Flotte
rechargeable
Camions lourds

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

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

Date : Lundi le 15 mai 2023 | Version révisée : 12 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 54 17
8. Scénarios d'électrification pour le camion 54 20
9. Analyse du camion 193 28
10. Scénario d'électrification pour le camion 193 31
11. Analyse du camion 157 36
12. Scénario d'électrification pour le camion 157 39
Scénario 1, camion 157 – Opération de jour seulement 40
Scénario 2, camion 157 – Opération jour et nuit avec recharge d'appoint 42
13. Conclusions et recommandations 46
14. Sources des données 48
15. Informations et contact 49
16. Remerciements 50

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 d'Inter-Nord..... 14
Tableau 3 : : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 54 18
Tableau 4 : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 54 19
Tableau 5 : Démonstration du calcul de temps d'arrêt..... 24
Tableau 6 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 54..... 25
Tableau 7 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 54 25
Tableau 8 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 193 29
Tableau 9 : : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 193 30
Tableau 10 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 193..... 33
Tableau 11 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 193 33
Tableau 12 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 157 37
Tableau 13 : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 157 38
Tableau 14 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 157..... 43
Tableau 15 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 157 43
Tableau 16 : Recommandation d'électrification des camions d'Inter-Nord 46

Liste des figures

Figure 1 : Échelle de dénivelé allant du plus petit dénivelé au plus grand 8
Figure 2 : Territoire de livraisons d'Inter-Nord 12
Figure 3 : Camions utilisés durant l'essai, dans l'ordre de gauche à droite : Camions 54, 193 et 157 13
Figure 4 : Fréquence des livraisons du camion 54 dans un rayon de 25 et 50 km d'Inter-Nord 17
Figure 5 : Fréquence des livraisons du camion 193 dans un rayon de 25 et 50 km d'Inter-Nord 28
Figure 6 : Fréquence des livraisons du camion 157 dans un rayon de 25 et 50 km d'Inter-Nord 36

Liste des graphiques

Graphique 1 : Répartition des kilométrages quotidiens par camion 14
Graphique 2 Répartition des vitesses - Inter-Nord 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 54 19
Graphique 5 : Journées de mesure du camion 54, 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 54 21
Graphique 7 : Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 54 22
Graphique 8 : Répartition des heures au dépôt sur la période d'essai 23
Graphique 9 : Courbe de décharge et recharge quotidienne du camion 54 24
Graphique 10 : Comparaison des coûts totaux de possession, camion 54 26
Graphique 11 : Émissions sur la vie du camion 54, Diesel vs. Électrique 27
Graphique 12 : Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 193 30
Graphique 13 : Journées de mesure du camion 193, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh) 31
Graphique 14 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 193 32
Graphique 15 : Moments des déplacements et arrêts du camion 193 33
Graphique 16 : Comparaison des coûts totaux de possession, camion 193 34
Graphique 17 : Émissions sur la vie du camion 193, Diesel vs. Électrique 35
Graphique 18 : Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 157 38
Graphique 19 : Moments des déplacements et arrêts du camion 157, scénario de jour 39
Graphique 20 : Moments des déplacements et arrêts du camion 157, scénario de jour et de soir 39
Graphique 21 : Journées de mesure du camion 157, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh) 40
Graphique 22 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 157 41
Graphique 23 : Courbe de décharge et recharge quotidienne du camion 157 42
Graphique 24 : Comparaison des coûts totaux de possession, camion 157 44
Graphique 25 : Émissions sur la vie du camion 157, Diesel vs. Électrique 44

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 Inter-Nord à Saint-Jérôme. 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 225 km

92 % des arrêts de nuit au terminal durent 12 heures ou plus, assez pour ajouter 600 kWh avec une borne de 50 kW pour chaque camion

Camion 54 – Porteur classe 6		Effet sur le potentiel d'électrification
Critère	**Valeur**	
Distances	Courtes	+
Constance	Variées	-
Dénivelé	Élevé	-
Recharge en journée	Oui	+
Chargement	Léger	+
Accessoires	Boîte chauffée	-

Estimation de consommation électrique en été	113 kWh / 100 km
Estimation de consommation électrique moyenne, sur 1 an	144 kWh / 100 km
Pénalité de chargement ?	Non
Capacité nominale requise pour 90 % des journées sans recharger durant la journée	362 kWh
Batterie disponible ?	Non

Recharger durant le jour permettrait le succès du camion 54 avec une batterie de capacité nominale de 315 kWh

Camion 193 – Tracteur classe 8		Effet sur le potentiel d'électrification
Critère	**Valeur**	
Distances	Courtes	+
Constance	Constantes	+
Dénivelé	Faible	+
Recharge en journée	Non	-
Chargement	Léger	+
Accessoires	Aucun	+

Estimation de consommation électrique en été	129 kWh / 100 km
Estimation de consommation électrique moyenne, sur 1 an	161 kWh / 100 km
Pénalité de chargement ?	Non
Capacité nominale requise pour 90 % des journées	410 kWh
Batterie disponible ?	Oui

Camion 157 – Tracteur classe 8		Effet sur le potentiel d'électrification
Critère	**Valeur**	
Distances	Courtes	+
Constance	Variées	-
Dénivelé	Faible	+
Recharge en journée	Non	-
Chargement	Léger	+
Accessoires	Aucun	+

Estimation de consommation électrique en été	157 kWh / 100 km
Estimation de consommation électrique moyenne, sur 1 an	198 kWh / 100 km
Pénalité de chargement ?	Non
Capacité nominale requise pour 90 % des journées	452 kWh
Batterie disponible ?	Oui
* UTILISATION DE JOUR SEULEMENT *	

2. Méthodologie

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3. Méthodologie : Scénarios d'électrification

À partir des informations recueillies et présentées à la section précédente, un scénario d'électrification a été élaboré pour chaque camion. Ceci consiste à estimer la quantité d'énergie requise pour effectuer l'entièreté des opérations quotidiennes normales de chaque camion durant la période de l'essai, 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 faire les essais, les besoins énergétiques ont été estimés pour la température réelle lors de l'essai, 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 Inter-Nord est une entreprise de transport, c’est-à-dire que les camions transportent les marchandises d’autres entreprises contre rémunération plutôt que leurs propres marchandises entre leurs usines ou magasins. Ces marchandises sont sèches, c’est-à-dire qu’elles peuvent être transportées dans une boîte de camion normale, sans unité de réfrigération, citerne ou benne, etc. Les camions analysés opèrent en LTL (*Less-Than-Truck Load*), c’est-à-dire qu’ils parcourent un circuit rejoignant plusieurs entreprises variées à chaque jour et y font des livraisons ou cueillettes représentant un chargement partiel pour le camion. Les camions partent généralement avec une cargaison pleine le matin, cependant la nature des marchandises transportées fait en sorte que le poids des véhicules n’est pas très élevé. Même lorsqu’ils sont à pleine capacité volumique, leur poids total est donc bien inférieur au Poids Nominal Brut (PNB) autorisé pour leurs classes respectives de véhicules.

L’entreprise opère depuis 1990 et dispose actuellement d’environ 75 camions et près de 200 remorques. Ces véhicules sont opérés par 80 chauffeurs. Les camions de l’entreprise se rendent dans les Laurentides, la Montérégie, une partie de l’Outaouais et de la Mauricie.

Les clients de l’entreprise sont des magasins de détail, petits et moyens commerces, et entreprises manufacturières. La cargaison est souvent organisée en palettes dans les camions. Pour deux des camions analysés, un seul client disposant de plusieurs succursales représente environ 50% des livraisons.

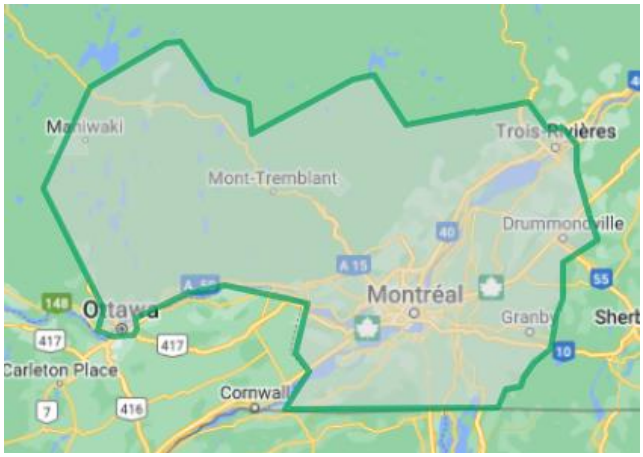


Figure 2 : Territoire de livraisons d’Inter-Nord

6. Véhicules analysés

À la suite des discussions avec le gestionnaire du parc, les trois camions retenus pour l'analyse sont les unités 54, 193 et 157. Il s'agit donc d'un camion porteur de classe 7, et de deux tracteurs.

Figure 3 : Camions utilisés durant l'essai, dans l'ordre de gauche à droite : Camions 54, 193 et 157

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. Aussi, le gestionnaire a manifesté un intérêt particulier pour ces camions, entre autres pour avoir une idée de l'effet du dénivelé sur le potentiel d'électrification du camion 54, et pour la possibilité d'électrifier les routes d'un client en particulier.

Aux dires des gestionnaires d'Inter-Nord, environ 65 % de la flotte de camions ont des opérations similaires aux camions qui ont été suivis durant ce test en termes de distances et chargement. La portion restante sont des véhicules affectées à des livraisons dans les régions plus éloignées couvertes par l'entreprise, soit les hautes-Laurentides, Lanaudière et la Mauricie. Ces véhicules parcourent donc de plus longues distances, et parcourent des routes plus montagneuses. Bien qu'il soit compréhensible d'être tenté d'appliquer les conclusions des trois camions présentés aux routes similaires, l'IVI préfère ne pas émettre de diagnostic ferme sur ces autres camions, car beaucoup de variables autres que la distance influence les simulations effectuées. Une étude approfondie de ces véhicules s'imposerait donc pour affirmer avec certitude le potentiel d'un véhicule autre que ceux présentés dans ce document.

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

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

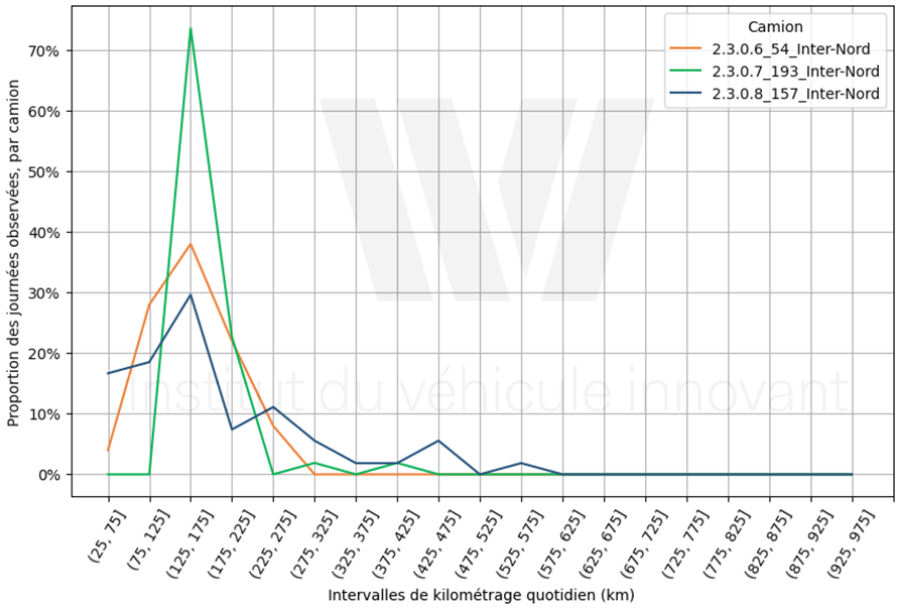
Tableau 2 : Informations de base sur l'utilisation des véhicules d'Inter-Nord

Camion #	54	193	157
Distance parcourue			
Durant le test	7 511 km	9 136 km	9 378 km
Annuellement (estimée)	30 041 km	36 546 km	38 349 km
Carburant			
Consommé durant le test	3 142 L	3 718 L	4 275 L
Consommé annuellement (estimé)	12 570 L	14 870 L	17 101 L
Consommation moyenne	41.8 L/100 km	40.7 L/100 km	44.6 L/100 km
Ralenti			
Temps par jour en moyenne	5,7 h	1,4 h	2,1 h
Carburant consommé au ralenti par jour	11,4 L	6,6 L	5,8 L
Carburant consommé par année (estimé)	2286 L	1399 L	1297 L
Opérations			
Vitesse moyenne en déplacement	40 km/h	32 km/h	36 km/h
Nombre de jours actifs durant l'essai	50 jours	53 jours	56 jours
Masse totale moyenne	9 558 kg	18 699 kg	23 548 kg

On y aperçoit, par exemple, que le camion 193 roule à une vitesse moyenne plus basse que les deux autres, et tourne moins longtemps au ralenti. Cela peut expliquer en partie sa consommation plus basse. Le camion 54, pour sa part, consomme plus que ce dernier malgré qu'il soit plus léger et plus petit. Celui-ci semble être utilisé plus sévèrement vu sa vitesse en déplacements et son utilisation de la marche au ralenti, et de son utilisation sur des routes montagneuses.

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

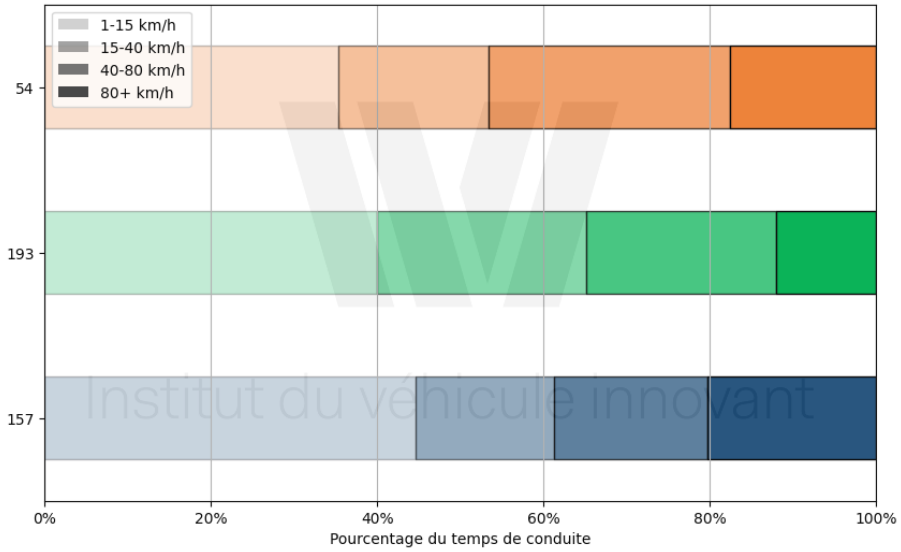


Bien que les trois camions aient un pic de fréquence de journées autour de 150 km, le camion 193 est le plus régulier, car environ 75% des journées analysées lors de l'essai sont dans cette plage. Ces distances sont populaires aussi pour le camion 54, mais la distribution est plus dispersée, signifiant que ses journées sont moins régulières. Pour le camion 157, quatre distances quotidiennes reviennent plus fréquemment : très courtes distances (25 – 75 km), 150 km comme les autres camions, puis deux journées scénarios d'utilisation jour et nuit, soit un d'environ 300 km et un de 500 km au total par période de 24h.

Pour les trois camions, 88 % des journées se terminent en ayant parcouru moins de 225 kilomètres.

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.

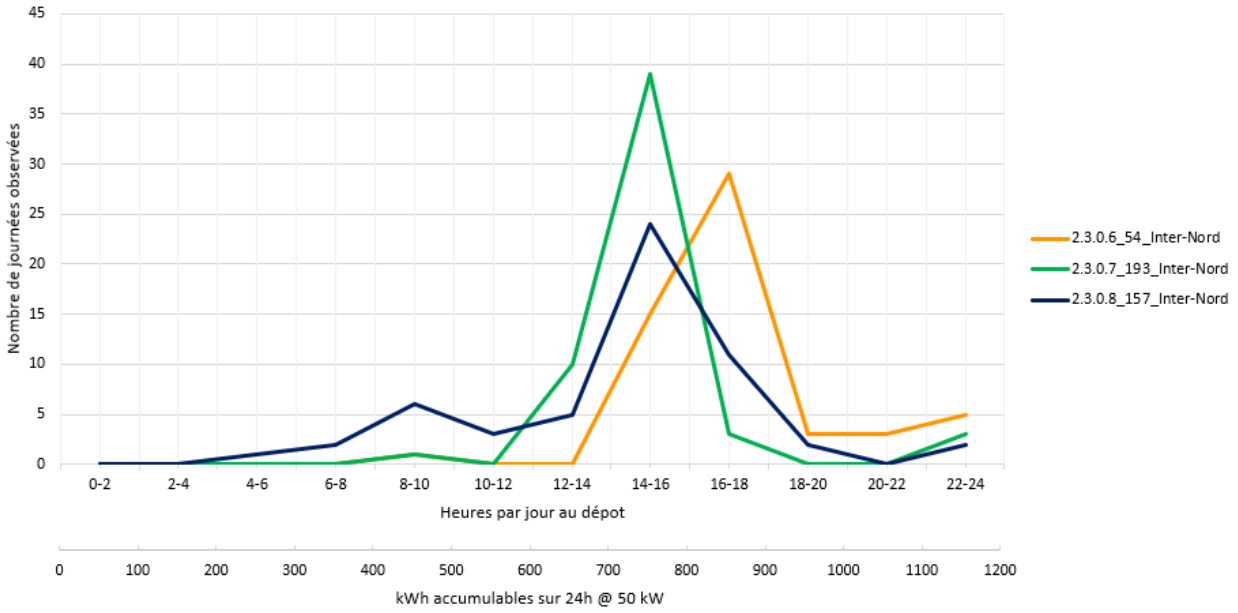
Graphique 2 Répartition des vitesses - Inter-Nord



Ce graphique permet de comprendre que le camion 157 est autant celui qui roule le plus souvent à haute vitesse que celui qui roule à très basse vitesse. L'unité 54, pour sa part, semble circuler plus souvent en zone urbaine. Le camion 193 passe très peu de temps à haute vitesse.

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 rencontrer les besoins, car celles-ci sont moins coûteuses à acquérir, installer puis opérer. Les trois véhicules suivis reviennent au dépôt d'Inter-Nord la nuit et y passent plusieurs heures, la plupart du temps. Ils disposent donc de cette longue période pour s'y recharger. Le graphique ci-dessous montre la répartition des heures passées sur le terrain d'Inter-Nord 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.

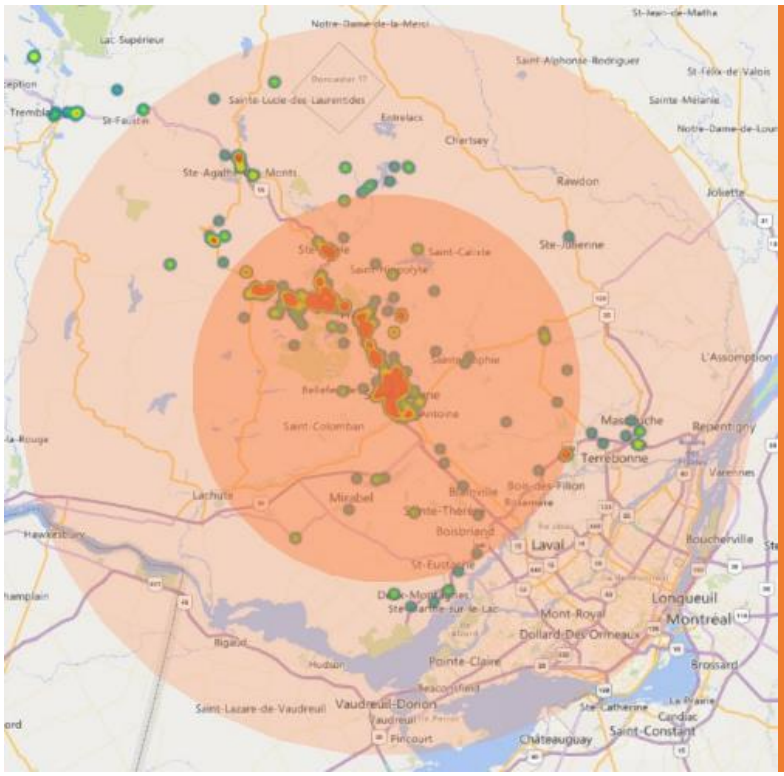
Les camions 54 et 193 disposent toujours d'au minimum 10 à 12 heures pour charger, plus fréquemment 14 à 16 heures. Le camion 157, pour sa part dispose souvent de plus de 12 heures, sauf lorsqu'il est utilisé de soir.

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 54

Le camion au diesel #54 est utilisé pour des livraisons de marchandises sèches à des magasins et commerces. Il effectue des livraisons LTL (*Less-Than-truck Load*) dans les environs de St-Sauveur et des Hautes-Laurentides, souvent très près les unes des autres. Le véhicule est rempli la nuit et effectue presque exclusivement des livraisons, diminuant le poids de la cargaison au fil des kilomètres.

Sa route est très constante le matin (la première livraison a toujours le même poids, à la même heure, au même magasin). Une fois toutes ses livraisons faites, il revient vide au dépôt en fin d'avant-midi pour être rechargé et repartir faire des livraisons à des endroits plus variés en après-midi. Le retour en fin de journée se fait souvent vide aussi. La carte suivante permet de visualiser la localisation et la fréquence des livraisons :



La presque totalité 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.

Ces zones rouges sont principalement visitées le matin.

Le véhicule revient presque chaque jour aux bureaux d'Inter-Nord durant la journée, pour une durée d'environ 30 à 90 minutes.

Figure 4 : Fréquence des livraisons du camion 54 dans un rayon de 25 et 50 km d'Inter-Nord

Le camion 54 évolue principalement dans les Hautes-Laurentides, qui est un territoire plus montagneux que la vallée du Saint-Laurent où se trouve Montréal. Ceci l'amène à gravir un dénivelé plus important que les autres camions d'Inter-Nord, et aura pour effet d'augmenter la consommation par rapport à un camion qui n'aurait pas à gravir ces côtes.

Cet indice de côtes à gravir indique que le camion devra monter en moyenne un dénivelé positif de 7,5 mètres pour chaque kilomètre parcouru.

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

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

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

Tableau 3 : : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 54

Dans la première section, la valeur qui aidera le plus le gestionnaire est probablement la distance au 90e percentile, qui est de 213 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 qu'il y a une certaine variabilité des distances quotidiennes, car les couleurs ne sont pas uniformes et la moyenne est plutôt loin du 90e percentile. Il y a une importante représentation des teintes pâles, autant que des cases foncées.

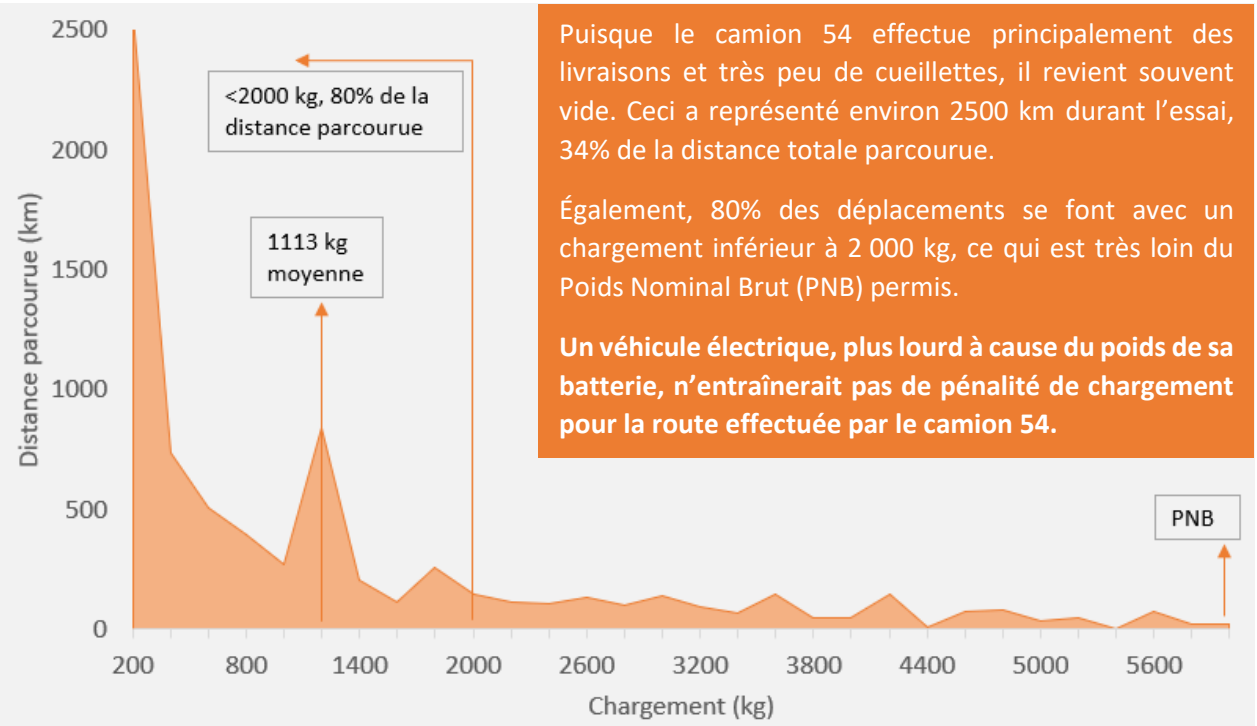
Il est difficile de remarquer une tendance, outre que le camion est utilisé cinq jours par semaine. En effet, il n'y a pas régulièrement une journée de la semaine ou un moment dans le mois où les distances sont régulièrement plus longues. Les lundis et mardis sont en moyenne un peu plus longues, mais très peu.

Max	260	km
90%	213	km
Med	145	km
Moy	148	km
σ	53	km
CV	36%	

	D	L	M	M	J	V	S
déc.	-	-	-	-	-	-	-
	-	106	-	103	131	213	-
	-	139	260	116	81	-	-
	-	-	-	192	179	-	-
janv.	-	-	61	18	96	160	-
	-	212	131	149	136	153	-
	-	-	-	185	233	162	-
	-	208	123	162	145	150	-
	-	257	110	221	138	101	-
févr.	-	196	201	83	132	111	-
	-	94	203	98	158	186	-
	-	136	108	126	104	154	-
	-	157	236	160	53	-	-
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 54 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 54



Puisque le camion 54 effectue principalement des livraisons et très peu de cueillettes, il revient souvent vide. Ceci a représenté environ 2500 km durant l'essai, 34% de la distance totale parcourue.

Également, 80% des déplacements se font avec un chargement inférieur à 2 000 kg, ce qui est très loin du Poids Nominal Brut (PNB) permis.

Un véhicule électrique, plus lourd à cause du poids de sa batterie, n'entraînerait pas de pénalité de chargement pour la route effectuée par le camion 54.

La durée de service prévue par Inter-Nord pour leurs camions porteurs de classes 6 et 7 est de huit ans.

En résumé, l'analyse des déplacements du camion 54 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 54

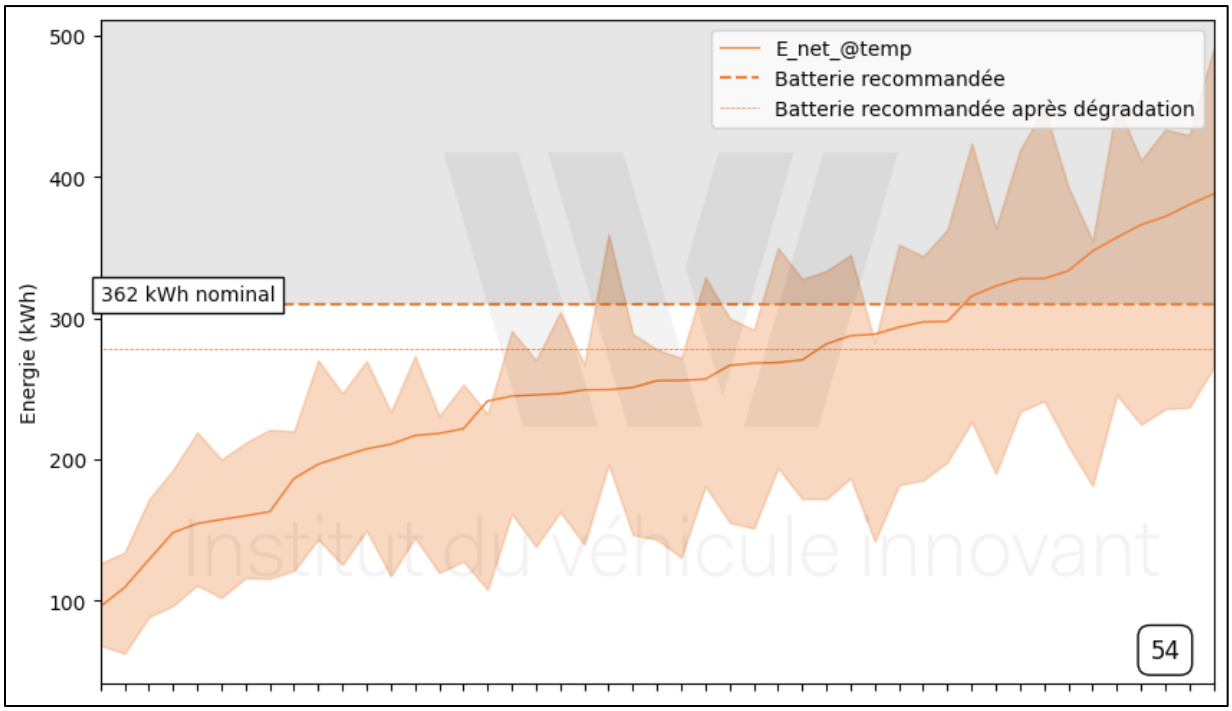
Critère	Valeur	Effet sur le potentiel d'électrification
Distances	Courtes	+
Constance	Variées	-
Dénivelé	Élevé	-
Recharge en journée	Oui	+
Chargement	Léger	+
Accessoires	Boîte chauffée	-

8. Scénarios d'électrification pour le camion 54

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

Le Graphique 5 montre la distribution de ces énergies pour chaque journée de l'essai. 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 54, 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 362 kWh total disposerait de 310 kWh avec marge de confort lorsque neuf (ligne horizontale pointillée épaisse), cette batterie permettrait au camion 54 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.

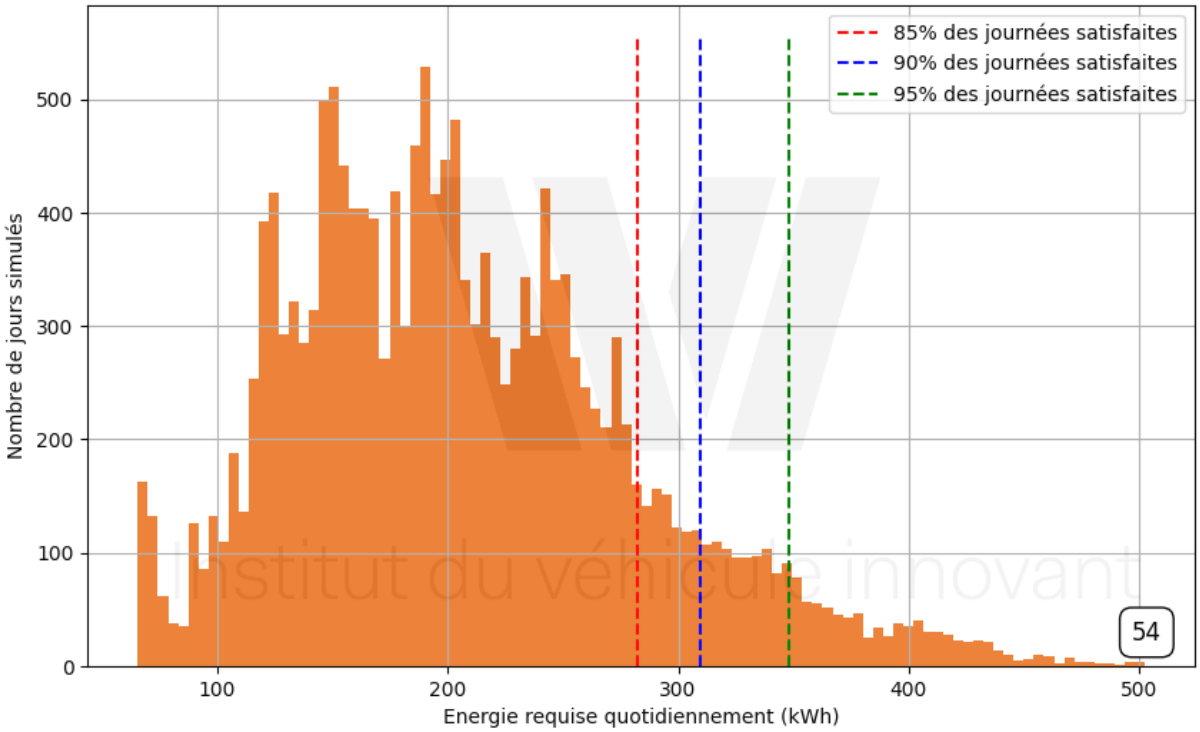
La consommation moyenne du camion à 20°C est estimée à 113 kWh/100 km. Elle sera plus élevée en hiver, pouvant être jusqu'à 50 % supérieure lors des quelques jours de grands froids.

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'essai 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 leur besoins énergétiques normalisés à 20°C ont été retirées (plus de détails dans la section Méthodologie : Scénario d'électrification). Par exemple, pour un camion avec 40 jours de données valides, l'IVI a simulé 14 600 données, soit 365 multiplié par 40. Le Graphique 6 illustre la quantité d'énergie requise quotidiennement pour chacune de ces données.

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

Graphique 6 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 54



Camion # 54

International Durastar 4300 - 2016 | 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 310 kWh, ce qui équivaut à une batterie dotée d'une énergie nominale 362 kWh.

Pour compléter 95 % des journées, la capacité nominale est de 407 kWh.

Pour compléter 85 % des journées, la capacité nominale est de 330 kWh.

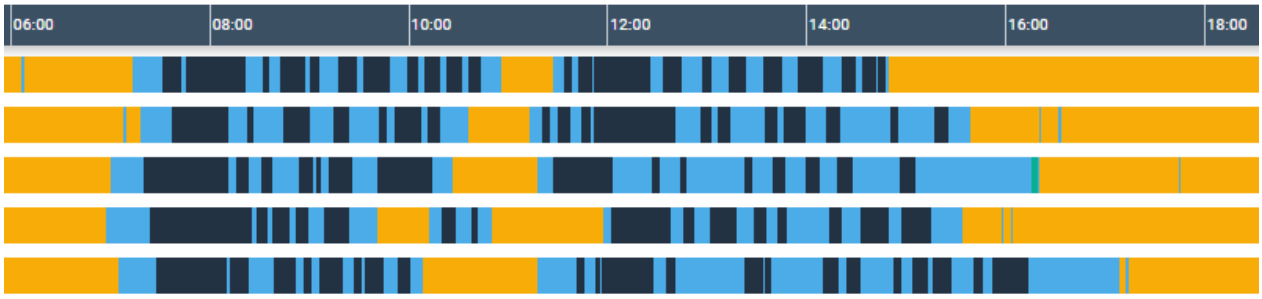
Les configurations de batteries offertes en 2023 pour les camions électriques de classes 6 et 7 vont d'environ 140 à 315 kWh. Puisque celle-ci constitue une importante partie du prix du véhicule, il est important de sélectionner la plus petite batterie qui répondra aux besoins énergétiques à long terme. 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.

⚠ L'analyse des besoins énergétiques a permis de constater que tous les déplacements, afin de compléter 90 % des journées simulées sur une année, ne pourront être complétés avec un véhicule électrique dans ce scénario si aucune recharge n'est effectuée dans la journée.

L'analyse montrée ci-haut n'est pas complète, car elle ne tient pas compte des opportunités de recharge durant la journée. En effet, une fois l'infrastructure de recharge installée, celle-ci est disponible en tout temps et si le camion passe par le dépôt au courant de la journée, il est possible de l'utiliser à ce moment.

Visualiser ces arrêts est possible avec le graphique 7, où chaque bande horizontale représente un jour du lundi au vendredi, de bas en haut. L'échelle en haut du graphique représente l'heure de la journée. Les nuits ont été coupées car il n'y avait aucun déplacement.

Graphique 7 : Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 54



	Arrêt au dépôt
	En circulation
	Arrêt chez un client

Camion # 54

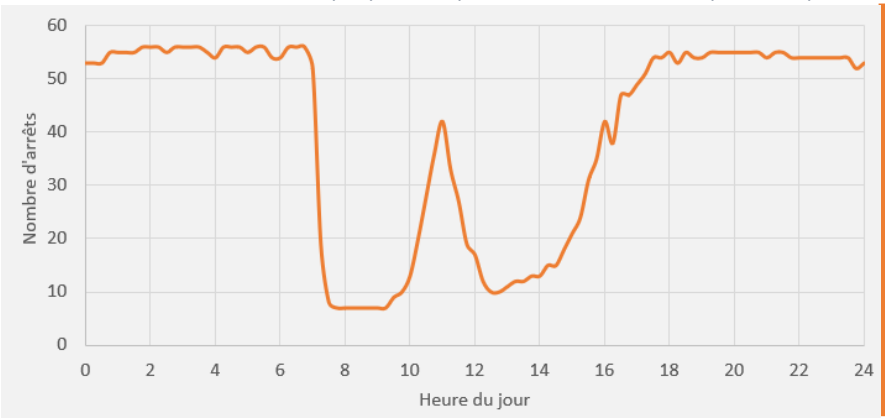
International Durastar 4300 - 2016 | Porteur Classe 7 – PNB 15 000 kg

En partant de la gauche, on observe que le camion est arrêté au dépôt jusqu'à un peu après 7h le matin. Ensuite il part pour une première livraison.

Tel qu'expliqué précédemment, presque l'entièreté des journées du camion 54 sont ponctuées d'un arrêt au dépôt d'une durée non-négligeable en fin d'avant-midi.

Afin de poursuivre le scénario d'électrification, l'information à retenir de ce graphique est que tout moment en jaune, non seulement ceux durant la nuit, pourraient et devraient être utilisés pour recharger le camion. Les résultats précédents ne tenaient pas compte de cette possibilité. La suite de cette analyse montre comment cette recharge additionnelle aiderait l'électrification.

Graphique 8 : Répartition des heures au dépôt sur la période d'essai



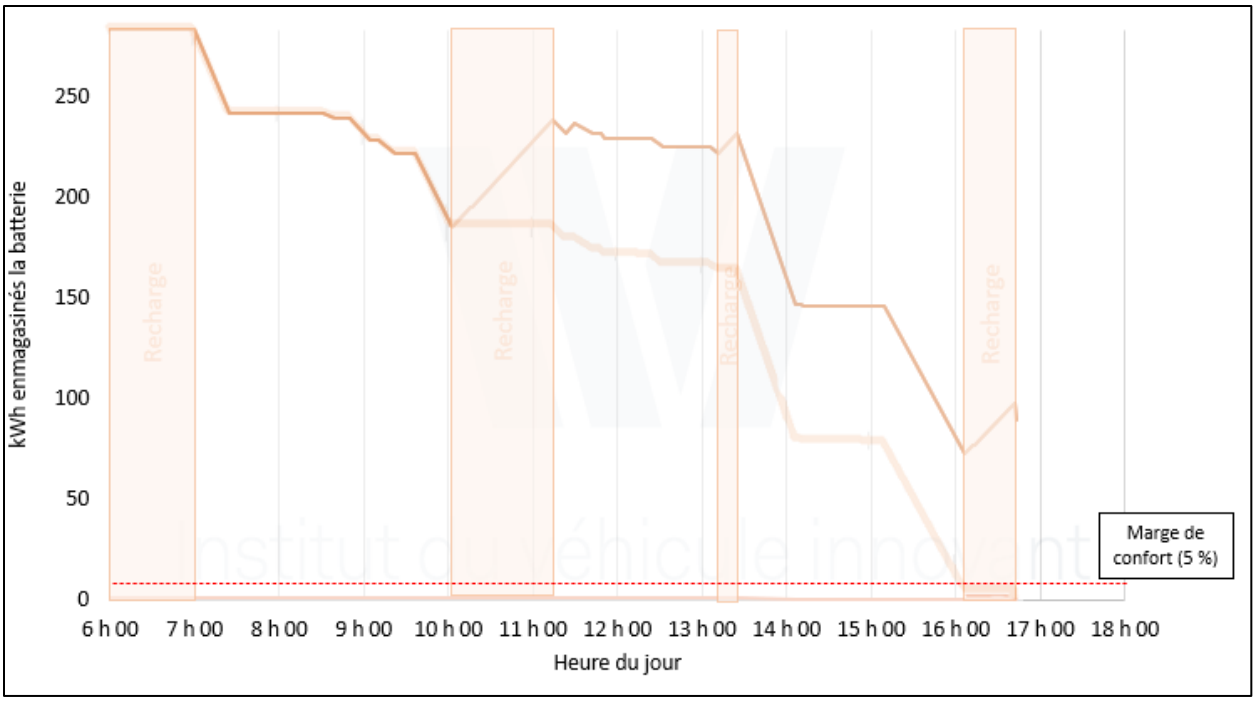
Le graphique 8 vient corroborer la fréquence des arrêts au dépôt durant la journée.

Celui-ci montre en effet que le camion est revenu 42 jours sur 55 jours actifs durant la prise de mesure.

Pour mieux comprendre l'effet qu'aura la recharge, la journée du 6 janvier a été choisie pour servir d'exemple, car elle représente une journée type du camion 54. Lors de cette journée, le camion est passé par le dépôt entre 10 h 2 et 11 h 14, soit un peu plus d'une heure. Sur le ci-dessous, deux courbes orange représentent l'énergie présente dans la batterie. La courbe pâle montre le premier scénario. Le camion ne recharge pas durant son arrêt au dépôt et la batterie se décharge complètement avant la fin de la journée. La courbe orange foncé montre un scénario ou le camion se recharge sur une borne de 50 kW, soit avec une puissance effective de 45 kW. Cet exemple permet de démontrer qu'en optimisant les temps de recharge, il est possible d'augmenter l'autonomie disponible pour la journée type dans le cas du camion 54.

L'utilisation des moments où le camion 54 repasse au dépôt d'Inter-Nord durant la journée pour recharger permet d'augmenter significativement le taux de journées possibles à compléter en véhicule électrique, même avec une borne rapide « standard » de 50 kW.

Graphique 9 : Courbe de décharge et recharge quotidienne du camion 54



Ce nouveau scénario aurait fait la différence pour compléter la journée du 6 janvier 2023. En observant le cas du camion 54, il est possible d'imaginer un scénario de recharge où le camion bénéficie d'une heure de recharge entre 11 h et 12 h.

En effet, l'IVI recommande une batterie nominale de 362 kWh afin que ce camion puisse effectuer sa route. En observant le tableau si dessous, il est possible de voir un exemple de calcul qui prend en compte deux puissances de bornes de recharge.

Tableau 5 : Démonstration du calcul de temps d'arrêt

Besoins énergétiques quotidiens	Batterie nominale du camion	Puissance effective de la borne	Temps d'arrêt durant la journée*
360 kWh	315 kWh	45 kW	1 h
360 kWh	315 kWh	90 kW	0,5 h

***Il est très important de noter que la recharge ne peut pas augmenter la capacité de batterie nominale du camion. Par exemple, recharger un camion 1 h s'il a dépensé seulement 10 kWh ne lui permettra en aucun cas de recevoir plus de 10 kWh de recharge. Donc le temps d'arrêt durant la journée doit être positionné de façon stratégique. En suivant l'exemple représenté dans le tableau ci-dessus, un camion qui nécessite 360 kWh pour accomplir sa journée et qui a une batterie de capacité nominale de 315 kWh doit obtenir au moins 1 h de recharge sur une borne de puissance de 50 kW. Cette heure de recharge doit donc être distribuée après que le camion est dépensé au moins 45 kWh et avant qu'il ne lui reste que 45 kWh.**

L'énergie dépensée pour les livraisons devra ensuite être restituée à la batterie. Ceci se fera à l'aide d'une borne de recharge, qui sera utilisée lorsque le véhicule est arrêté au terminal d'Inter-Nord.

Les graphiques 3 et 7 montrent que le camion s'y arrête toutes les nuits, pendant au moins 12 heures. Ce moment serait idéal pour recharger la batterie d'un véhicule électrique sur une borne de recharge. Une puissance de 50 kW est généralement considérée comme le standard minimal pour un camion lourd. L'infrastructure sera donc une Borne Rapide à Courant Continu (BRCC). Cette borne fournira une puissance réelle au véhicule d'environ 45 kW dans les conditions météorologiques et d'état de charge idéales.

En multipliant cette dernière donnée par le nombre d'heures, on constate qu'il serait donc possible d'ajouter quotidiennement 540 kWh d'énergie dans la batterie du camion. En comparaison avec la batterie proposée de 315 kWh, cela est largement suffisant.

Les paramètres retenus pour un scénario d'électrification du camion 54 seraient donc les suivants :

Tableau 6 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 54

Capacité de la batterie embarquée	315 kWh
Puissance de la borne de recharge	BRCC 50 kW
90 % des opérations remplies sans recharge durant la journée?	Non
90 % des opérations remplies avec recharge durant la journée?	Oui

Le scénario d'électrification précédent représente le scénario ou le camion reçoit une recharge d'une heure sur une borne de 54 kW durant la journée. 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.

*Ce calcul prend en compte une recharge d'une heure durant la journée à l'aide d'une borne de puissance effective de 45 kW.

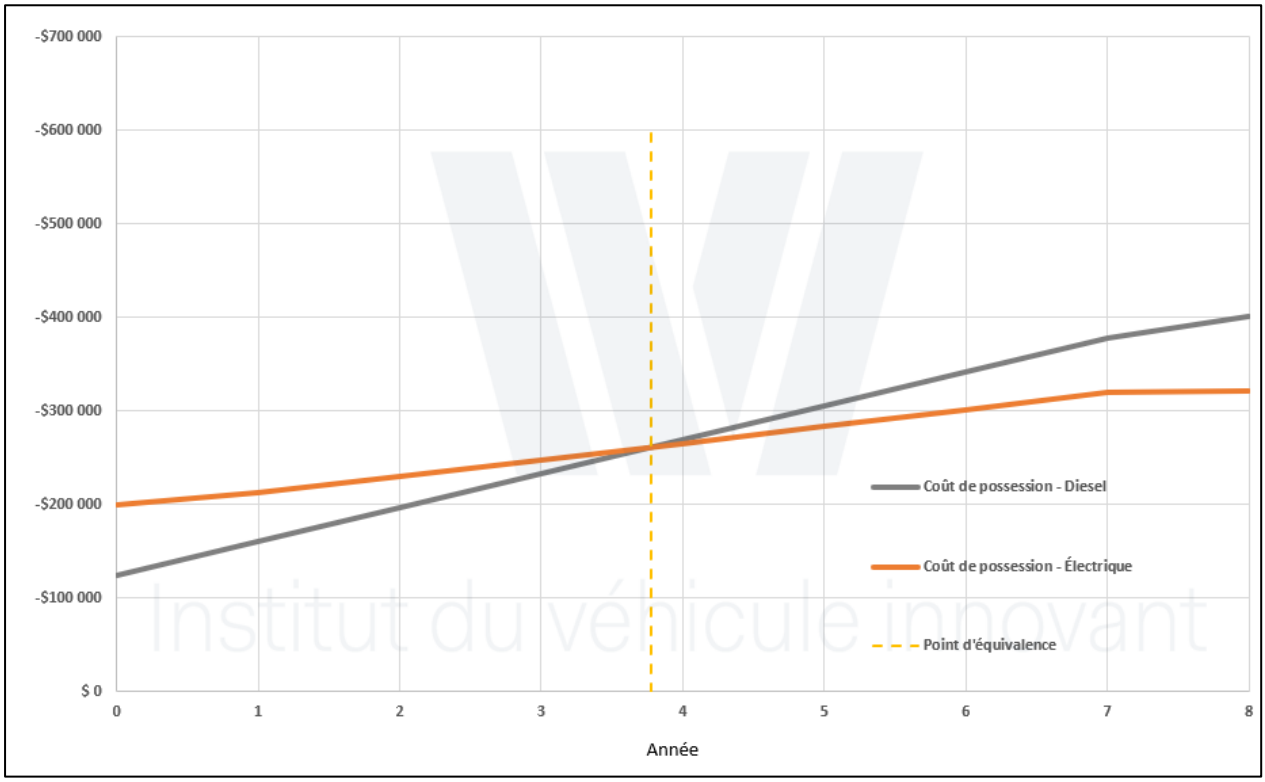
Tableau 7 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 54

Coût annuel de carburant avant électrification	25 080 $
Coût annuel d'électricité	5 732 $
Économie annuelle de coûts d'énergie	19 348 $
Surcoût total à l'achat	75 000 $
Période de retour sur investissement	**3,8 années**
Bénéfice net après 8 ans	**79 469 $**

Le camion électrique aurait un coût total de possession après 8 ans de 321 700 $, comparé à 401 000 $ pour un camion diesel. Ceci représente une économie de 20 %.

Le Graphique 10 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.

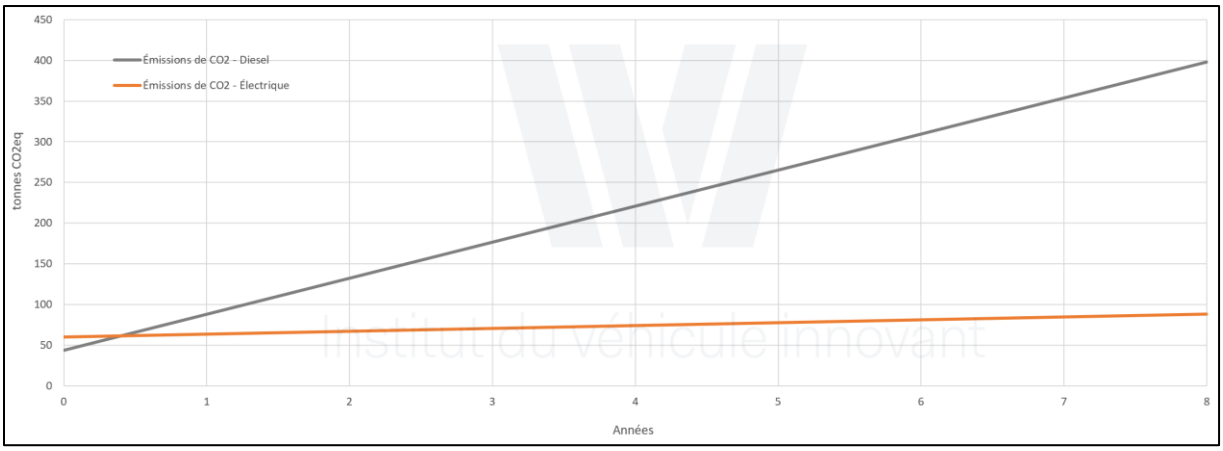
Graphique 10 : Comparaison des coûts totaux de possession, camion 54



Au même titre que l'analyse économique, les émissions de GES sur la durée de vie du camion seront réduites considérablement. Ainsi, le point d'équivalence des émissions de GES arriverait après environ 4,8 mois d'utilisation ou 12 021 km. Après 8 ans, ce véhicule aurait évité l'émission de 309 tonnes de CO2 équivalent.

Cette analyse tient compte de l'ensemble des émissions liées à la production du véhicule et sa batterie. Cette dernière est responsable des émissions additionnelles du camion électrique. Les émissions causées par l'utilisation du véhicule électrique considèrent l'utilisation en majeure partie de l'hydro-électricité.

Graphique 11 : Émissions sur la vie du camion 54, Diesel vs. Électrique



Le scénario d'électrification du camion 54 est particulier. Celui-ci offre une rentabilité intéressante et il serait en mesure d'effectuer 90 % des déplacements normalement souhaité par l'IVI si le scénario de recharge est mis en œuvre.

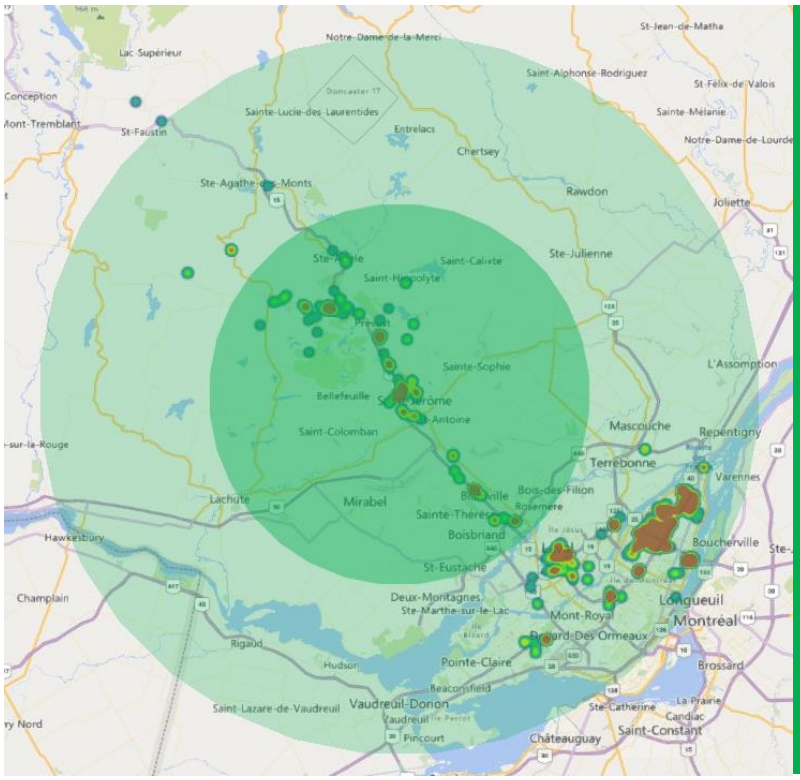
Il incombe donc au gestionnaire de flotte de décider si l'adaptation des opérations proposée, soit d'effectuer une recharge sur l'heure du midi d'une durée approximative d'une heure, est réalisable et vaut la peine. Il est intéressant de noter que le camion effectue déjà un arrêt d'une durée approximative d'une heure durant la journée, donc l'adaptation serait mineure. De plus, celle-ci ne serait pas obligatoire chaque jour, mais elle aiderait surtout le camion à accomplir ses routes durant l'hiver.

Le système de chauffage de la boîte par le liquide de refroidissement moteur n'a pas été considéré dans cette analyse. Ce système augmentera la consommation électrique, mais il est impossible d'évaluer de combien dans le présent rapport.

9. Analyse du camion 193

Le camion 193 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 les Basses-Laurentides. Le véhicule est chargé la nuit, fait des livraisons en avant-midi et fait ensuite des cueillettes dans l'après-midi.

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 presque totalité des livraisons se fait dans un rayon de 50 km à partir du port d'attache, soit dans une zone très concentrée dans l'est de Montréal et, dans une moindre mesure, à Laval le long de l'autoroute 15.

Plusieurs livraisons sont aussi faites dans les Laurentides autour de Saint-Jérôme et au nord, dans un rayon de 25 km.

Le camion revient très rarement au dépôt d'Inter-Nord durant la journée. Il ne pourrait donc pas bénéficier de recharge à cet endroit entre ses livraisons.

Figure 5 : Fréquence des livraisons du camion 193 dans un rayon de 25 et 50 km d'Inter-Nord

Dénivelé faible

2,6 m/km

Puisqu'il descend immédiatement jusqu'aux îles de Laval et Montréal, le camion 193 circule en majeure partie dans des endroits assez plats. Malgré ceci, il y a quand même 2,6 mètres de dénivelé positif par kilomètre à gravir.

Une certaine énergie sera donc requise pour compenser le dénivelé, mais celle-ci serait moindre que pour le camion 54 à masse égale.

Camion # 193

International LT - 2019 | Tracteur Classe 8 – PNB 36 363 kg

Le détail des distances parcourues à 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 8 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 193

Ici, la tendance des déplacements du camion 193 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.

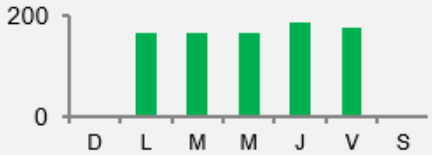
Ce qu'on y observe est que la presque totalité des jours ont sensiblement la même couleur, donc une distance semblable, sauf les deux premières journées au retour du congé du temps des fêtes, qui sont beaucoup plus longues.

Ces deux journées surviennent immédiatement au retour du temps des fêtes, alors que plusieurs commerces requièrent des livraisons irrégulièrement importantes. Il serait donc fort avantageux d'ignorer ces deux journées dans un scénario d'électrification, car ce scénario risque de ne pas se présenter de façon périodique au courant de l'année. De telles journées pourraient être assignées partiellement à des camions à essence, pour les prochaines années, durant la longue transition vers l'électrification.

Outre ces deux journées exceptionnelles, les livraisons du camion 193 sont donc très constantes, tel qu'en fait foi l'écart de seulement 13 kilomètres entre la moyenne des distances parcourues et le 90e percentile.

Ces deux journées ont donc été retirées du scénario d'électrification présenté ci-après.

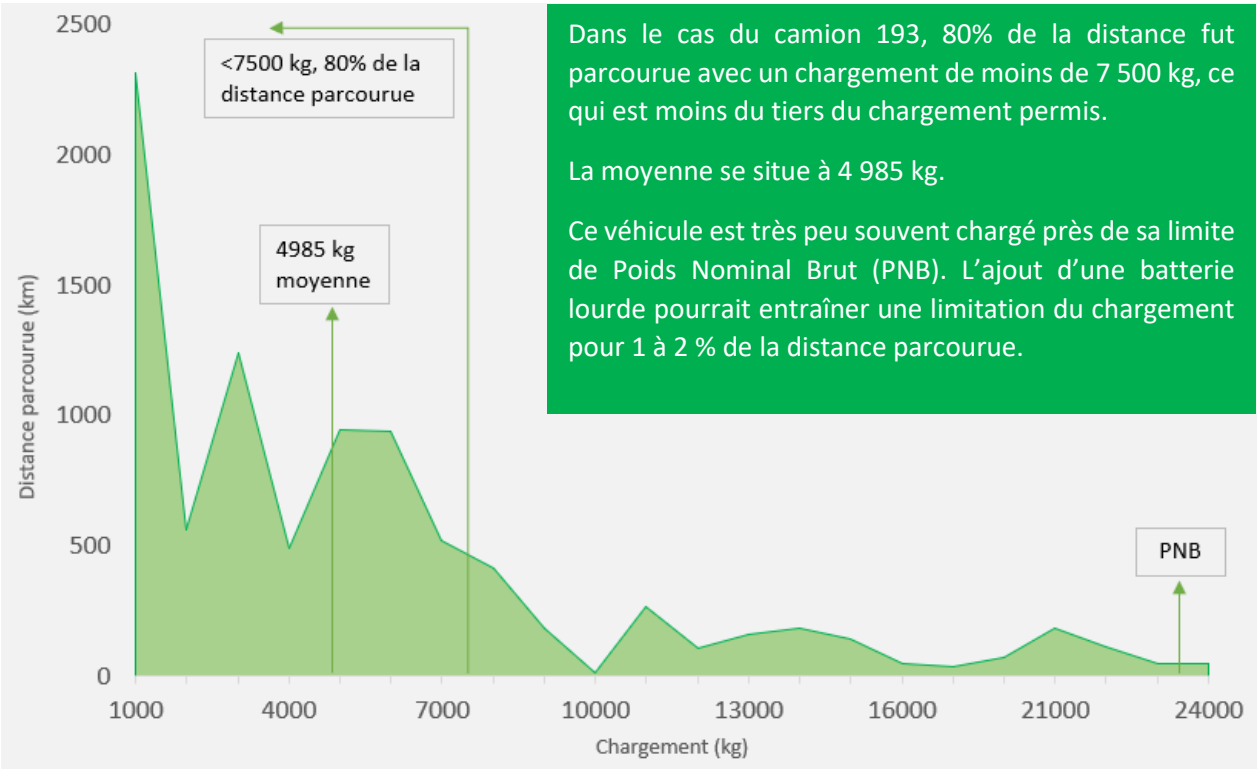
Max	418	km
90%	185	km
Med	164	km
Moy	172	km
σ	41	km
CV	24%	



	D	L	M	M	J	V	S
déc.	-	-	-	-	-	147	-
	-	158	168	154	150	157	-
	-	161	151	151	161	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
janv.	-	-	-	-	418	304	-
	-	160	164	136	163	152	-
	-	159	162	170	168	164	-
	-	158	190	182	153	167	-
	-	171	152	178	164	169	-
févr.	-	185	164	164	160	177	-
	-	186	177	172	187	165	-
	-	149	164	178	148	177	-
	-	164	153	170	179	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 12 : Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 193



Dans le cas du camion 193, 80% de la distance fut parcourue avec un chargement de moins de 7 500 kg, ce qui est moins du tiers du chargement permis.

La moyenne se situe à 4 985 kg.

Ce véhicule est très peu souvent chargé près de sa limite de Poids Nominal Brut (PNB). L'ajout d'une batterie lourde pourrait entraîner une limitation du chargement pour 1 à 2 % de la distance parcourue.

Généralement, Inter-Nord conserve ses tracteurs de classe 8 pendant 10 ans.

En résumé, l'analyse des déplacements du camion 193 permet de déterminer les grandes lignes qui affecteront son potentiel d'électrification des façons suivantes :

Tableau 9 : : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 193

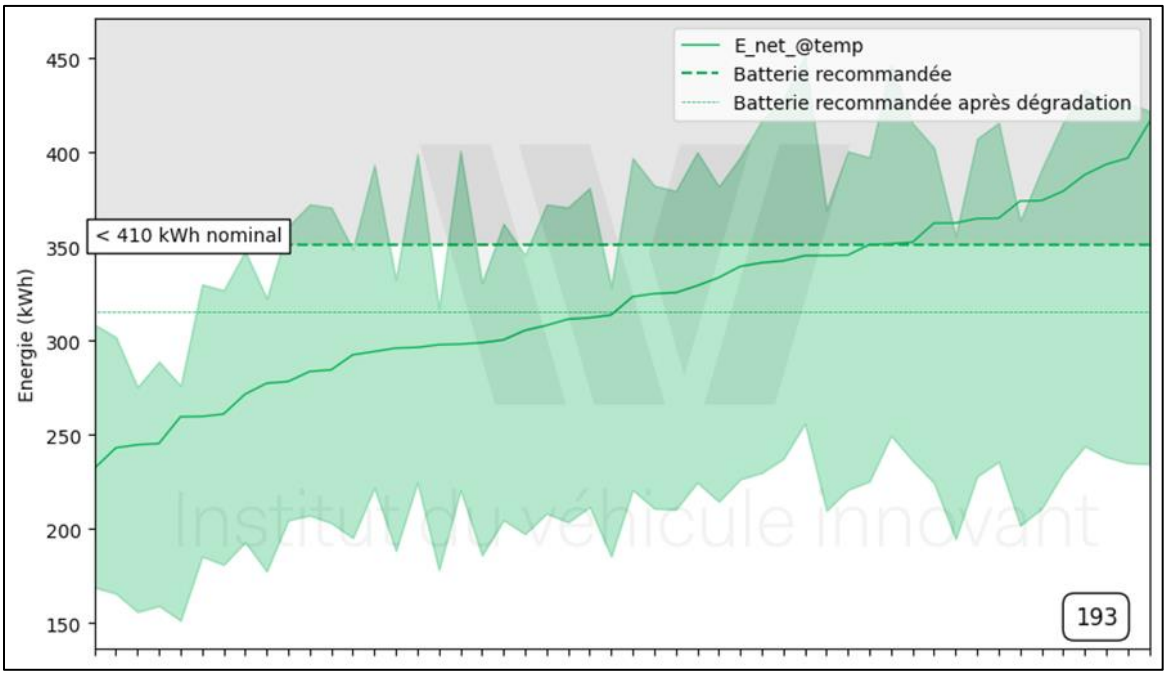
Critère	Valeur	Effet sur le potentiel d'électrification
Distances	Courtes	+
Constance	Constantes	+
Dénivelé	Faible	+
Recharge en journée	Non	-
Chargement	Léger	+
Accessoires	Aucun	+

10. Scénario d'électrification pour le camion 193

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 suivant présente les mêmes données réorganisées en ordre croissant de besoin énergétique quotidien. Cela aidera à visualiser dans quelle proportion une configuration de batterie particulière permettrait de répondre au besoin de l'unité 193.

Graphique 13 : Journées de mesure du camion 193, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh)



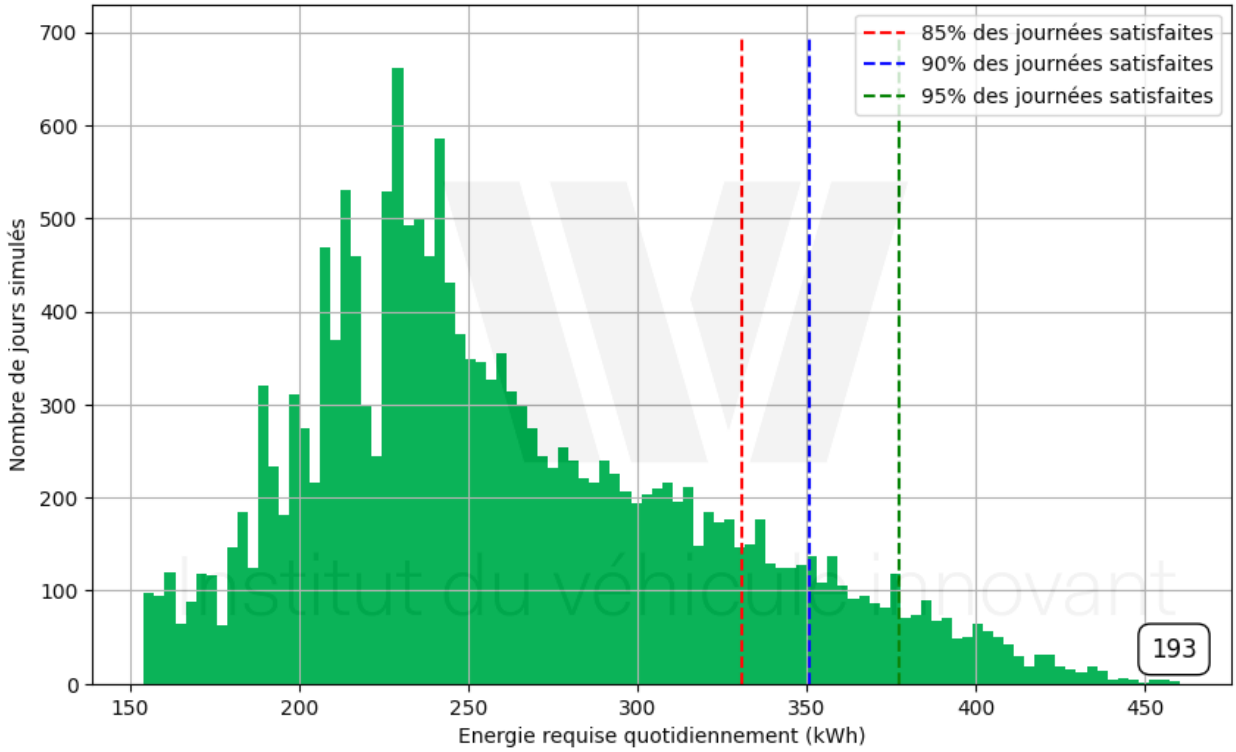
Guide d'interprétation du Graphique 13:

- 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 410 kWh disposerait de 351 kWh avec marge de confort lorsque neuf (ligne horizontale pointillée épaisse), cette batterie permettrait au camion 193 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 129 kWh/100 km. Elle sera plus élevée en hiver, pouvant être jusqu'à 50 % supérieure lors des quelques jours de grands froids.

Le Graphique 14 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 14 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 193



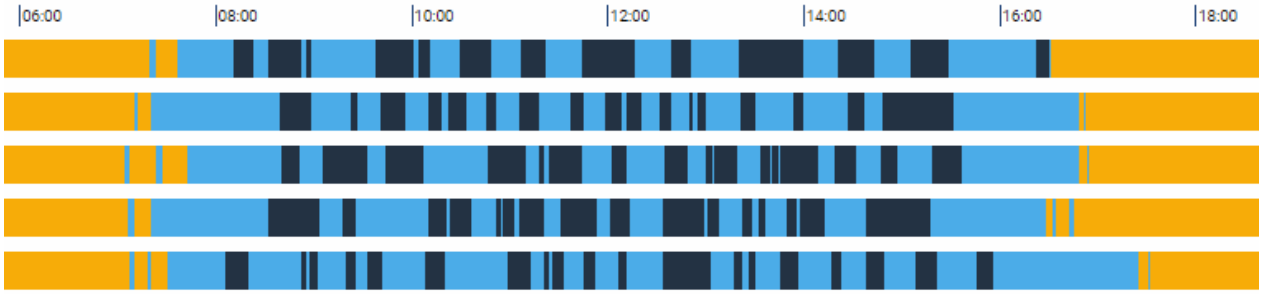
Une batterie de 410 kWh nominale permettrait alors de réaliser 90 % des journées sur une année moyenne en un seul cycle de décharge de la batterie, tandis qu'une batterie de 387 et de 441 kWh pourrait respectivement satisfaire 85 et 95 % des journées sur une année moyenne.

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

Durant la période de mesure, le camion 193 ne s'est pas arrêté au dépôt durant la journée. Il n'aurait donc pas pu bénéficier de recharges chez Inter-Nord 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 ci-dessous.

Sur ce graphique, les bandes jaunes sont les moments où le camion est arrêté au dépôt d'Inter-Nord. Les heures de la nuit ont été coupées car il n'y a aucun déplacement. On y constate que le véhicule circule généralement entre 7 et 17 heures. Le graphique 3 confirme qu'il passe régulièrement 14 heures à l'arrêt la nuit, et au minimum 10 heures. Ces heures seront utilisées pour la recharge.

Graphique 15 : Moments des déplacements et arrêts du camion 193



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 une énergie ajoutée quotidiennement d'au moins 450 kWh. Bien que cela soit à peine supérieur à la capacité utilisable de la batterie, il est important de comprendre que l'utilisation quotidienne ne videra pratiquement jamais complètement la batterie du véhicule. De plus, on dispose plus fréquemment de 14 heures pour la recharge, ce qui serait suffisant pour ajouter plus de 600 kWh (14h*45 kW = 630 kWh), ajoutant une marge de manœuvre additionnelle.

Les paramètres retenus pour un scénario d'électrification du camion 193 seraient donc les suivants :

Tableau 10 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 193

Capacité de la batterie embarquée	410 kWh
Puissance de la borne de recharge	BRCC 50 kW
90 % des opérations remplies ?	Oui

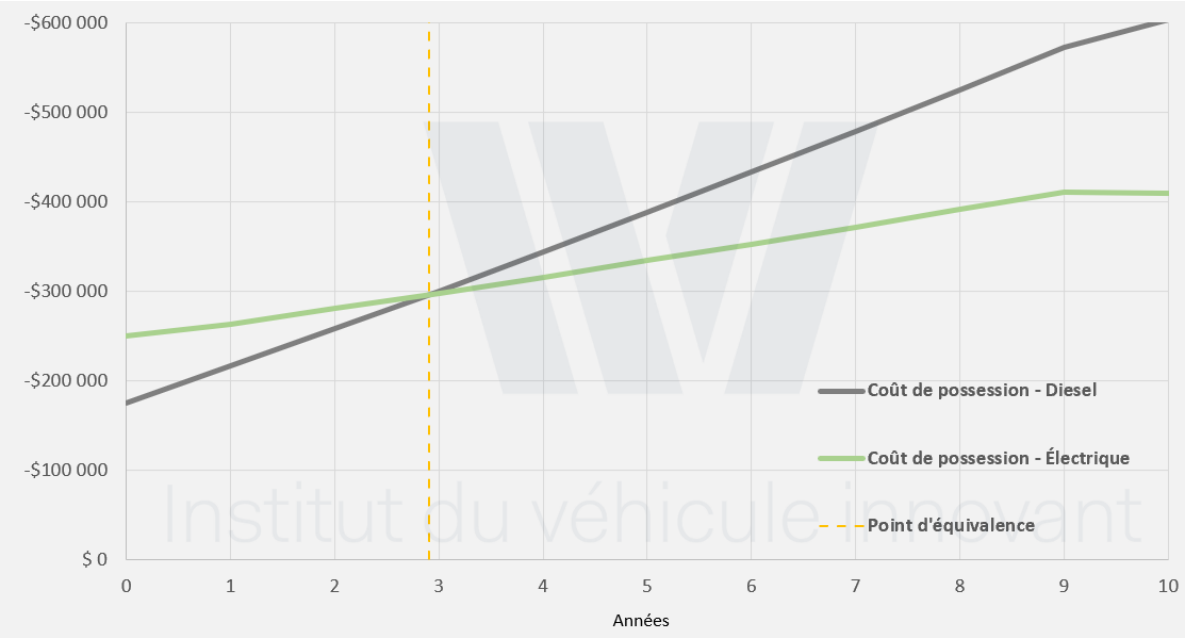
Le scénario d'électrification précédent pourrait apporter les bénéfices financiers indiqués au Tableau 11. Les bénéfices sont comptabilisés sur 10 ans, soit la durée sur laquelle Inter-Nord conserve généralement leurs tracteurs classe 8.

Tableau 11 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 193

Coût annuel de carburant avant électrification	30 037 $
Coût annuel d'électricité	5 868 $
Économie annuelle de coûts d'énergie	24 169
Surcoût total à l'achat (après subventions)	75 000 $
Période de retour sur investissement	**2,9 années**
Bénéfice net après 10 ans	**194 466$**

Le camion électrique aurait un coût total de possession après 10 ans de 409 546 $, contre 604 011 $ pour un camion diesel. Ceci représente une économie de 32 %. 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.

Graphique 16 : Comparaison des coûts totaux de possession, camion 193

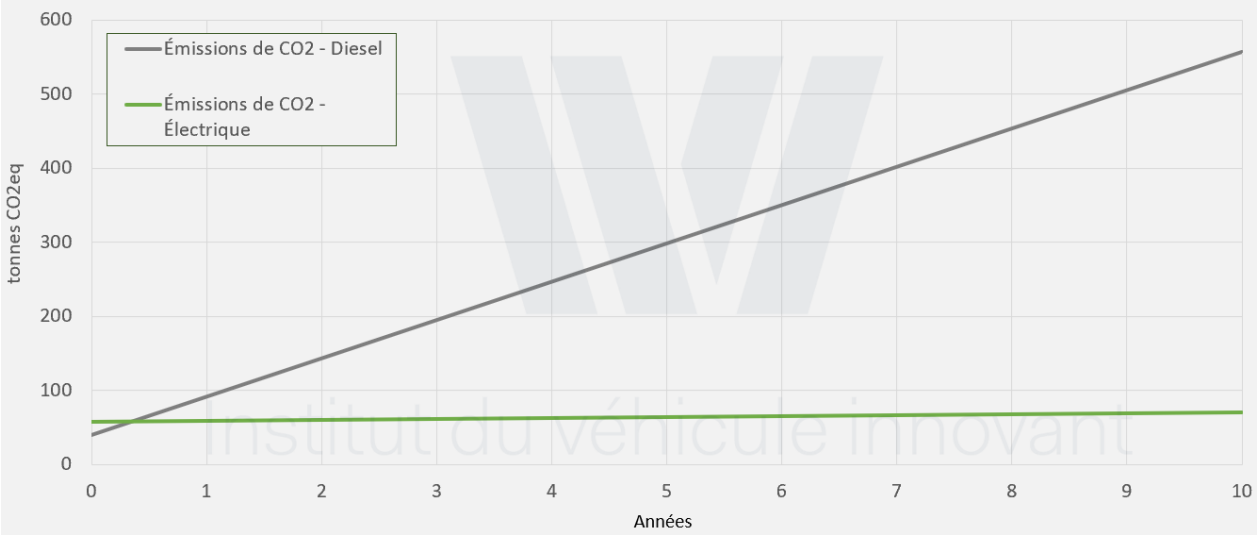


Dans le scénario d'électrification présenté pour le camion 193, celui-ci serait en mesure de compléter l'entièreté des journées, hormis les deux journées du retour du temps des fêtes, sans avoir à recourir à un camion diesel pour aider. La réduction des émissions de GES sera plus importante que pour le camion 54. Le point d'équivalence des émissions arrive vers 12 970 km, soit après seulement cinq mois d'opération. Après 10 ans, le camion aura évité l'émission de 485 tonnes de CO_2 équivalent, soit pratiquement 8 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 # 193

International LT - 2019 | Tracteur Classe 8 – PNB 36 363 kg

Graphique 17 : Émissions sur la vie du camion 193, Diesel vs. Électrique

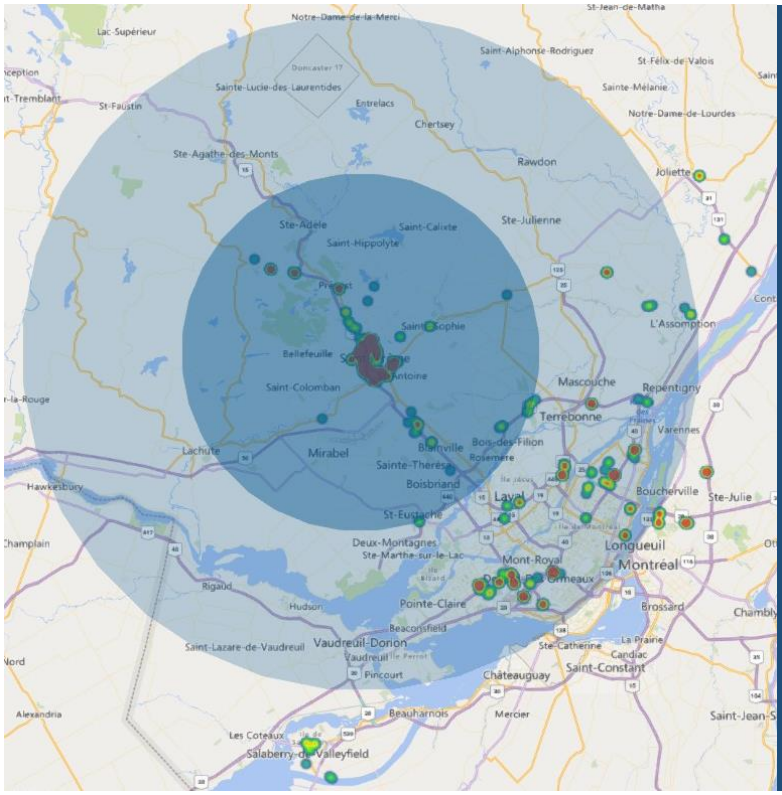


Le camion 193 a un bon potentiel d'électrification. Ses routes sont très constantes, et il est possible de couvrir toutes ses opérations avec une batterie et une borne de recharge raisonnables.

De plus, la rentabilité et la réduction des émissions de GES sont très intéressants.

11. Analyse du camion 157

Le camion 157 est utilisé pour des livraisons de marchandises sèches à des magasins et commerces. Il effectue des livraisons LTL (*Less-Than-truck Load*) dans les environs de Saint-Jérôme, puis à des endroits variés dans le grand-Montréal, revenant principalement à Saint-Laurent et Anjou. Le véhicule est généralement chargé la nuit et effectue des livraisons le matin et des cueillettes l'après-midi. Il est parfois utilisé pour un deuxième quart de travail de nuit, pour aller faire des échanges de remorques remplies de palettes de marchandises avec un chargement évalué à 25 000 lbs (11 364 kg).



Une très grande partie des livraisons et cueillettes se trouve concentrée aux alentours de Saint-Jérôme, dans un rayon bien inférieur à 25 km.

Durant le jour, quelques livraisons peuvent aussi avoir lieu à Montréal.

Cependant, les activités nocturnes du camion l'amènent à se déplacer plus près de l'extrémité du rayon de 50 km, et même un peu plus loin. Lorsqu'il est utilisé la nuit, il passe quelques heures au bureau avant de repartir.

Figure 6 : Fréquence des livraisons du camion 157 dans un rayon de 25 et 50 km d'Inter-Nord

Le camion 157 circule principalement dans la vallée du Saint-Laurent, qui est plutôt plate. Une bonne partie des déplacements se fait aussi près de Saint-Jérôme dont le terrain est un peu plus montagneux, mais toutefois moins que les Hautes-Laurentides. Ceci amène le camion à gravir en moyenne 3,1 mètres de dénivelé positif par kilomètre.

Une certaine énergie sera donc requise pour accomplir ceci. À masse égale, elle serait un peu plus élevée que le camion 193, mais significativement moins que le camion 54.

Le détail des distances parcourues à 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 12 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 157

Le camion 157 présente un cas particulier, car celui-ci a deux modes d'opération dont les déplacements sont très différents.

Lorsqu'il est utilisé durant le jour, il parcourt de courts trajets, quoiqu'assez variés.

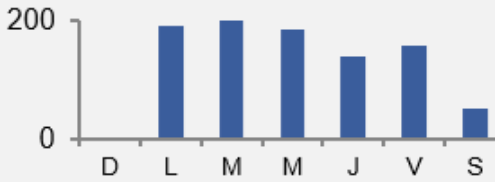
À 15 reprises durant l'essai sur 56 jours actifs mesurés, le camion est reparti en soirée après avoir complété son itinéraire de jour. Ceci est non-négligeable, et affecte grandement les kilométrages maximaux, de même que l'écart-type et le Coefficient de Variation de l'étude.

On pourrait croire que ces journées se trouvent doublées, mais en réalité les activités de nuit sont encore plus longues et demandantes que les fonctions diurnes.

L'entièreté des journées dépassant 300 km, et plusieurs des journées au-delà de 200 km arrivent à ce total à cause de la combinaison des itinéraires de jour et de nuit.

Il pourrait être utile de décupler ces deux opérations type et de les considérer séparément pour leur potentiel d'électrification respectif.

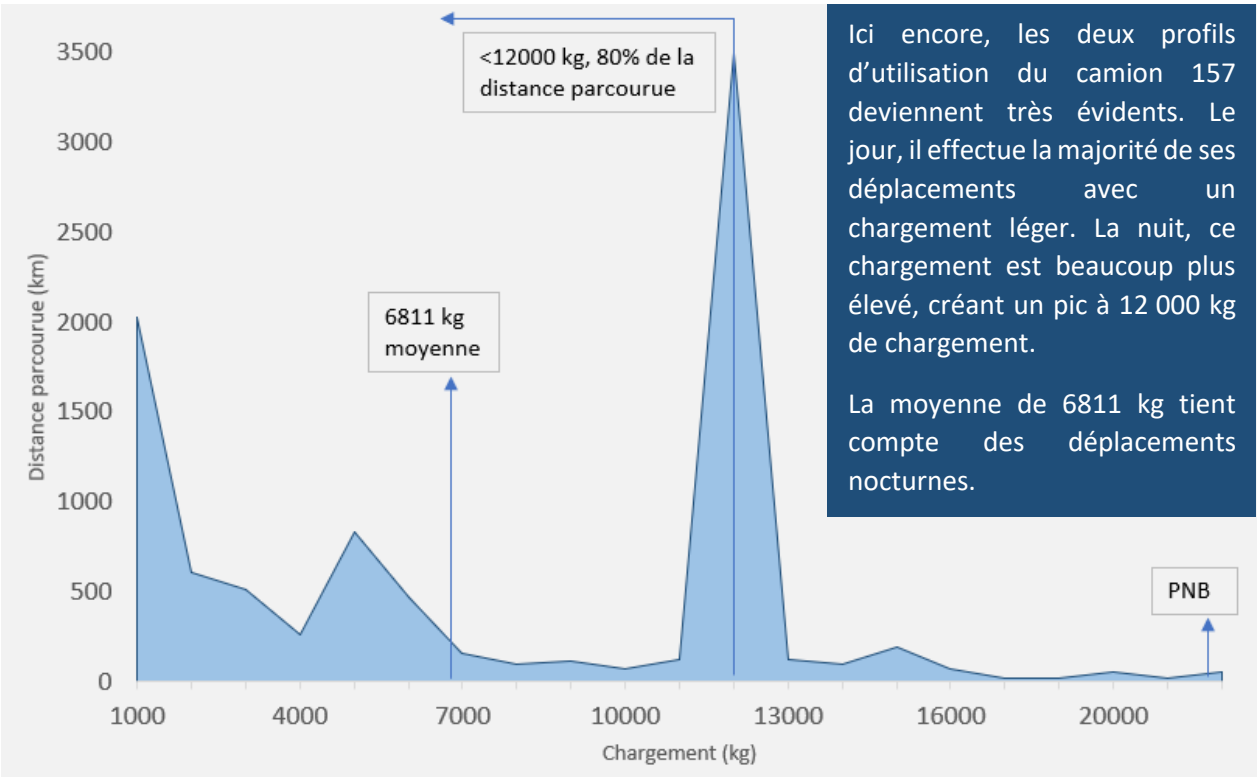
Max	522	km
90%	307	km
Med	144	km
Moy	171	km
σ	118	km
CV	69%	



	D	L	M	M	J	V	S
déc.	-	-	-	-	-	49	-
	-	-	-	230	87	135	-
	-	167	80	139	167	-	-
	-	-	-	135	158	-	-
janv.	-	-	134	252	140	431	-
	-	60	144	144	116	52	-
	-	220	196	84	77	139	-
	-	142	141	28	58	211	-
	-	226	203	314	277	258	53
févr.	-	42	203	170	20	35	-
	-	445	339	522	295	289	-
	-	144	51	29	120	82	-
	-	280	493	183	149	60	-
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 18 : Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 157



Ici encore, les deux profils d'utilisation du camion 157 deviennent très évidents. Le jour, il effectue la majorité de ses déplacements avec un chargement léger. La nuit, ce chargement est beaucoup plus élevé, créant un pic à 12 000 kg de chargement.

La moyenne de 6811 kg tient compte des déplacements nocturnes.

En résumé, l'analyse des déplacements du camion 157 permet de déterminer les grandes lignes qui affecteront son potentiel d'électrification des façons suivantes :

Tableau 13 : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 157

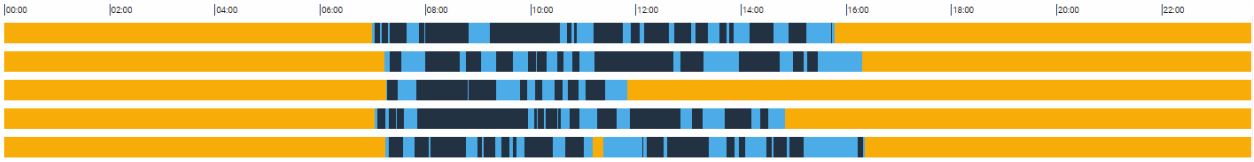
Critère	Valeur	Effet sur le potentiel d'électrification
Distances	Courtes	+
Constance	Variées	-
Dénivelé	Faible	+
Recharge en journée	Non	-
Chargement	Léger	+
Accessoires	Aucun	+

12. Scénario d'électrification pour le camion 157

Le cas du camion 157 est un peu particulier, car celui-ci opère sur deux scénarios hebdomadaires différents. Les graphiques d'utilisation à bandes utilisés précédemment offrent une excellente façon de comprendre ces deux scénarios.

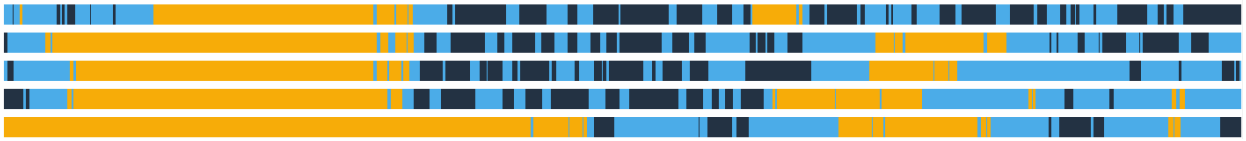
Durant la première semaine type, le camion est utilisé seulement de jour tel qu'illustré ci-dessous. Les bandes jaunes représentent un arrêt au bureau, le bleu foncé est un arrêt chez un client, alors que les bandes bleu pâle représentent les moments où le camion circule. Cette fois-ci les bandes montrent toutes les heures du jour, de minuit à 23h59 pour mieux comprendre les déplacements nocturnes du deuxième scénario.

Graphique 19 : Moments des déplacements et arrêts du camion 157, scénario de jour



Lors de la deuxième semaine type, le camion est utilisé le jour comme dans le cas précédent, puis il revient au dépôt en fin de journée et repart en soirée et une bonne partie de la nuit pour effectuer des repositions de remorques entre terminaux. Ces remorques sont chargées en palettes vides, ce qui représente un chargement moyen d'environ 12 000 kg. Le camion fait peu de livraisons et la vitesse de déplacement moyen est plus élevée qu'en journée. Ce type de journée représente environ 25 % de l'essai.

Graphique 20 : Moments des déplacements et arrêts du camion 157, scénario de jour et de soir



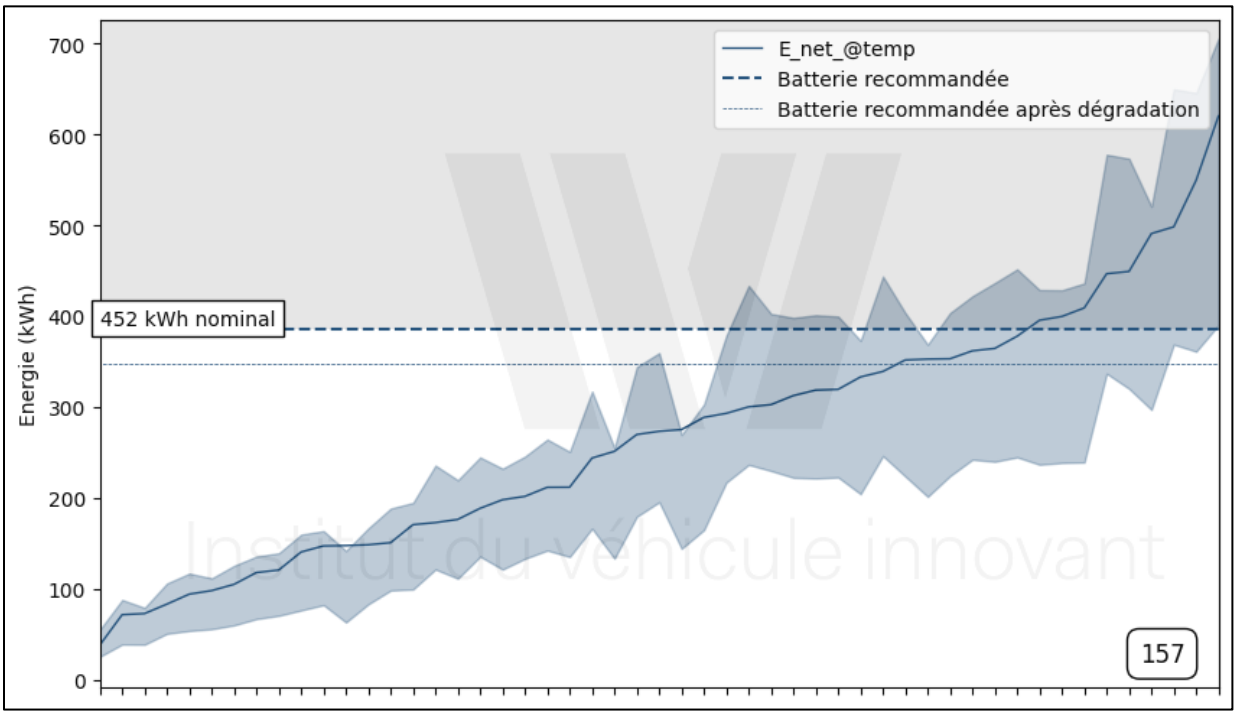
L'analyse sera donc divisée en deux scénarios. Dans le premier scénario, le véhicule serait utilisé seulement pour les activités en journée et les repositions de nuit seraient réalisées par un autre véhicule. Dans le deuxième scénario, le camion devrait être rechargé en fin de journée avec une borne rapide et tenterait de compléter les repositions.

Scénario 1, camion 157 – Opération de jour seulement

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 21 présente la distribution de ces énergies pour chaque journée de l'essai. 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 21 : Journées de mesure du camion 157, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh)



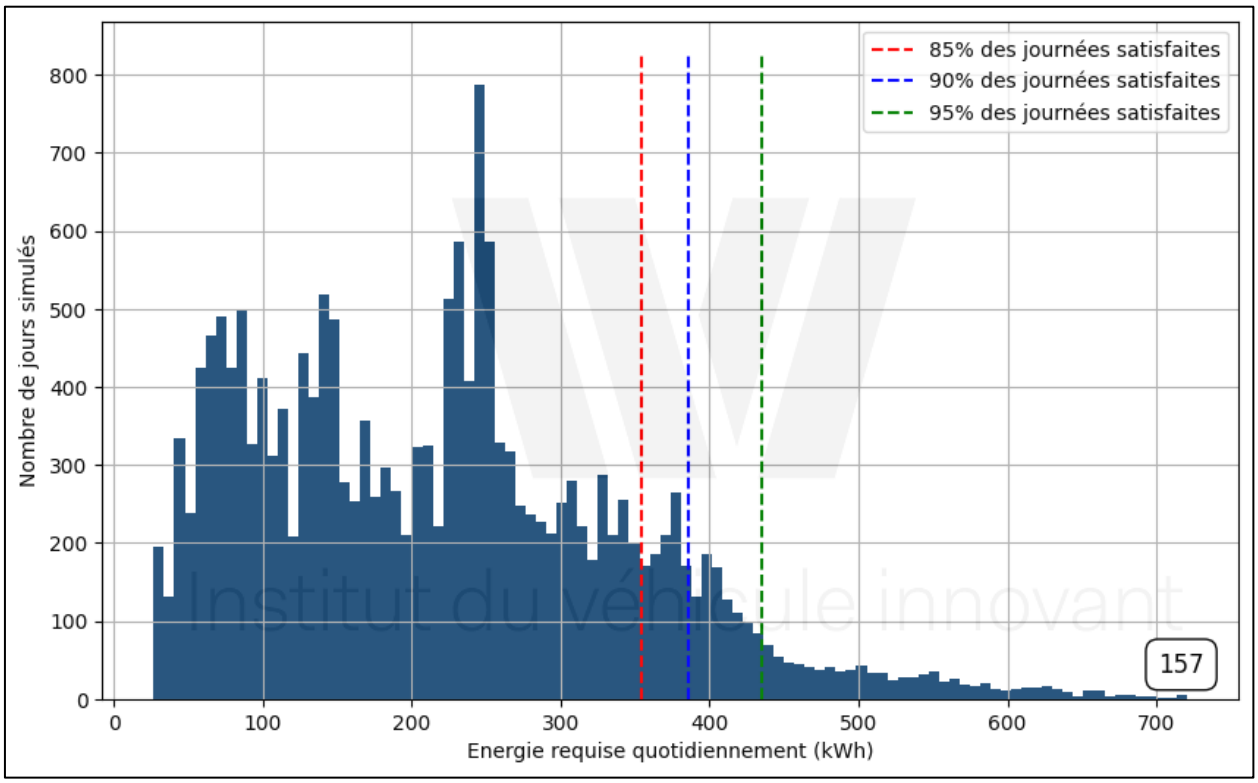
Guide d'interprétation du Graphique 21:

- 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 452 kWh disposerait de 386 kWh avec marge de confort lorsque neuf (ligne horizontale pointillée épaisse), cette batterie permettrait au camion 157 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 22 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 22 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 157



Une batterie de 452 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 414 et de 509 kWh pourrait respectivement satisfaire 85 % et 95 % des journées sur une année moyenne.

Les configurations de batteries offertes pour les tracteurs électriques de classe 8 vont d'environ 250 à 650 kWh actuellement, en 2023. 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 que la dégradation de la batterie diminuera l'autonomie au fil des ans. L'IVI propose de considérer une diminution de 10% sur la durée d'utilisation du véhicule.

Le scénario d'électrification 1, qui consiste à utiliser le camion seulement pour ses sorties de jour, serait possible à implémenter avec succès, avec un camion muni d'une batterie de 452 kWh nominale. Toutefois, il serait plus pratique pour Inter-Nord de vérifier si tous les trajets du camion 157 pourraient être effectués avec un seul camion électrique. C'est ce à quoi tentera de répondre le scénario 2.

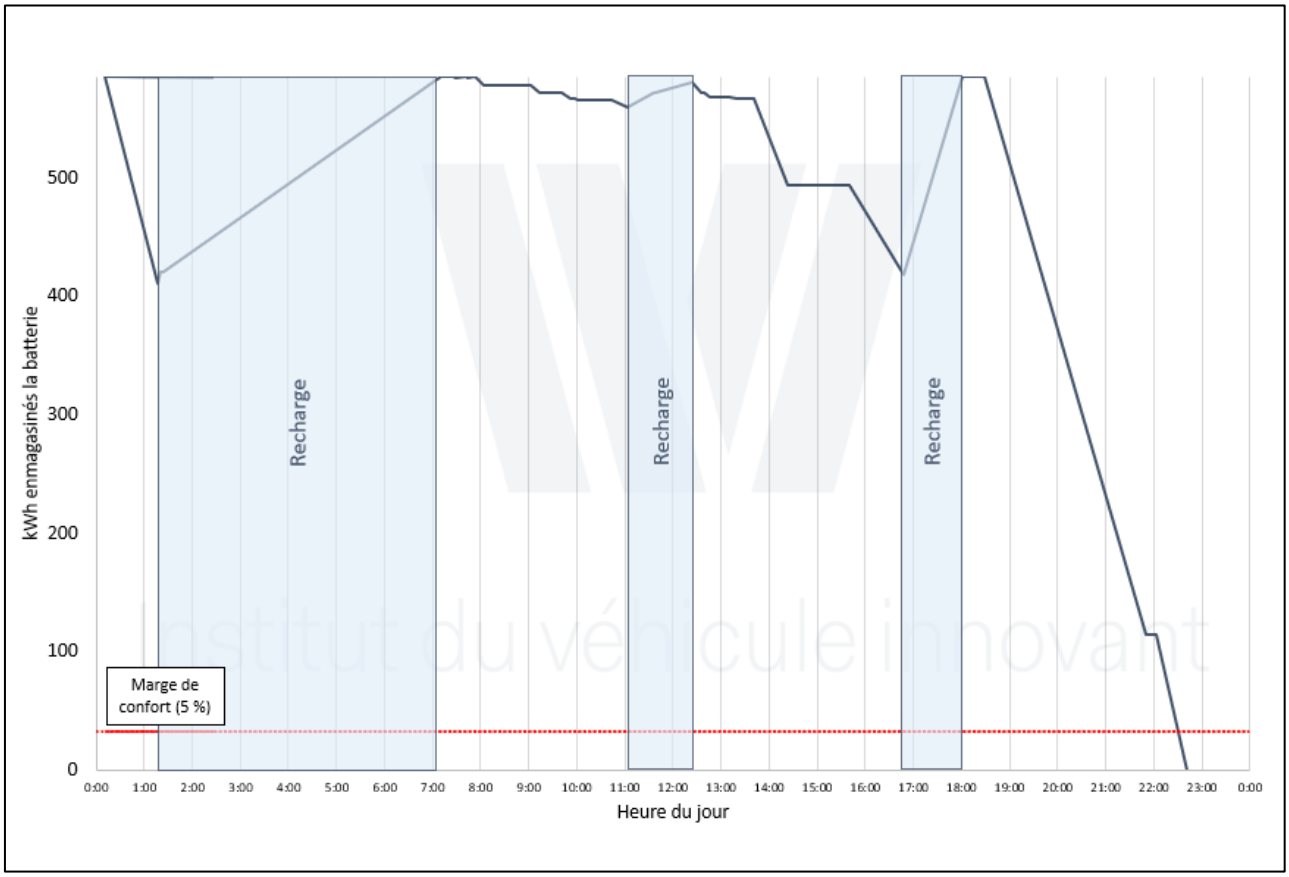
Scénario 2, camion 157 – Opération jour et nuit avec recharge d'appoint

L'option de recharger le camion 157 en fin de journée avant de repartir en soirée a été étudiée avec une borne de recharge d'une puissance de 150 kW. Cette borne a été sélectionnée, car elle permet de maximiser la recharge durant le temps au dépôt en début de soirée et de repartir pleinement charger le plus souvent possible. Malheureusement, bien que ce temps d'arrêt soit souvent suffisant pour remplir la batterie, l'autonomie est inadéquate pour compléter plusieurs des trajets de nuit observés. En effet, ces routes sont plus longues, sont parcourues à haute vitesse et transportent un chargement important.

En guise d'exemple, le graphique 23 illustre l'évolution de l'état de charge du camion lors de la journée et la soirée du 15 février 2023. On y voit que la courbe remonte à 100 % avant de repartir, puis plonge abruptement avant de descendre bien en bas de 0 %. En fait, le premier trajet décharge l'entièreté de la batterie à lui seul. Il s'agit d'un trajet de 188 km sur autoroute entre Saint-Jérôme et l'arrondissement Saint-Laurent à Montréal. Le camion fait également un détour par Joliette. Cette portion du trajet nécessite plusieurs accélérations partant d'une basse vitesse et terminant à vitesse d'autoroute, ce qui est très énergivore.

Bien que le graphique 23 s'arrête à minuit, le camion n'a pas encore terminé sa route et il continue à rouler jusqu'aux petites heures le lendemain. Cela demanderait encore plus d'énergie de la batterie que ce qui est montré par le graphique.

Graphique 23 : Courbe de décharge et recharge quotidienne du camion 157



Il n'est donc pas possible de considérer le scénario 2 comme étant viable, car dans la plupart des cas il ne fonctionnerait pas. Le seul scénario d'électrification possible pour le camion 157 est celui où il opère seulement de jour, et les fonctions de nuit sont reprises par un autre camion, car celles-ci ne peuvent être électrifiées avec l'offre actuelle de batteries.

Donc, le scénario 1 sera utilisé pour le restant de l'étude du camion 157.

Suivant cette constatation, il reste à déterminer la puissance de la borne de recharge qui serait adéquate avant de pouvoir calculer les bénéfices associés à l'électrification. Vu que tous les trajets nocturnes ne sont plus considérés, le Graphique 3 présentant les heures disponibles à la recharge peut être amputé de la portion de gauche, et on peut considérer qu'il disposera fréquemment de 12 heures et plus pour la recharge. Suivant cette logique, le même diagnostic est posé qu'avec les camions 54 et 193. La recharge avec une BRCC d'une puissance de 50 kW (45 kW effectifs) durant 12 heures ajoutera au minimum 540 kWh d'énergie, ce qui sera suffisant pour recharger la batterie jusqu'à un état de charge de 100 % chaque nuit.

Les paramètres retenus pour un scénario d'électrification du camion 157 seraient donc les suivants :

Tableau 14 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 157

Capacité de la batterie embarquée	452 kWh
Puissance de la borne de recharge	BRCC 50 kW
90 % des opérations remplies ?	Oui **(de jour seulement)**

Le scénario d'électrification précédent pourrait apporter les bénéfices financiers indiqués au Tableau 15. Ce tableau comprend une ligne additionnelle pour le coût de diesel après l'électrification, puisque le camion électrique ne pourra pas remplacer les opérations nocturnes. Il restera alors une certaine dépense de carburant pour combler les trajets restants. Les bénéfices sont comptabilisés sur 10 ans, soit la durée sur laquelle Inter-Nord conserve généralement ses tracteurs classe 8.

Tableau 15 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 157

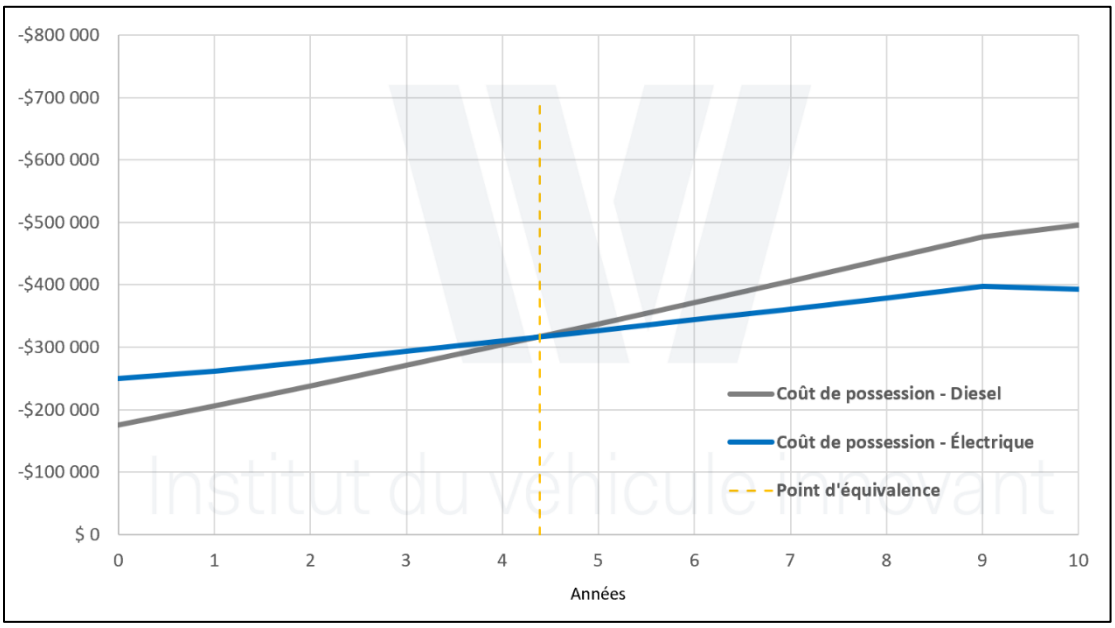
Coût annuel de carburant avant électrification	20 407 $
Coût annuel d'électricité	4 473 $
Économie annuelle de coûts d'énergie	15 934 $
Surcoût total à l'achat	75 000 $
Période de retour sur investissement	**4,4 années**
Bénéfice net après 10 ans	**102 867 $**

Bien que le bénéfice après 10 ans soit positif, ce scénario n'est possiblement pas le plus intéressant présenté dans ce rapport, car il impose une modification importante des opérations, et ce pour un bénéfice beaucoup moins intéressant.

Les deux graphiques suivants présentent les bénéfices économiques et environnementaux. Le camion électrique aurait un coût total de possession après 10 ans de 393 262 $, contre 496 129 $ pour un camion diesel, tel que montré sur le graphique 24. Ceci représente une économie de 20 %.

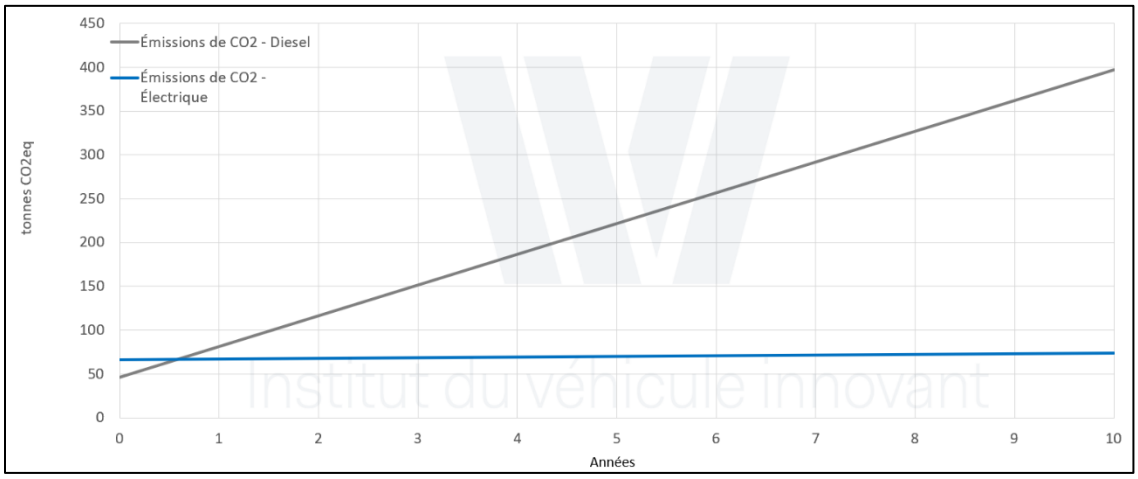
Il est important de ne pas oublier que même si l'économie effectué est importante, ce scénario d'électrification ne tient pas compte des déplacements de soir. Ceux-ci auront lieu quand même et Inter-Nord aura encore à défrayer des coûts de carburant. Ces trajets représentent 15 000 km annuellement, soit 40 % de la distance parcourue par le camion.

Graphique 24 : Comparaison des coûts totaux de possession, camion 157



Les avantages environnementaux sont quand même intéressants, bien qu'ils ne soient pas les meilleurs parmi les trois camions mesurés pour Inter-Nord. Le point d'équivalence arrive après 13 096 km et près de 7 mois. À partir de ce moment, un camion électrique aurait émis moins de GES qu'un camion diesel. L'émission de 322 tonnes de CO2 équivalent seraient évitées en 10 ans.

Graphique 25 : Émissions sur la vie du camion 157, Diesel vs. Électrique



Camion # 157

Western Star 4900 - 2017 | Tracteur Classe 8 – PNB 36 363 kg

Le camion 157 présente un bon potentiel de réduction d'émission de GES, mais il est impossible de remplacer tous ses déplacements actuels, principalement la nuit. Il serait donc nécessaire de conserver un camion diesel en renfort ou de redistribuer les trajets de nuit à un autre véhicule. De plus, les gains financiers sont présents, mais ils ne seront pas majeurs une fois que le coût du diesel de nuit sera ajouté dans les calculs.

Dans le scénario où le gestionnaire de flotte ne peut pas adapter la route du camion 157, l'IVI ne peut pas recommander l'électrification de ce camion pour l'instant.

Dans le cas où le gestionnaire de flotte peut facilement redistribuer les routes du soir à un autre camion, l'IVI recommanderait l'électrification de ce camion. Cependant, dans le cas d'une stratégie d'électrification progressive, il serait recommandé de prioriser le camion 193 ou tout autre camion qui parcourt un itinéraire semblable à celui-ci puisque les gains monétaire et environnemental sont supérieurs.

13. Conclusions et recommandations

L'analyse des trois camions diesel instrumentés chez Inter-Nord 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 16 : Recommandation d'électrification des camions d'Inter-Nord

Véhicule	Camion 54	Camion 193	Camion 157
Potentiel d'électrification (/10)	7	10	7
Recommandation d'électrification de l'IVI	Oui (avec adaptation)	Oui	Oui (avec adaptation)
Capacité totale de batterie requise pour effectuer 85 % des déplacements	330 kWh	387 kWh	414 kWh
Capacité totale de batterie requise pour effectuer 90 % des déplacements	362 kWh	410 kWh	452 kWh
Capacité totale de batterie requise pour effectuer 95 % des déplacements	407 kWh	441 kWh	509 kWh

Ce score est obtenu 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, capacités des batteries et disponibilité des accessoires amènera probablement une amélioration de ces scores avec le temps.

Le camion 193 présente un excellent potentiel car il n'est muni d'aucun accessoire et ses routes sont très constantes. De plus, la demande énergétique est toujours en-deçà de l'énergie contenue dans les batteries offertes par des camions sur le marché, à l'exception de deux journées jugées peu représentatives et peu à risque de se répéter en cours d'année. Les bénéfices économiques et environnementaux seraient très intéressants.

En version électrique, le camion 54 pourrait compléter une bonne partie de ses déplacements actuels, mais pas l'entièreté de ceux-ci sans effectuer de recharge en journée. La rentabilité est un peu moins élevée que le camion 193, et l'existence d'un chauffage de boîte utilisant le liquide de refroidissement moteur amène une incertitude quant à sa consommation électrique réelle. En plus de ne pas être un équipement offert sur les véhicules électriques, l'installation par après de ce dispositif pourrait diminuer le nombre de journées où l'IVI estime qu'un camion électrique serait en mesure de compléter ses trajets, surtout en hiver.

En électrifiant la route du camion 157, il serait seulement en mesure de remplir ses fonctions de jour. En se limitant à ces opérations, la rentabilité du camion électrique n'est pas optimale. Cependant, ce scénario mérite d'être étudié. Le camion électrique aurait un point d'équivalence d'environ 4,4 ans et il pourrait générer de très bons bénéfices environnementaux.

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

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 d'Inter-Nord 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 la positionner 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 d'Inter-Nord. 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 d'Inter-Nord, 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 :