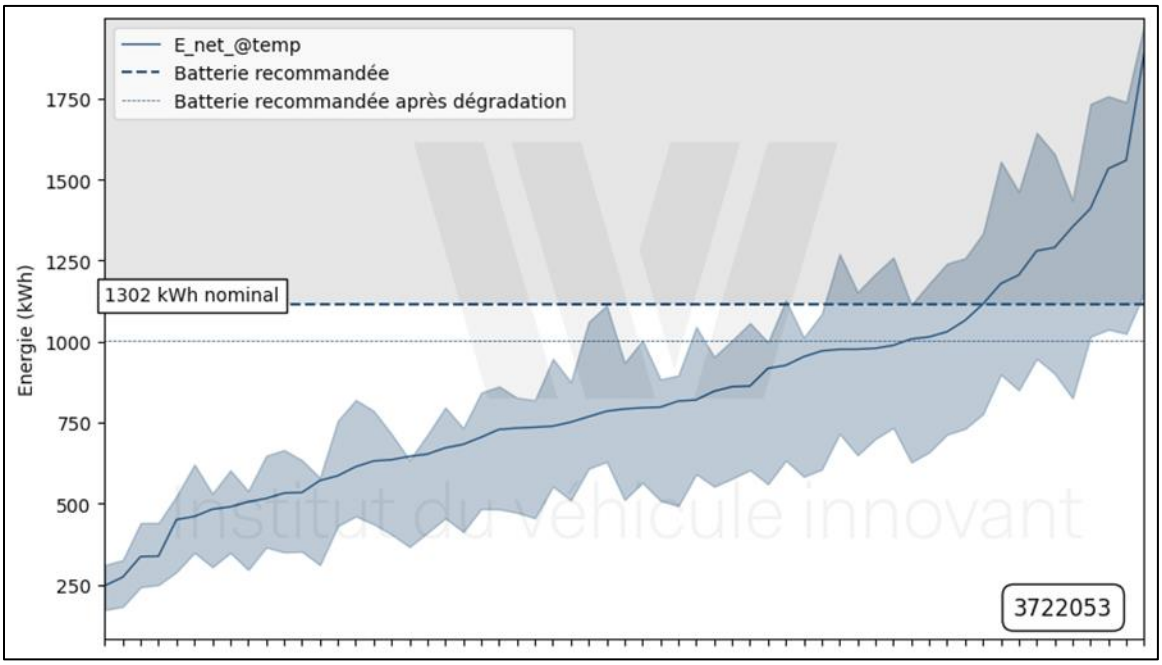
Critère	Valeur	Effet sur le potentiel d'électrification
Distances	Longues	-
Constance	Variées	-
Dénivelé	Faible	+
Recharge en journée	Non	-
Chargement	Lourd	-
Accessoires	Aucun	+

12. Scénario d'électrification pour le camion 3722053

La distance quotidienne, les montées, le chargement et autres mesures présentées dans la section précédente ont tous été utilisés pour évaluer une consommation d'énergie électrique quotidienne en kWh. Tous les trajets de chaque journée ont été regroupés pour obtenir un aperçu de l'énergie qui serait requise par période de 24h pour compléter l'entièreté de ces trajets.

Le Graphique 15 montre la distribution de ces énergies pour chaque journée de l'analyse. Ces journées ont été réordonnées en ordre croissant de besoin énergétique quotidien. Ceci permet de mieux visualiser à quel point la configuration de batterie répondra au besoin.

Graphique 15 : Journées de mesure du camion 3722053, en ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh)



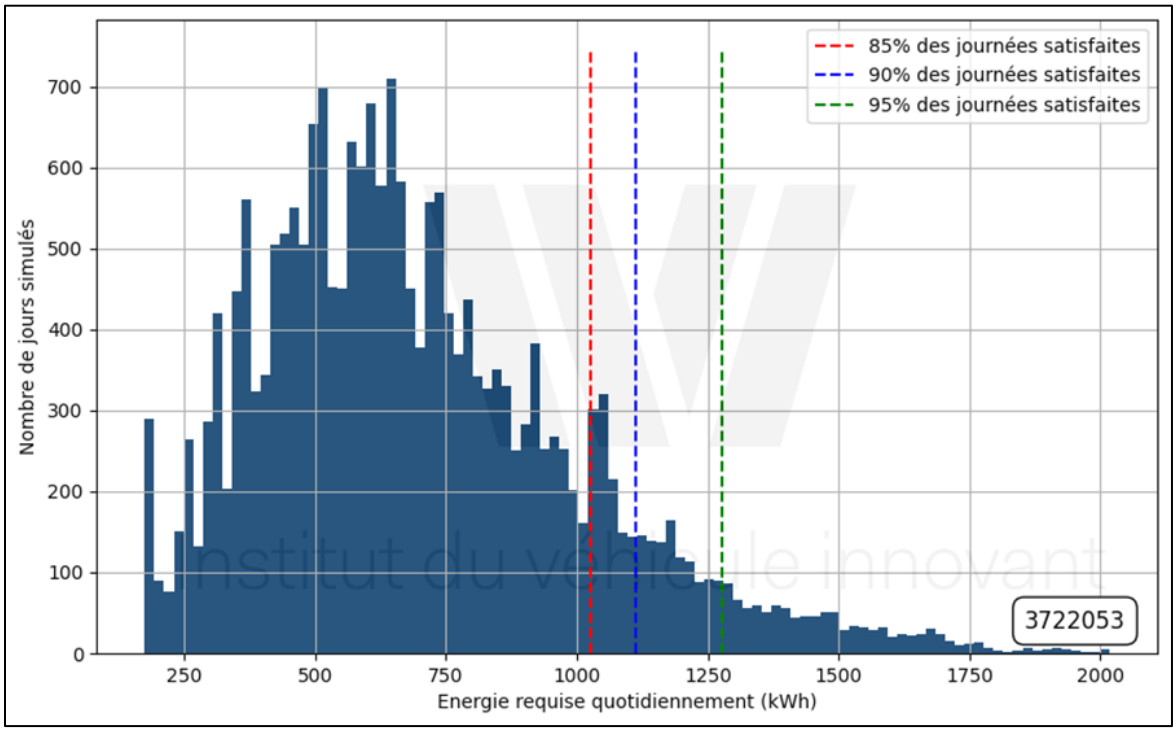
Guide d'interprétation du Graphique 15:

- La courbe bleue du graphique ci-dessus montre l'énergie requise simulée pour un camion électrique (en kWh) pour compléter chaque journée du test à la température extérieure réelle.
- L'aire bleue montre la différence d'énergie pour une même journée s'il fait chaud (20°C) ou très froid. La valeur plus élevée représente l'énergie lors d'une journée froide (-20°C).
- La zone sous la ligne pointillée horizontale représente les journées où le camion dispose d'assez d'énergie pour compléter tous les trajets de la journée.
- Un camion avec une batterie de capacité nominale de 1302 kWh disposerait de 1113 kWh avec marge de confort lorsque neuf (ligne horizontale pointillée épaisse), cette batterie permettrait au camion 3722053 d'effectuer 90 % de ses journées.
- La zone grise représente les journées impossibles à compléter sans recharger
- La fine ligne horizontale représente l'énergie après une dégradation de 10 %. Elle permet de comparer les journées qu'il sera possible de compléter à long terme.

La consommation moyenne du camion à 20°C est estimée à 199 kWh / 100 km. Elle sera plus élevée en hiver, pouvant être jusqu'à 50 % supérieure lors des quelques jours de grands froids.

Le Graphique 16 représente les tailles de batteries recommandées pour accomplir 85%, 90% ou 95% des journées d'une année, sans que le camion électrique n'ait recours à la recharge en cours de journée. Pour obtenir ce graphique, l'IVI a considéré que toutes les journées de l'année ont des chances égales de se faire attribuer les routes de l'une ou l'autre des journées valides de l'échantillon récolté. L'IVI a développé une méthode pour propager sur une année les données récoltées en trois mois. Cette méthode est expliquée en détail au-dessus du Graphique 6.

Graphique 16 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 3722053



Une batterie de 1302 kWh nominale permettrait alors de réaliser 90 % des journées sur une année moyenne en un seul cycle de décharge de la batterie, tandis qu'une batterie de 1200 et de 1493 kWh pourrait respectivement satisfaire 85 et 95 % des journées sur une année moyenne.

Le camion 3722053 parcourt assez souvent des distances similaires et longues. Il est fréquemment utilisé la fin de semaine aussi. Malgré ses longues journées, quelques journées encore plus longues ressortent du lot comme étant encore plus longues.

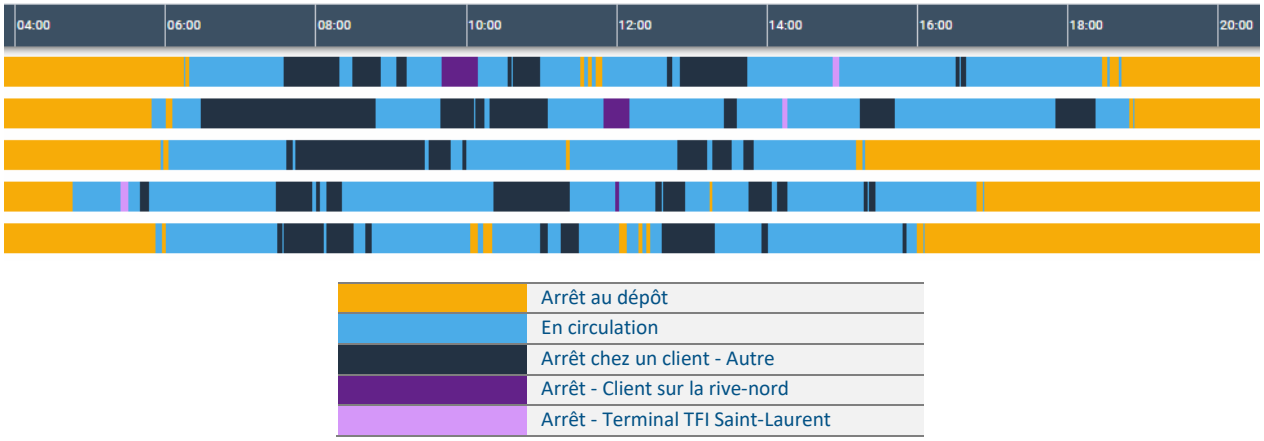
Les configurations de batteries offertes pour les tracteurs électriques de classe 8 vont d'environ 250 à 650 kWh. Puisque celle-ci constitue une importante partie du prix du véhicule, il est important de sélectionner la plus petite batterie qui répondra aux besoins énergétiques à long terme. À ce sujet, il est prudent de prévoir une dégradation de la batterie qui pourrait diminuer l'autonomie d'environ 10% sur la durée d'utilisation du véhicule.

L'analyse des besoins énergétiques a permis de constater que tous les déplacements ne pourront être complétés avec un véhicule électrique dans ce scénario, bien que la taille maximale de batterie offerte ait

été sélectionnée. Sur une année complète, 50 % des déplacements pourraient être réalisés par un camion électrique muni de la plus grosse batterie disponible sur le marché au moment d'écrire ce rapport.

Comme proposé pour les deux autres camions, proposer une entente avec les deux principaux lieux de livraison permettrait d'augmenter ce taux de réussite, mais très peu. Le graphique à bandes ci-dessous illustre les moments arrêtés au terminal de Papineau International, en route et arrêté chez des clients durant la semaine du 9 au 13 janvier 2023. On y observe que le véhicule a un horaire assez irrégulier et chargé. Les temps d'arrêt aux terminaux et chez les deux clients principaux sont très courts, probablement trop courts pour ajouter une quantité d'énergie significative.

Graphique 17 : Moments des déplacements et arrêts du camion 3722053



Le Graphique 3 montre que le camion dispose presque toujours de plus de 8 heures par nuit. Pour remettre 1113 kWh d'énergie dans sa batterie en 8 heures, l'infrastructure de recharge installée devrait être en mesure de fournir une puissance effective moyenne de 135 kW. Il serait donc sage d'installer une borne d'une puissance supérieure, 150 kW par exemple. Les paramètres retenus pour un scénario d'électrification hypothétique du camion 3722053 seraient donc les suivants :

Tableau 13 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 3722053

Capacité nominale requise pour satisfaire 90% des journées	1302 kWh
Puissance de la borne de recharge	BRCC 150 kW
Batterie recommandée disponible sur le marché ?	Non

Les bénéfices financiers ne peuvent pas être calculés, puisqu'un camion disposant d'une batterie suffisante n'est pas actuellement disponible sur le marché. Seul un surcoût acceptable à l'achat peut être approximé, mais ceci ne tiendra pas compte de possibles augmentations de prix d'ici à ce qu'un tel camion devienne disponible. Il faut aussi tenir compte du fait que Papineau International conserve ses leurs camions 5 ans. Ceux-ci doivent donc être rentabilisés bien avant ce moment. Le coût du diesel considéré est 2,00 $/L et le coût de l'électricité est fixé à 0,16 $/kWh.

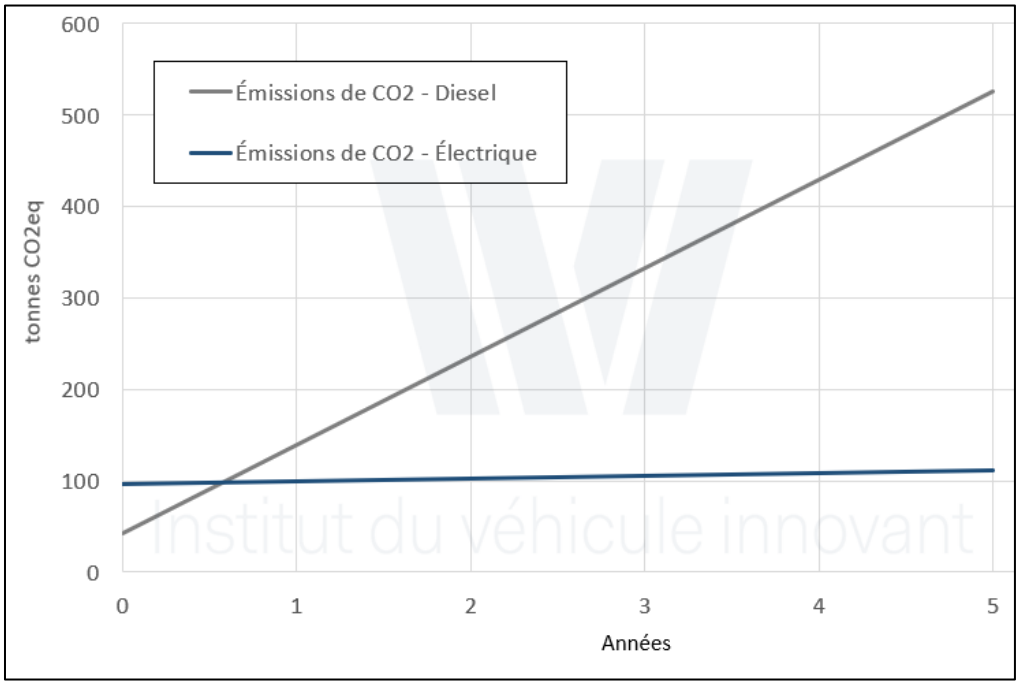
Tableau 14 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 3722053

Coût annuel de carburant avant électrification	59 068 $
Coût annuel d'électricité	25 821 $
Économie annuelle de coûts d'énergie	33 247 $
Économie potentielle après 5 ans	**166 235 $**

Un camion électrique devrait donc avoir un surcoût à l'achat inférieur à 166 000 $ incluant l'infrastructure de recharge et son installation. Le marché actuel est loin de s'approcher de ces paramètres. Ce calcul est assez simpliste. Il sera important, au moment de l'acquisition, de comparer aussi les coûts d'entretien du véhicule et de la borne de recharge, les assurances, etc.

À l'inverse de l'analyse économique, le bénéfice environnemental de l'électrification de cette route serait non négligeable. Le point d'équivalence des émissions de CO2 équivalent arriverait après environ 7 mois d'utilisation ou 45 850 km. Après 5 ans, ce véhicule aurait évité l'émission de 414 tonnes de CO2.

Graphique 18 : Émissions sur la vie du camion 3722053, Diesel vs. Électrique



Le camion 3722053 ne représente pas une opportunité d'électrification pour le moment compte tenu de l'avancement du marché. Une forte augmentation de l'énergie embarquée sera nécessaire, ainsi qu'une diminution marquée des prix.

L'entreprise Papineau International pourrait aussi considérer garder ses camions électriques plus longtemps, considérant que l'entretien devrait être moins onéreux pour ces véhicules. Ceci aiderait à rentabiliser un tel investissement.

13. Conclusions et recommandations

L'analyse des trois camions diesel instrumentés chez Papineau International a apporté beaucoup d'informations sur le potentiel d'électrification de ceux-ci. En plus du kilométrage quotidien, les habitudes de déplacements de chaque camion ont permis d'élaborer un score d'adéquation avec les camions lourds électriques actuellement offerts sur le marché, que voici :

Tableau 15 : Recommandation d'électrification des camions de Papineau International

Véhicule	Camion 3720074	Camion 3720079	Camion 3722053
Potentiel d'électrification (/10)	3	3	3
Recommandation d'électrification de l'IVI, basée sur les technologies de 2023	Non	Non	Non
Capacité totale de batterie requise pour effectuer 85 % des déplacements	1090 kWh	914 kWh	1200 kWh
Capacité totale de batterie requise pour effectuer 90 % des déplacements	1173 kWh	1015 kWh	1302 kWh
Capacité totale de batterie requise pour effectuer 95 % des déplacements	1292 kWh	1190 kWh	1493 kWh

Dans les trois cas, l'électrification n'est pas une solution viable pour le moment. Il sera nécessaire d'attendre encore quelques années pour que des batteries de capacités supérieures soient offertes.

La note accordée au potentiel d'électrification est obtenue en donnant une pondération aux critères les plus importants apportés par cette analyse, soit la proportion des jours réalisables, la nécessité d'adapter les opérations ou non pour y arriver, le délai avant d'arriver au point d'équivalence, les bénéfices sur la durée d'utilisation, et la présence d'accessoires difficiles à électrifier.

Les trois camions ont tout de même un potentiel d'électrification non nul, car les opérations de ceux-ci peuvent être plus propices que d'autres véhicules. Par exemple, ils reviennent toujours au terminal la nuit, ils ne transportent pas des charges extrêmes requérant des remorques à trois ou quatre essieux et ils ne sont pas munis d'accessoires spéciaux qui sont encore peu adaptés pour les véhicules électriques. Cette note de 3/10 signifie donc qu'ils pourront être électrifiés plus rapidement que d'autres camions, lorsque les batteries le permettront. Ce score est valide au moment de la parution de ce rapport. L'évolution des prix, capacité des batteries et disponibilité des accessoires amènera probablement une amélioration de ces scores avec le temps.

Les recommandations émises dans le présent rapport considèrent une batterie neuve et non dégradée. Il est important de constater qu'avec le temps et les cycles de recharge, une dégradation de l'ordre de 10 % ou plus pourrait apparaître, réduisant d'autant l'autonomie d'un véhicule électrique. Dans cette éventualité, le véhicule ne deviendrait pas pour autant inutile. Il pourrait toujours être intéressant financièrement pour Inter-Nord de l'utiliser en le rechargeant un peu plus longtemps durant la journée.

Cette analyse considère chaque minute passée au dépôt comme étant propice à la recharge, alors que ceci pourrait être moindre si le chargement de la cargaison prend beaucoup de temps, par exemple. Il faudrait

faire attention de positionner une borne à un endroit permettant de recharger le véhicule pendant qu'on y ajoute les marchandises, ou de le rebrancher après et de considérer ce temps dans la sélection de la puissance de la borne à installer. Aussi, plusieurs bornes de recharge rapide publiques pour les camions lourds apparaîtront sous peu au Québec. Cette option pourrait être encore plus avantageuse pour un camion qui n'a pas l'habitude de repasser au dépôt durant la journée et dont l'autonomie a diminué.

Le présent rapport fait l'état des possibilités d'électrification pour trois camions de la flotte de Papineau International. Ces véhicules ont été choisis sur le volet par l'IVI et le participant pour répondre aux questionnements des gestionnaires de flotte et pour leurs déplacements limités pouvant produire des candidats à l'électrification. Il ne faut donc pas utiliser ces résultats comme généralisation quant au potentiel d'électrification de l'entièreté du parc de Papineau International, ni des camions lourds de classes 6 à 8 en général. Le but de ce document n'est pas de produire un diagnostic sur un échantillon représentatif de ce marché.

14. Sources des données

Les données utilisées dans le présent rapport viennent des sources suivantes. Au besoin, plus de précisions pourraient être données à la demande d'un participant.

Historique du prix du carburant :

- https://www150.statcan.gc.ca/

Données météorologiques :

- https://open-meteo.com

Données sur les émissions de GES pour la fabrication de véhicules et de batteries :

- Nom du document : Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives, Argonne National Lab, auteurs : Dr. Y. L. Ding, Z. P. Cano, Prof. A. P. Yu, Prof. Z. W. Chen, lien : https://www.osti.gov/pages/servlets/purl/1561559
- https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global-LCA-passenger-cars-jul2021_0.pdf
- https://www.ghgenius.ca/index.php

Coût des véhicules électriques :

- Données publiées dans les médias et données privilégiées obtenues de partenaires

Données scientifiques pour les calculs énergétiques :

- Projets antérieurs de l'IVI
- https://x-engineer.org/drivetrain-losses-efficiency/
- https://www.researchgate.net/figure/Drag-coefficient-of-different-vehicles-type-1_fig1_331695168

15. Informations et contact

Si vous avez des questions à la suite de la lecture du présent rapport, vous pouvez contacter l'équipe du projet à l'aide des informations ci-dessous :

Institut du véhicule innovant

100, rue Claude-Audy, Saint-Jérôme (Québec), J5L 0J2

450-431-5744 x 261 | flotte@ivisolutions.ca

Plusieurs publications auxquelles l'IVI a participé pourront aider le gestionnaire de flotte dans sa démarche d'électrification. Celles-ci peuvent être trouvées à l'adresse suivante :

- https://www.ivisolutions.ca/ressources-consultables/

16. Remerciements

Ce projet est réalisé grâce à la participation financière du gouvernement du Québec dans le cadre du programme Action-Climat Québec et rejoint les objectifs du Plan pour une économie verte 2030.

L'équipe tient également à remercier Hydro-Québec pour son implication à titre de partenaire majeur.

Enfin, l'équipe tient à remercier tous les partenaires du projet Flotte Rechargeable – Camions Lourds. Leur dévouement, leur professionnalisme et leur coopération ont été d'une haute importance pour l'achèvement de ce rapport.

La collecte de données pour cette phase du projet a notamment été rendue possible en utilisant les appareils GO de :