Flotte
rechargeable
Camions lourds

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

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

Date : Mercredi le 17 mai 2023| Version révisée : 26 juillet 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 2013 17
8. Scénario d'électrification pour le camion 2013 20
9. Analyse du camion 3018 24
10. Scénario d'électrification pour le camion 3018 27
11. Analyse du camion 2012 32
12. Scénario d'électrification pour le camion 2012 35
13. Conclusions et recommandations 39
14. Sources des données 41
15. Informations et contact 42
16. Remerciements 43

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 SET transport 14
Tableau 3 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 2013 18
Tableau 4 : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 2013 19
Tableau 5 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 2013 22
Tableau 6 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 2013 23
Tableau 7 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 3018 25
Tableau 8: Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 3018 26
Tableau 9: Paramètres d'électrification retenus pour le camion 3018 29
Tableau 10: Bénéfices financiers de l'électrification du camion 3018 30
Tableau 11 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 2012 ... 33
Tableau 12 : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 2012 34
Tableau 13: Paramètres d'électrification retenus pour le camion 2013 37
Tableau 14: Bénéfices financiers de l'électrification du camion 2012 38
Tableau 15: Recommandation d'électrification des camions de SET 39

Liste des figures

Figure 1 : Échelle de dénivelé allant du plus petit dénivelé au plus grand 8
Figure 2 : Équipe des dirigeants de SET transport 12
Figure 3 : Camions utilisés durant la période d'instrumentation, dans l'ordre de gauche à droite : Camions 2013, 3018 et 2012 13
Figure 4 : Fréquence des livraisons du camion 2013 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de SET 17
Figure 5 : Fréquence des livraisons du camion 3018 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de SET 24
Figure 6 : Fréquence des livraisons du camion 2012 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de SET 32

Liste des graphiques

Graphique 1 : Répartition des kilométrages quotidiens par camion 14
Graphique 2 : Répartition des vitesses – S.E.T Transport 15
Graphique 3 : Heures par jour au dépôt, sans les fins de semaine et les fériés 16
Graphique 4 : Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 2013 19
Graphique 5 : Journées de mesure du camion 2013, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh) 20
Graphique 6 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 2013 21
Graphique 7: Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 2013 22
Graphique 8: Émission sur la vie du camion 2013, Diesel vs. Électrique 23
Graphique 9: Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 3018 26
Graphique 10: Journées de mesure du camion 3018, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh) 27
Graphique 11 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 3018 28
Graphique 12 : Moments des déplacements et arrêts du camion 3018 29
Graphique 13 : Comparaison des coûts totaux de possession, camion 3018 30
Graphique 14 : Émissions sur la vie du camion 3018, Diesel vs. Électrique 31
Graphique 15: Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 2012 34
Graphique 16: Journées de mesure du camion 2012, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh) 35
Graphique 17 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 2012 36
Graphique 18: Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 2012 37
Graphique 19 : Émissions sur la vie du camion 2012, Diesel vs. Électrique 38

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 SET Transport, de Terrebonne.

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 :

89 % des journées se terminent en ayant parcouru moins de 275 km

94 % des arrêts de nuit au terminal durent 14 heures ou plus, assez pour ajouter700 kWh avec une borne de 50 kW pour chaque camion

Camion 2013 – Porteur classe 7		Effet sur le potentiel d'électrification
Critère	**Valeur**	
Distances	Moyennes	-
Constance	Constante	+
Dénivelé	Faible	+
Recharge en journée	Non	-
Chargement	Léger	+
Accessoires	Aucun	+

Estimation de consommation électrique en été	106 kWh / 100 km
Estimation de consommation électrique moyenne, sur 1 an	128 kWh / 100 km
Pénalité de chargement ?	Oui
Capacité nominale requise pour 90 % des journées sans recharger durant la journée	447 kWh
Batterie disponible ?	Non

Camion 3018 – Tracteur classe 8		Effet sur le potentiel d'électrification
Critère	**Valeur**	
Distances	Courtes	+
Constance	Constantes	+
Dénivelé	Faible	+
Recharge en journée	Plausible	+
Chargement	Léger	+
Accessoires	Aucun	+

Estimation de consommation électrique en été	154 kWh / 100 km
Estimation de consommation électrique moyenne, sur 1 an	193 kWh / 100 km
Pénalité de chargement ?	Non
Capacité nominale requise pour 90 % des journées	521 kWh
Batterie disponible ?	Oui

Camion 2012 – Porteur classe 7		Effet sur le potentiel d'électrification
Critère	**Valeur**	
Distances	Moyennes	-
Constance	Variées	-
Dénivelé	Faible	+
Recharge en journée	Non	-
Chargement	Léger	+
Accessoires	Aucun	+

Estimation de consommation électrique en été	116 kWh / 100 km
Estimation de consommation électrique moyenne, sur 1 an	139 kWh / 100 km
Pénalité de chargement ?	Oui
Capacité nominale requise pour 90 % des journées	534 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 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 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

L'entreprise SET est une entreprise qui propose des services d'entreposage, de transfert de marchandise et de livraison générale, etc. Bien qu'une majeure partie de ses opérations soit en charge dédiée (TL, *Total Load*) où la remorque est remplie de produits à livrer à un seul client, les trois camions analysés opèrent pour leur part en charge partielle (LTL, *Less-Than-Truck Load*), c'est-à-dire qu'ils parcourent un circuit rejoignant plusieurs entreprises variées chaque jour et y font des livraisons ou cueillettes représentant un chargement partiel pour le camion.

L'entreprise fut fondée en 1992 à Terrebonne. Elle opère présentement 12 camions qui sont chacun attitrés à un chauffeur. Les camions de l'entreprise circulent dans le Grand Montréal, en Ontario, en Estrie et au Saguenay.

L'entreprise compte une poignée de clients importants, qui sont des magasins de détail à grande surface ou leurs distributeurs, et des entreprises manufacturières. Toute la flotte de SET Transport attitrée au transport LTL dessert l'ensemble de ces clients.

Figure 2 : Équipe des dirigeants de SET transport

L'entreprise conserve actuellement ses camions 5 ans, car ceci correspond à la durée de leur garantie. Cette décision est basée sur la fiabilité actuelle des camions, qui est problématique pour l'entreprise surtout en ce qui a trait aux systèmes antipollution. Les gestionnaires de flotte ont signifié qu'historiquement ils gardaient leurs camions plus longtemps. Ils ont donc manifesté une ouverture à conserver un camion électrique 10 ans si la fiabilité était en hausse. Les analyses de rentabilité porteront donc sur ce scénario.

6. Véhicules analysés

Pour donner suite aux discussions avec le gestionnaire du parc, les trois camions retenus pour l'analyse sont les unités 2012, 2013 et 3018. Ce sont deux camions porteurs de classe 6 et un tracteur de classe 8, respectivement.

Figure 3 : Camions utilisés durant la période d'instrumentation, dans l'ordre de gauche à droite : Camions 2013, 3018 et 2012

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. En effet, les trois véhicules font des livraisons locales dans le Grand-Montréal et ils reviennent au port d'attache le soir.

Ces unités ont été choisies, car elles effectuent les plus courtes distances parmi les camions de l'entreprise. La flotte compte 2 ou 3 autres camions locaux comme ceux-ci, mais le restant parcourt des distances beaucoup plus grandes. Cela revient donc à dire qu'environ 40 % de la flotte a des opérations similaires.

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, 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 SET.

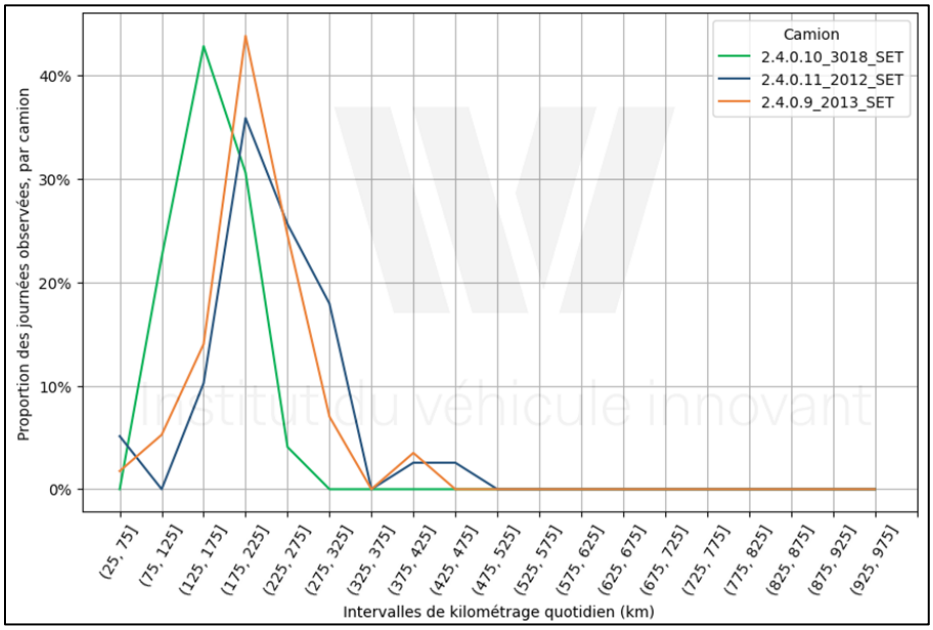
Tableau 2 : Informations de base sur l'utilisation des véhicules de SET transport

Camion #	2013	3018	2012
Distance parcourue			
Durant le test	11 049 km	7 010 km	7 562 km
Annuellement (estimée)	44 196 km	28 040 km	30 250 km
Carburant			
Consommé durant le test	2 906 L	3 357 L	2 352 L
Consommé annuellement (estimé)	11 624 L	13 430 L	9 407 L
Consommation moyenne	24.2 L/100 km	43.7 L/100 km	27.1 L/100 km
Ralenti			
Temps par jour en moyenne	1.2 h	3 h	2,2 h
Carburant consommé au ralenti par jour	5.2 L	7.5 L	7.1 L
Carburant consommé par année (estimé)	1 141 L	1 405 L	1 055 L
Opérations			
Vitesse moyenne en déplacement	45 km/h	47 km/h	45 km/h
Nombre d'arrêts par jour	11	7.1	9
Nombre de jours actifs durant l'analyse	51 jours	44 jours	33 jours
Masse totale moyenne	9 430 kg	17 556 kg	9 456 kg

Il est possible de constater que les camions classe 7, les 2012 et 2013, consomment beaucoup moins de diesel que le camion 3018, qui est de classe 8. L'unité 2012 montre une consommation un peu plus élevée que le camion 2013.

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

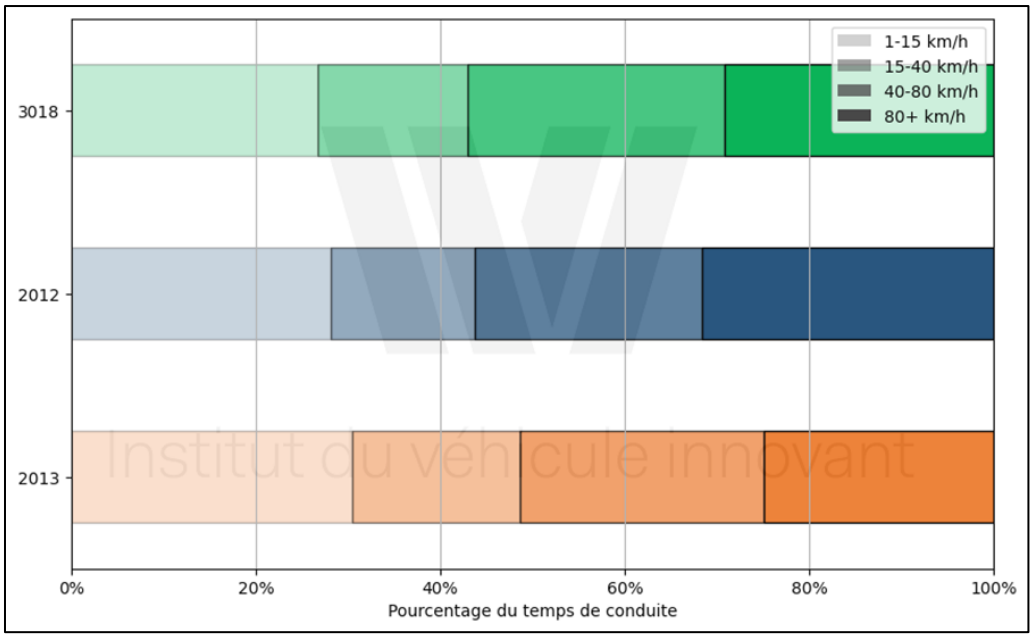


En observant le Graphique 1, il est possible de remarquer que le camion 3018 parcourt en moyenne moins de kilométrage par jour que les camions 2013 et 2012. En effet, environ 95 % du temps, la distance quotidienne parcourue par ce camion est inférieure à 225 km, de même que 65 % du temps, elle est inférieure à 175 km. Durant la période de collecte de données, le camion 3018 n'a jamais dépassé la barre des 275 km par jour.

Les camions 2012 et 2013 montrent une moyenne oscillant entre 125 et 275 kilomètres par jour. Cependant, ces deux camions dépassent 275 kilomètres par jour environ 20 % du temps.

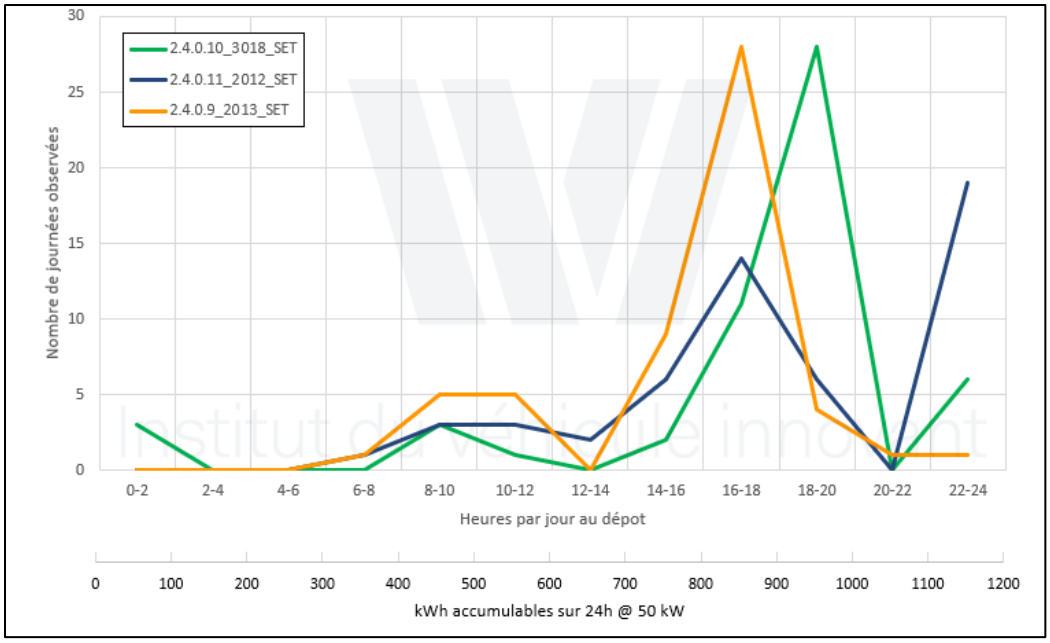
Un autre facteur d'importance est la vitesse du véhicule. L'augmentation de la vitesse cause une hausse plus drastique de la consommation d'un véhicule électrique qu'un véhicule diesel. Le graphique suivant apporte plus de précisions sur la répartition du temps dans différentes plages de vitesses. De 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 – S.E.T Transport



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 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, car celles-ci sont moins coûteuses à acquérir, installer puis opérer. Les trois véhicules suivis reviennent au dépôt de SET la nuit et y passent plusieurs heures, la plupart du temps. Ils disposent donc de cette longue période pour s'y recharger. Le Graphique 3 montre la répartition des heures passées sur le terrain de transport SET à l'arrêt.

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



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.

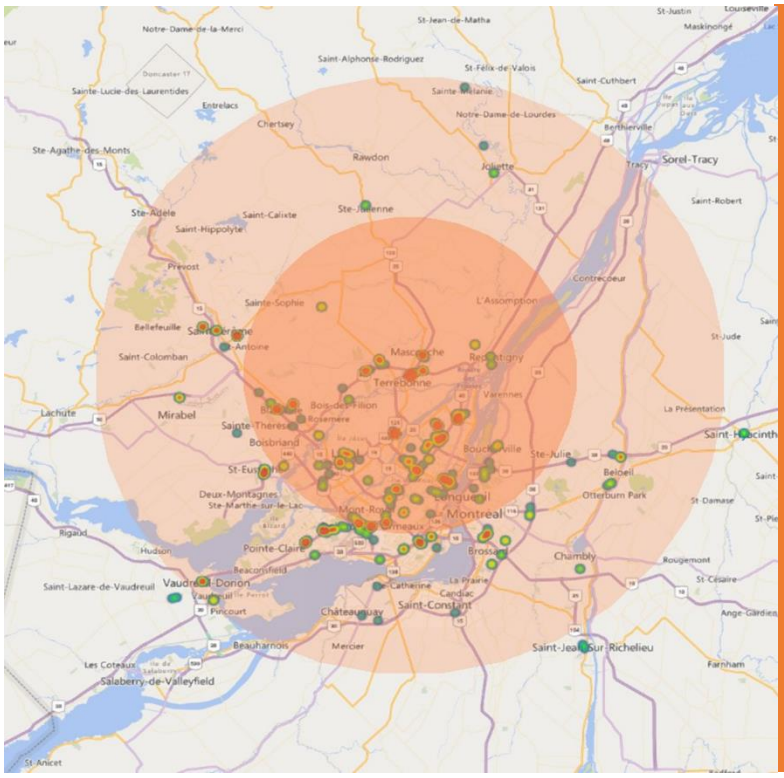
Les trois camions analysés disposent d'une durée d'arrêt au terminal de SET transport supérieur à 14 h par jour et ce, 94 % des jours.

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 seconde portion de ce rapport.

7. Analyse du camion 2013

Le camion au diesel #2013 est utilisé pour des livraisons de marchandises sèches à des magasins et commerces. Il effectue des livraisons LTL (*Less-Than-truck Load*) surtout sur l'île de Montréal. Les livraisons sont souvent très près les unes des autres. Le camion part souvent de l'entrepôt de SET partiellement chargé et fait plusieurs arrêts dans la journée afin de faire des cueillettes et des livraisons.

Ses trajets varient beaucoup d'une journée à l'autre, mais ils sont souvent dans un rayon de 25 à 30 km de l'entrepôt. Il revient rarement à l'entrepôt durant la journée et en fin de journée il revient souvent avec un chargement léger à livrer le lendemain ou redistribuer à un autre camion. La carte suivante permet de visualiser la localisation et la fréquence des livraisons :



La majeure partie des livraisons sont effectuées dans un rayon de 50 km à partir du port d'attache, et même une très grande partie dans un rayon de 25 km.

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

Quelques arrêts ont été faits à Saint-Hyacinthe et à Sherbrooke, mais la majorité des arrêts se font sur l'île de Montréal.

Le véhicule arrête rarement à l'entrepôt durant la journée. Durant une journée typique, il part vers 7h du matin et il revient à l'entrepôt en début d'après-midi.

Figure 4 : Fréquence des livraisons du camion 2013 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de SET

Le dénivelé du territoire parcouru est un critère important dans l'évaluation de la consommation d'énergie. Le camion 2013 évolue principalement dans la région métropolitaine de Montréal. Ce territoire est majoritairement plat.

Cet indice de côtes à gravir indique que le camion devra monter en moyenne un dénivelé positif de 2,1 mètres pour chaque kilomètre parcouru.

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 5 km. Il est donc considéré que le camion a été inactif à ces moments.

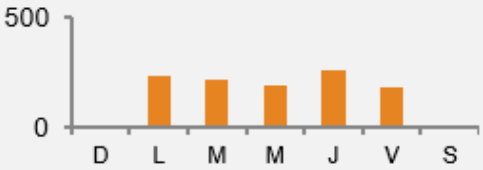
Tableau 3 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 2013

Dans la première section, la valeur qui aidera le plus le gestionnaire est probablement la distance au 90e percentile, qui est de 278 km en une journée. Il se pourrait en effet 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 que la moyenne et la médiane sont très proches, ce qui amène à penser que la répartition des distances est plutôt égalitaire. En effet, il est possible de constater qu'il y a peu de journées foncées. Seulement deux journées sortent réellement du lot.

Le camion semble rouler 5 jours par semaine et il parcourt des distances semblables chaque semaine. Les distances sont souvent effectuées durant le jour et le camion revient rarement à l'entrepôt durant la journée. Ceci est important pour l'électrification, car le camion doit avoir la charge nécessaire pour faire la distance moyenne sans recharge durant la journée.

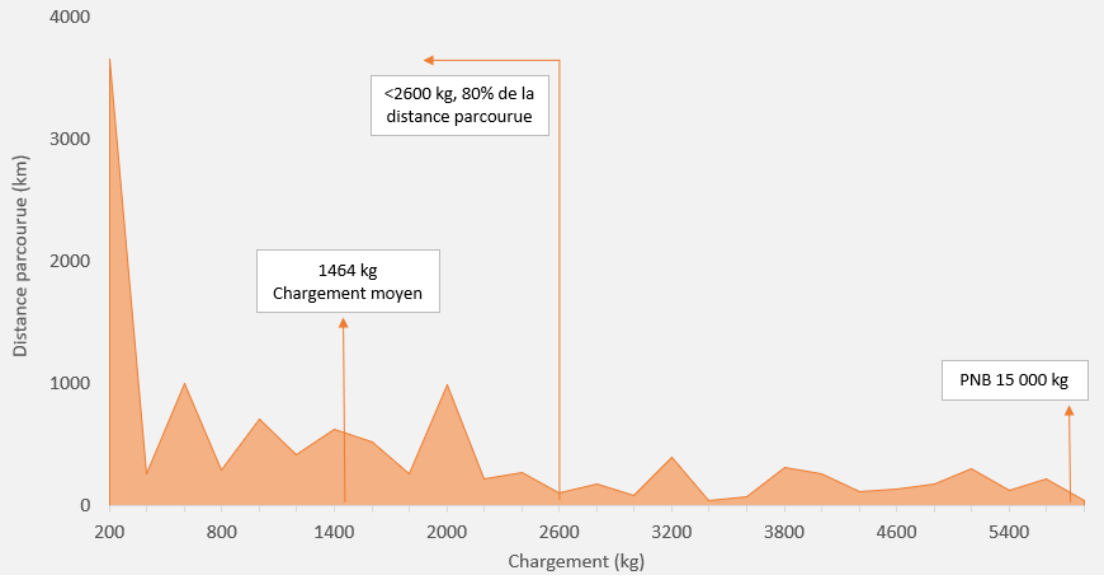
Max	423	km
90%	278	km
Med	206	km
Moy	217	km
σ	60	km
CV	28%	



	D	L	M	M	J	V	S
déc.	-	-	-	-	-	-	-
	-	224	201	206	246	117	-
	-	272	186	260	198	86	-
	-	-	-	162	378	172	-
janv.	-	-	-	137	151	106	-
	-	212	258	190	257	222	-
	-	279	222	232	255	195	-
	-	189	212	187	212	260	-
	-	266	171	178	423	204	-
févr.	-	176	292	153	282	189	-
	-	265	195	237	205	226	-
	-	283	262	139	247	192	-
	-	205	202	-	-	-	-
mars	-	-	-	-	-	-	-

L'énergie requise pour chaque accélération et chaque montée est directement proportionnelle à la masse totale du véhicule, incluant son chargement. Puisque le camion 2013 effectue plusieurs livraisons variées au fil des journées, le poids de la cargaison transportée a été noté pour chaque trajet. Le graphique suivant montre le chargement typiquement transporté.

Graphique 4 : Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 2013



Il arrive fréquemment que le camion 2013 revienne vide à l'entrepôt. Son déplacement sans chargement représente plus de 3 600 km, soit 31 % de l'essai. Également, 80 % des déplacements se font avec un chargement inférieur à 2 600 kg.

Un véhicule électrique, plus lourd à cause du poids de sa batterie, entraînerait une pénalité de chargement que pour 3 % de la distance parcourue durant l'essai.

En résumé, l'analyse des déplacements du camion 2013 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 2013

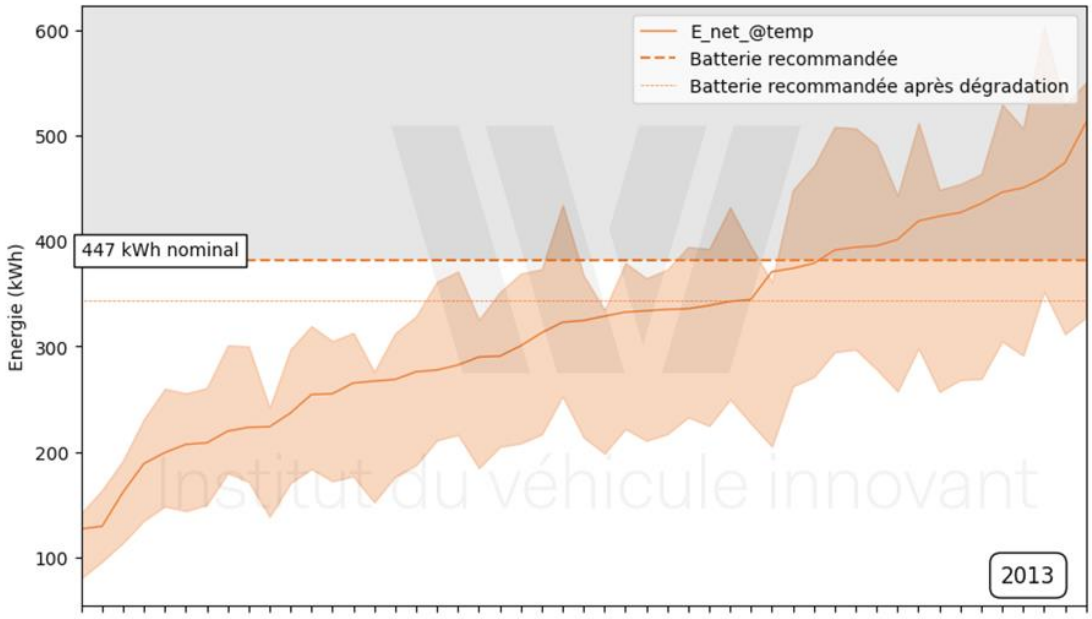
Critère	Valeur	Effet sur le potentiel d'électrification
Distances	Moyenne	-
Constance	Constante	+
Dénivelé	Faible	+
Recharge en journée	Non	-
Chargement	Léger	+
Accessoires	Aucun	+

8. Scénario d'électrification pour le camion 2013

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. 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 2013, 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 447 kWh totaux disposerait de 382 kWh avec marge de confort lorsque neuf (ligne horizontale pointillée épaisse), cette batterie permettrait au camion 2013 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.

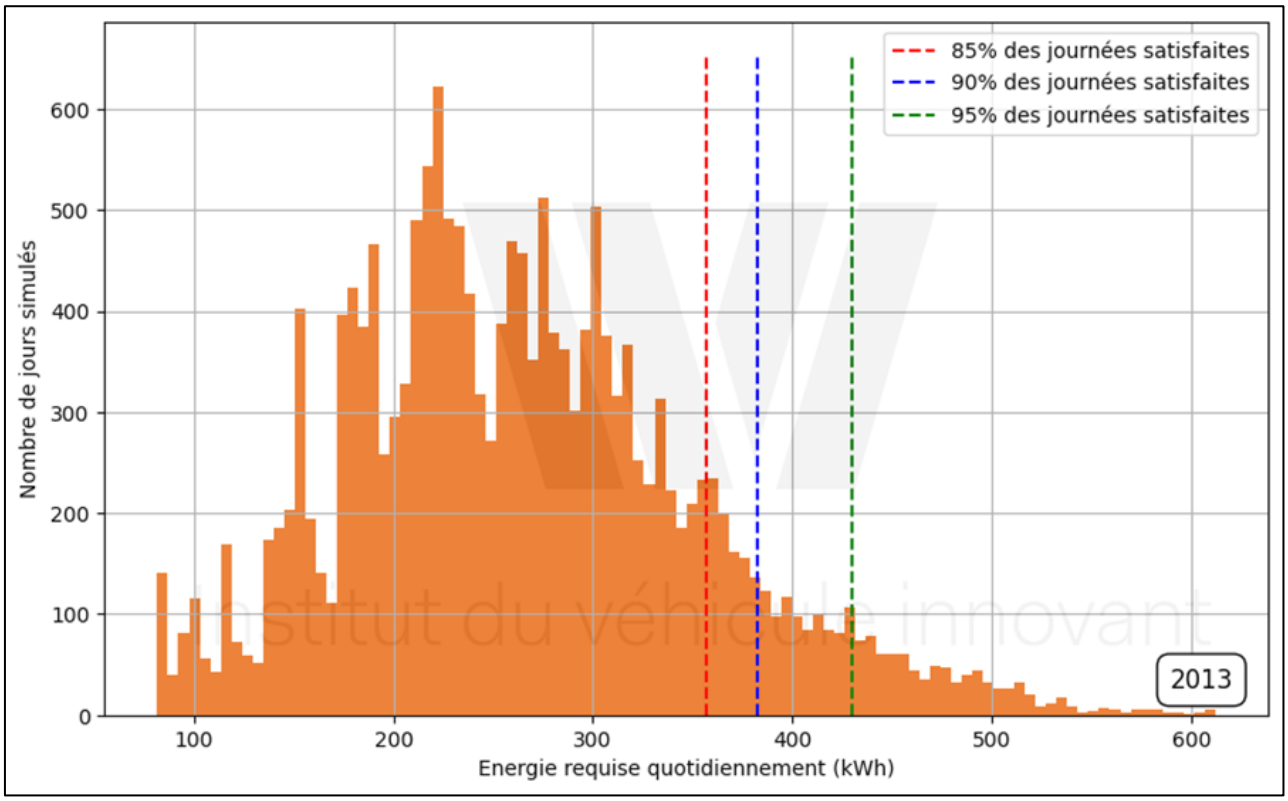
La consommation moyenne du camion à 20°C est estimée à 106 kWh / 100 km. Elle sera plus élevée en hiver, pouvant être jusqu'à 50 % supérieure lors des quelques jours de grands froids.

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 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 2013



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 382 kWh, ce qui équivaut à une batterie dotée d'une énergie nominale 447 kWh.

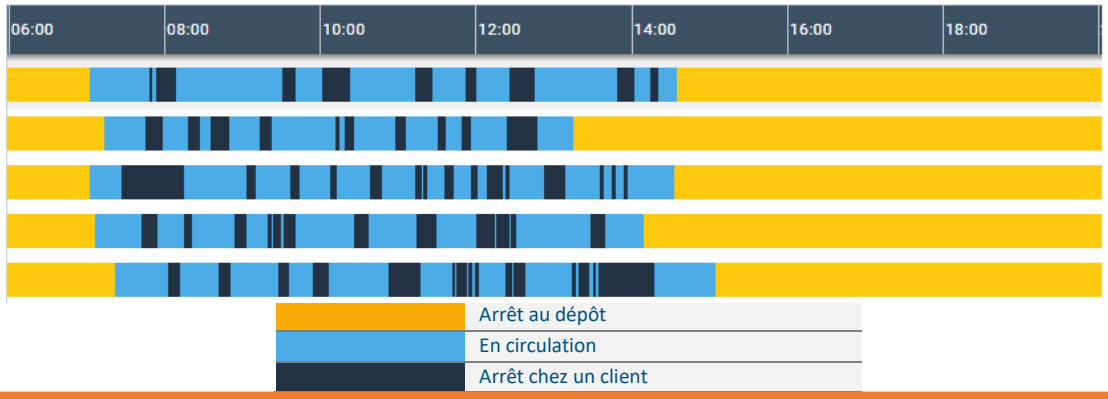
Pour compléter 95 % des journées, la capacité nominale est de 503 kWh.

Pour compléter 85 % des journées, la capacité nominale est de 417 kWh.

Les configurations de batteries offertes en 2023 pour les camions électriques de classes 6 et 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 journée typique du camion 2013. 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 7: Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 2013



En partant de la gauche, on observe que le camion est arrêté au dépôt jusqu'à environ 7h le matin. Ensuite il effectue des livraisons jusqu'en début ou milieu d'après-midi.

Le camion effectue en moyenne une dizaine d'arrêts chez des clients au cours de sa journée, qui ne dure jamais plus que 30 minutes. Les clients sont également variés tout au long de la semaine.

Tableau 5 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 2013

Capacité nominale requise pour satisfaire 90% des journées	447 kWh
Batterie recommandée disponible sur le marché	Non

En date de la rédaction de ce rapport, aucun produit existant ne propose une batterie ayant la capacité nominale requise pour électrifier le camion 2013. La plus grosse batterie disponible sur le marché pour les camions de classe 7 est de 315 kWh, ce qui permettrait au camion de compléter environ 70 % de ses journées au courant d'une année.

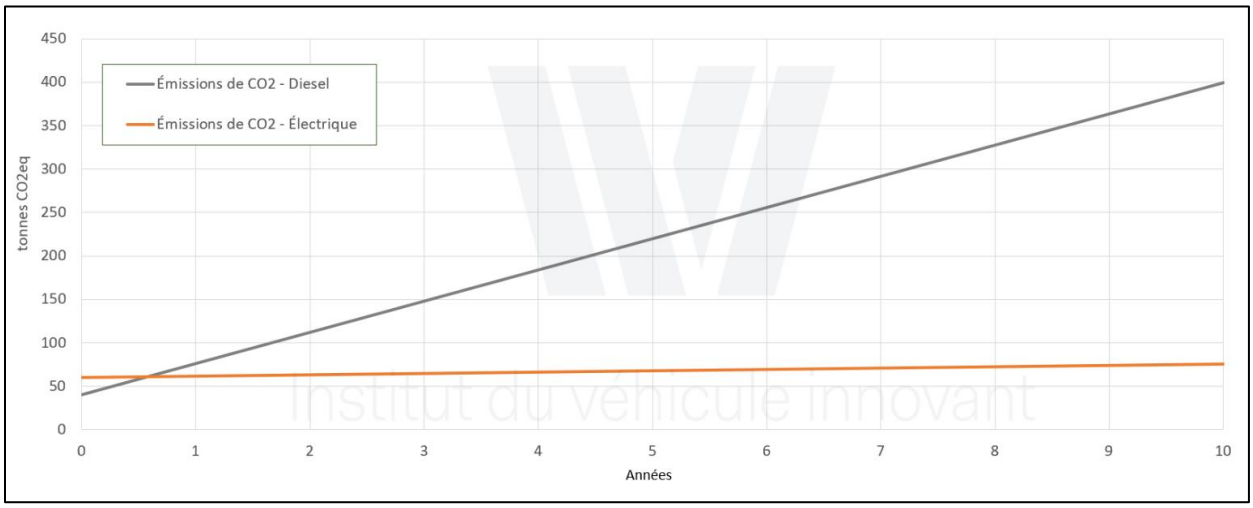
Les bénéfices financiers ne peuvent pas être calculés pour un camion inexistant. Cependant, une hypothèse sur l'économie possible en coût énergétique d'un camion de classe 7 avec une batterie de 444 kWh a été posée. Ce calcul a été effectué avec un coût de 2 $ par litre de diesel et de 0,12 $ par kilowattheure. Une économie possible de 160 000 $ serait envisagée sur 10 ans.

Tableau 6 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 2013

Coût annuel de carburant avant électrification	21 926 $
Coût annuel d'électricité	5 918 $
Économie annuelle de coûts d'énergie	16 008 $
Économie potentielle après 10 ans	160 080 $

Il est possible de calculer le bénéfice environnemental de l'électrification de cette route, celui-ci est représenté dans le graphique ci-dessous. Ce bénéfice n'est pas négligeable puisque l'électrification éviterait la propagation de plus de 324 tonnes de CO2. Le point d'équivalence d'émission des GES arriverait après seulement 25 350 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 8: Émission sur la vie du camion 2013, Diesel vs. Électrique



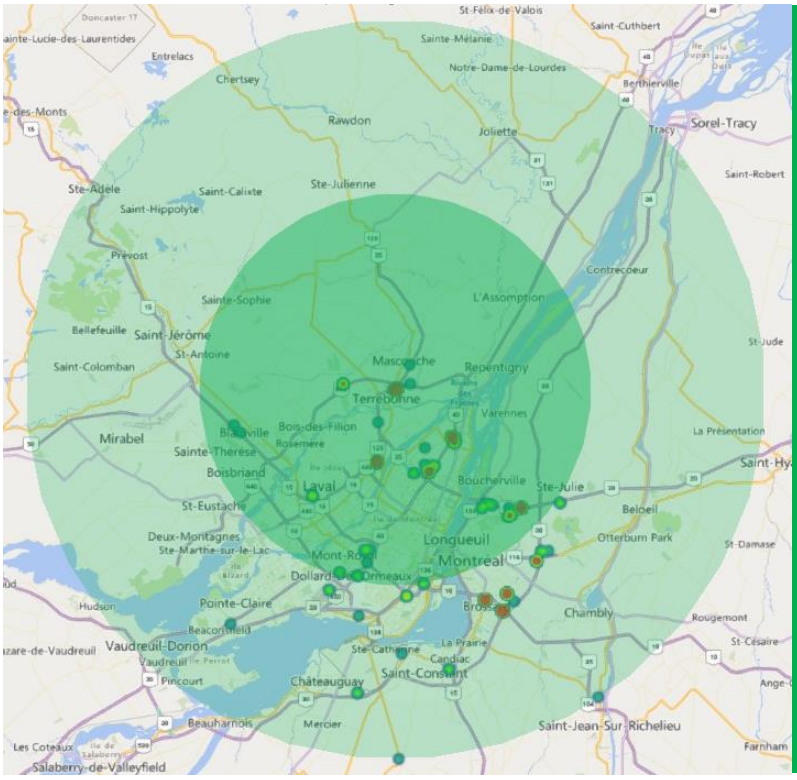
Le camion 2013 ne s'arrête pas assez longtemps pour recharger et sa consommation quotidienne requiert une batterie de 447 kWh, ce qui n'existe pas sur le marché actuellement pour un camion de classe 7. L'IVI ne recommande pas l'électrification pour ce camion.

Dans l'éventualité où un tel camion serait sur le marché, son surcoût incluant l'infrastructure devrait être inférieur à 160 000 $ pour que celui-ci soit rentable.

9. Analyse du camion 3018

Le camion 3018 est utilisé pour des livraisons de marchandises sèches à des magasins et commerces. Il effectue des livraisons LTL (*Less-Than-truck Load*) dans l'est de Montréal et sur la rive sud.

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 :



La majorité des livraisons effectuées sont regroupées à 8 endroits principaux

La moitié de ceux-ci se retrouvent dans un rayon de 25 kilomètres, et les autres à l'intérieur de 50 kilomètres.

Le camion ne revient pas au dépôt de S.E.T pour des périodes de temps significatives entre ses livraisons. Toutefois, il se retrouve fréquemment aux mêmes endroits : un de ces arrêts, visité tous les jours, pourrait servir à recharger le véhicule si un partenariat était convenu avec le client.

Figure 5 : Fréquence des livraisons du camion 3018 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de SET

Dénivelé faible

1,9 m/km

Le camion 3018 parcourt des trajets dans la vallée du Saint-Laurent où le relief est relativement plat.

Le dénivelé moyen lors des trajets de ce camion est de 1,9 mètre par kilomètre parcouru.

Camion # 3018

Freightliner Cascadia 113 - 2011 | Tracteur Classe 8 – PNB 36 363 kg

Le détail des distances parcourues chaque jour de l'essai 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.

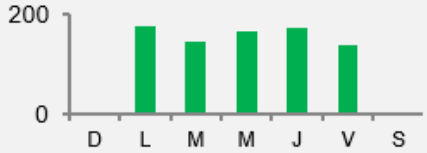
Tableau 7 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 3018

Ici, la tendance des déplacements du camion 3018 est facilement comprise en observant le tableau des distances quotidiennes présenté en dégradé de couleurs selon la distance. Plus une case est foncée, plus la distance parcourue lors de cette journée est élevée.

Le camion a un horaire stable, effectuant un nombre similaire de kilomètres chaque jour. En moyenne, celui-ci parcourt aux alentours de 160 km/jour, avec très peu de variances (écart-type de 39 km).

Le kilométrage maximum effectué en une journée est de 251 km, et a été effectué le 19, où le camion a visité plusieurs clients différents sur la rive sud lors d'une même journée. Il faut noter que cette journée, le camion a également parcouru 20 km pour se rendre au garage pour des réparations, où il est resté jusqu'au mardi suivant (24 janvier). Autrement, les kilométrages hebdomadaires se situent en dessous de 211 km/jour.

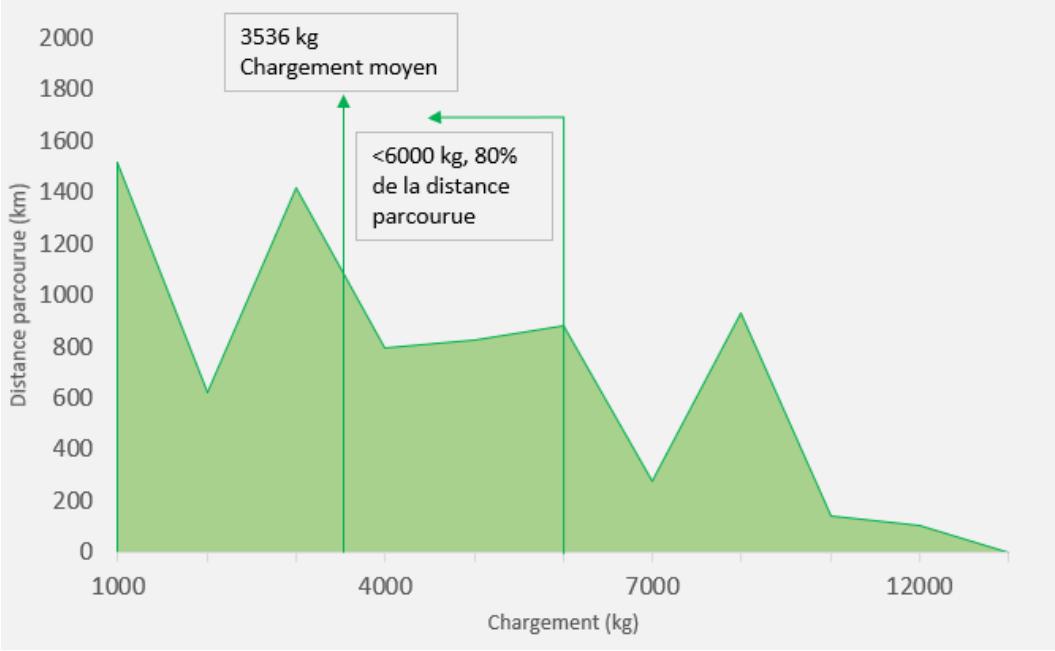
Max	251	km
90%	201	km
Med	159	km
Moy	160	km
σ	39	km
CV	25%	



	D	L	M	M	J	V	S
déc.	-	-	-	-	-	-	-
	-	175	157	172	211	122	-
	-	170	157	175	128	122	-
	-	-	-	122	209	122	-
	-	-	-	150	161	124	-
janv.	-	188	156	159	149	125	-
	-	194	177	155	251	-	-
	-	-	24	250	-	-	-
	-	141	135	167	178	200	-
févr.	-	-	-	180	190	125	-
	-	149	202	174	122	165	-
	-	186	-	125	122	122	-
	-	197	-	-	-	-	-
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 3018



Dans le cas du camion 3018, 80% de la distance fut parcourue avec un chargement de moins de 6 000 kg, ce qui est moins du tiers du chargement permis.

La moyenne se situe à 3 536 kg, et le maximum durant l'essai à 11 818 kg.

Ce véhicule n'est jamais chargé près de sa limite de Poids Nominal Brut (PNB). L'ajout d'une batterie lourde n'entraînera aucune limitation du chargement.

En résumé, l'analyse des déplacements du camion 3018 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 3018

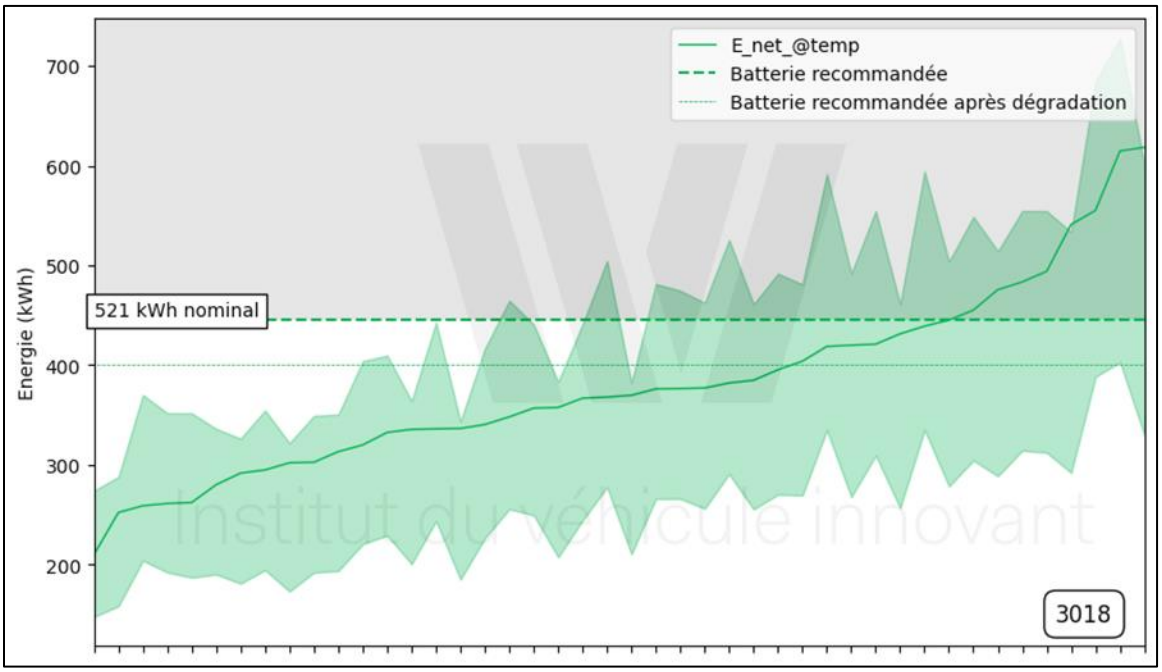
Critère	Valeur	Effet sur le potentiel d'électrification
Distances	Courtes	+
Constance	Constantes	+
Dénivelé	Faible	+
Recharge en journée	Plausible	+
Chargement	Léger	+
Accessoires	Aucun	+

10. Scénario d'électrification pour le camion 3018

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 3018, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh)



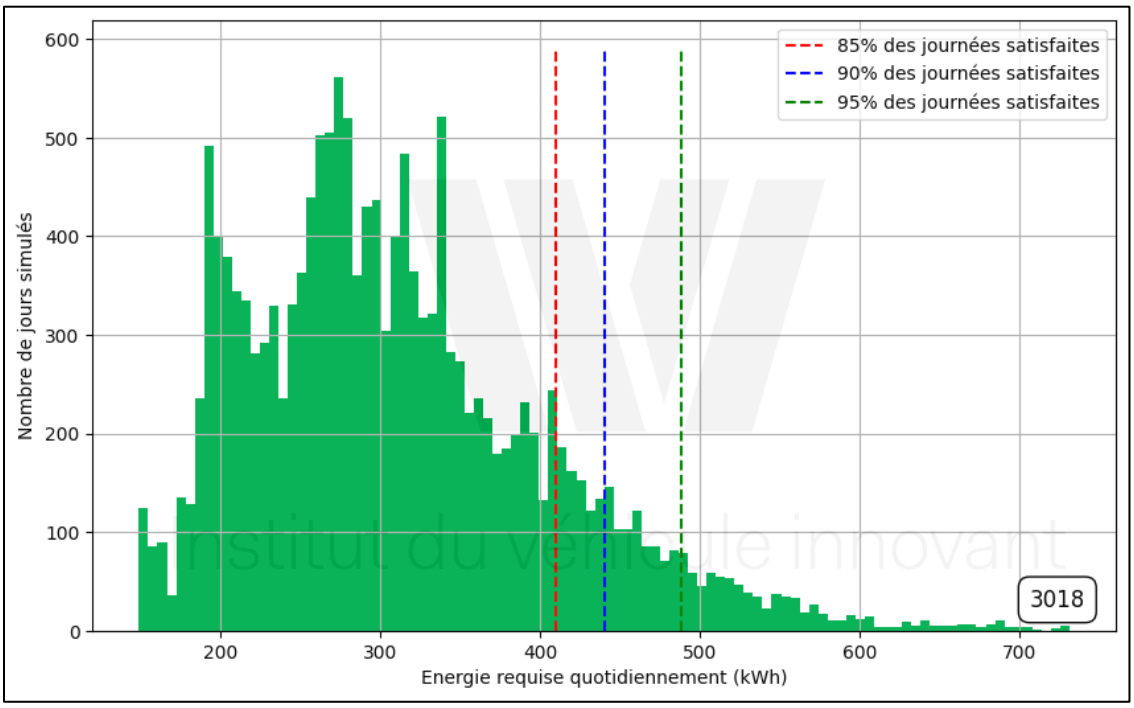
Guide d'interprétation du Graphique 10:

- 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 521 kWh disposerait de 445 kWh avec marge de confort lorsque neuf (ligne horizontale pointillée épaisse), cette batterie permettrait au camion 3018 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 154 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 3018



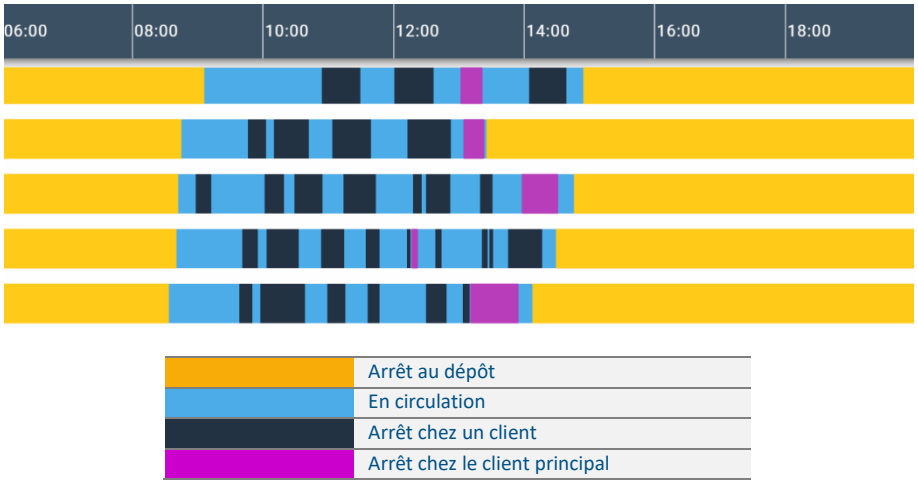
Une batterie de 521 kWh nominale permettrait alors de réaliser 90 % des journées sur une année moyenne en un seul cycle de décharge de la batterie, tandis que des batteries de 484 et de 577 kWh pourraient respectivement satisfaire 85 et 95 % des journées sur une année moyenne.

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.

Durant la période de mesure, le camion 3018 ne s'est pas arrêté au dépôt durant la journée. Il n'aurait donc pas pu bénéficier de recharges à l'entrepôt de SET entre ses trajets quotidiens. Les moments possibles restants sont donc la nuit. L'horaire des déplacements et des arrêts du camion peut être visualisé sur le Graphique 12, ci-dessous. Ce graphique représente les déplacements pour une semaine typique du camion 3018. La semaine représentée est celle du 13 au 17 février 2023.

Sur ce graphique, les bandes jaunes sont les moments où le camion est arrêté au dépôt de SET. Les heures de la nuit ont été coupées, car il n'y a aucun déplacement. On y constate que le véhicule circule généralement entre 8:00 et 15:00. Le Graphique 12 permet également de vérifier que le camion passe minimalement 16h par jour à l'entrepôt.

Graphique 12 : Moments des déplacements et arrêts du camion 3018



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 ajoutée quotidiennement. Celle-ci serait donc d'au moins 720 kWh (16h * 45 kW). Cette valeur est plus que suffisante pour effectuer une charge complète.

Les paramètres retenus pour un scénario d'électrification du camion 3018 seraient donc les suivants :

Tableau 9: Paramètres d'électrification retenus pour le camion 3018

Capacité de la batterie embarquée	521 kWh
Puissance de la borne de recharge	BRCC 50 kW
90 % des opérations remplies ?	Oui

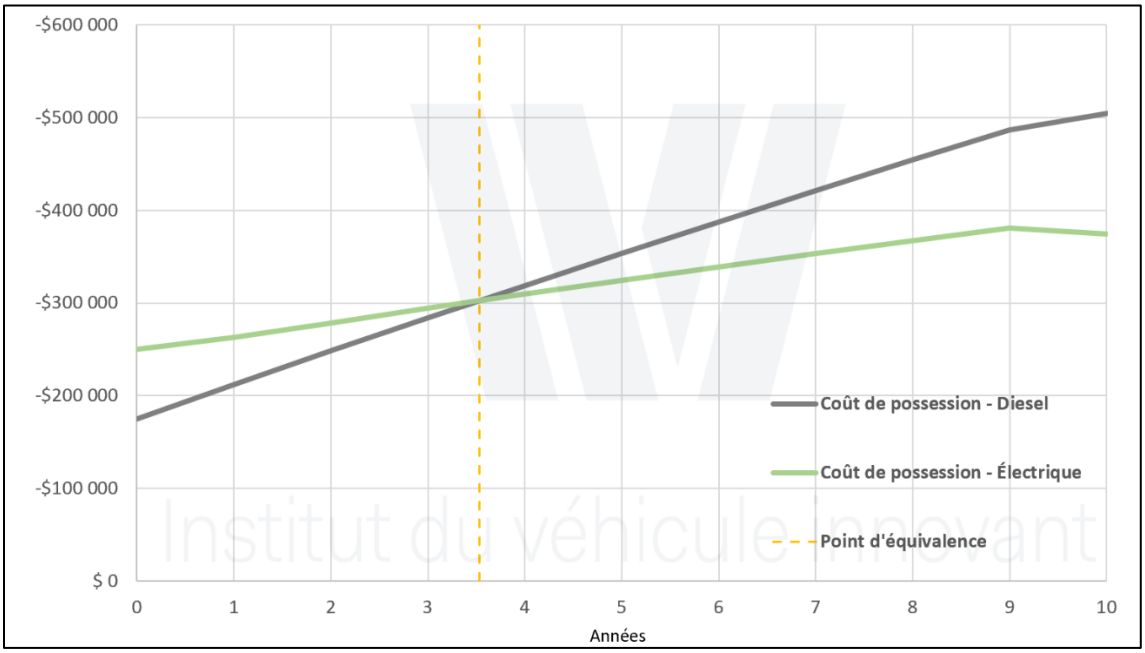
Le scénario d'électrification précédent pourrait apporter les bénéfices financiers indiqués au tableau 9. Les bénéfices sont comptabilisés sur 10 ans, soit la durée que SET Transport souhaiterait conserver ce type de véhicule.

Tableau 10: Bénéfices financiers de l'électrification du camion 3018

Coût annuel de carburant avant électrification	26 919 $
Coût annuel d'électricité	5 848 $
Économie annuelle de coûts d'énergie	21 071 $
Surcoût total à l'achat (après subventions)	75 000 $
Période de retour sur investissement	**3,5 années**
Bénéfice net après 10 ans	**129 838 $**

Sur une période de 10 ans, le camion électrique aurait un coût total de 374 340 $ tandis que le camion diesel serait plutôt de 504 178 $. La différence représente une économie potentielle de 26 % au moment de la disposition. Le graphique suivant montre cette économie. 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 13 : Comparaison des coûts totaux de possession, camion 3018

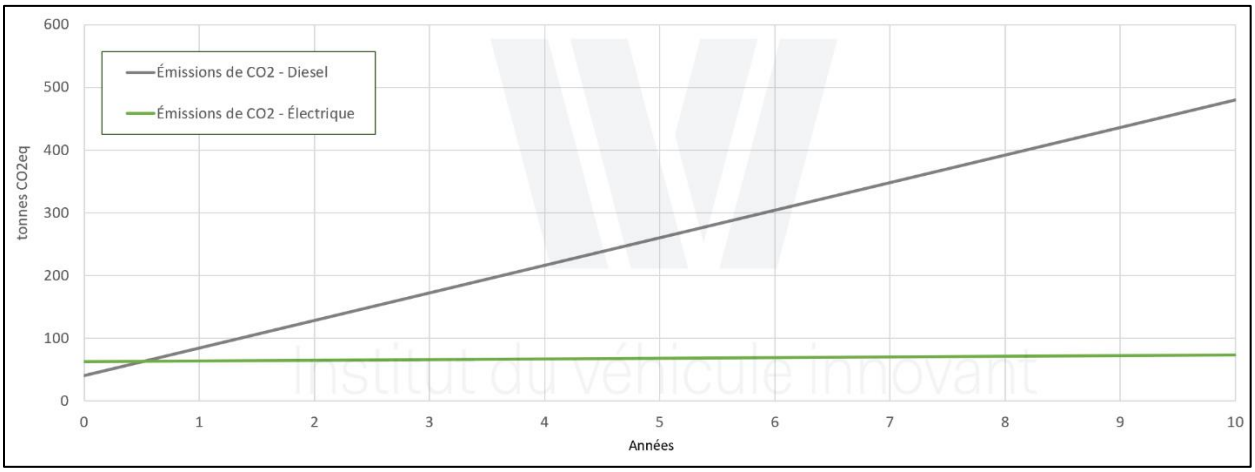


Dans le scénario d'électrification présenté pour le camion 3018, celui-ci serait en mesure de compléter l'entièreté des journées, hormis quelques journées d'hiver plus froides où un camion diesel pourrait être utilisé pour le remplacer. Le point d'équivalence des émissions arrive vers 15 900 km, soit après seulement six mois d'opération. Après 10 ans, le camion aura évité l'émission de 405 tonnes de CO_2 équivalent, soit environ 6,5 fois moins qu'un camion diesel ayant parcouru la même distance. Ces valeurs viennent des analyses indépendantes de l'IVI, basées sur des études ICCT.

Camion # 3018

Freightliner Cascadia 113 - 2011 | Tracteur Classe 8 – PNB 36 363 kg

Graphique 14 : Émissions sur la vie du camion 3018, Diesel vs. Électrique

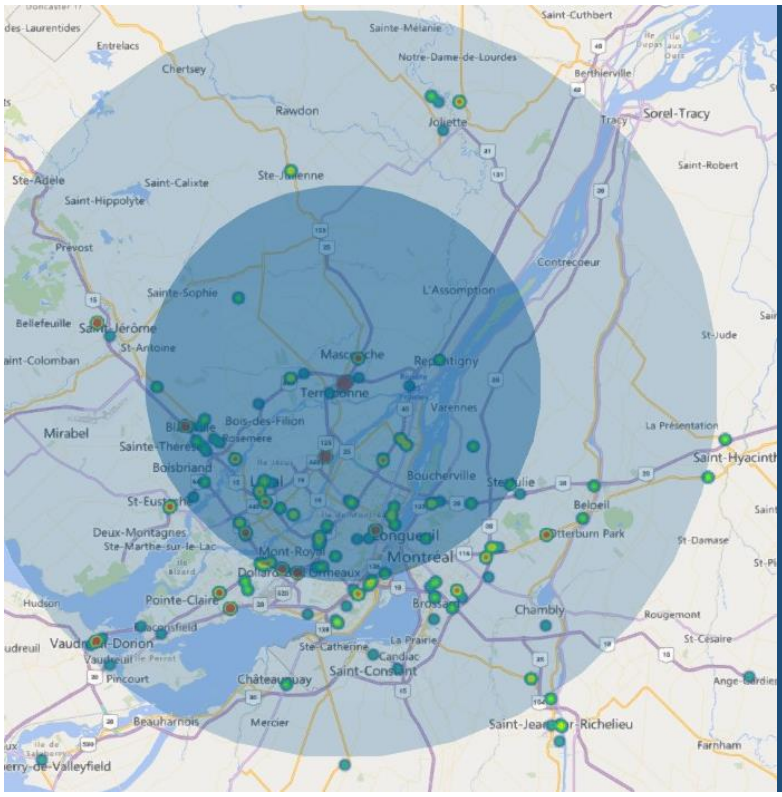


Le camion 3018 a un bon potentiel d'électrification. Ses routes sont constantes et peu chargées, ce qui permet une électrification avec un batterie de taille raisonnable et un chargeur de faible puissance, soit 50 kW. De plus, l'économie potentielle sur 10 ans de 26 % et la diminution des GES est très intéressante.

11. Analyse du camion 2012

Le camion 2012 est utilisé pour des livraisons de marchandises sèches aux mêmes magasins et commerces que les deux autres véhicules mentionnés précédemment.

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 :



Une très grande partie des livraisons et cueillettes se trouve concentrée aux alentours de Montréal et de la Rive-Sud de Montréal.

La majorité des arrêts sont effectués dans un rayon de 50 km de l'entrepôt de SET. Un arrêt fréquent à Vaudreuil-Dorion est à la limite de ce rayon de 50 km. Quelques trajets ont dépassé ce rayon dont quelques arrêts à Saint-Jean-sur-Richelieu, Saint-Hyacinthe et Sherbrooke. Ces destinations sont très peu fréquentes dans l'ensemble des déplacements effectués.

Figure 6 : Fréquence des livraisons du camion 2012 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de SET

Le camion 2012 parcourt des trajets dans la région métropolitaine de Montréal où le relief est relativement plat. Une région peu montagneuse est préférable pour l'électrification.

Le dénivelé moyen lors des trajets de ce camion est de 2,0 mètres par kilomètre parcouru.

Camion # 2012

Freightliner M2 106 - 2019| Porteur Classe 7 – PNB 15 000 kg

Le détail des distances parcourues chaque jour de l'essai 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 5 km. Le graphique du milieu montre les moyennes de déplacement pour chaque journée de la semaine.

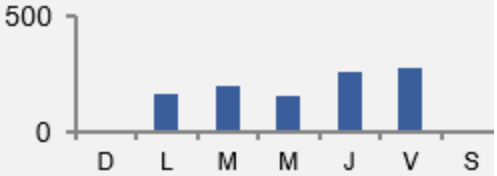
Tableau 11 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 2012

Le camion 2012 présente un cas particulier, car il n'a pas roulé beaucoup durant la période d'essai et ses distances n'étaient pas constantes. En effet, l'écart-type de 96 km démontre l'étendue des données récoltées.

Il est possible de constater que durant la période d'essai, le camion 2012 n'a pas eu de routine, c'est-à-dire qu'il n'a pas de trajet typique. Chaque semaine, les trajets et les distances semblent changer.

Les distances sont effectuées durant le jour et le camion revient à l'entrepôt en fin de journée. Il revient rarement à l'entrepôt durant la journée. Cette information est importante pour l'électrification, car le camion doit avoir la charge nécessaire pour compléter la journée sans recharge. Pour répondre aux besoins de l'entreprise, il serait opportun de viser à être en mesure de compléter les journées plus longues que la moyenne, et ce, autant en été qu'en hiver.

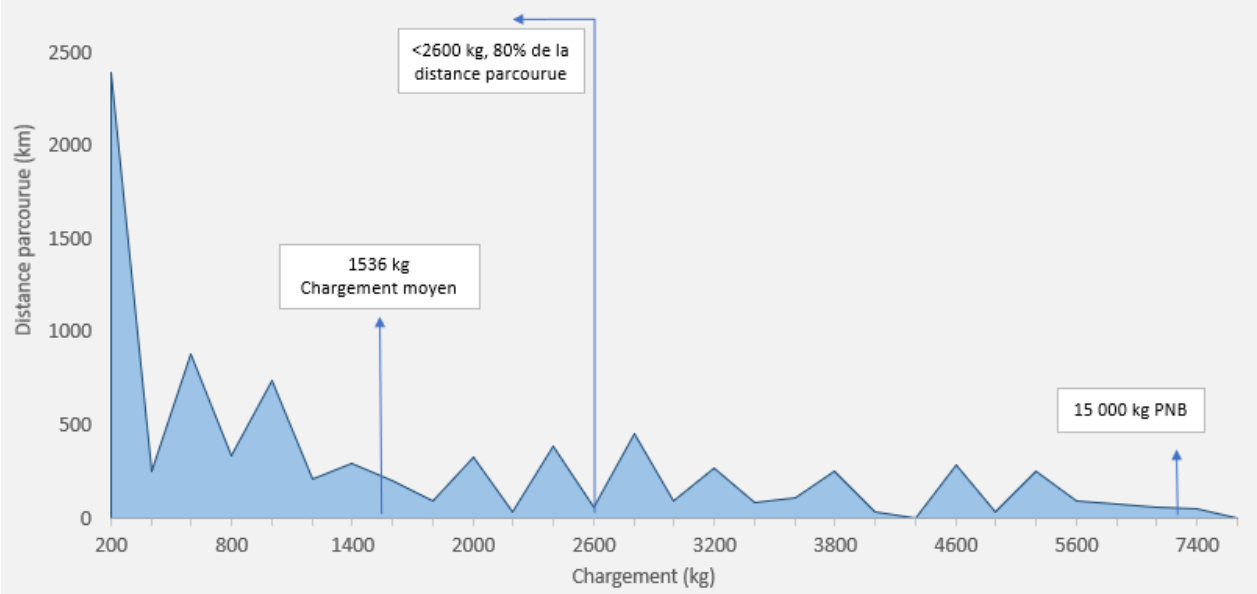
Max	451	km
90%	302	km
Med	217	km
Moy	211	km
σ	96	km
CV	45%	



	D	L	M	M	J	V	S
déc.	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	268	201	196	-	-
	-	232	223	209	210	239	-
	-	-	-	181	270	383	-
janv.	-	-	202	136	203	251	-
	-	-	40	38	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	177	209	12	211	277	-
	-	178	313	142	247	297	-
févr.	-	223	-	-	277	236	-
	-	13	-	268	451	-	-
	-	12	-	258	-	271	-
	-	314	160	-	-	-	-
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 15: Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 2012



En observant le Graphique 15, il est possible de venir à la conclusion que le poids total du camion 2012 s'approche très rarement du PNB permis. Ce chargement est presque identique à celui du camion 2013. En fait, sa charge ne dépasse que très rarement les 2600 kg.

Selon cette analyse, il serait donc possible d'effectuer les trajets réguliers avec un camion électrique qui afficherait un surpoids dû à sa batterie de traction.

En résumé, l'analyse des déplacements du camion 2012 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

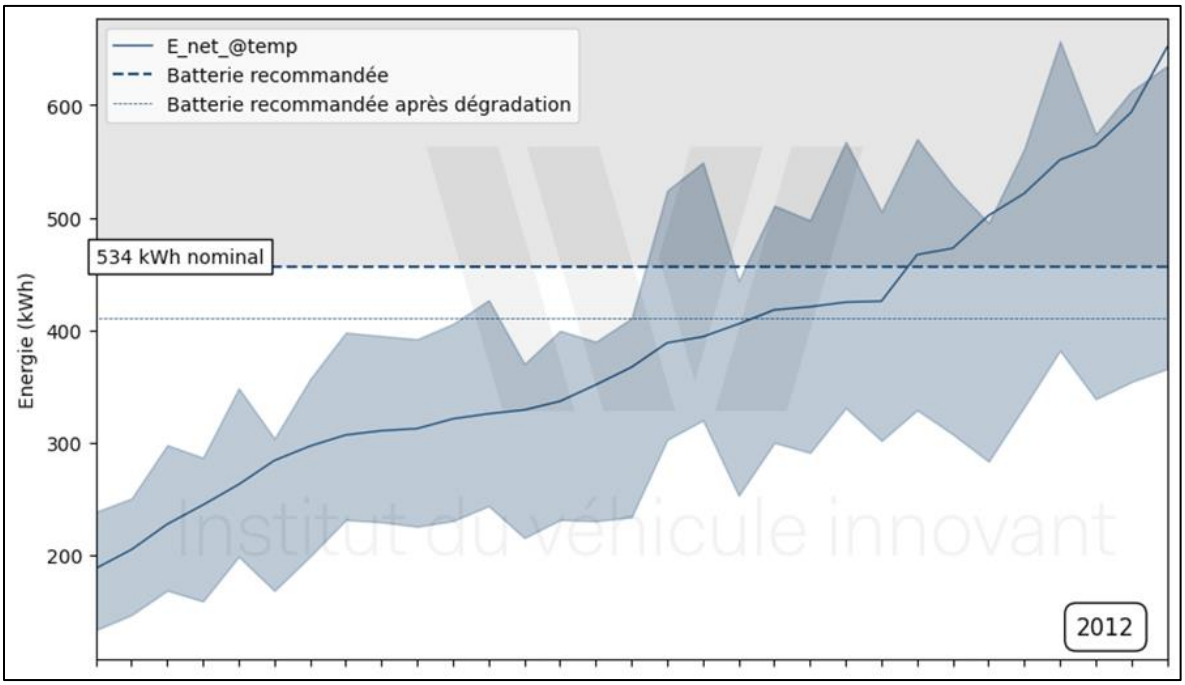
Critère	Valeur	Effet sur le potentiel d'électrification
Distances	Moyennes	-
Constance	Variées	-
Dénivelé	Faible	+
Recharge en journée	Non	-
Chargement	Léger	+
Accessoires	Aucun	+

12. Scénario d'électrification pour le camion 2012

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 2012, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh)



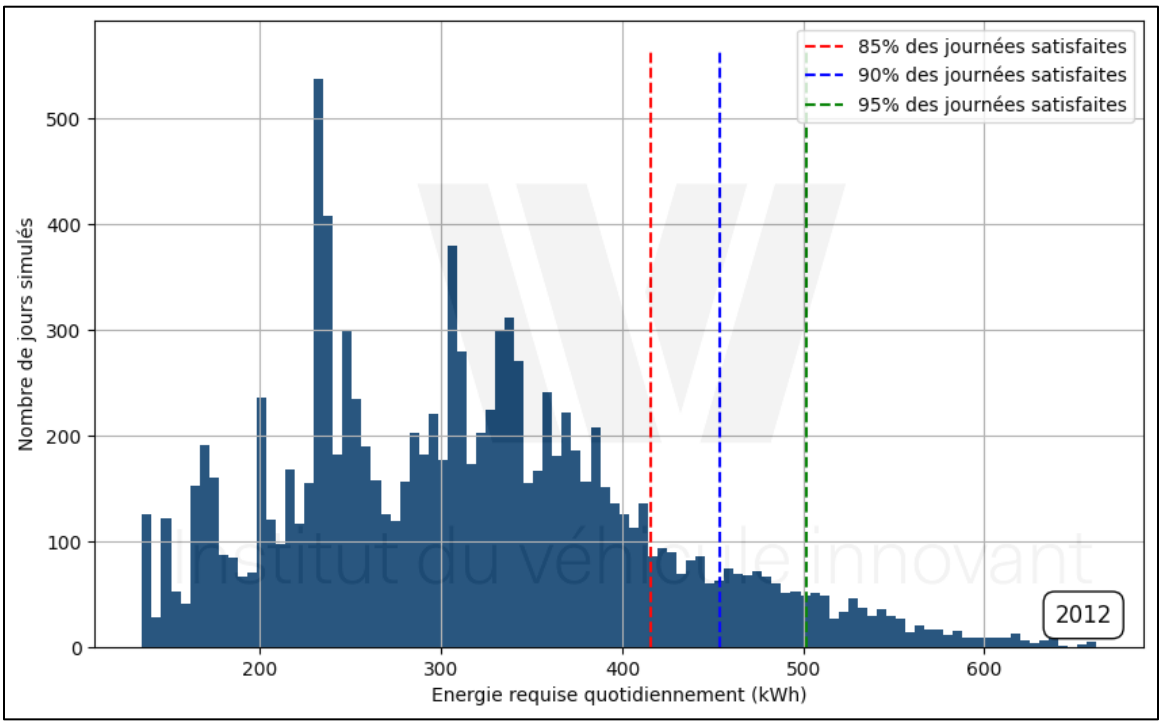
Guide d'interprétation du Graphique 16:

- 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 534 kWh disposerait de 457 kWh avec marge de confort lorsque neuf (ligne horizontale pointillée épaisse), cette batterie permettrait au camion 2012 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 116 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 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 17.

Graphique 17 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 2012



Une batterie de 534 kWh nominale permettrait alors de réaliser 90 % des journées sur une année moyenne en un seul cycle de décharge de la batterie, tandis que des batteries de 489 et de 590 kWh pourraient respectivement satisfaire 85 % et 95 % des journées sur une année moyenne.

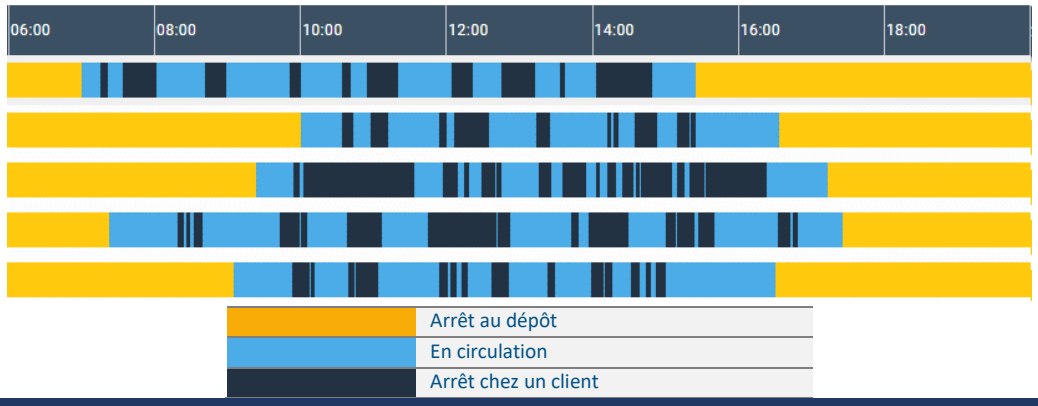
Camion # 2012

Freightliner M2 106 – 2019 | Porteur Classe 7 – PNB 15 000 kg

Le Graphique 18 permet de visualiser les arrêts lors d'une journée typique du camion 2012. 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.

Il est à noter que l'horaire de ce camion a beaucoup de variances. Le camion a fréquemment eu des semaines de 3 ou 4 jours.

Graphique 18: Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 2012



En partant de la gauche, on observe que le camion quitte le dépôt entre 6:30 et 10h le matin.

Le camion effectue en moyenne 8 arrêts chez des clients au cours de sa journée, qui ne durent rarement plus de 30 minutes. Les clients sont variés, ne permettant pas de planifier des recharges à des endroits fréquents.

Tableau 13: Paramètres d'électrification retenus pour le camion 2013

Capacité nominale requise pour satisfaire 90% des journées	534 kWh
Batterie recommandée disponible sur le marché	**Non**

En date de la rédaction de ce rapport, aucun produit existant ne propose une batterie ayant la capacité nominale requise pour électrifier le camion 2013. La plus grosse batterie disponible pour les camions de classe 7 est de 315 kWh, ce qui ne permettrait pas au véhicule de compléter ces routes.

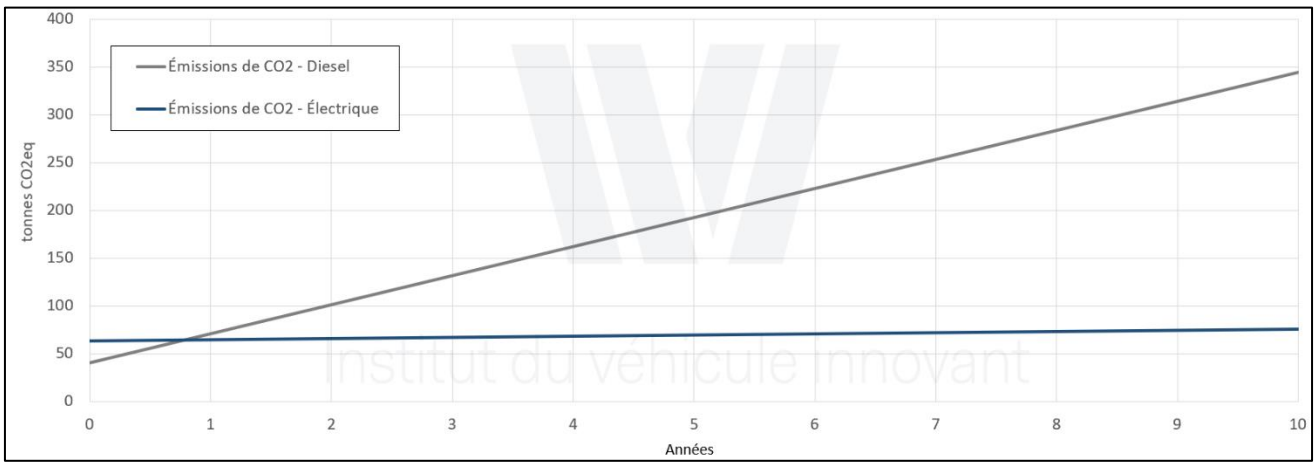
Tout comme le camion 2013, les bénéfices financiers ne peuvent pas être calculés pour le camion 2012, car un tel camion est inexistant. Cependant, une hypothèse a été posée sur l'économie possible en coût énergétique d'un camion de classe 6 avec une batterie de 534 kWh. Ce calcul a été effectué avec un coût de 2 $ par litre de diesel et de 0,12 $ par kilowattheure. Une économie possible de 136 440 $ serait envisagée sur 10 ans. Le surcoût à l'achat d'un camion électrique devrait donc être inférieur à cette valeur pour être rentable.

Tableau 14: Bénéfices financiers de l'électrification du camion 2012

Coût annuel de carburant avant électrification	18 575 $
Coût annuel d'électricité	4 931 $
Économie annuelle de coûts d'énergie	13 644 $
Économie potentielle après 10 ans	**136 440 $**

Il est possible de calculer le bénéfice environnemental de l'électrification de cette route, celui-ci est représenté dans le graphique ci-dessous. Le point d'équivalence des émissions de CO_2 arrive après 26 500 km. Après 10 ans, l'électrification pourrait permettre la diminution de l'émission d'environ 270 tonnes de CO_2. 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 : Émissions sur la vie du camion 2012, Diesel vs. Électrique



Comme le camion 2012 ne s'arrête pas assez longtemps pour recharger et que sa consommation quotidienne requière une batterie de 534 kWh, ce qui n'existe pas sur le marché actuellement pour un camion de classe 7, l'IVI ne recommande pas l'électrification pour ce camion.

Dans l'éventualité où un tel camion serait sur le marché, il pourrait être intéressant de faire le changement puisque la retombée en termes de GES est très intéressante. Le surcoût du camion électrique ainsi que de l'infrastructure devrait être inférieur à 136 000 $ pour que celui-ci soit rentable.

13. Conclusions et recommandations

L'analyse des trois camions diesel instrumentés chez SET 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 SET

Véhicule	Camion 2013	Camion 3018	Camion 2012
Potentiel d'électrification (/10)	3	**9**	3
Recommandation d'électrification de l'IVI	Non	**Oui**	Non
Capacité totale de batterie requise pour effectuer 85 % des déplacements	417 kWh	**484 kWh**	489 kWh
Capacité totale de batterie requise pour effectuer 90 % des déplacements	447 kWh	**521 kWh**	534 kWh
Capacité totale de batterie requise pour effectuer 95 % des déplacements	503 kWh	**493 kWh**	590 kWh

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, la capacité des batteries et la disponibilité des accessoires amèneront probablement une amélioration de ces scores avec le temps.

Dans le cas des véhicules 2013 et 2012, les batteries nécessaires pour suffire aux trajets de 90% des journées de l'année (447 kWh et 534 kWh, respectivement) ne sont pas encore disponibles pour les camions de classe 7. Les plus grosses batteries disponibles pour de tels camions sont d'environ 315 kWh. Une telle batterie permettrait aux camions 2013 et 2012 de compléter 70% et 59% des journées dans une année, respectivement.

Le camion 3018 présente un excellent potentiel, car il n'est muni d'aucun accessoire, ses routes sont courtes, contiennent peu de dénivelés et le chargement du véhicule est léger. La demande énergétique est généralement en deçà de l'énergie contenue dans les batteries offertes par des camions sur le marché. Les bénéfices économiques et environnementaux seraient très intéressants.

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 SET 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, mais 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.

Le présent rapport fait l'état des possibilités d'électrification pour trois camions de la flotte de SET. 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 SET, 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 :