Flotte
rechargeable
Camions lourds

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

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

Date : 13 Octobre 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 1552 18
8. Scénario d'électrification pour le camion 1552 21
9. Analyse du camion 1553 27
10. Scénario d'électrification pour le camion 1553 30
11. Analyse du camion 1839 35
12. Scénario d'électrification pour le camion 1839 38
13. Conclusions et recommandations 42
14. Sources des données 44
15. Informations et contact 45
16. Remerciements 46

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 : Informations de base sur l'utilisation des véhicules de Transport Levasse..... 14
Tableau 3 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 1552 19
Tableau 4 : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 1552 20
Tableau 5: Paramètres d'électrification retenus pour le camion 1552..... 24
Tableau 6: Bénéfices financiers de l'électrification du camion 1552 24
Tableau 7 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 1553 28
Tableau 8: Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 1553 29
Tableau 9: Paramètres d'électrification retenus pour le camion 1553..... 32
Tableau 10: Bénéfices financiers de l'électrification du camion 1553 33
Tableau 11 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 1839 ... 36
Tableau 12 : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 2012 37
Tableau 13: Paramètres d'électrification retenus pour le camion 1839..... 40
Tableau 14: Bénéfices financiers de l'électrification du camion 1839 40
Tableau 15: Recommandation d'électrification des camions de Transport Levasse 42

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 1552, 1553 et 1839..... 13
Figure 3 : Fréquence des livraisons du camion 1552 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de Transport Levasse..... 18
Figure 4 : Fréquence des livraisons du camion 1553 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de Transport Levasse..... 27
Figure 5 : Fréquence des livraisons du camion 1839 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de Transport Levasse..... 35

Liste des graphiques

Graphique 1 : Répartition des kilométrages quotidiens par camion 15
Graphique 2 : Répartition des vitesses – Transport Levasse..... 16
Graphique 3 : Heures par jour au dépôt, sans les fins de semaine et les fériés 17
Graphique 4 : Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 1552..... 20
Graphique 5: Journées de mesure du camion 1552, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh)..... 21
Graphique 6 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 1552 22
Graphique 7 : Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 1552..... 23
Graphique 8 : Comparaison des coûts totaux de possession, camion 1552..... 25
Graphique 9: Émission sur la vie du camion 1552, Diesel vs. Électrique 25
Graphique 10 : Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 1553... 29
Graphique 11: Journées de mesure du camion 1553, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh)..... 30
Graphique 12 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 1553 31
Graphique 13 : Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 1553..... 32
Graphique 14: Émission sur la vie du camion 1553, Diesel vs. Électrique 33
Graphique 15: Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 1839.... 37
Graphique 16: Journées de mesure du camion 1839, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh)..... 38
Graphique 17 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 1839 39
Graphique 18 : Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 1839..... 40
Graphique 19: Émission sur la vie du camion 1839, Diesel vs. Électrique 41

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 lourds 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 est d'encourager les entreprises québécoises à prendre le virage de l'énergie propre et 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 du 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 Transport Levasse (Globco), de Lévis.

L'analyse des déplacements 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 :

88 % des journées se terminent en ayant parcouru moins de 325 km

93 % des arrêts de nuit au terminal durent 12 heures ou plus, assez pour ajouter 540 kWh avec une borne de 50 kW pour chaque camion

Camion 1552 – Porteur Classe 7		Effet sur le potentiel d'électrification
Critère	**Valeur**	
Distances	**Courtes**	+
Constance	**Régulier**	+
Dénivelé	**Moyen / Élevé**	-
Recharge en journée	**Possible**	+
Chargement	**Faible**	+
Accessoires	**Aucun**	+

Estimation de consommation électrique en été	89 kWh / 100 km
Estimation de consommation électrique moyenne, sur 1 an	114 kWh / 100 km
Pénalité de chargement ?	Non
Capacité nominale requise pour 90 % des journées	308 kWh
Batterie disponible ?	Oui

Camion 1553 – Porteur Classe 7		Effet sur le potentiel d'électrification
Critère	**Valeur**	
Distances	**Moyennes**	+/-
Constance	**Variable**	-
Dénivelé	**Moyen**	+/-
Recharge en journée	**Possible**	+
Chargement	**Faible**	+
Accessoires	**Aucun**	+

Estimation de consommation électrique en été	106 kWh / 100 km
Estimation de consommation électrique moyenne, sur 1 an	134 kWh / 100 km
Pénalité de chargement ?	Non
Capacité nominale requise pour 90 % des journées	528 kWh
Batterie disponible ?	Non

Camion 1839 – Tracteur Classe 8		Effet sur le potentiel d'électrification
Critère	**Valeur**	
Distances	**Moyennes**	+/-
Constance	**Variable**	-
Dénivelé	**Moyen / Élevé**	-
Recharge en journée	**Possible**	+/-
Chargement	**Faible**	+
Accessoires	**Aucun**	+

Estimation de consommation électrique en été	157 kWh / 100 km
Estimation de consommation électrique moyenne, sur 1 an	197 kWh / 100 km
Pénalité de chargement ?	Non
Capacité nominale requise pour 90 % des journées	840 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 au diesel 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 potentielle 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 batteries 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 la période d'instrumentation, 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 l'analyse, 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

Transport Levasse est l’opérateur des déplacements locaux et régionaux de Globco, une entreprise de transport et de logistique au niveau international. En opération depuis plus de trente ans, Transport Levasse livre des marchandises pour le compte d’autrui, plutôt que de transporter leurs propres produits.

Les chargements transportés sont des matières sèches n’ayant pas besoin de réfrigération. Les camions opèrent en charge partielle (*LTL*, *Less-Than-Truck Load*) et, bien qu’ils visitent très fréquemment quelques clients en particulier, ils n’ont pas de routes prédéfinies ni dédiées. Des pièces de camions lourds, des meubles et des matériaux de rénovation sont quelques exemples de produits transportés entre les lieux de fabrication, les centres de distribution et les commerces de détail.

Basée à Lévis, l’entreprise opère 4 camions porteurs de classe 6 et 17 tracteurs de classe 8. À partir de ce lieu et des autres terminaux de Globco, Transport Levasse livre des marchandises du Saguenay à Ottawa.

6. Véhicules analysés

Pour donner suite aux discussions avec le gestionnaire du parc, les trois camions retenus pour l'analyse sont les unités numéro 1552, 1553 et 1839. Ce sont trois camions de marque Freightliner, les deux premiers étant des porteurs M2 et le 1839, un tracteur Cascadia.

Figure 2 : Camions utilisés durant la période d'instrumentation, dans l'ordre de gauche à droite : Camions 1552, 1553 et 1839

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. De plus, ils représentent bien les opérations régulières de la flotte. Les deux porteurs sont identiques, mais ceux-ci permettent de comparer une route typique à Lévis (camion 1552) et une au terminal de Laval (camion 1553).

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. Ensuite, l'information est divisée par camion afin de bien comprendre leurs modes de fonctionnement et comment celui-ci impacterait la consommation électrique.

Quelques données saillantes ont été compilées dans un tableau résumé, voir le Tableau 2. 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 Transport Levasse.

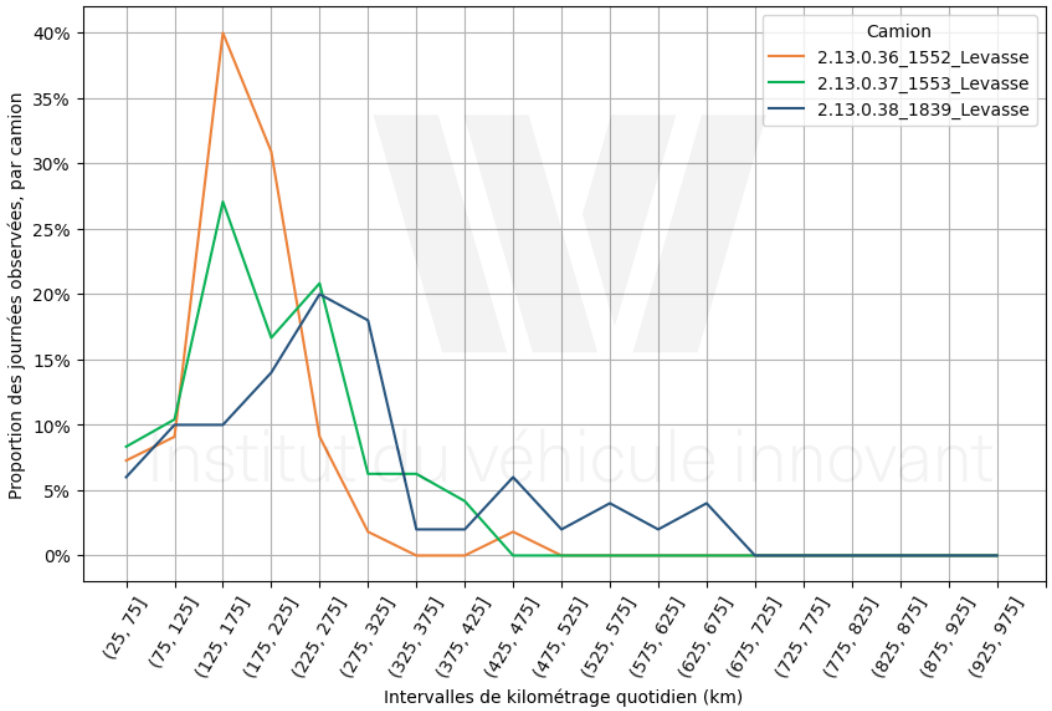
Tableau 2 : Informations de base sur l'utilisation des véhicules de Transport Levasse

Camion #	1552	1553	1839
Distance parcourue			
Durant le test	9 132 km	9 152 km	13 497 km
Annuellement (estimée)	36 527 km	36 611 km	53 989 km
Carburant			
Consommé durant le test	2 374 L	2 356 L	5 542 L
Consommé annuellement (estimé)	9 497 L	9 423 L	22 168 L
Consommation moyenne	26,0 L/100 km	25,7 L/100 km	41,1 L/100 km
Ralenti			
Temps par jour en moyenne	2,3 h	1,8 h	1,3 h
Carburant consommé au ralenti par jour	6,3 L	4,2 L	6,8 L
Carburant consommé par année (estimé)	1 538 L	979 L	1 558 L
Opérations			
Vitesse moyenne en déplacement	34 km/h	40,5 km/h	48,2 km/h
Nombre de jours actifs durant l'analyse	54 jours	46 jours	50 jours
Masse totale moyenne pondérée	9 122 kg	9 400 kg	16 610 kg

L'observation du Tableau 2 permet de constater que malgré une faible différence de vitesse moyenne et de carburant consommé au ralenti, les deux camions porteurs de l'essai ont des déplacements et des données de consommation très similaires. Le camion 1839, seul tracteur de cette analyse, a bien sûr des données très différentes. Sa vitesse moyenne est plus élevée, signifiant qu'il doit passer plus de temps à vitesse d'autoroute. Les trois camions transportent des chargements très légers.

Le facteur le plus déterminant du besoin énergétique quotidien est la distance parcourue. Le graphique suivant montre la distribution des distances quotidiennes parcourues par camion.

Graphique 1 : Répartition des kilométrages quotidiens par camion

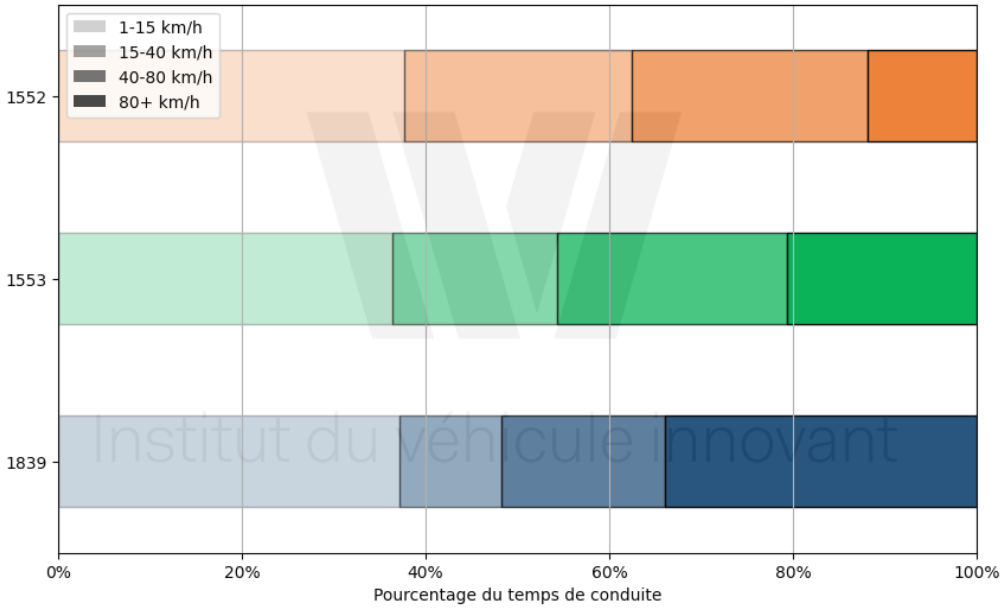


En observant le Graphique 1, il est possible de remarquer que le camion 1552 est celui parcourant les distances les plus régulières et courtes. Lors de 40 % des journées de mesure, il a parcouru entre 125 et 175 kilomètres, et environ 90% des journées ont terminé avant d'atteindre 275 km. Les deux autres camions ont une distribution des distances un peu plus étalée. L'unité 1553 a parcouru généralement moins de 375 km, alors que le 1839 a quelques journées dépassant cette marque, jusqu'à 675 km.

Pour les trois camions, 88 % des journées se sont terminées en ayant parcouru moins de 325 km.

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. L'information intéressante pour déterminer la consommation électrique est la bande foncée de chaque couleur, représentant la proportion du temps de conduite passée à vitesse d'autoroute. En effet, rouler à cette vitesse fait augmenter significativement la consommation d'un véhicule électrique.

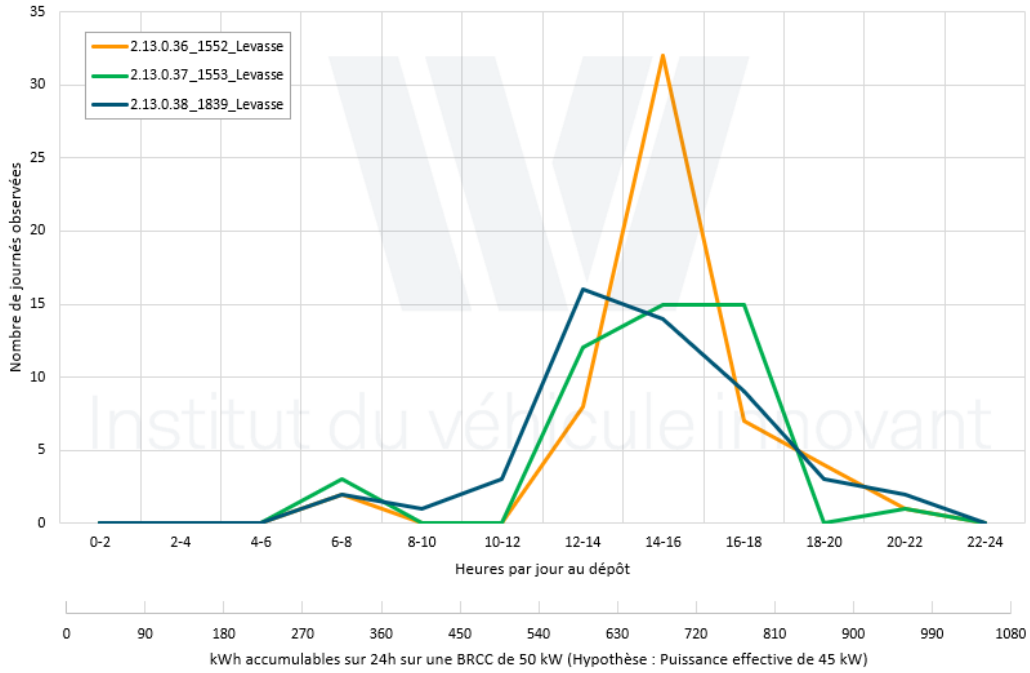
Graphique 2 : Répartition des vitesses – Transport Levasse



Tel que supposé précédemment, le graphique ci-haut permet de vérifier que le camion 1839 roule plus souvent à haute vitesse. Celui-ci passe près de 35 % du temps de conduite à plus de 80 km/h. Ceci aura pour effet d'augmenter sa consommation. Les deux autres camions passent à peine 10 – 12 % du temps à cette vitesse. Outre le temps à très basse vitesse qui est assez constant, ces deux derniers véhicules semblent passer beaucoup plus de temps à circuler en ville.

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 d'opérer commercialement un véhicule électrique consiste à charger le véhicule à la borne de recharge la plus lente possible, au dépôt, durant ses périodes d'inactivité. Il va donc de soi que plus ce temps est long, plus la borne peut être lente (moins puissante). L'IVI préconise la sélection d'infrastructures de recharge les moins puissantes possibles pouvant satisfaire les besoins (incluant les marges de sécurité et de confort), car celles-ci sont moins coûteuses à acquérir, installer puis opérer. Les trois véhicules observés reviennent à un dépôt de Globco la nuit, et même parfois, durant le jour. Ils disposent donc de longues périodes pour s'y recharger. Le Graphique 3 montre la répartition des heures passées sur le terrain de Transport Levasse à l'arrêt.

Graphique 3 : Heures par jour au dépôt, sans les fins de semaine et les fériés



Ce graphique ci-dessus montre une échelle de l'énergie pouvant potentiellement être restituée à la batterie durant les heures d'arrêt au dépôt. Par exemple, un camion arrêté 10 heures et branché sur une borne de 50 kW, soit de puissance effective de 45 kW, pourrait théoriquement accumuler 450 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.

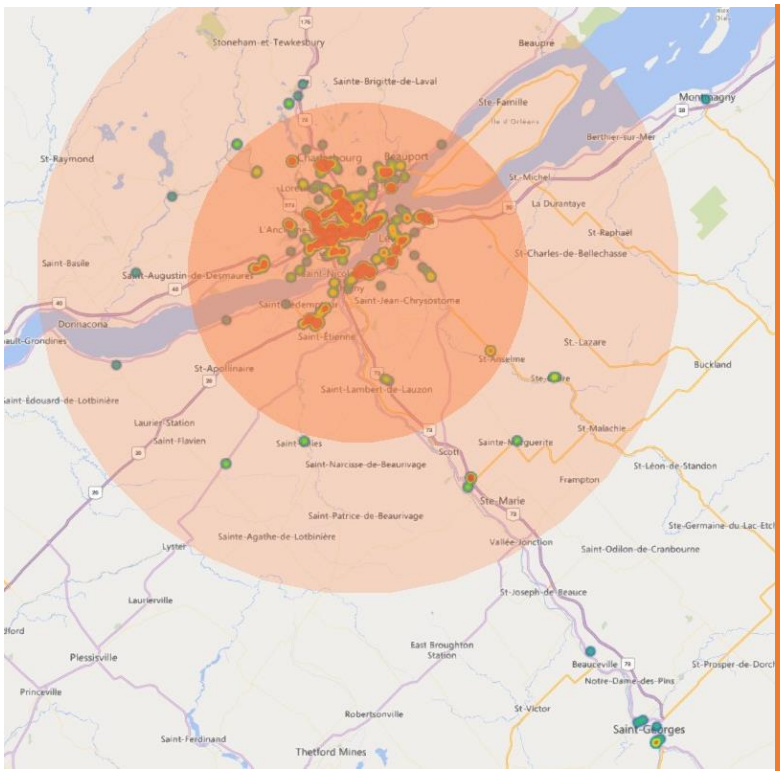
Les trois camions analysés disposent d'une durée d'arrêt au terminal de Transport Levasse supérieur à 12 heures par jour et ce, 93 % des jours.

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

7. Analyse du camion 1552

Le camion au diesel 1552 est utilisé pour faire diverses livraisons de marchandises sèches à Lévis et à Québec. Il part généralement du terminal assez plein et effectue des livraisons en avant-midi. Il repasse assez souvent pour recharger avant de poursuivre sa route de livraisons. Il peut effectuer quelques collectes en fin de journée aussi.

La carte suivante permet de visualiser la localisation et la fréquence des livraisons :



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

Le camion 1552 se déplace un peu partout à Québec et Lévis, soit dans un rayon de moins de 25 km du terminal.

Quelques arrêts sont notés dans le rayon de 50 km. Les deux principaux sont à Sainte-Marie et à Saint-Georges, en Beauce.

Figure 3 : Fréquence des livraisons du camion 1552 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de Transport Levasse

Le dénivelé du territoire parcouru est un critère important dans l'évaluation de la consommation d'énergie, car plus le camion doit monter des côtes, plus il devra dépenser d'énergie. Cette énergie est aussi proportionnelle au poids du véhicule. Le camion 1552 opère à Québec et Lévis et dans les environs, soit des endroits où il y a beaucoup de côtes.

Cet indice de côtes à gravir indique que le camion devra monter en moyenne un dénivelé positif de 5,3 mètres pour chaque kilomètre parcouru. Cet indice est qualifié de moyen, mais il est très près de la limite pour être élevé. Le freinage régénératif permet de récupérer une partie de l'énergie dépensée pour monter, mais pas l'entièreté.

Camion # 1552

Freightliner M2 2015 | Porteur Classe 7– PNB 15 000 kg

Le détail des distances parcourues chaque jour de la période de collecte de données est présenté dans le tableau 3. 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 sans valeurs 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 1552

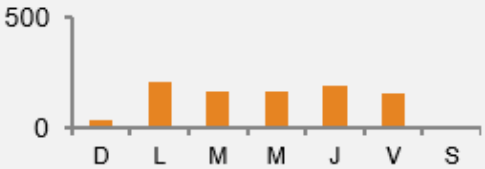
La première section du tableau ci-contre permet d'observer les faits saillants des distances parcourues. Le 90e percentile de distance parcourue en une journée devrait fournir les meilleurs renseignements pour un gestionnaire de flotte désireux d'électrifier cette route. En effet, les journées plus longues que 237 km sont très rares et pourraient possiblement être comblées par un autre camion.

Les distances moyennes et médianes sont autour de 165 km.

En observant le graphique et le calendrier dessous, on y aperçoit que les journées sont assez régulières, qu'il y a peu de variation entre chaque journée de la semaine ou de semaine en semaine. Seules les quelques journées exceptionnellement longues ressortent, car elles sont plus foncées.

Les journées surlignées en gris sont ainsi colorées, car aucune donnée de chargement n'a été fournie pour celles-ci. Elles ne font donc pas partie des scénarios d'électrification suivants, mais on peut observer qu'elles ne sont pas plus longues que les journées typiques considérées.

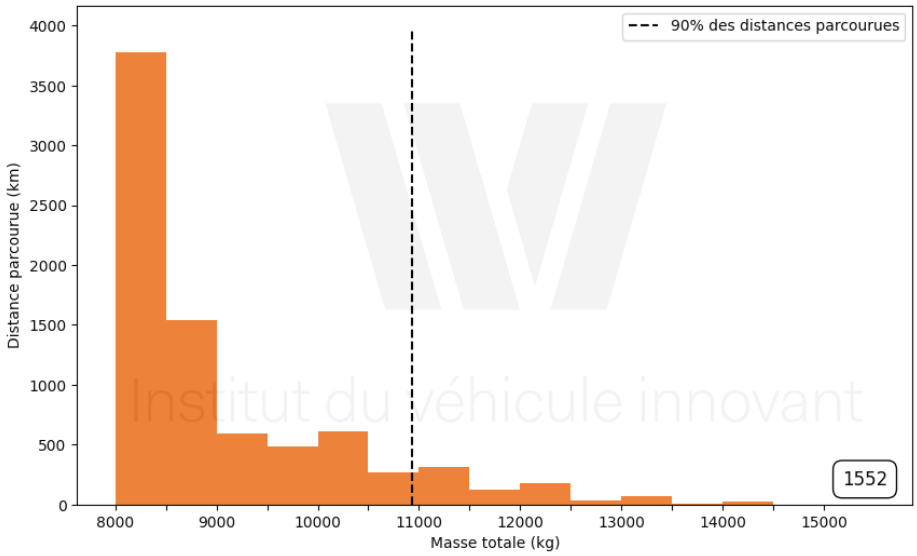
Max	430	km
90%	237	km
Med	165	km
Moy	169	km
σ	63	km
CV	37%	



	D	L	M	M	J	V	S
	-	-	186	296	175	209	-
	-	-	168	200	124	145	-
mars	35	205	238	57	-	-	-
	-	-	-	63	195	168	-
	-	-	194	116	176	183	-
	-	236	178	223	430	202	-
avr.	-	-	200	138	163	116	-
	-	-	199	247	140	134	-
	-	-	64	129	168	126	-
	-	242	135	133	272	163	-
	-	153	126	155	116	94	-
mai	-	-	151	195	188	159	-
	-	-	132	151	196	144	-

L'énergie requise pour chaque accélération et chaque montée est directement proportionnelle à la masse totale du véhicule, incluant son chargement. Le camion 1552 effectue plusieurs livraisons par jour. Le poids de sa cargaison a donc été noté pour chaque trajet et compilé par kilomètre parcouru, pour voir à quelle fréquence un chargement plus ou moins lourd est transporté. Le graphique suivant montre le chargement typiquement transporté.

Graphique 4 : Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 1552



Le camion 1552 transporte des marchandises très légères. Il a parcouru environ la moitié des trajets de la période d'instrumentation avec moins de 1000 kg de chargement, et 90 % de la distance avec moins de 3000 kg de chargement.

Un camion électrique, plus lourd d'environ 2000 kg à cause du poids de la batterie, ne causerait pas de limitation de chargement à ce véhicule.

En résumé, l'analyse des déplacements du camion 1552 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 1552

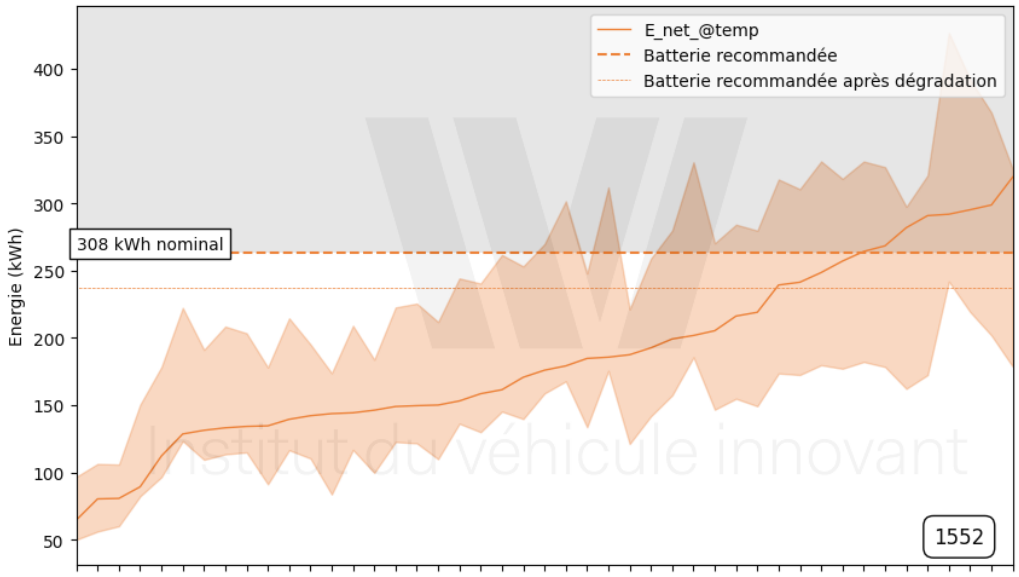
Critère	Valeur	Effet sur le potentiel d'électrification
Distances	**Courtes**	**+**
Constance	**Régulier**	**+**
Dénivelé	**Moyen / Élevé**	**-**
Recharge en journée	**Possible**	**+**
Chargement	**Faible**	**+**
Accessoires	**Aucun**	**+**

8. Scénario d'électrification pour le camion 1552

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 active ont été regroupés pour obtenir un aperçu de l'énergie qui serait requise par période de 24 h pour compléter l'entièreté de ces trajets.

Le Graphique 5 montre la distribution de ces énergies pour chaque journée durant la période d'instrumentation. Celles-ci 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 1552, classées par 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 308 kWh disposerait de 263 kWh avec marge de confort lorsque neuf (ligne horizontale pointillée épaisse), cette batterie permettrait au camion 1552 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.

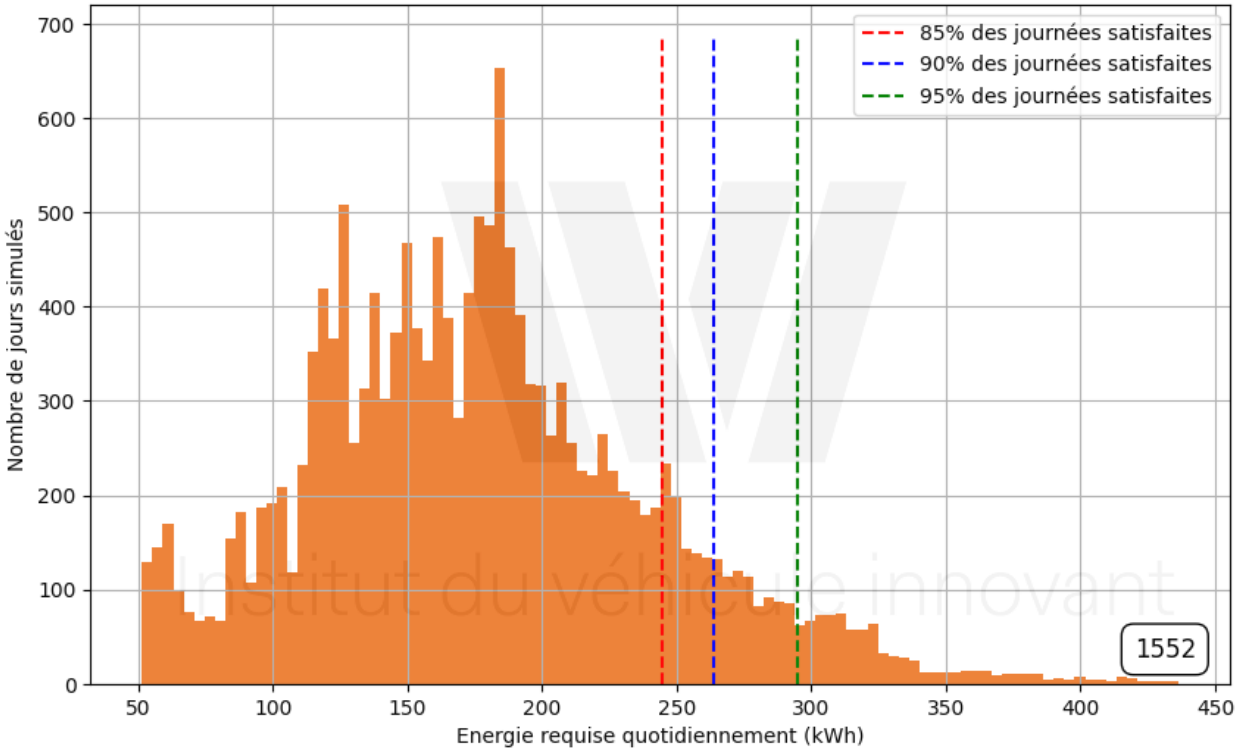
La consommation moyenne du camion à 20°C est estimée à 89 kWh / 100 km. Elle sera plus élevée en hiver, pouvant être jusqu'à 50 % supérieure lors des quelques jours de grands froids.

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. 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 ci-dessous 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 1552



Camion # 1552

Freightliner M2 2015 | Porteur Classe 7– PNB 15 000 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 263 kWh, ce qui équivaut à une batterie dotée d'une énergie nominale 308 kWh.

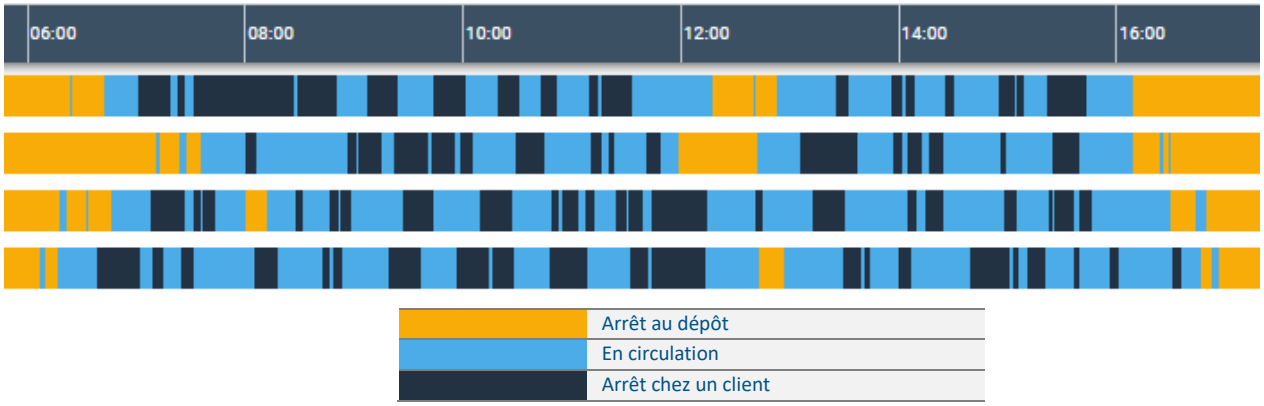
Pour compléter 95 % des journées, la capacité nominale est de 345 kWh.

Pour compléter 85 % des journées, la capacité nominale est de 286 kWh.

Les configurations de batteries offertes en 2023 pour les camions électriques de classe 7 vont d'environ 140 à 315 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.

Le Graphique 7 permet de visualiser les arrêts lors d'une semaine typique du camion 1552. Chaque bande horizontale représente un jour du mardi 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 représentée est celle du 11 au 14 avril 2023.

Graphique 7 : Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 1552



Le camion 1552 circule habituellement de 7h à 16h. Au courant d'une journée typique, il effectue un peu plus de 10 arrêts.

Il lui arrive fréquemment de repasser au terminal de Transport Levasse durant la journée et d'y rester plusieurs minutes. Ceci pourrait constituer une opportunité de recharge pour aider à compléter ses trajets avec une batterie plus petite. Instaurer une régularité et une durée suffisante à ces arrêts pourrait, par exemple, rendre les journées froides d'hiver possibles à compléter avec un camion électrique, peu importe leur distance.

Une puissance de 50 kW est généralement considérée comme le standard minimal pour un camion lourd. Cette borne fournira une puissance réelle au véhicule d'environ 45 kW. Comme pour les batteries, la stratégie consiste à sélectionner la borne de recharge la moins puissante qui réponde aux besoins.

En multipliant la puissance par le nombre d'heures, on arrive à l'énergie pouvant être ajoutée quotidiennement. Celle-ci serait donc d'au moins 540 kWh (12h*45 kW). Cette valeur est plus que suffisante pour effectuer une charge complète.

Les paramètres retenus pour un scénario d'électrification du camion 1552 seraient donc les suivants :

Tableau 5: Paramètres d'électrification retenus pour le camion 1552

Capacité de la batterie embarquée	308 kWh
Puissance de la borne de recharge	BRCC 50 kW
90 % des opérations remplies ?	Oui

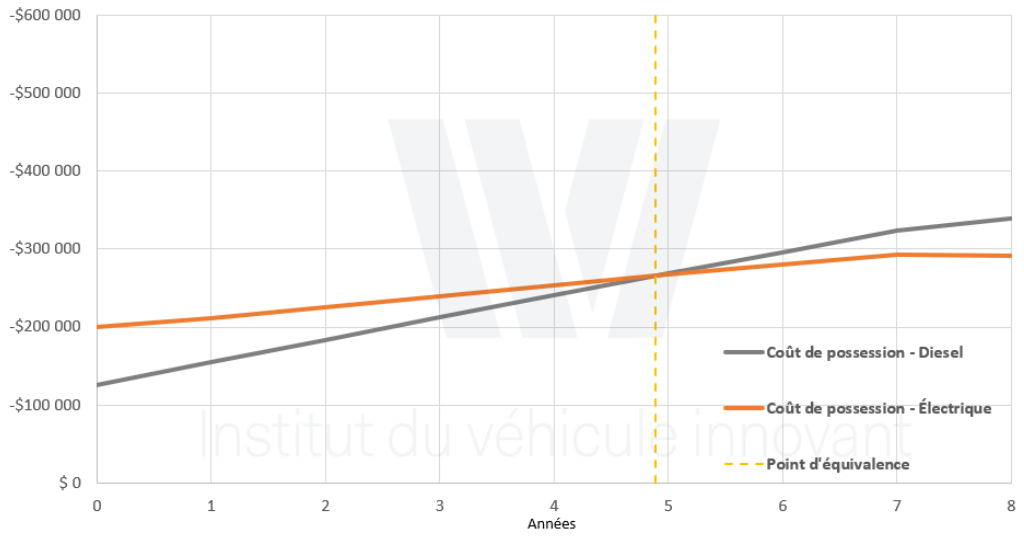
Le scénario d'électrification précédent pourrait apporter les bénéfices financiers indiqués au Tableau 6. Les bénéfices sont comptabilisés sur une période de 8 ans puisque celle-ci correspond à la période que Levasse Transport garde ses camions.

Tableau 6: Bénéfices financiers de l'électrification du camion 1552

Coût annuel de carburant avant électrification	19 469 $
Coût annuel d'électricité	4 207 $
Économie annuelle de coûts d'énergie	15 262 $
Surcoût total à l'achat (après subventions)	75 000 $
Période de retour sur investissement	**4,9 années**
Bénéfice net après 8 ans	**47 296 $**

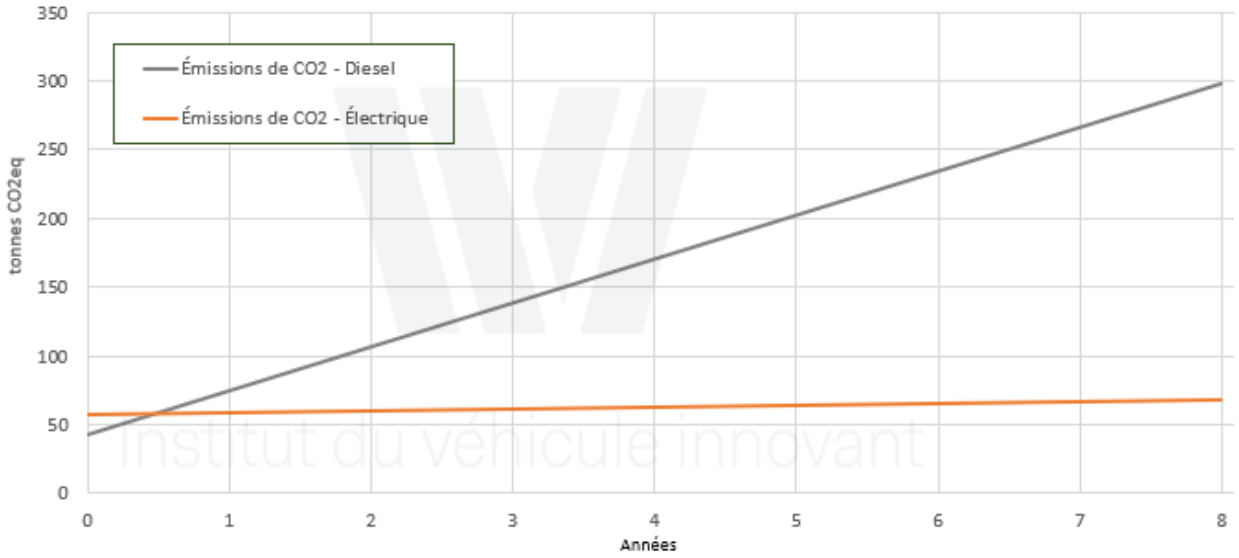
Sur une période de 8 ans, le camion électrique aurait un coût approximatif de 291 467 $ tandis que le camion diesel serait plutôt de 338 763 $. La différence représente une économie potentielle de 14 %. Ces simulations tiennent compte des incitatifs actuels, de l'inflation, de la maintenance des camions, de l'énergie et de la puissance, du coût de la borne et de son installation et de son entretien. Le coût du diesel considéré est 2.00 $/L et le coût de l'électricité est fixé à 0.12 $/kWh.

Graphique 8 : Comparaison des coûts totaux de possession, camion 1552



Il est possible de calculer le bénéfice environnemental de l'électrification de cette route, celui-ci est représenté à la figure ci-dessous. Ce bénéfice n'est pas négligeable puisque l'électrification éviterait la propagation de plus de 230 tonnes de CO2 équivalent. Un camion électrique est plus polluant à produire, mais définitivement moins polluant à utiliser que son équivalent au diesel. Le point d'équivalence d'émission cumulée de GES arriverait après seulement 16 900 km. 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 9: Émission sur la vie du camion 1552, Diesel vs. Électrique



Camion # 1552

Freightliner M2 2015 | Porteur Classe 7– PNB 15 000 kg

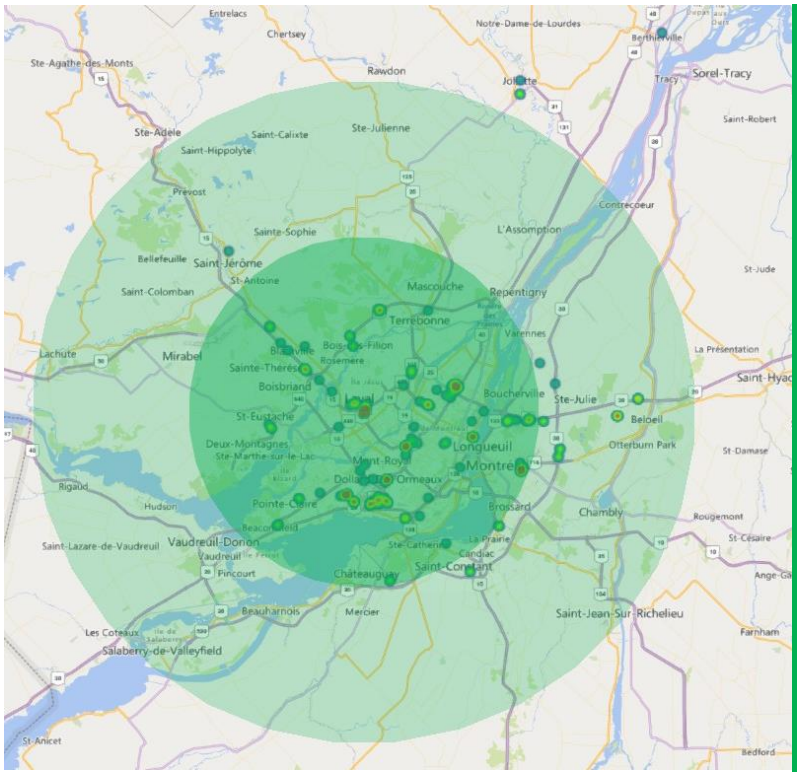
Le camion 1552 pourrait être électrifié en tenant compte des tailles de batteries offertes en ce moment sur le marché. De plus, le fait que celui-ci retourne souvent au terminal durant la journée permettrait de tenter d'opérer cette route avec un camion ayant une batterie plus petite que la plus grosse batterie offerte, ce qui donnerait plus de choix au gestionnaire de flotte et pourrait permettre de faire des économies à l'achat.

Un retour sur investissement serait envisageable en 4,9 années et des profits de plus de 45 000 $ seraient possibles sur une période de 8 ans. Sur cette même période, un camion électrique permettrait une économie de plus de 230 tonnes de CO2 équivalent.

9. Analyse du camion 1553

Le camion au diesel 1553 est utilisé pour la livraison de marchandises sèches. Durant la période de mesure, il a été attitré à un terminal à Laval jusqu'au 13 mars. Par la suite, il a poursuivi les opérations à Québec, de manière très semblable au camion 1552. En après-midi, il effectue principalement des cueillettes qui seront livrées plus tard par un autre camion.

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 :



Lors de la période d'instrumentation, le camion 1553 a été utilisé à Laval et à Québec. Puisque les routes de Québec sont semblables à celles du camion 1552, l'intensité des arrêts à Laval est présentée ici.

La majorité des arrêts de ce camion sont répartis à l'intérieur du rayon de 25 km du terminal de Globco à Laval. Les points les plus fréquemment visités sont Anjou, Boucherville et le parc industriel de Laval. Les points fréquemment visités paraissent moins intenses puisque le camion n'est resté à Laval que pendant trois semaines.

Figure 4 : Fréquence des livraisons du camion 1553 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de Transport Levasse

L'indice de côtes du camion 1553 est moins élevé que le précédent. Cela est possiblement dû au fait qu'il a circulé durant une partie de l'essai à Laval et dans le Grand-Montréal.

Un indice de dénivelé moyen de 3,8 m/km a donc été repéré.

Camion # 1553

Freightliner M2 2015 | Porteur Classe 7– PNB 15 000 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 1553

La distance moyenne parcourue est de 195 km pour le camion 1553, un peu plus que le camion présenté précédemment. C'est la même chose pour la distance au 90e percentile, qui est de 320 km. Cette distance commence à être un peu longue pour un camion électrique. Il pourrait être nécessaire de considérer la possibilité de recharger durant la journée ou raccourcir ces longues journées.

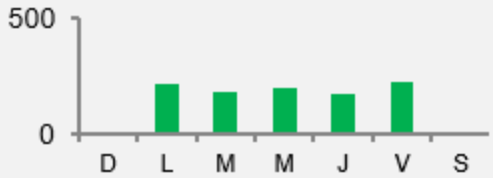
Le camion 1553 ne semble pas avoir de route régulière, aucun jour de semaine n'est plus intense qu'un autre en moyenne.

L'observation du calendrier permet d'observer l'irrégularité des journées en constatant l'importante différence entre le dégradé de couleurs d'une journée à l'autre.

Le camion a été attitré à des routes à Laval au début de la période de mesure, jusqu'au 13 mars. Ces journées semblent être un peu plus longues que les journées mesurées par la suite, dépassant presque toutes 200 km.

Tout comme le camion précédent, les journées surlignées en gris sont ainsi colorées, car aucune donnée de chargement n'a été fournie pour celles-ci. Elles ne font donc pas partie des scénarios d'électrification suivants.

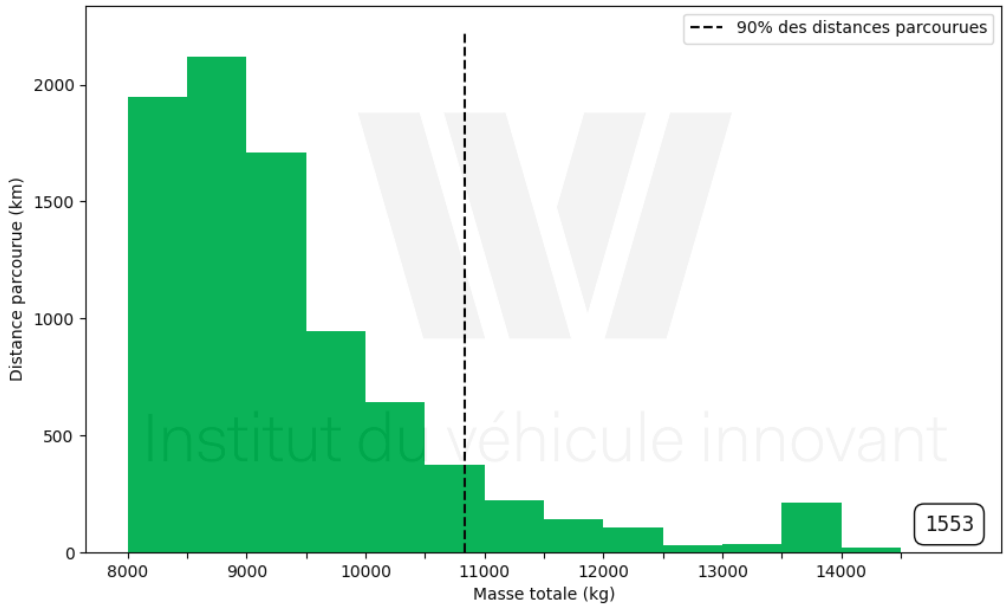
Max	419	km
90%	320	km
Med	189	km
Moy	195	km
σ	94	km
CV	48%	



	D	L	M	M	J	V	S
	-	-	-	361	139	294	-
	-	228	179	235	243	233	-
mars	-	168	314	364	168	247	-
	-	419	401	171	-	-	-
	-	-	-	43	41	-	-
	-	-	-	-	25	-	-
avr.	-	244	189	146	296	-	-
	-	-	9	232	194	-	-
	-	197	120	-	251	-	-
	-	172	225	116	188	63	-
	-	-	106	219	142	-	-
mai	-	159	113	106	156	329	-
	-	134	141	237	195	198	-

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 ou estimé lorsque non disponible pour chaque trajet. Le graphique suivant résume le chargement typiquement transporté.

Graphique 10 : Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 1553



Le camion 1553 a aussi un chargement dégressif, par contre celui-ci est plus réparti que le camion 1552. Il faut toutefois faire attention à cette conclusion, car une partie des chargements a été approximée, en particulier les collectes en après-midi pour lesquelles l'information était peu souvent connue.

En considérant que 90 % de la distance parcourue se fait à moins de 10 800 kg, changer ce véhicule pour un camion électrique qui serait plus lourd de 2000 kg n'entraînerait généralement pas de limitation au niveau du chargement, sauf pour quelques trajets exceptionnels. Ceux-ci totalisent environ 200 km sur la période de collecte de données.

En résumé, l'analyse des déplacements du camion 1553 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 1553

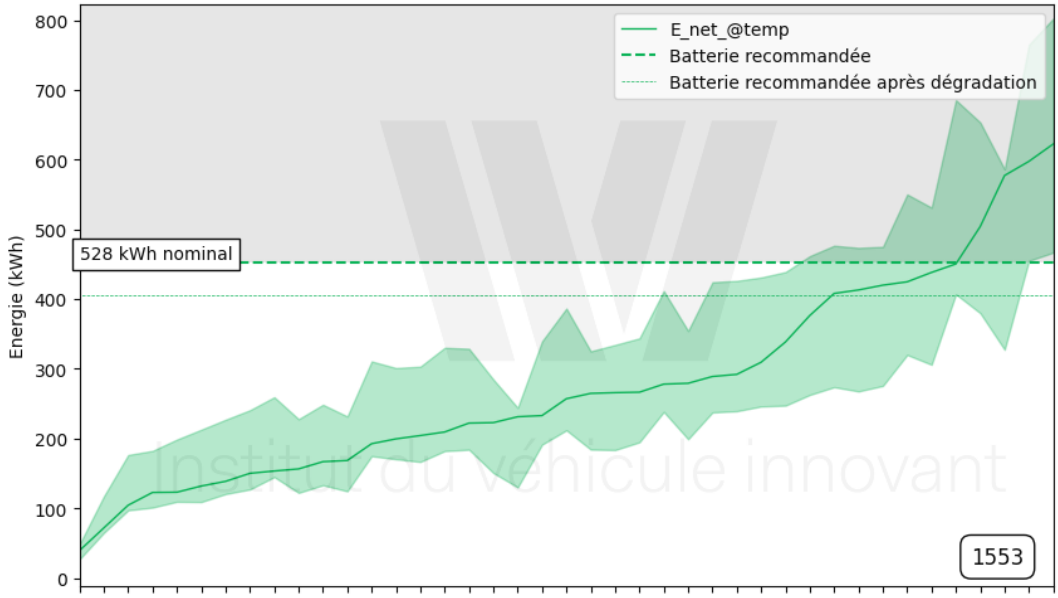
Critère	Valeur	Effet sur le potentiel d'électrification
Distances	**Moyennes**	**+/-**
Constance	**Variable**	**-**
Dénivelé	**Moyen**	**+/-**
Recharge en journée	**Possible**	**+**
Chargement	**Faible**	**+**
Accessoires	**Aucun**	**+**

10. Scénario d'électrification pour le camion 1553

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 11 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 11: Journées de mesure du camion 1553, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh)



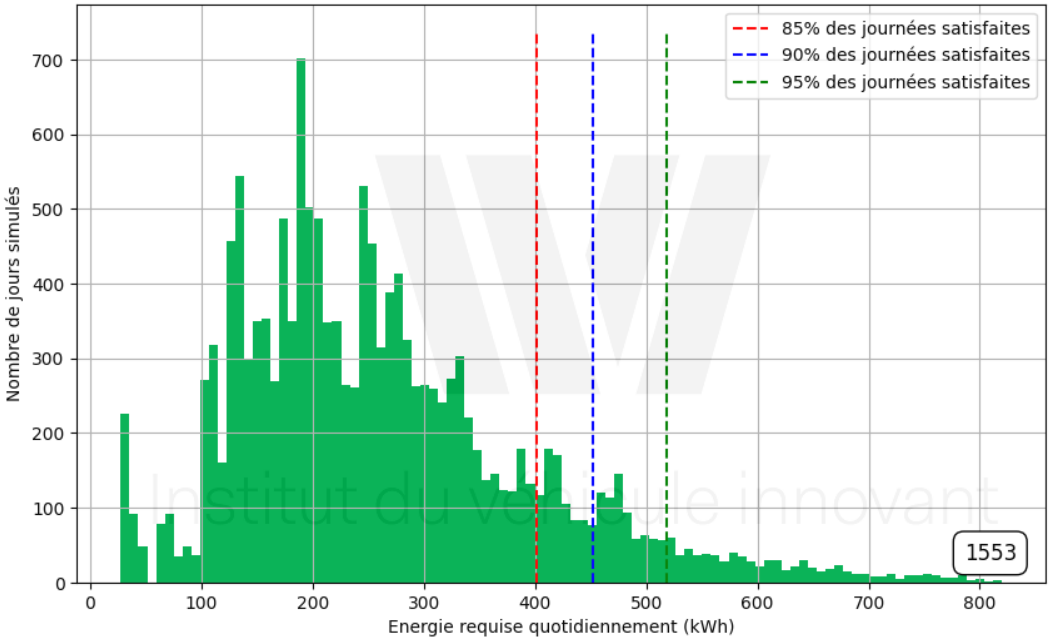
Guide d'interprétation du Graphique 11:

- 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 528 kWh disposerait de 452 kWh avec marge de confort lorsque neuf (ligne horizontale pointillée épaisse), cette batterie permettrait au camion 1553 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 107 kWh / 100 km. Elle sera plus élevée en hiver, pouvant être jusqu'à 50 % supérieure lors des quelques jours de grands froids.

Le Graphique 12 représente les tailles de batteries recommandées pour accomplir 85%, 90% ou 95% des journées d'une année, sans que le camion électrique 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 12 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 1553

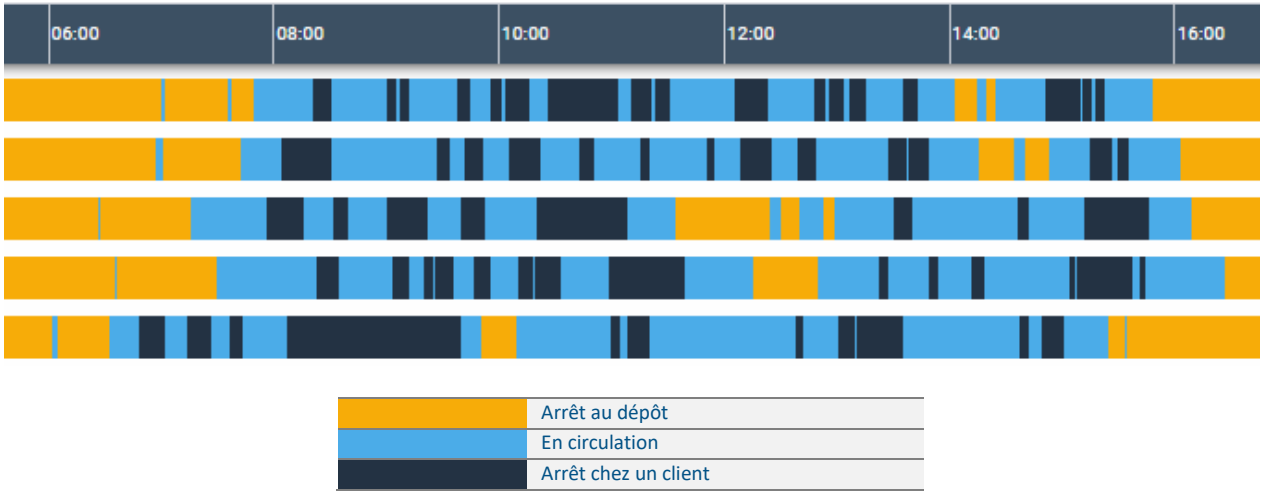


Une batterie de 528 kWh nominale permettrait alors de réaliser 90 % des journées sur une année moyenne en un seul cycle de décharge de la batterie, tandis qu'une batterie de 470 et de 607 kWh pourrait respectivement satisfaire 85 et 95 % des journées sur une année moyenne.

Les configurations de batteries offertes en 2023 pour les camions électriques de classe 7 vont d'environ 140 à 315 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.

Le Graphique 13 permet de visualiser les arrêts lors d'une semaine typique du camion 1553. 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 représentée est celle du 27 février au 3 mars 2023.

Graphique 13 : Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 1553



Les déplacements du camion 1553 ressemblent à ceux du camion 1552. La semaine présentée ci-haut montre une semaine de déplacements à Laval.

Les arrêts au terminal de Globco en journée seraient des moments propices pour la recharge, cependant ces arrêts en début ou en fin de journée risquent d'être moins efficaces, car la batterie pourrait être trop peu déchargée, ou trop déchargée avant d'arriver à cet arrêt.

Une puissance de 50 kW est généralement considérée comme le standard minimal pour un camion lourd. Cette borne fournira une puissance réelle au véhicule d'environ 45 kW. Comme pour les batteries, la stratégie consiste à sélectionner la borne de recharge la moins puissante qui réponde aux besoins.

En multipliant la puissance par le nombre d'heures, on arrive à l'énergie pouvant être ajoutée quotidiennement. Celle-ci serait donc d'au moins 540 kWh (12h*45 kW). Cette valeur est plus que suffisante pour effectuer une charge complète.

Les paramètres requis pour un scénario d'électrification du camion 1553 seraient donc les suivants :

Tableau 9: Paramètres d'électrification retenus pour le camion 1553

Capacité de la batterie embarquée	528 kWh
Puissance de la borne de recharge	BRCC 50 kW
90 % des opérations remplies ?	**Non**

Le scénario d'électrification précédent pourrait apporter les bénéfices financiers indiqués au Tableau 10, si une batterie d'une taille suffisante était disponible. Ces économies potentielles sont estimées sur une durée de 8 ans.

Tableau 10: Bénéfices financiers de l'électrification du camion 1553

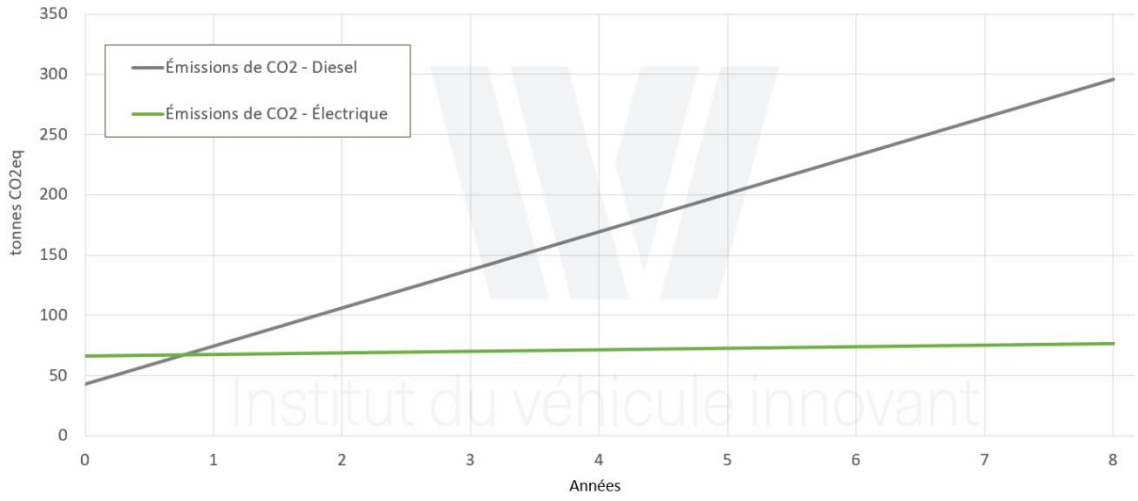
Coût annuel de carburant avant électrification	19 283 $
Coût annuel d'électricité	6 187 $
Économie annuelle de coûts d'énergie	13 096 $
Économies potentielles après 8 ans	**104 768 $**

En date de la rédaction de ce rapport, aucun produit existant ne propose une batterie ayant la capacité nominale requise pour électrifier le camion 1553. La plus grosse batterie sur le marché est d'environ 315 kWh, ce qui limiterait le nombre de journées possibles à compléter.

Les bénéfices financiers ne peuvent pas être calculés pour un camion inexistant. Cependant, une hypothèse sur l'économie possible du coût énergétique d'un camion avec une batterie de 528 kWh peut être posée. Cette économie sur une période de 8 ans pourrait atteindre 104 768 $. Le coût du diesel considéré est 2.00 $/L et le coût de l'électricité est estimé à 0.12 $/kWh.

Il est quand même possible de calculer le bénéfice environnemental de l'électrification de cette route, celui-ci est représenté à la figure ci-dessous. Ce bénéfice n'est pas négligeable puisque l'électrification éviterait la propagation de plus de 219 tonnes de CO2 équivalent. Le point d'équivalence d'émission des GES arriverait après seulement 27 900 km. Ces valeurs viennent des analyses indépendantes de l'IVI, basées sur des études ICCT et tiennent compte des émissions de GES de la production d'électricité par barrages hydro-électriques.

Graphique 14: Émission sur la vie du camion 1553, Diesel vs. Électrique



Camion # 1553

Freightliner M2 2015 | Porteur Classe 7– PNB 15 000 kg

L'IVI n'est pas en mesure de recommander l'électrification du camion 1553 en considérant l'entièreté de ses déplacements mesurés, car ce scénario requiert plus d'énergie que ce qui est contenu dans les camions actuellement en vente.

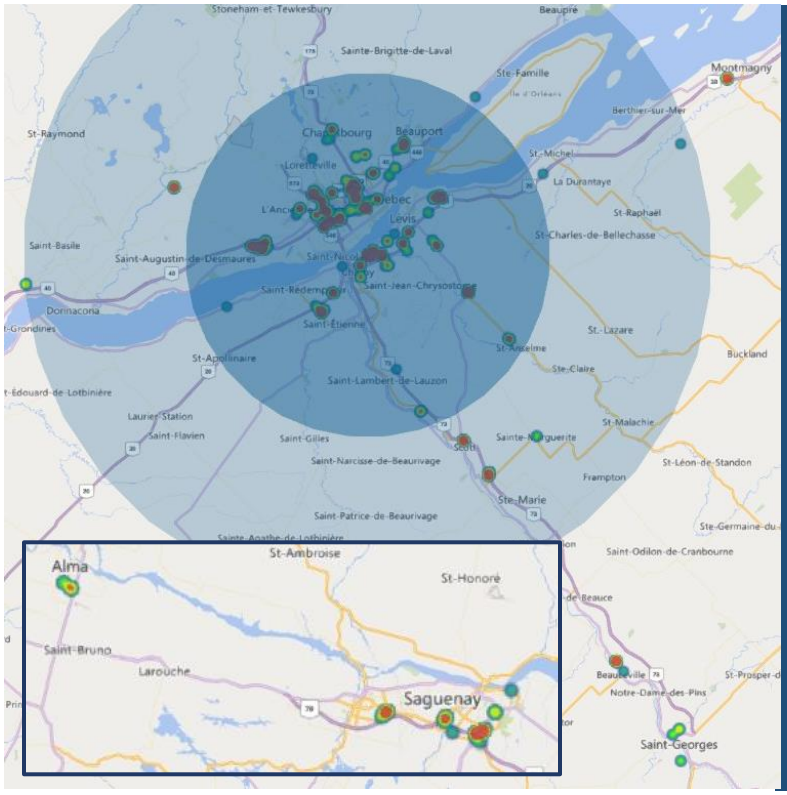
Cette conclusion est causée par les plus longues journées de déplacement, et il semble que la majorité de celles-ci ont été observées alors que le véhicule était utilisé à Laval. Dans cette optique, la demande énergétique des journées à Québec a été évaluée séparément. Ces déplacements sont semblables à ceux effectués par le camion 1552, quoiqu'un peu plus long. Il est estimé que l'électrification de 90 % des déplacements annuels du camion 1553 à Québec nécessiterait une batterie d'environ 375 kWh, ce qui est toujours un peu supérieur aux batteries offertes avec les camions porteurs en 2023.

Le camion 1553 revient fréquemment au dépôt durant la journée, et ce pour une durée moyenne de 35 minutes. Ces arrêts ont été observés 12 fois sur les 26 jours analysés à Québec, soit presque la moitié du temps. Utiliser ces arrêts pour recharger lors des plus longues journées d'hiver serait une bonne façon de réduire encore un peu plus la batterie requise. Ainsi, un arrêt de 30 minutes permettrait d'ajouter près de 25 kWh dans la batterie, réduisant le besoin de 375 à 350 kWh

11. Analyse du camion 1839

Le camion 1839 est utilisé pour la livraison et cueillette de marchandises sèches. Seul tracteur de cette analyse, ce camion se déplace plus loin de son terminal que les deux précédents. Il visite fréquemment la Beauce, Montmagny et le Saguenay. Les clients visités sont moins nombreux et plus fréquents, mais ses routes sont quand même irrégulières et en charge partielle.

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 longs et fréquents :



Le camion 1839 effectue la majeure partie de ses déplacements à l'intérieur du rayon de 25 km du terminal de Transport Levasse dans les villes de Québec et Lévis. Il visite aussi fréquemment Saint-Henri, toujours à l'intérieur de ce rayon.

Une poignée d'autres endroits sont visités fréquemment, quelques-uns étant à moins de 50 km du dépôt.

Le camion visite relativement fréquemment Saguenay, comme montré dans l'encadré.

Figure 5 : Fréquence des livraisons du camion 1839 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de Transport Levasse

Dénivelé moyen

5,0 m/km

Le camion numéro 1839 circule à Québec, en Beauce et traverse la réserve faunique des Laurentides pour se rendre à Saguenay. Un indice de dénivelé moyen lui a été décerné, mais celui-ci est plus près de la limite élevée.

Sa consommation risque d'être plus élevée que d'autres camions ayant les mêmes chargements, mais qui circuleraient dans des endroits moins montagneux.

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 11 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 1839

Les déplacements du camion 1839 sont plus longs que ceux des deux camions précédents, et ont une certaine répétabilité.

En effet, les lundis semblent beaucoup plus longs. C'est lors de ces journées que le camion se rend à Saguenay. Les vendredis pour leur part sont généralement plus courts.

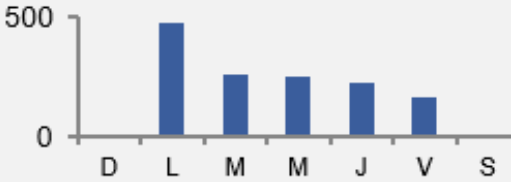
En analysant les déplacements de ce camion tel quel, ils résultent en une distance au 90e percentile de 507 km et une moyenne de 270 km.

En retirant la journée du lundi, la moyenne resterait sensiblement la même, mais le 90e percentile s'approcherait beaucoup de celle-ci, ce qui faciliterait son scénario d'électrification.

Les lundis où le camion s'est rendu à Saguenay n'ont pas été considérés dans l'analyse du potentiel d'électrification suivant, car elles sont assez peu nombreuses pour être ressorties comme des anomalies statistiques. De plus, il est assez évident qu'un camion électrique ne pourrait pas compléter ces trajets en ce moment.

Tout comme pour les camions précédents, les journées surlignées en gris sont ainsi colorées, car aucune donnée de chargement n'a été fournie pour celles-ci. Elles ne font donc pas partie des scénarios d'électrification suivants.

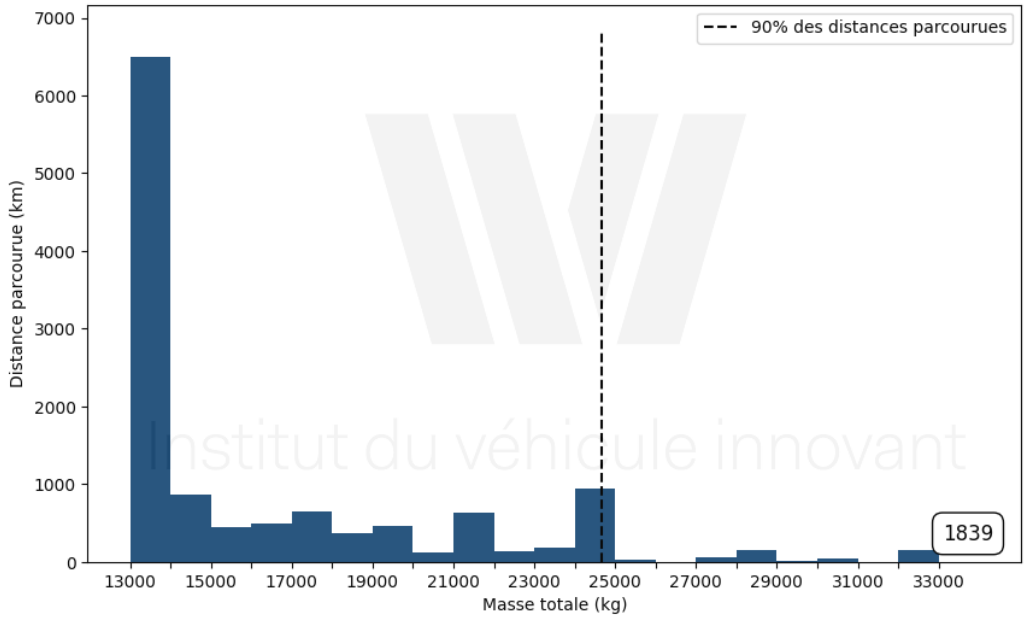
Max	641	km
90%	507	km
Med	259	km
Moy	270	km
σ	153	km
CV	56%	



	D	L	M	M	J	V	S
	-	-	221	184	289	78	-
	-	641	295	435	256	78	-
mars	-	52	-	-	-	-	-
	-	-	-	326	276	-	-
	-	267	399	107	271	-	-
	-	564	200	253	290	43	-
avr.	-	-	57	157	170	131	-
	-	-	286	287	215	453	-
	-	638	240	-	-	-	-
	-	-	260	314	107	181	-
	-	546	215	250	259	116	-
mai	-	590	452	130	131	-	-
	-	497	266	276	222	271	-

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 les trajets. Le graphique suivant résume ces chargements. Pour quelques trajets de reposition de remorques, il a été impossible de savoir si celles-ci étaient vides ou pleines. Nous devons donc estimer que leur répartition aurait ressemblé aux données connues.

Graphique 15: Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 1839



Sur la moitié de la distance parcourue durant la prise de mesures, le camion 1839 a transporté une remorque contenant moins de 1000 kg. Ensuite, les chargements sont répartis jusqu'à environ 25 000 kg. Cette valeur représente également le chargement maximal transporté sur 90 % de la distance. En somme, le camion 1839 transporte très rarement plus de ceci, et le chargement maximal enregistré était de 33 000 kg sur une très faible distance.

Un camion électrique dont la batterie cause un surpoids d'environ 2000 kg n'entraînerait pas de diminution de la charge transportée.

En résumé, l'analyse des déplacements du camion 1839 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 2012

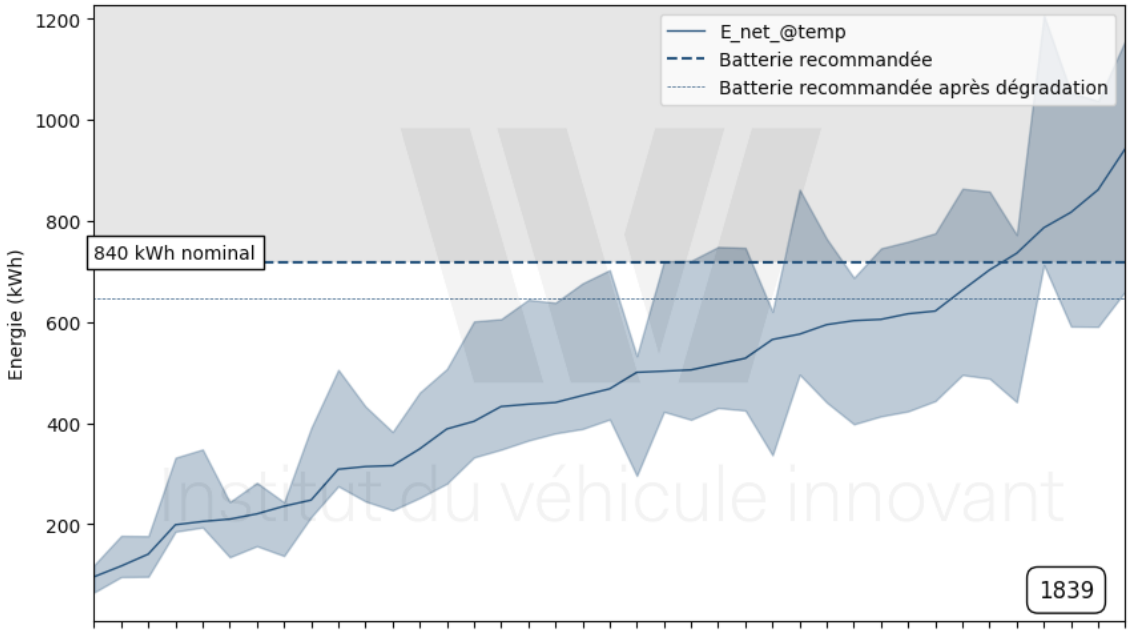
Critère	Valeur	Effet sur le potentiel d'électrification
Distances	**Moyennes**	**+/-**
Constance	**Variable**	**-**
Dénivelé	**Moyen / Élevé**	**-**
Recharge en journée	**Possible**	**+/-**
Chargement	**Faible**	**+**
Accessoires	**Aucun**	**+**

12. Scénario d'électrification pour le camion 1839

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 16 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 16: Journées de mesure du camion 1839, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh)



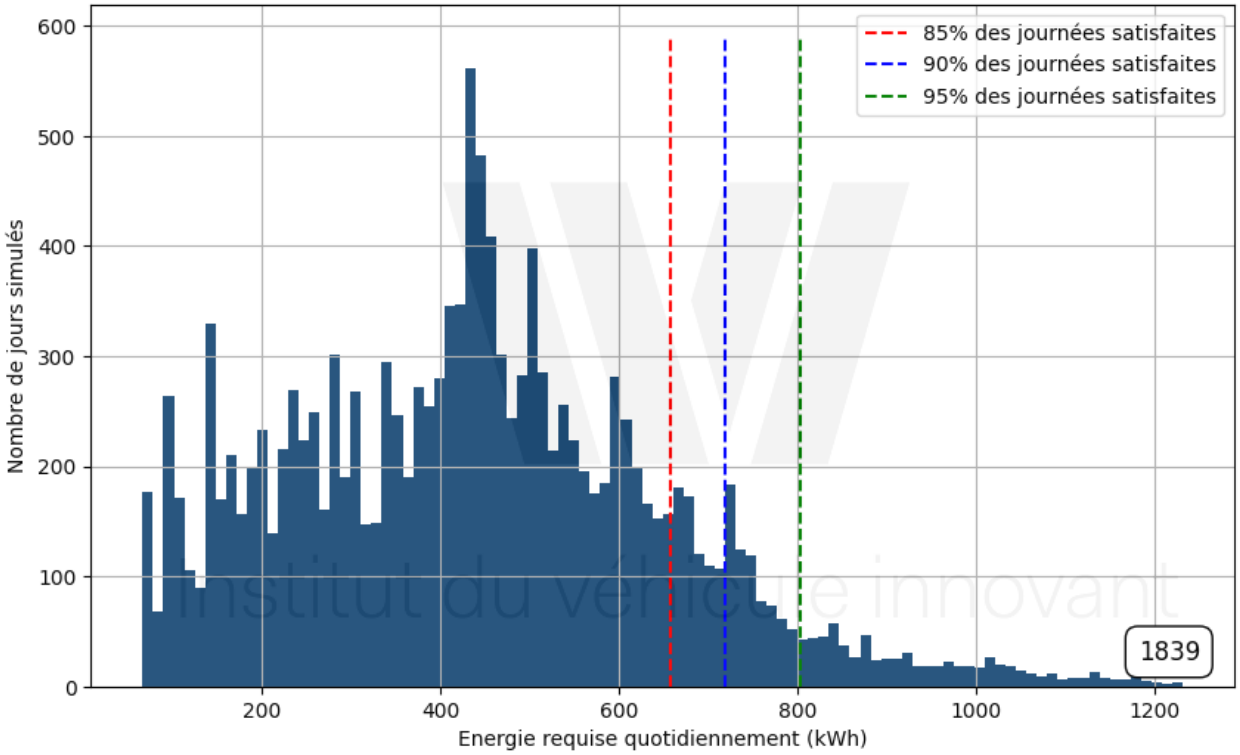
Guide d'interprétation du Graphique 16 :

- 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 840 kWh disposerait de 718 kWh avec marge de confort lorsque neuf (ligne horizontale pointillée épaisse), cette batterie permettrait au camion 1839 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 157 kWh / 100 km. Elle sera plus élevée en hiver, pouvant être jusqu'à 50 % supérieure lors des quelques jours de grands froids.

Le Graphique 17 représente les tailles de batteries recommandées pour accomplir 85%, 90% ou 95% des journées d'une année, sans que le camion électrique 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 17 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 1839

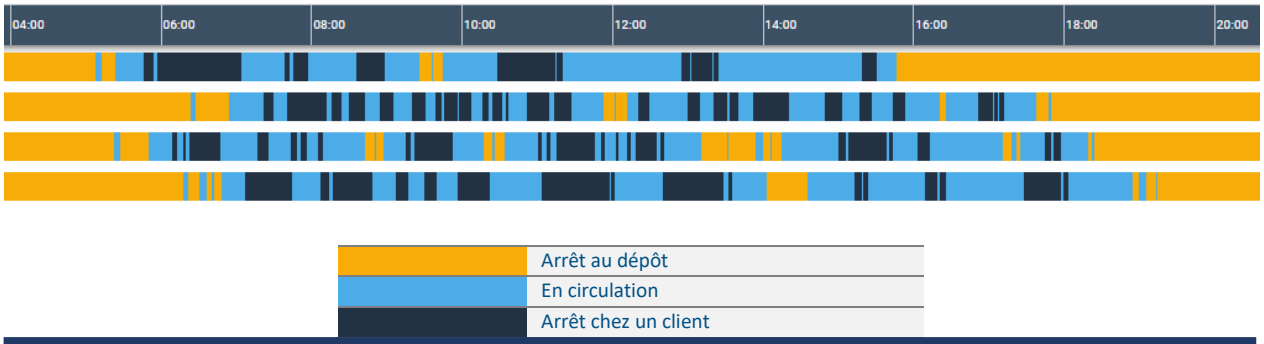


Une batterie de 840 kWh nominale permettrait alors de réaliser 90 % des journées sur une année moyenne en un seul cycle de décharge de la batterie, tandis qu'une batterie de 770 et de 940 kWh pourrait respectivement satisfaire 85 % et 95 % des journées sur une année moyenne.

Les configurations de batteries offertes en 2023 pour les camions 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 dans la flotte.

Le Graphique 18 permet de visualiser les arrêts lors d'une semaine typique du camion 1839. 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.

Graphique 18 : Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 1839



Le camion 1839 semble avoir des heures d'utilisation plus longues, de 6h à 18h environ. Celles-ci sont toutefois assez régulières.

Comme les deux autres camions, il revient fréquemment au dépôt de Transport Levasse, mais à des heures irrégulières. Placer ces arrêts le plus possible au milieu de la journée permettrait généralement de maximiser le potentiel de recharge en journée.

En divisant l'énergie consommée par la durée de recharge disponible, on obtient la puissance de recharge requise. Celle-ci serait donc d'au moins 840 kWh / 12 h = 70 kW. Une borne de 100 kW pourrait répondre de façon fiable à ce besoin. Cette puissance est plus élevée que le minimum généralement utilisé pour les camions lourds, et il en va de même pour les coûts associés.

Les paramètres retenus pour un scénario d'électrification du camion 1839 seraient donc les suivants :

Tableau 13: Paramètres d'électrification retenus pour le camion 1839

Capacité de la batterie embarquée	840 kWh
Puissance de la borne de recharge	BRCC 100 kW
90 % des opérations remplies ?	**Non**

Le scénario d'électrification précédent pourrait apporter les bénéfices financiers indiqués au Tableau 14, si une batterie d'une taille suffisante était disponible. Tout comme pour les autres camions de Levasse Transport, les bénéfices financiers ont été calculés sur une période de 8 ans.

Tableau 14: Bénéfices financiers de l'électrification du camion 1839

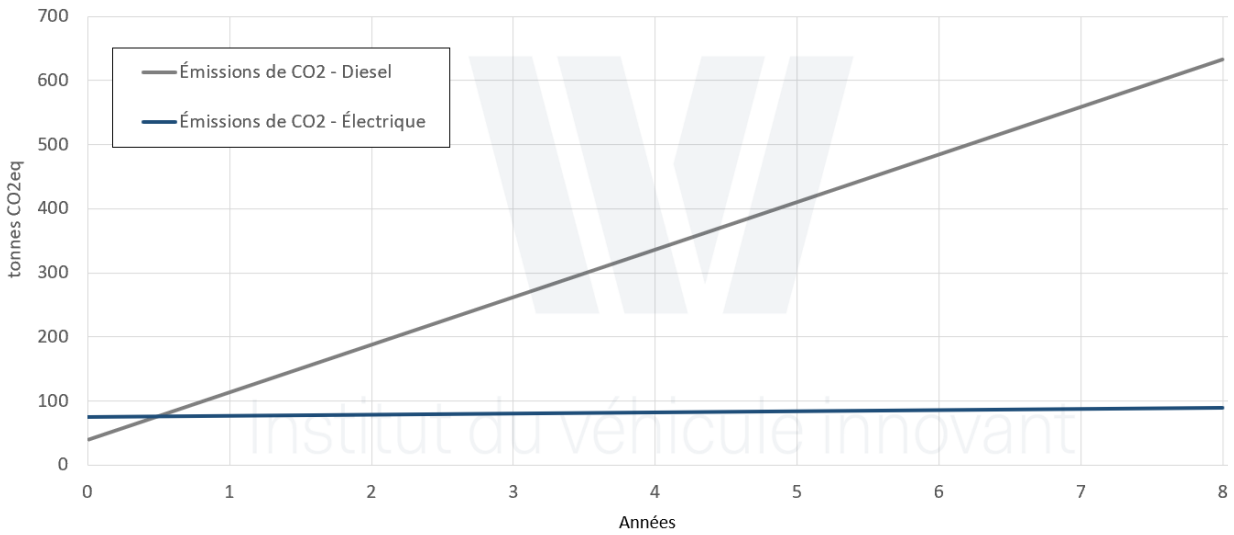
Coût annuel de carburant avant électrification	45 488 $
Coût annuel d'électricité	14 017 $
Économie annuelle de coûts d'énergie	31 471 $
Économies potentielles après 8 ans	**251 768 $**

En date de la rédaction de ce rapport, aucun produit existant ne propose une batterie ayant la capacité nominale requise pour électrifier le camion 1839 au Canada. La plus grosse batterie sur le marché est d'environ 650 kWh, ce qui limiterait sévèrement le nombre de journées possibles à compléter.

Les bénéfices financiers ne peuvent pas être calculés pour un camion inexistant. Cependant, une hypothèse sur l'économie possible du coût énergétique d'un camion avec une batterie de 840 kWh peut être posée. Le coût du diesel considéré est 2.00 $/L et le coût de l'électricité est estimé à 0.16 $/kWh (plus élevé pour ce camion, car la recharge s'effectuerait à 100 kW). Une économie potentielle de 251 768 $ est envisageable après 8 ans.

Il est quand même possible de calculer le bénéfice environnemental de l'électrification de cette route, celui-ci est représenté à la figure ci-dessous. Ce bénéfice n'est pas négligeable puisque l'électrification éviterait la propagation de plus de 543 tonnes de CO2 équivalent. Le point d'équivalence d'émission des GES arriverait après seulement 26 538 km. Ces valeurs viennent des analyses indépendantes de l'IVI, basées sur des études ICCT et tiennent compte des émissions de GES de la production d'électricité par barrages hydro-électriques.

Graphique 19: Émission sur la vie du camion 1839, Diesel vs. Électrique



L'IVI n'est pas en mesure de recommander l'électrification de la route du camion 1839 telle quelle pour l'instant, car celle-ci requiert plus d'énergie que celle contenue dans les batteries offertes sur le marché.

Cependant, 66 % des trajets du camion 1839 sont des trajets de 260 km ou moins. Avec une consommation estimée lors des plus grands froids de l'hiver d'environ 236 kWh/100 km, un camion muni d'une batterie de 650 kWh nominale pourrait effectuer ces trajets. Un ajustement aux routes de ce véhicule permettrait d'augmenter ce taux de succès à 90 % ou plus en réattribuant les routes courtes d'autres camions à celui-ci.

Puisque les retombées économiques et environnementales sont plutôt bonnes pour ce camion, il serait intéressant de réévaluer une route dédiée pour ce camion avec des trajets de 260 km et moins.

Les trajets vers Saguenay ne sont pas possibles pour l'instant avec une telle limitation de distance quotidienne.

13. Conclusions et recommandations

L'analyse des trois camions diesel instrumentés chez Transport Levasse 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 Transport Levasse

Véhicule		**Camion 1552**	**Camion 1553**	**Camion 1839**
Potentiel d'électrification (/10)		**8**	**3**	**5**
Recommandation d'électrification de l'IVI		Oui	Non	Non
Capacité totale de la batterie nécessaire pour effectuer un certain pourcentage des déplacements annuels	85 %	286 kWh	470 kWh	770 kWh
	90 %	**308 kWh**	**528 kWh**	**840 kWh**
	95 %	345 kWh	607 kWh	940 kWh
Puissance de la borne de recharge afin d'effectuer 90 % des déplacements annuels		50 kW	50 kW	100 kW

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.

Bien entendu, 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.

L'IVI recommande l'électrification de la route du camion 1552. Cette route ne demande aucune modification et la capacité de batterie nécessaire pour l'électrifier existe déjà. De plus, les retombées économiques permettent un retour sur investissement en moins de 5 ans et les retombées environnementales permettent d'éviter la diffusion de plus de 230 tonnes de CO_2 équivalent.

Pour ce qui est des camions 1553 et 1839, les capacités de batterie actuellement disponible sur le marché ne permettent pas l'électrification de leur route respective. Cependant, comme mentionné dans ce rapport, l'IVI recommande d'évaluer la possibilité d'adaptation des opérations. Celles-ci pourraient permettre l'électrification d'une partie ou de l'entièreté des routes.

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.

Les trois camions instrumentés lors de ce test sont arrêtés longtemps la nuit, ce qui leur permettrait d'utiliser des bornes de recharge peu puissantes, et donc moins coûteuses. Cependant dans son analyse, l'IVI a considéré chaque minute passée au dépôt de Transport Levasse comme étant propice à la recharge, alors que ceci pourrait être moindre si le chargement de la cargaison prend beaucoup de temps, par exemple. Malgré ceci une borne de 50 kW devrait être suffisante pour les camions 1552 et 1553 tandis qu'une borne de 100 kW devrait être suffisante pour le camion 1839. Il faudra 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. Aussi, plusieurs bornes de recharge rapide publiques pour les camions lourds apparaîtront sous peu au Québec. L'utilisation de ces bornes pourrait être avantageuse pour un camion qui n'a pas l'habitude de repasser au dépôt durant la journée.

Il est également intéressant de mentionner qu'une des premières bornes publiques pour camions lourds installées au Québec se situe sur la rue Cunard à Laval. Elle se situe à 1 kilomètre de l'entrepôt de Levasse Transport à Laval. Cette borne pourrait être utilisée pour de la recharge stratégique en journée afin d'optimiser un itinéraire pour l'électrification d'un camion.

Le présent rapport fait l'état des possibilités d'électrification pour trois camions de la flotte de Transport Levasse. 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 Transport Levasse ni comme 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 :