Flotte rechargeable Camions lourds

Rapport – Phase 2
Smart Transport

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

Date : 21 juin 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 08 19
8. Scénario d'électrification pour le camion 08 22
9. Analyse du camion 12 27
10. Scénario d'électrification pour le camion 12 30
11. Analyse du camion 05 34
12. Scénario d'électrification pour le camion 05 37
13. Conclusions et recommandations 41
14. Sources des données 43
15. Remerciements 44

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

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

Liste des tableaux

Tableau 1 : Énergie nominale vs. utilisable d'un camion électrique à différents stades de vie 10
Tableau 2 : Informations de base sur l'utilisation des véhicules de Smart Transport 14
Tableau 3 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 08 20
Tableau 4 : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 08 21
Tableau 5 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 08 25
Tableau 6 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 08 25
Tableau 7 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 12 28
Tableau 8: Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 12 29
Tableau 9 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 12 32
Tableau 10 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 12 33
Tableau 11 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 05 35
Tableau 12 : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 05 36
Tableau 13 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 05 39
Tableau 14 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 05 39
Tableau 15: Recommandation d'électrification des camions de Smart Transport 41

Liste des figures

Figure 1 : Échelle de dénivelé allant du plus petit dénivelé au plus grand 8
Figure 2 : Camions utilisés durant l'essai, dans l'ordre de gauche à droite : Camions 08, 12 et 05 13
Figure 3 : Fréquence des livraisons du camion 08 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de Smart Transport 19
Figure 4 : Fréquence des livraisons du camion 12 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de Smart Transport 27
Figure 5 : Fréquence des livraisons du camion 05 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de Smart Transport 34

Liste des graphiques

Graphique 1 : Répartition des kilométrages quotidiens par camion 15
Graphique 2 : Répartition des vitesses – Smart Transport 16
Graphique 3 : Heures par jour au dépôt, sans les fins de semaine et les fériés 17
Graphique 4 : Proportion de la distance parcourue selon la masse totale transportée du camion 08 21
Graphique 5: Journées de mesure du camion 08, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh) 22
Graphique 6 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 08 23
Graphique 7 : Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 08 24
Graphique 8: Émission sur la vie du camion 08, Diesel vs. Électrique 25
Graphique 9: Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 12 29
Graphique 10: Journées de mesure du camion 12, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh) 30
Graphique 11 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 12 31
Graphique 12 : Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 12 32
Graphique 13: Émission sur la vie du camion 12, Diesel vs. Électrique 33
Graphique 14: Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 05 36
Graphique 15: Journées de mesure du camion 05, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh) 37
Graphique 16 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 05 38
Graphique 17 : Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 05 39
Graphique 18: Émission sur la vie du camion 05, Diesel vs. Électrique 40

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 Smart Transport, située à Montréal.

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 :

59 % des journées se terminent en ayant parcouru moins de 200 km

85 % des arrêts de nuit au terminal durent 12 heures ou plus, assez pour ajouter 540 kWh avec une borne de 50 kW pour chaque camion

Camion 08 – Porteur essieu simple		Effet sur le potentiel d'électrification
Critère	**Valeur**	
Distances	**Longues**	-
Constance	**Variées**	-
Dénivelé	**Faible**	+
Recharge en journée	**Oui**	+
Chargement	**Moyen**	+/-
Accessoires	**Non**	+

Consommation électrique estimée en été	98 kWh / 100 km
Pénalité de chargement ?	Non
Capacité nominale requise pour 90 % des journées	413 kWh
Batterie disponible ?	Non

Camion 12 – Porteur essieu simple		Effet sur le potentiel d'électrification
Critère	**Valeur**	
Distances	**Longues**	-
Constance	**Variées**	-
Dénivelé	**Faible**	+
Recharge en journée	**Oui**	+
Chargement	**Faible**	+
Accessoires	**Non**	+

Consommation électrique estimée en été	104 kWh / 100 km
Pénalité de chargement ?	Non
Capacité nominale requise pour 90 % des journées	429 kWh
Batterie disponible ?	Non

Camion 05 – Porteur essieu simple		Effet sur le potentiel d'électrification
Critère	**Valeur**	
Distances	**Longues**	-
Constance	**Variées**	-
Dénivelé	**Faible**	+
Recharge en journée	**Oui**	+
Chargement	**Moyen**	+/-
Accessoires	**Oui**	-

Consommation électrique estimée en été	110 kWh / 100 km
Pénalité de chargement ?	Non
Capacité nominale requise pour 90 % des journées	463 kWh
Batterie disponible ?	Non

2. Méthodologie

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

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

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

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

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

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

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

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

Le freinage régénératif pourra être utilisé lors de la descente des côtes parcourues dans le but de récupérer un peu d'énergie 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 effectuer la collecte de données, les besoins énergétiques ont été estimés pour la température réelle lors de l'analyse, mais aussi pour des températures de 20°C et -20°C. Ces températures ont été sélectionnées, car elles représentent respectivement une température où une batterie est à sa meilleure efficacité, et une température assez froide pour représenter une journée typique où un véhicule électrique aurait une autonomie minimale.

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

L'énergie requise calculée dans les trois scénarios ci-dessous est comparée aux capacités nominales d'énergie contenue dans les batteries, ou l'énergie totale. Cette valeur est utilisée, car c'est le nombre qui est le plus souvent annoncé 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, la même batterie vendue avec 100 kWh d'énergie nominale pourra compléter 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

Fondée en 1992, Smart Transport est une compagnie montréalaise qui se spécialise dans le transport de marchandises sur palettes, l’entreposage et la logistique. Ils transportent majoritairement des produits provenant de l’industrie papetière, soit des produits à recycler ou produits d’emballage recyclés.

L’entreprise opère actuellement 15 camions, majoritairement dans la grande région Métropolitaine de Montréal. Deux de leurs camions sont attitrés aux longues distances. Chaque camion à un chauffeur attitré.

L’entreprise conserve actuellement ses camions 7 à 8 ans. Cette décision a été prise car leurs analyses internes démontre qu’après cette période le coût d’entretien augmente significativement, rendant plus rentable le remplacement. La même durée de vie sera donc utilisée pour les scénarios d’électrification présentés dans ce rapport.

6. Véhicules analysés

Suite aux consultations avec le gestionnaire du parc, les trois camions retenus pour l'analyse sont les unités 08, 12 et 05. Les trois véhicules analysés sont des camions porteurs avec un essieu simple à l'arrière. Le premier camion, soit le 08, est un Freightliner tandis que les deux autres camions sont de la marque Mack. Le camion 05 est muni d'un hayon élévateur tandis que les deux autres camions n'ont pas d'accessoire.

Figure 2 : Camions utilisés durant l'essai, dans l'ordre de gauche à droite : Camions 08, 12 et 05

Ces camions ont été retenus car ils répondaient aux critères généraux de sélection quant aux distances approximatives parcourues et au retour au dépôt la nuit. En effet, les trois camions étudiés font des livraisons dans le jour et reviennent à l'entrepôt pour la nuit, ce qui permet de prévoir du temps pour la recharge. Dans le cas étudié, les trois camions se sont avérés avoir des paramètres très similaires. Il est donc possible de constater qu'une certaine partie de l'analyse se répète dans la suite du rapport.

La compagnie compte environ 15 camions porteurs, dont 12 qui font des livraisons similaires à ceux étudiés durant l'analyse. Bien qu'il soit tentant d'appliquer les conclusions des trois camions présentés dans ce rapport à tout autre camion de la flotte, l'IVI préfère ne pas émettre de diagnostic ferme sur ceux-ci, car beaucoup de variables autres que ceux mentionnés précédemment influencent les simulations effectuées. Une étude approfondie de ces véhicules s'imposerait donc pour affirmer avec certitude le potentiel d'électrification des véhicules autres que ceux présentés dans ce document.

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

Quelques données saillantes ont été compilées dans un tableau résumé, voir le Tableau 2. Bien que ces données ne fournissent que très peu d'information sur la possible consommation d'un camion qui serait électrifié, elles permettent de comprendre les généralités des opérations de ces trois camions. Ces informations ne devraient pas receler d'importantes surprises pour les gestionnaires de Smart Transport.

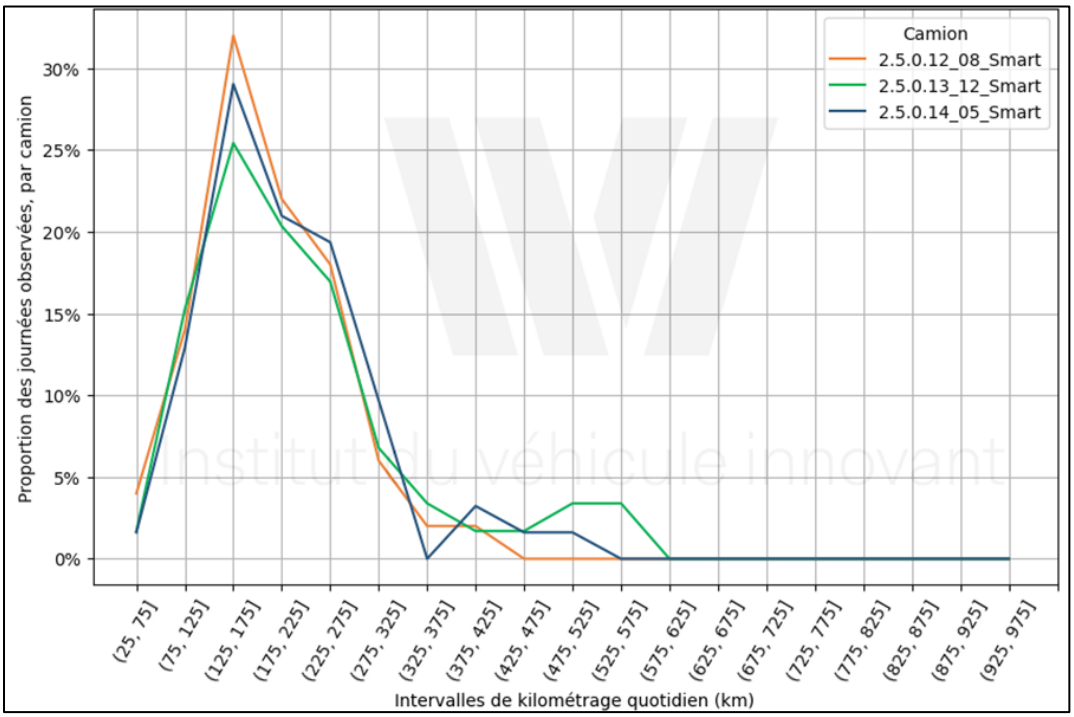
Tableau 2 : Informations de base sur l'utilisation des véhicules de Smart Transport

Camion #	08	12	05
Distance parcourue			
Durant le test	9 144 km	12 888 km	12 938 km
Annuellement (estimée)	36 576 km	51 552 km	51 752 km
Carburant			
Consommé durant le test	2 155 L	3 163 L	3 194 L
Consommé annuellement (estimé)	8 620 L	12 652 L	12 776 L
Consommation moyenne	26,2 L/100 km	26,0 L/100 km	27,5 L/100 km
Ralenti			
Temps par jour en moyenne	1 h	0,8 h	0,7 h
Carburant consommé au ralenti par jour	5,6 L	4,3 L	4,6 L
Carburant consommé par année (estimé)	1 124 L	1 008 L	1 160 L
Opérations			
Vitesse moyenne en déplacement	37,3 km/h	42,5 km/h	40,6 km/h
Nombre de jours actifs durant l'essai	50 jours	59 jours	63 jours
Masse totale moyenne	9 254 kg	8 836kg	9 234 kg

Dans le Tableau 2, il est possible de voir que le camion 08 a parcouru beaucoup moins de distances durant l'essai que les deux autres camions. Le camion 05 est celui avec la plus grande consommation. Cette consommation plus élevée peut être expliquée en partie par le fait que ce camion a un chargement moyen plus élevé et qu'il est un an plus vieux que le camion 12.

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

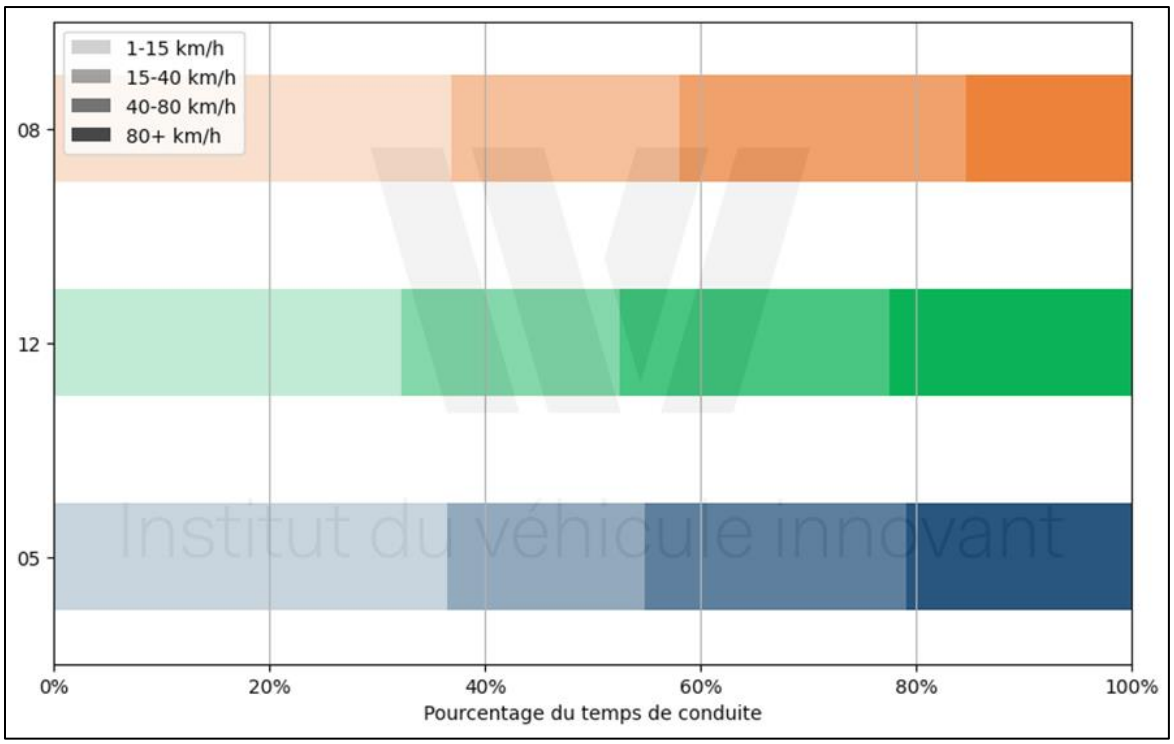
Graphique 1 : Répartition des kilométrages quotidiens par camion



En observant le Graphique 1, il est possible de remarquer que les trois camions parcourent des distances très semblables. Les kilométrages quotidiens les plus fréquents sont entre 125 et 175 km. Cependant, beaucoup de journées sont plus longues. Ainsi, plus de 91 % des journées effectuées par les trois camions ont un kilométrage quotidien inférieur à 325 km.

Un autre facteur d'importance est la vitesse du véhicule. Le Graphique 2 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. Le camion 08 est celui qui passe le moins de temps à vitesse d'autoroute, mais il est possible de constater que les trois camions ont des plages de vitesses plutôt similaires.

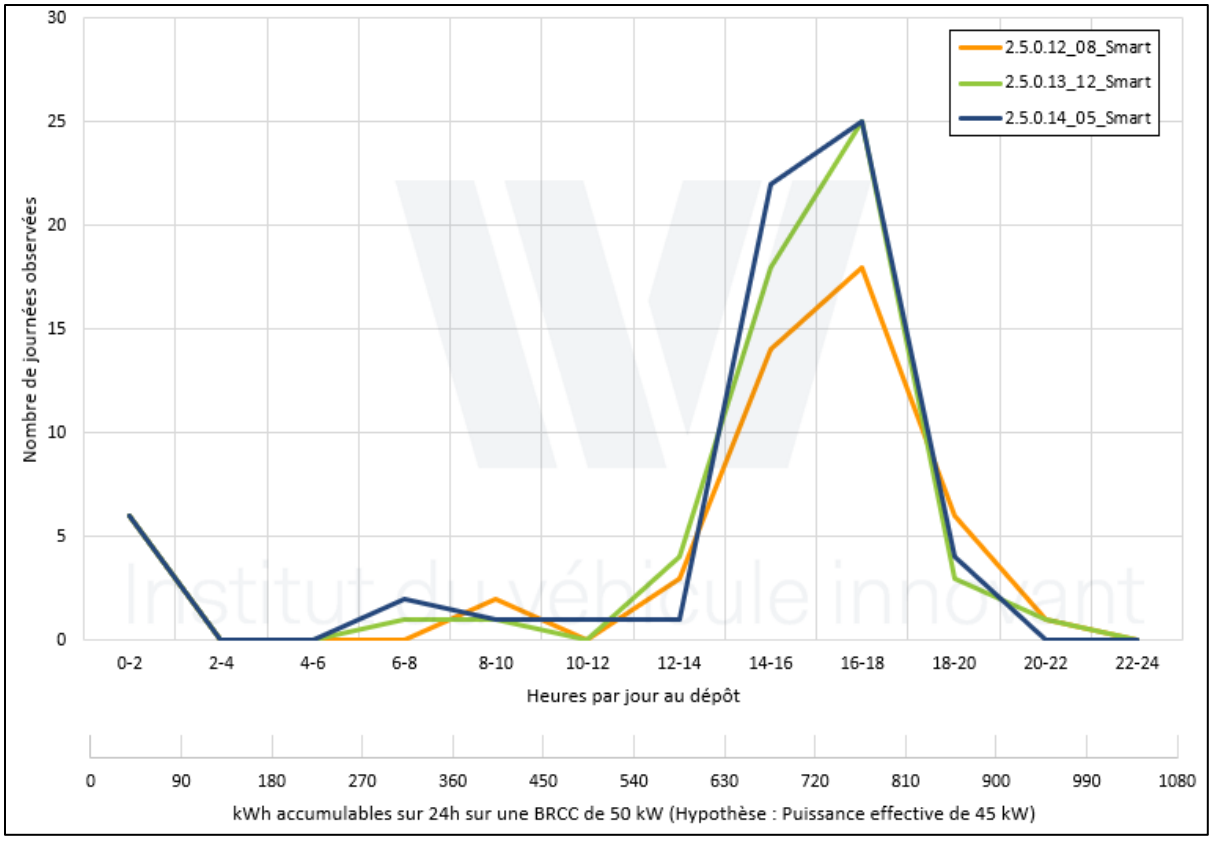
Graphique 2 : Répartition des vitesses – Smart Transport



L'analyse de ce graphique permet de constater que les trois camions passent environ 20 % de leur temps à vitesse d'autoroute.

Le mode de ravitaillement des véhicules électriques est complètement différent de celui des véhicules à combustion interne. En effet, la méthode la plus efficace et la moins coûteuse d'opérer commercialement un véhicule électrique consiste à charger le véhicule à la borne de recharge la plus lente possible, au dépôt, durant ses périodes d'inactivité. Il va donc de soi que plus ce temps est long, plus la borne peut être lente (moins puissante). L'IVI préconise la sélection d'infrastructures de recharge les moins puissantes possibles pouvant satisfaire les besoins (incluant les marges de sécurité et de confort), car celles-ci sont moins coûteuses à acquérir, installer puis opérer. Les trois camions de Smart Transport reviennent à l'entrepôt pour la nuit, ce qui laisse la possibilité aux camions de se recharger durant celle-ci. Le Graphique 3 montre la répartition des heures passées sur le terrain de Smart Transport à l'arrêt.

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



Le graphique ci-dessus montre 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, soit de puissance effective de 45 kW, pourrait théoriquement accumuler 450 kWh d'énergie dans la batterie. Ces valeurs pourront être comparées aux besoins quotidiens en énergie, pour prouver que la recharge au dépôt peut suffire aux besoins du camion.

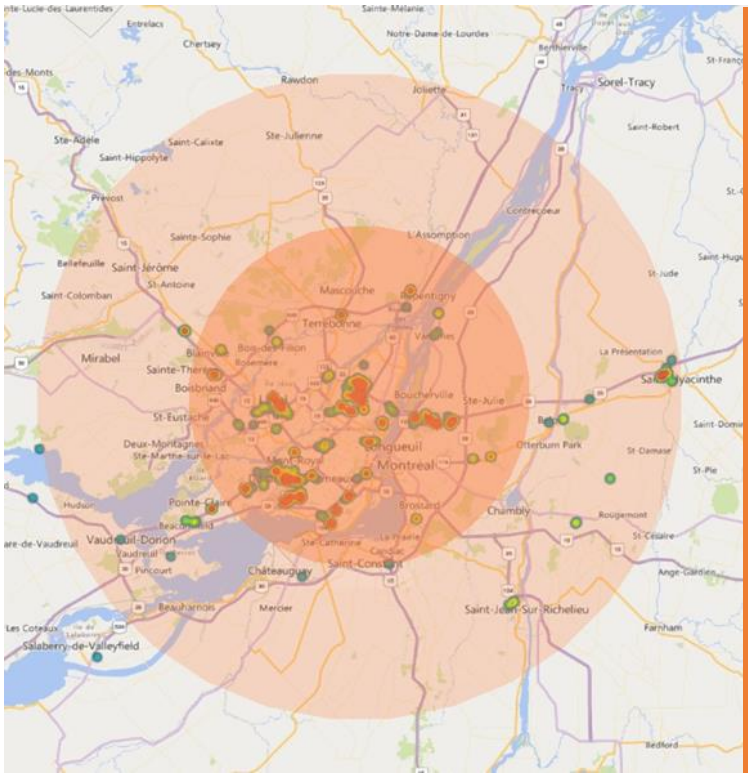
Les trois camions étudiés disposent d'une durée d'arrêt minimal d'environ 13 h par jours à l'entrepôt de Smart Transport. Avec une borne de 50 kW, cela permettrait de recharger environ 585 kWh dans une batterie, ce qui est amplement en considérant les capacités de batteries requises présentées aux sections suivantes.

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

7. Analyse du camion 08

Le camion au diesel 08 est majoritairement utilisé pour effectuer des livraisons de palettes, de papiers, de cartons et de plastiques. Ce camion se déplace surtout dans la grande région métropolitaine de Montréal.

La carte représentée à la Figure 3 permet de visualiser la localisation et la fréquence des livraisons :

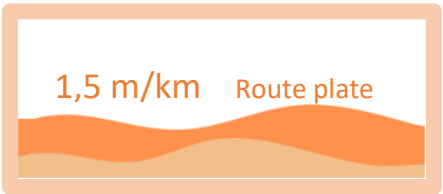


La couleur des points représente la fréquence des arrêts à un endroit. Ainsi, les zones rouges sont visitées très fréquemment.

Le camion 08 se déplace majoritairement dans un rayon de 25 km autour de l'entrepôt de Smart Transport. Il est également possible de voir qu'il fait souvent un arrêt chez un client à Saint-Hyacinthe et à Boucherville.

Le véhicule revient rarement au dépôt durant la journée et quand c'est le cas, il n'y reste pas longtemps. Il est intéressant de noter que le camion a circulé à proximité de la borne de recharge publique pour camions lourds située à Laval à plusieurs reprises durant l'essai.

Figure 3 : Fréquence des livraisons du camion 08 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de Smart Transport



Le dénivelé du territoire parcouru est un critère important dans l'évaluation de la consommation d'énergie. L'indice de côté du camion 08 indique que celui-ci se déplace majoritairement sur des routes qui ont un faible dénivelé, ce qui est cohérent puisque ses déplacements se situent majoritairement sur le territoire de Montréal.

Cet indice de côtes à gravir indique que le camion devra monter en moyenne un dénivelé positif de 1,5 mètre pour chaque kilomètre parcouru. Le freinage régénératif pourra être utilisé lors de la descente des côtes parcourues dans le but de récupérer un peu d'énergie dans la batterie, mais ce n'est pas la totalité de cette énergie qui sera restituée.

Le détail des distances parcourues chaque jour de l'essai est présenté dans le tableau 3. Celui-ci comporte trois sections pour couvrir l'entièreté des détails des déplacements du camion. En haut, la distance maximale, au 90e percentile, médiane et moyenne sont présentées, ainsi que l'écart-type (σ) et le Coefficient de Variation (CV).

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

Finalement, la section du bas est organisée en calendrier où les dates sont remplacées par la distance parcourue lors de cette journée, en kilomètres. Un dégradé de couleurs permet de visualiser quelles journées ont été plus intenses. Celles-ci ont une teinte plus foncée. Les journées 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.

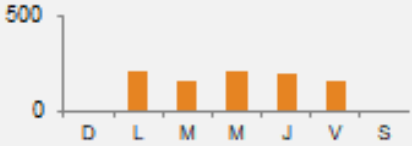
Tableau 3 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 08

Dans la première section du tableau 3, la moyenne et le 90e percentile sont les valeurs les plus importantes pour le gestionnaire de flotte. Le 90e percentile représente une valeur de km quotidien maximale qui sera rarement dépassée.

En regardant le diagramme à bande, il est possible de constater que le camion ne se déplace pas la fin de semaine et il semble faire de plus courte distance les mardis et vendredis.

La disparité des couleurs dans le calendrier indique que les trajets varient beaucoup et que le camion ne semble pas avoir de routine. Les routes ne sont pas constantes de semaine en semaine. On constate également que durant le mois de janvier, le camion a parcouru de plus grande distance quotidiennement que durant le mois de février et mars.

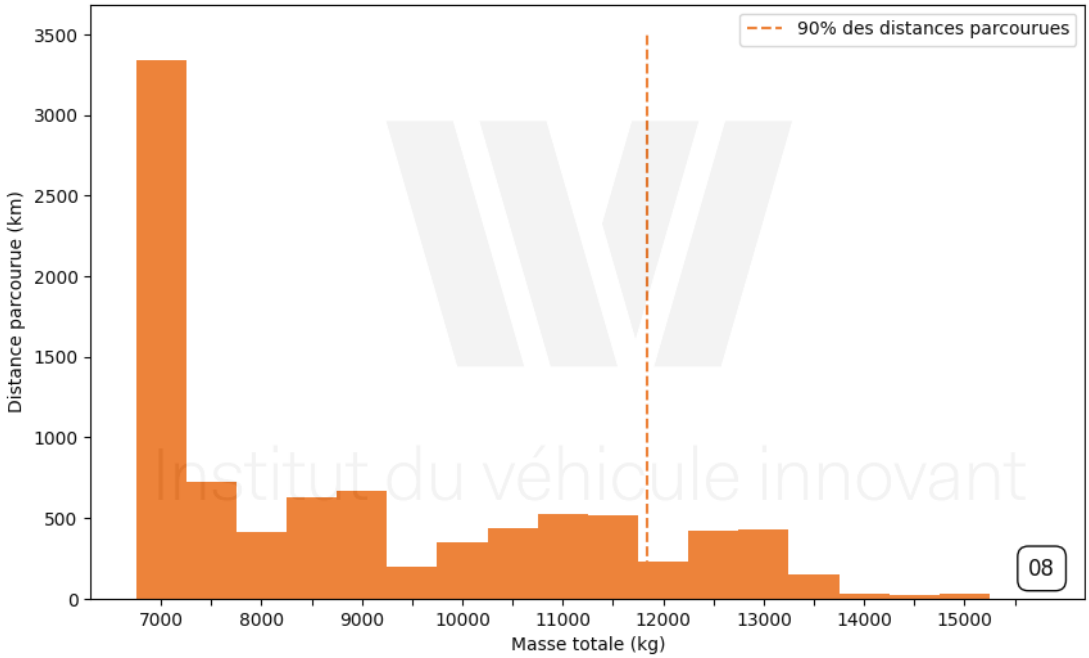
Max	397	km
90%	273	km
Med	170	km
Moy	183	km
σ	72	km
CV	39%	



	D	L	M	M	J	V	S
janv.	-	-	-	-	-	-	-
	-	265	207	248	298	195	-
	-	273	235	341	-	-	-
	-	-	-	-	-	114	-
	-	180	197	240	293	222	-
févr.	-	-	135	397	206	262	-
	-	-	49	128	92	94	-
	-	188	140	151	97	182	-
	-	-	134	241	275	139	-
mars	-	100	68	-	229	143	-
	-	-	237	164	136	117	-
	-	213	141	160	175	148	-
	-	-	-	136	165	108	-
avr.	-	210	144	131	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-

L'énergie requise pour chaque accélération et chaque montée est directement proportionnelle à la masse totale du véhicule, incluant son chargement. Pour réaliser l'étude de sa consommation énergétique, la masse totale du camion a été notée pour chaque trajet. Le graphique ci-dessous résume la masse totale moyenne du camion 08.

Graphique 4 : Proportion de la distance parcourue selon la masse totale transportée du camion 08



Les déplacements sans chargement représentent environ le tiers des déplacements du camion 08. Il est également possible de remarquer que durant la grande majorité de ses déplacements, celui-ci a une masse totale inférieure à 13 000 kg. Cette masse est utilisée car elle correspond au Poids Nominal Brut (PNB) d'un camion classe 7, soit 15 000 kg, moins 2 000 kg qui correspond au surpoids approximé des batteries d'un camion électrique. En posant cette hypothèse, le camion 08 pourrait effectuer environ 95 % de ses déplacements sans avoir à réduire son chargement.

En résumé, l'analyse des déplacements du camion 08 permet de déterminer les grandes lignes qui affecteront son potentiel d'électrification de façons suivantes :

Tableau 4 : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 08

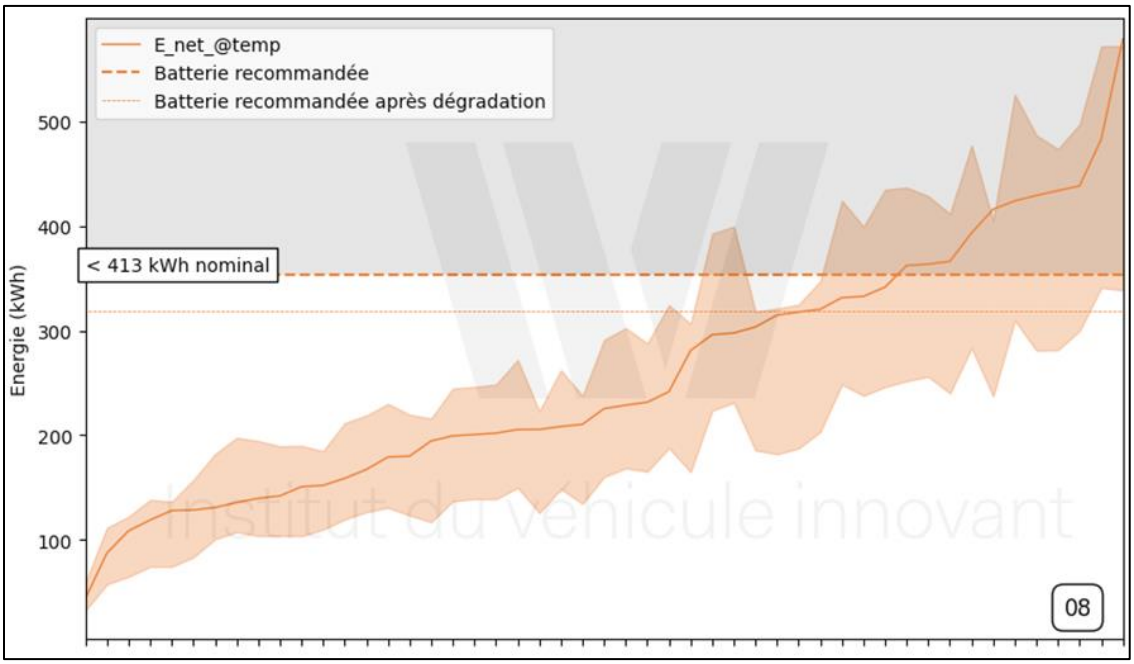
Critère	Valeur	Effet sur le potentiel d'électrification
Distances	**Moyennes**	**+/-**
Constance	**Variées**	**-**
Dénivelé	**Faible**	**+**
Recharge en journée	**Oui**	**+**
Chargement	**Moyen**	**+/-**
Accessoires	**Non**	**+**

8. Scénario d'électrification pour le camion 08

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

Le Graphique 5 montre la distribution de ces énergies pour chaque journée 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 08, 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 en une seule charge.
- Un camion avec une batterie de capacité nominale de 413 kWh disposerait de 353 kWh avec marge de confort lorsque neuf (ligne horizontale pointillée épaisse), cette batterie permettrait au camion 08 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.

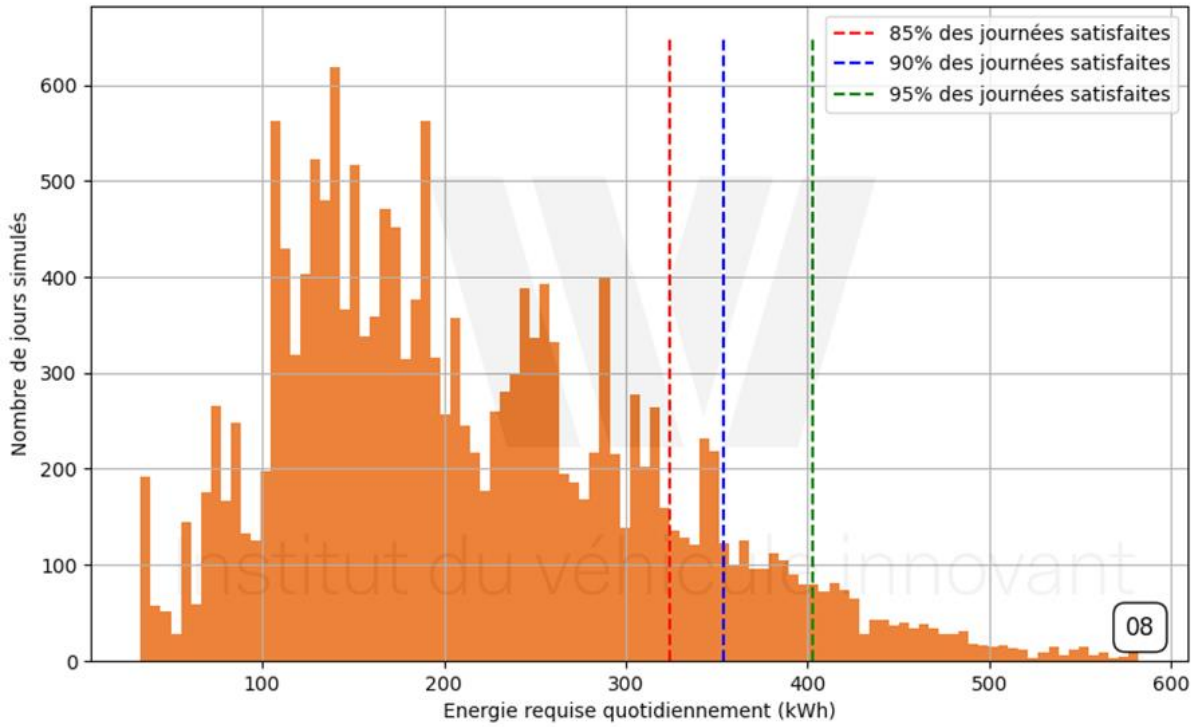
La consommation moyenne du camion à 20 °C est estimée à 98 kWh/100 km. Elle sera plus élevée en hiver, pouvant être jusqu'à 50 % supérieure lors des quelques jours de grands froids.

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 leurs besoins énergétiques normalisés à 20 °C ont été retirées (plus de détails dans la section Méthodologie : Scénarios 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 ci-dessous illustre la quantité d'énergie requise quotidiennement pour chacune de ces données.

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

Graphique 6 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 08



Camion # 08

Freightliner M2 2021 | Porteur essieu simple– PNB 17 250 kg

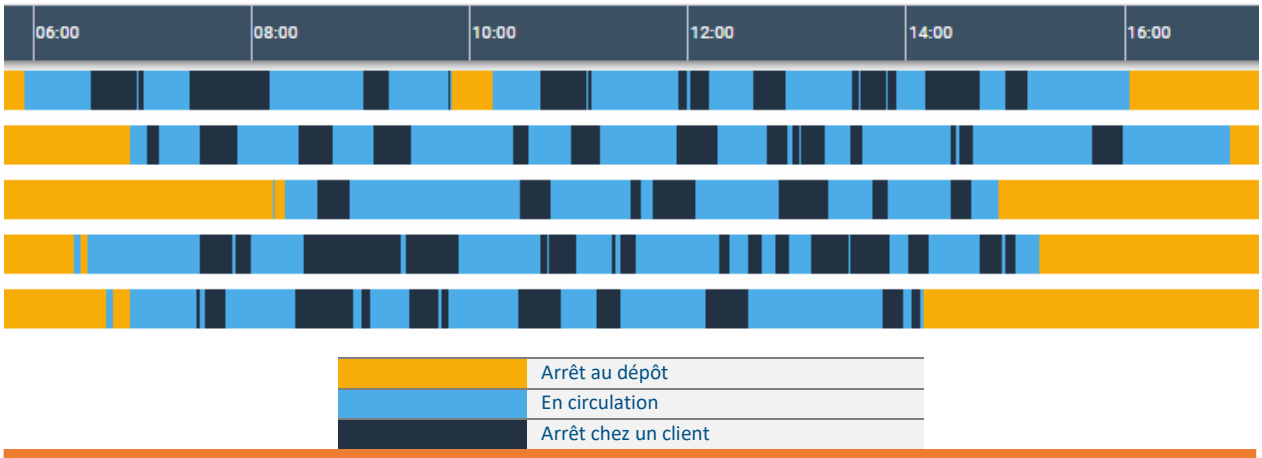
Pour compléter l'entièreté des trajets d'une journée 90 % du temps sur une année complète, l'IVI estime que la batterie requise devrait avoir une capacité utilisable avec marge de 353 kWh, ce qui équivaut à une batterie dotée d'une énergie nominale 413 kWh. L'énergie totale requise pour compléter 85%, 90% et 95% des trajets est résumée dans le tableau suivant :

85 %	90 %	95 %
378 kWh	413 kWh	471 kWh

Les configurations de batteries offertes en 2023 pour les camions électriques de classes 6 et 7 passent d'environ 140 à 315 kWh. Puisque celle-ci est responsable d'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, comme mentionné précédemment.

Le Graphique 7 permet de visualiser les arrêts lors d'une semaine typique du camion 08. 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 08



On observe que le camion 08 effectue une dizaine d'arrêts par jour. Une journée typique commence dans les environs de 6h00 et finie vers 16h00 ou 17h00.

Il est important de noter que durant une journée typique, le camion est arrêté plus de 13 heures, comme démontré au Graphique 3.

Tableau 5 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 08

Capacité nominale requise pour satisfaire 90% des journées	413 kWh
Batterie recommandée disponible sur le marché ?	Non

En date de la rédaction de ce rapport, aucun produit existant ne propose une batterie ayant la capacité nominale requise pour électrifier le camion 08. La plus grosse batterie disponible sur le marché pour les camions de classe 7 est de 315 kWh, ce qui permettrait au camion de compléter 76 % de ses journées au courant d'une année.

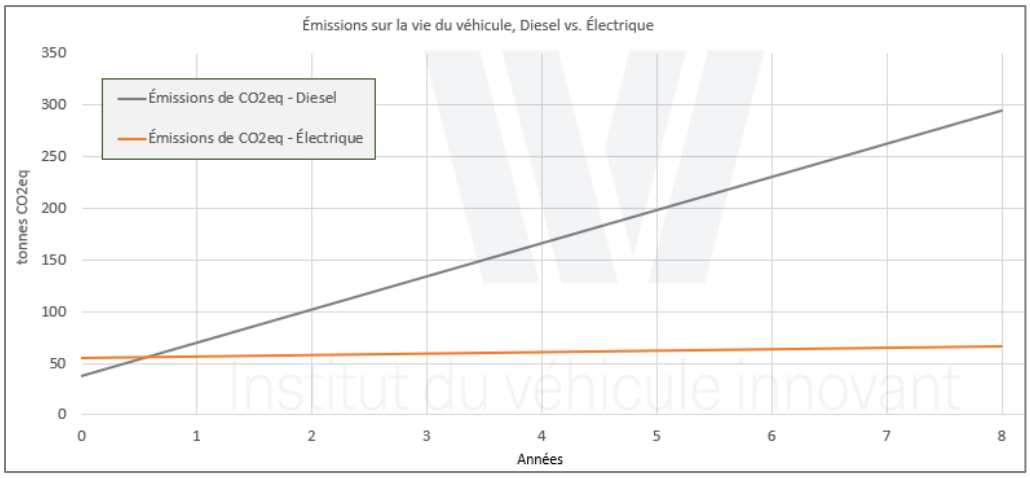
Les bénéfices financiers ne peuvent pas être calculés pour un camion inexistant. Cependant, une hypothèse sur l'économie possible en coût énergétique d'un camion de classe 7 avec une batterie de 413 kWh peut être posée. Ce calcul a été effectué avec un coût de 2 $ par litre de diesel et de 0,12 $ par kilowattheure. Une économie possible de 122 064 $ serait envisagée sur 8 ans.

Tableau 6 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 08

Coût annuel de carburant avant électrification	19 645 $
Coût annuel d'électricité	4 387 $
Économie annuelle de coûts d'énergie	15 258 $
Économie potentielle après 8 ans	122 064 $

Il est possible de calculer le bénéfice environnemental de l'électrification de cette route, celui-ci est représenté à la figure ci-dessous. Ce bénéfice n'est pas négligeable puisque l'électrification éviterait la propagation de plus de 228 tonnes de CO2. Le point d'équivalence d'émission des GES arriverait après seulement 21 659 km. Ces valeurs viennent des analyses indépendantes de l'IVI, basées sur des études ICCT et tiennent compte des émissions de GES de la production d'électricité par barrages hydro-électriques.

Graphique 8: Émission sur la vie du camion 08, Diesel vs. Électrique



L'IVI n'est pas en mesure de recommander l'électrification pour ce camion, car la batterie qu'il nécessiterait n'existe pas encore dans le marché actuel pour un camion porteur de classe 6 ou 7.

Dans l'éventualité où un tel camion serait sur le marché, une approximation grossière pourrait établir que son surcoût net de subventions, incluant l'infrastructure de recharge, devrait être inférieur à 122 064 $ pour que celui-ci soit rentable.

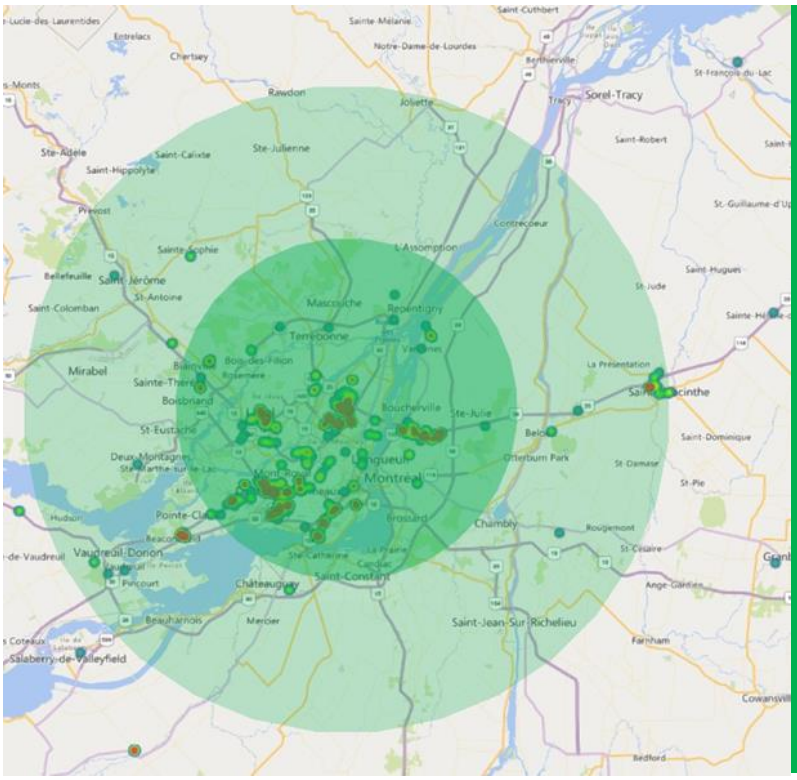
Il est intéressant pour le gestionnaire de flotte de noter que le camion circule souvent proche d'une borne de recharge publique pour camions lourds à Laval et qu'il retourne quelquefois à l'entrepôt durant la journée. Un scénario d'électrification pourrait être étudié si le gestionnaire de flotte décidait d'envisager d'arrêter le camion et de le recharger sur l'heure du diner. Dans ce cas, l'énergie disponible pour les routes devrait être étudiée en fonction du temps de recharge alloué et du type de bornes. Par exemple, un scénario ou le gestionnaire achète un camion avec une batterie de 315 kWh, mais qu'il prévoit faire un arrêt chaque jour d'environ 1 h avec une borne à recharge rapide de 150 kW pourrait être envisagé.

Il serait également possible de changer les routes des trois camions qui sont très semblables afin de réduire le nombre de kilomètres quotidiens moyens parcourus et par ce fait d'optimiser la route pour un camion électrique. Dans ce cas, la consommation moyenne estivale estimée de 98 kWh/100 km pourrait aider le gestionnaire à calculer l'autonomie de son camion et optimiser ses routes.

9. Analyse du camion 12

Le camion # 12 est surtout utilisé pour effectuer des livraisons de palettes, de papiers, de cartons et de plastiques. Ce camion se déplace surtout dans la grande région métropolitaine de Montréal.

La Figure 4 permet de visualiser la fréquence des arrêts à différents endroits.

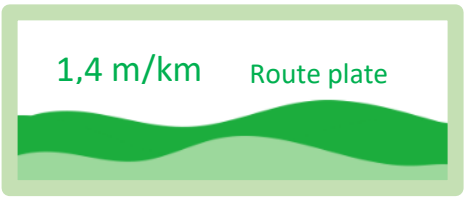


La couleur des points représente la fréquence des arrêts à un endroit. Ainsi, les zones rouges sont visitées très fréquemment.

La majorité des déplacements du camion 12 se font sur le territoire de l'île de Montréal, dans un rayon de 25 km de l'entrepôt de Smart Transport. Le camion fait également régulièrement un arrêt à Boucherville et à Saint-Hyacinthe.

Le camion revient à l'entrepôt de Smart Transport chaque soir, mais rarement durant la journée.

Figure 4 : Fréquence des livraisons du camion 12 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de Smart Transport



Le dénivelé du territoire parcouru est un critère important dans l'évaluation de la consommation d'énergie. Le camion 12 se déplace majoritairement sur des routes qui ont un faible dénivelé, ce qui est cohérent puisque ses déplacements se situent majoritairement sur le territoire de Montréal.

L'indice de côtes à gravir indique que le camion devra monter en moyenne un dénivelé positif de 1,4 mètre pour chaque kilomètre parcouru. Le freinage régénératif pourra être utilisé lors de la descente des côtes parcourues dans le but de récupérer un peu d'énergie dans la batterie, mais ce n'est pas la totalité de cette énergie qui sera restituée.

Camion # 12

Mack MD 2023 | Porteur essieu simple– PNB 17 250 kg

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

Tableau 7 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 12

En observant le tableau 7, il est possible de constater que le 90e percentile est très élevé, soit 369 km. La moyenne est également relativement élevée pour un camion local.

En regardant le diagramme à bande, il est possible de constater que le camion semble parcourir moins de kilomètres les jeudi et vendredi.

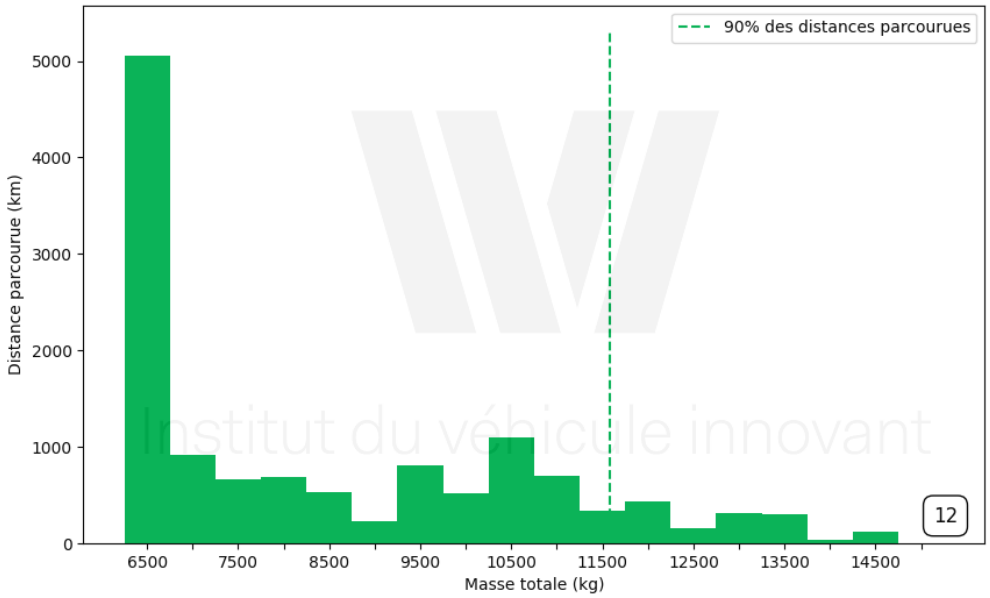
Puis, en observant le calendrier, la variation des tons de couleurs indique que le camion ne semble pas avoir de routine et qu'il parcourt des routes variées de jour en jour.

Max	535	km
90%	369	km
Med	192	km
Moy	215	km
σ	114	km
CV	53%	

	D	L	M	M	J	V	S
	-	-	-	-	-	-	-
janv.	-	337	183	485	205	206	-
	-	180	141	210	254	535	-
	-	129	199	240	323	52	-
	-	159	282	114	154	117	-
févr.	-	228	-	105	249	135	-
	-	140	284	278	148	99	-
	-	246	279	176	16	178	-
	-	505	127	363	526	248	-
mars	-	152	195	196	110	124	-
	-	273	238	156	144	213	-
	-	165	99	421	109	-	-
	-	-	212	189	146	162	-
avr.	-	232	455	115	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-

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 9 résume la masse totale moyenne du camion 12 selon les distances parcourues.

Graphique 9: Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 12



Les déplacements sans chargement représentent plus de 40 % des déplacements du camion 12. Durant la majorité de ses déplacements, la masse totale du camion 12 est inférieure à 12 000 kg. En électrifiant le camion et en considérant que les batteries ajouteraient un poids supplémentaire d'environ 2 000 kg, il serait possible de faire environ 95 % des routes sans réduire son chargement actuel.

En résumé, l'analyse des déplacements du camion 12 permet de déterminer les grandes lignes qui affecteront son potentiel d'électrification de façons suivantes :

Tableau 8: Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 12

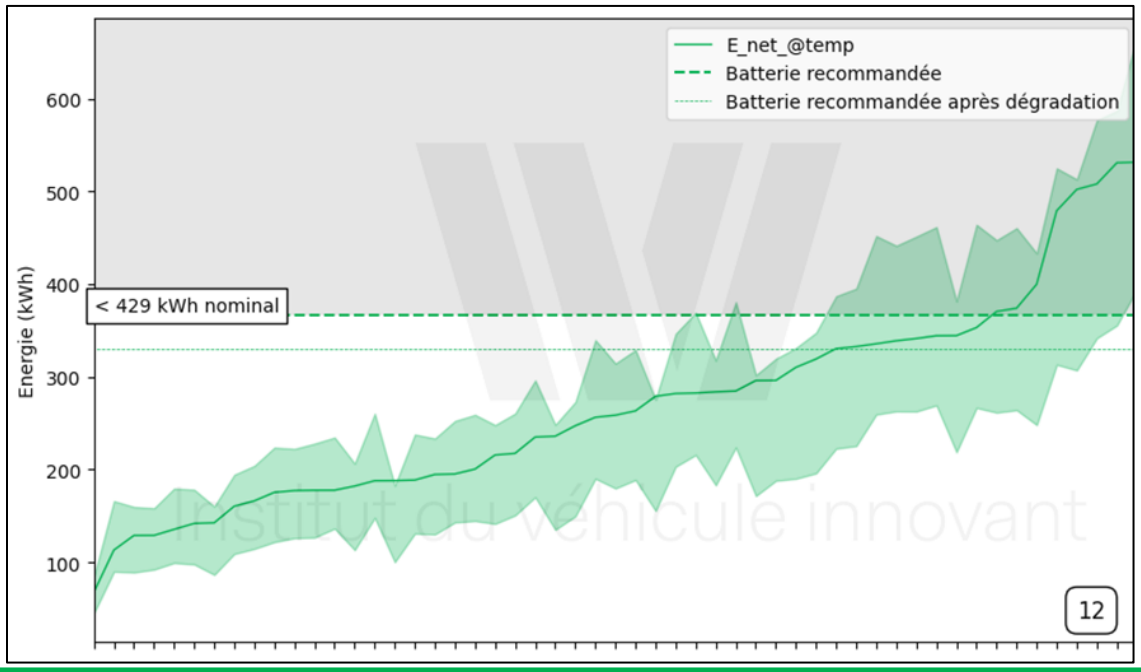
Critère	Valeur	Effet sur le potentiel d'électrification
Distances	**Longues**	**-**
Constance	**Variées**	**-**
Dénivelé	**Faible**	**+**
Recharge en journée	**Oui**	**+**
Chargement	**Faible**	**+**
Accessoires	**Non**	**+**

10. Scénario d'électrification pour le camion 12

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 24 h pour compléter l'entièreté de ces trajets.

Le Graphique 10 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 répondra au besoin.

Graphique 10: Journées de mesure du camion 12, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh)



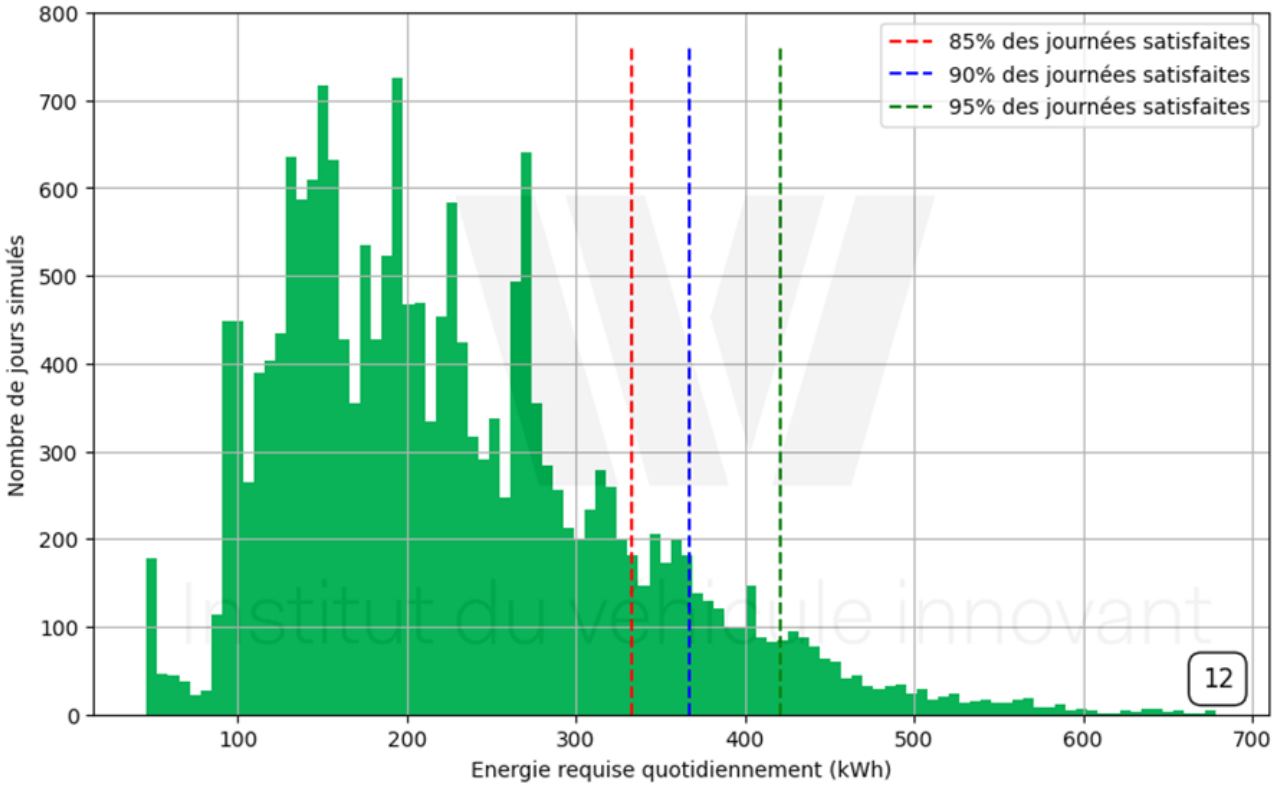
Guide d'interprétation du Graphique 10:

- La courbe verte du graphique ci-dessus montre l'énergie requise simulée pour un camion électrique (en kWh) pour compléter chaque journée du test à la température extérieure réelle.
- L'aire verte montre la différence d'énergie pour une même journée s'il fait chaud (20°C) ou très froid. La valeur plus élevée représente l'énergie lors d'une journée froide (-20°C).
- La zone sous la ligne pointillée horizontale représente les journées où le camion dispose d'assez d'énergie pour compléter tous les trajets de la journée.
- Un camion avec une batterie de capacité nominale de 429 kWh disposerait de 367 kWh avec marge de confort lorsque neuf (ligne horizontale pointillée épaisse), cette batterie permettrait au camion 12 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 104 kWh / 100 km. Elle sera plus élevée en hiver, pouvant être jusqu'à 50 % supérieure lors des quelques jours de grands froids.

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

Graphique 11 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 12

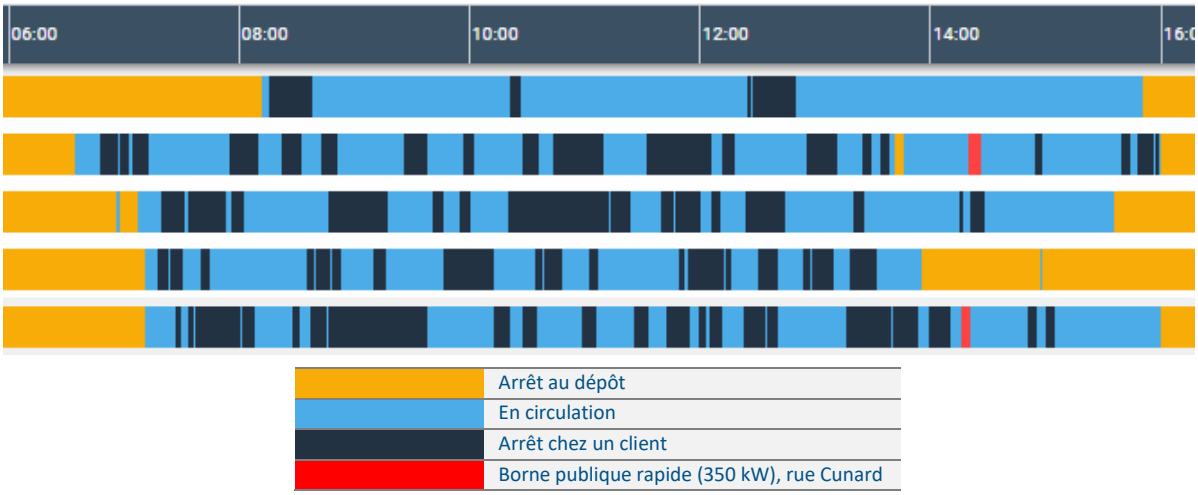


Une batterie de 429 kWh nominale permettrait alors de réaliser 90 % des journées sur une année moyenne en un seul cycle de décharge de la batterie.

Les configurations de batteries offertes en 2023 pour les camions électriques de classes 6 et 7 s'étalent d'environ 140 à 315 kWh. Puisque celle-ci est responsable d'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, comme mentionné précédemment.

Le graphique 12 permet de visualiser les arrêts lors d'une semaine typique du camion 12. 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 12 : Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 12



On observe que le camion 08 effectue plusieurs arrêts par jour. Une journée typique commence dans les environs de 6h00 et finit vers 16h00.

Il est donc important de noter que durant une journée typique, le camion est arrêté plus de 14 heures.

À deux reprises durant la semaine présentée, le camion s'est arrêté près d'une borne de recharge rapide publique spécifique aux camions, située sur la rue Cunard à Laval près du garage municipal. Ces deux arrêts sont de courte durée, environ 15 minutes, mais s'ils étaient allongés et possiblement placés plus tôt dans la journée, ils pourraient permettre de diminuer la taille de batterie requise pour compléter ces journées.

Tableau 9 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 12

Capacité nominale requise pour satisfaire 90% des journées	429 kWh
Batterie recommandée disponible sur le marché?	Non

En date de la rédaction de ce rapport, aucun produit existant ne propose une batterie ayant la capacité nominale requise pour électrifier le camion 12. La plus grosse batterie disponible sur le marché pour les camions de classe 7 est de 315 kWh, ce qui permettrait au camion de compléter 73 % de ses journées au courant d'une année.

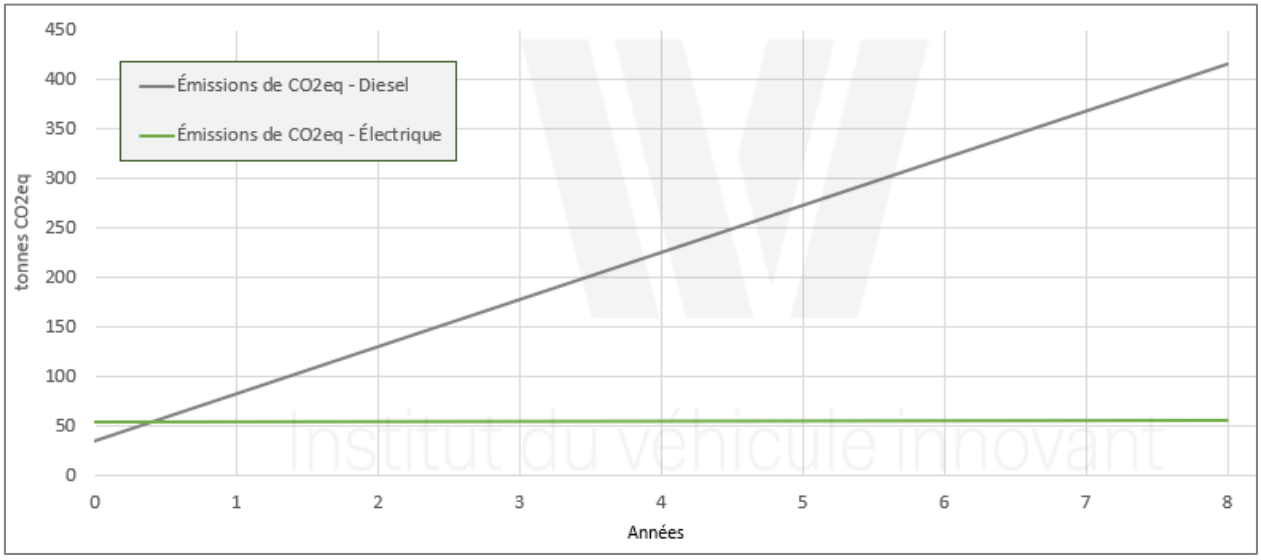
Les bénéfices financiers ne peuvent pas être calculés pour un camion inexistant. Cependant, une hypothèse sur l'économie possible en coût énergétique d'un camion de classe 7 avec une batterie de 429 kWh peut être posée. Ce calcul a été effectué avec un coût de 2 $ par litre de diesel et de 0,12 $ par kilowattheure. Une économie possible de 167 320 $ serait envisagée sur 8 ans.

Tableau 10 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 12

Coût annuel de carburant avant électrification	27 477 $
Coût annuel d'électricité	6 562 $
Économie annuelle de coûts d'énergie	20 915 $
Économie potentielle après 8 ans	167 320 $

Il est possible de calculer le bénéfice environnemental de l'électrification de cette route, celui-ci est représenté à la figure ci-dessous. Ce bénéfice n'est pas négligeable puisque l'électrification éviterait la propagation de plus de 326 tonnes de CO2. Le point d'équivalence d'émission des GES arriverait après seulement 22 493 km, soit 0,4 année. Ces valeurs viennent des analyses indépendantes de l'IVI, basées sur des études ICCT et tiennent compte des émissions de GES de la production d'électricité par barrages hydro-électriques.

Graphique 13: Émission sur la vie du camion 12, Diesel vs. Électrique



L'IVI n'est pas en mesure de recommander l'électrification pour ce camion, car la batterie qu'il nécessiterait n'existe pas encore dans le marché en date d'aujourd'hui pour un camion porteur de classe 6 ou 7.

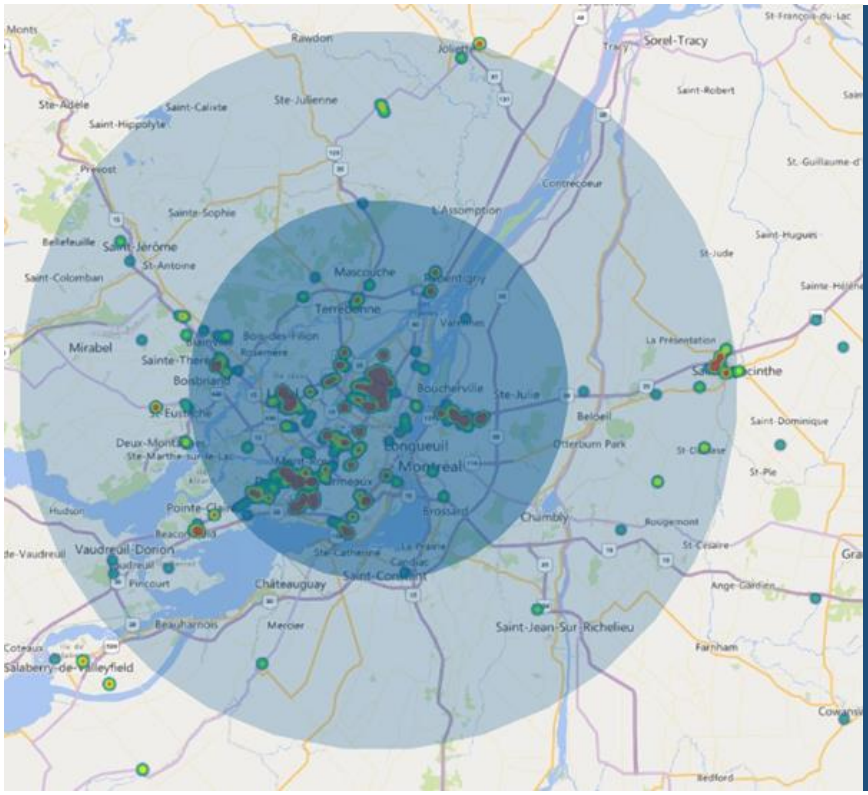
Dans l'éventualité où un tel camion deviendrait disponible sur le marché, une approximation grossière pourrait établir que son surcoût net de subventions, incluant l'infrastructure de recharge, devrait être inférieur à 167 320$ pour que celui-ci soit rentable.

Les propositions d'adaptation des opérations décrites dans la conclusion du camion 08 peuvent également être envisagées pour ce camion.

11. Analyse du camion 05

Tout comme les deux autres camions analysés, le camion 05 est surtout utilisé pour effectuer des livraisons de palettes, de papiers, de cartons et de plastiques. Ce camion se déplace surtout dans la grande région métropolitaine de Montréal.

La carte suivante permet de visualiser la fréquence des arrêts à différents endroits.



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

Tout comme les deux autres véhicules analysés, le camion 05 se déplace majoritairement sur l'île de Montréal. Il fait plusieurs arrêts chez un client à Saint-Hyacinthe et à Boucherville.

Il est intéressant de noter que le camion passe souvent par Laval, à proximité d'une borne de recharge publique pour camion lourd.

Figure 5 : Fréquence des livraisons du camion 05 dans un rayon de 25 et 50 km de l'entrepôt de Smart Transport

Le dénivelé du territoire parcouru est un critère important dans l'évaluation de la consommation d'énergie. Le camion 05 se déplace majoritairement sur des routes qui ont un faible dénivelé, ce qui est cohérent puisque ses déplacements se situent majoritairement sur le territoire de Montréal.

L'indice de côtes à gravir indique que le camion devra monter en moyenne un dénivelé positif de 1,4 mètre pour chaque kilomètre parcouru. Le freinage régénératif pourra être utilisé lors de la descente des côtes parcourues dans le but de récupérer un peu d'énergie dans la batterie, mais ce n'est pas la totalité de cette énergie qui sera restituée.

Camion # 05

Mack MD 2022 | Porteur essieu simple– PNB 17 250 kg

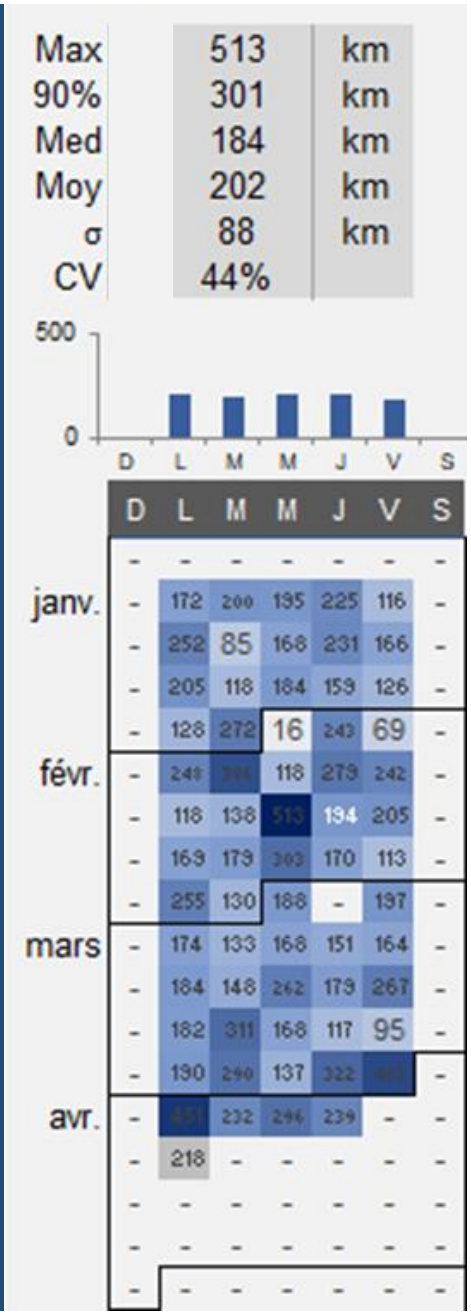
Le détail des distances parcourues chaque jour de l'essai est présenté dans les trois sections du tableau suivant. En haut se trouvent les distances principales de l'analyse et en bas, un calendrier des distances. Le dégradé des teintes permet de visualiser l'intensité des déplacements de chaque jour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

Tableau 11 : Représentation visuelle des distances parcourues quotidiennement par le camion 05

Les données les plus importantes pour le gestionnaire de la flotte dans le tableau 11 sont surement celles du 90e percentile et de la moyenne. Le 90e percentile couvre la grande majorité des distances parcourues par le camion et pourrait être perçu comme la valeur de kilométrage quotidien maximal attribué au camion 05. La moyenne de distances quotidiennes de 202 km est élevée pour l'électrification d'un camion porteur de classe 6 ou 7.

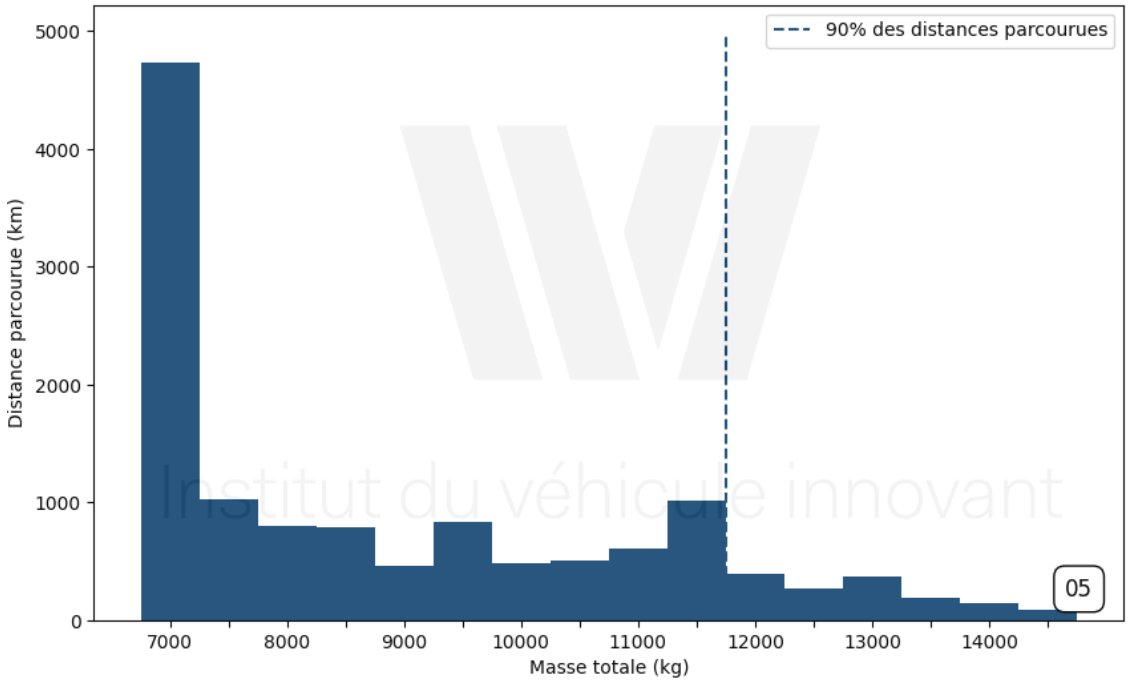
Il est possible de constater que le camion 05 effectue des distances plutôt semblables de jour en jour durant la semaine. La répartition des données dans le calendrier indique que les journées sont plutôt variées et qu'il n'y a pas de constance dans les déplacements de ce camion.

La journée en gris représente une journée de l'étude où les données de consommations étaient disponibles, mais où les chargements ne l'étaient pas. Cette journée est donc utilisée seulement pour les calculs de consommations du camion 05.



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 14 suivant représente la masse totale moyenne du camion 05 selon les distances parcourues.

Graphique 14: Proportion de la distance parcourue selon le chargement transporté du camion 05



Les déplacements sans chargement représentent plus de 40 % des déplacements du camion 05. Durant la majorité de ses déplacements, la masse totale du camion 05 est inférieure à 12 000 kg. En électrifiant le camion et en considérant que les batteries ajouteraient un poids supplémentaire d'environ 2 000 kg, il serait possible de faire environ 95 % des trajets sans réduire son chargement actuel.

En résumé, l'analyse des déplacements du camion 05 permet de déterminer les grandes lignes qui affecteront son potentiel d'électrification des façons suivantes :

Tableau 12 : Effet des données principales sur le potentiel d'électrification du camion 05

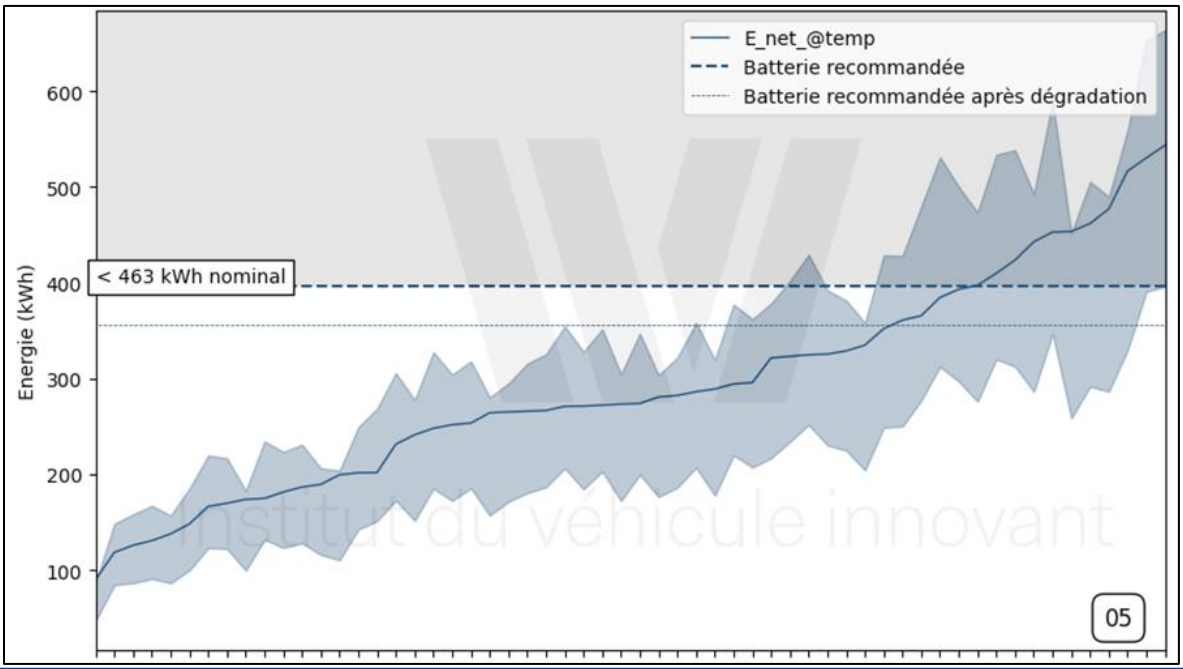
Critère	Valeur	Effet sur le potentiel d'électrification
Distances	**Longues**	**-**
Constance	**Variées**	**-**
Dénivelé	**Faible**	**+**
Recharge en journée	**Oui**	**+**
Chargement	**Moyen**	**+/-**
Accessoires	**Oui**	**-**

12. Scénario d'électrification pour le camion 05

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 24 h pour compléter l'entièreté de ces trajets.

Le Graphique 15 suivant 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 répondra au besoin.

Graphique 15: Journées de mesure du camion 05, classées par ordre croissant des besoins quotidiens simulés en énergie (kWh)



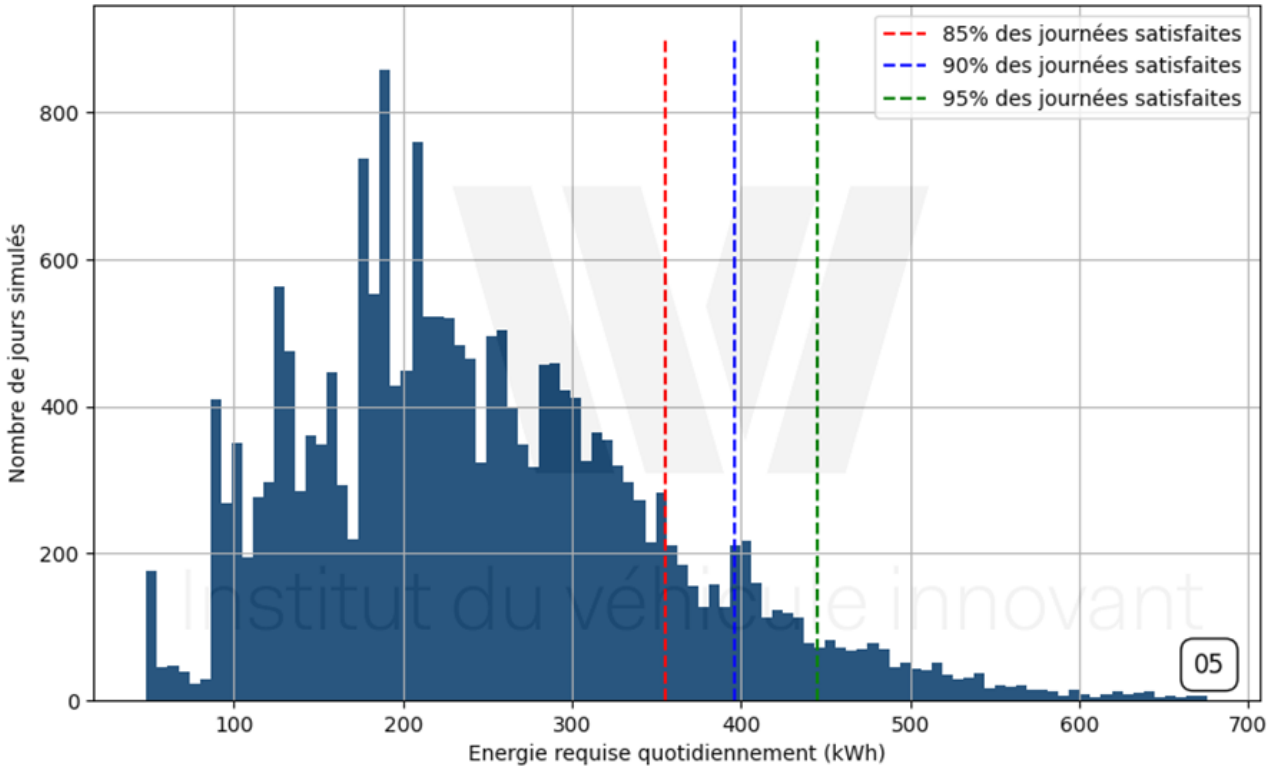
Guide d'interprétation du Graphique 15:

- La courbe bleue du graphique ci-dessus montre l'énergie requise simulée pour un camion électrique (en kWh) pour compléter chaque journée du test à la température extérieure réelle.
- L'aire bleue montre la différence d'énergie pour une même journée s'il fait chaud (20°C) ou très froid. La valeur plus élevée représente l'énergie lors d'une journée froide (-20°C).
- La zone sous la ligne pointillée horizontale représente les journées où le camion dispose d'assez d'énergie pour compléter tous les trajets de la journée.
- Un camion avec une batterie de capacité nominale de 463 kWh disposerait de 396 kWh avec marge de confort lorsque neuf (ligne horizontale pointillée épaisse), cette batterie permettrait au camion 05 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 110 kWh/100 km. Elle sera plus élevée en hiver, pouvant être jusqu'à 50 % supérieure lors des quelques jours de grands froids.

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

Graphique 16 : Énergie consommée par jour pour les journées simulées pour le camion 05



Une batterie de 463 kWh nominale permettrait alors de réaliser 90 % des journées sur une année moyenne en un seul cycle de décharge de la batterie.

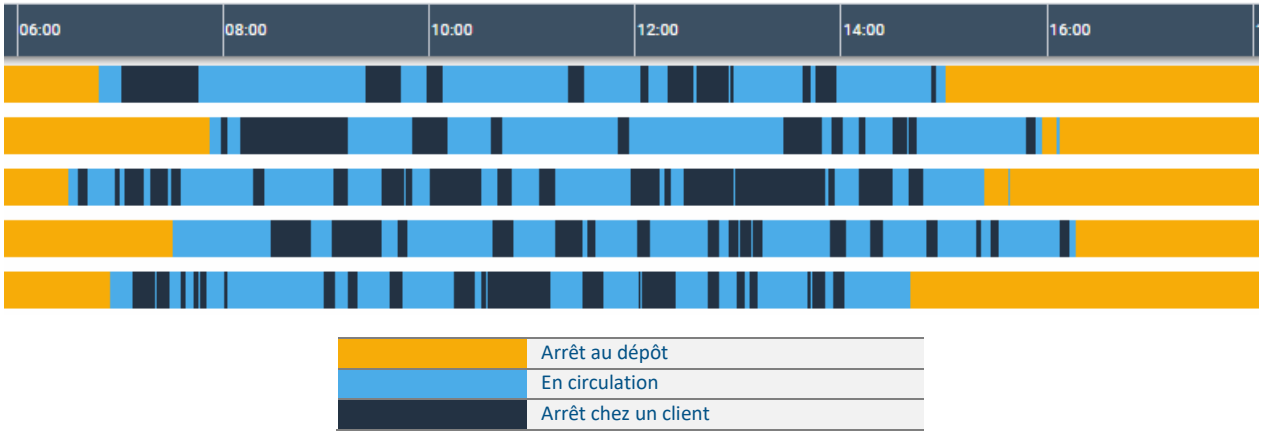
Les configurations de batteries offertes en 2023 pour les camions électriques de classes 6 et 7 s'étalent d'environ 140 à 315 kWh. Puisque celle-ci constitue une importante partie du prix du véhicule, il est important de sélectionner la plus petite batterie qui répondra aux besoins énergétiques à long terme. À ce sujet, il est prudent de prévoir une dégradation de la batterie qui pourrait diminuer l'autonomie d'environ 10 % sur la durée d'utilisation du véhicule dans la flotte.

Le graphique 17 permet de visualiser les arrêts lors d'une journée typique du camion 05. 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.

Camion # 05

Mack MD 2022 | Porteur essieu simple– PNB 17 250 kg

Graphique 17 : Moments des déplacements et arrêts typiques du camion 05



On observe que le camion 05 effectue plusieurs arrêts par jour. Une journée typique commence dans les environs de 6h00 et fini vers 16h00.

Il est donc important de noter que durant une journée typique, le camion est arrêté plus de 14 heures.

Tableau 13 : Paramètres d'électrification retenus pour le camion 05

Capacité nominale requise pour satisfaire 90% des journées	463 kWh
Batterie recommandée disponible sur le marché?	Non

En date de la rédaction de ce rapport, aucun produit existant ne propose une batterie ayant la capacité nominale requise pour électrifier le camion 05. La plus grosse batterie disponible sur le marché pour les camions de classe 7 est de 315 kWh, ce qui permettrait au camion de compléter 68 % de ses journées au courant d'une année.

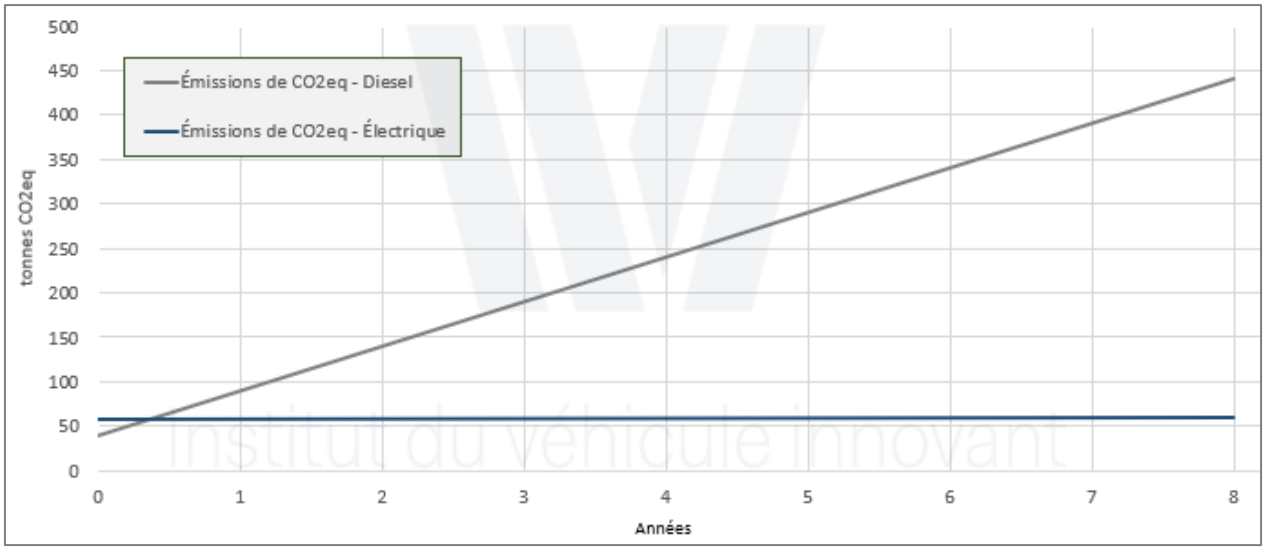
Les bénéfices financiers ne peuvent pas être calculés pour un camion inexistant. Cependant, une hypothèse sur l'économie possible en coût énergétique d'un camion de classe 7 avec une batterie de 463 kWh peut être posée. Ce calcul a été effectué avec un coût de 2 $ par litre de diesel et de 0,12 $ par kilowattheure. Une économie possible de 176 192 $ serait envisagée sur 8 ans.

Tableau 14 : Bénéfices financiers de l'électrification du camion 05

Coût annuel de carburant avant électrification	29 175 $
Coût annuel d'électricité	7 151 $
Économie annuelle de coûts d'énergie	22 024 $
Économie potentielle après 8 ans	176 192 $

Il est possible de calculer le bénéfice environnemental de l'électrification de cette route, celui-ci est représenté à la figure ci-dessous. Ce bénéfice n'est pas négligeable puisque l'électrification éviterait la propagation de plus de 380 tonnes de CO2. Le point d'équivalence d'émission des GES arriverait après seulement 20 828 km, soit 0,4 année. Ces valeurs viennent des analyses indépendantes de l'IVI, basées sur des études ICCT et tiennent compte des émissions de GES de la production d'électricité par barrages hydro-électriques.

Graphique 18: Émission sur la vie du camion 05, Diesel vs. Électrique



L'IVI n'est pas en mesure de recommander l'électrification pour ce camion, car la batterie qu'il nécessiterait n'existe pas encore dans le marché en date d'aujourd'hui pour un camion porteur de classe 6 ou 7.

Dans l'éventualité où un tel camion deviendrait disponible sur le marché, une approximation grossière pourrait établir que son surcoût net de subventions, incluant l'infrastructure de recharge, devrait être inférieur à 176 192 $ pour que celui-ci soit rentable.

Les hypothèses proposées dans la conclusion du camion 08 pour également être envisagées pour ce camion.

13. Conclusions et recommandations

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

Tableau 15: Recommandation d'électrification des camions de Smart Transport

Véhicule	Camion 08	Camion 12	Camion 05
Potentiel d'électrification (/10)	5	4	3
Recommandation d'électrification de l'IVI	Non	Non	Non
Capacité totale de batterie requise pour effectuer 85 % des déplacements	379 kWh	390 kWh	416 kWh
Capacité totale de batterie requise pour effectuer 90 % des déplacements	413 kWh	429 kWh	463 kWh
Capacité totale de batterie requise pour effectuer 95 % des déplacements	471 kWh	492 kWh	521 kWh

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

Bien entendu, ce score est valide au moment de la parution de ce rapport. L'évolution des prix, capacité des batteries et disponibilité des accessoires amènera probablement une amélioration de ces scores avec le temps.

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. La consommation énergétique du hayon de levage n'a pas été considérée, cependant des études démontrent que celle-ci se situerait à moins de 1 kWh pour une journée typique d'opération, ce qui n'affectera pas l'autonomie de façon significative.

Selon notre analyse, les trois camions étudiés ne représentent pas une opportunité d'électrification avec les technologies disponibles actuellement sur le marché. Cependant, leurs notes attribuées pour le potentiel d'électrification sont non nulles, car il serait possible d'envisager une électrification si des changements sont apportés à la route des camions. Par exemple, en diminuant la distance parcourue ou en prévoyant un arrêt d'une heure sur l'heure du diner à une borne de recharge rapide, il serait envisageable d'électrifier les camions. Il est important de noter que l'étude présentée dans ce rapport par l'IVI prend en compte les données réelles obtenues sur 3 camions durant trois mois. Si le gestionnaire de flotte considère un scénario hypothétique où le trajet du camion est modifié afin de permettre une

recharge en pleine journée, l'IVI conseille au gestionnaire de refaire une étude plus détaillée visant à évaluer la possibilité d'un tel scénario.

Les trois camions instrumentés lors de ce test sont arrêtés longtemps la nuit, ce qui leur permettrait d'utiliser des bornes de recharge peu puissantes, et donc moins coûteuses. Cependant dans son analyse, l'IVI a considéré chaque minute passée au dépôt de Smart Transport comme étant propice à la recharge, alors que ceci pourrait être moindre si le chargement de la cargaison prend beaucoup de temps et ne peut se faire à l'emplacement où une borne serait installée, par exemple. Malgré ceci une borne de 50 kW serait suffisante, mais il faudra faire attention de positionner une borne à un endroit permettant de recharger le véhicule pendant qu'on y ajoute les marchandises, ou de le rebrancher après. Aussi, plusieurs bornes de recharge rapide publiques pour les camions lourds apparaîtront sous peu au Québec. L'utilisation de ces bornes pourrait être avantageuse pour un camion qui n'a pas l'habitude de repasser au dépôt durant la journée.

Le présent rapport fait l'état des possibilités d'électrification pour trois camions de la flotte de Smart Transport. Ces véhicules ont été choisis sur le volet par l'IVI et le participant pour répondre aux questionnements des gestionnaires de flotte et pour leurs déplacements limités pouvant produire des candidats à l'électrification. Il ne faut donc pas utiliser ces résultats comme généralisation quant au potentiel d'électrification de l'entièreté du parc de Smart Transport, 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, mais bien pour ces trois camions précisément.

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://climat.meteo.gc.ca/historical_data/

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

Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives, Argonne National Lab

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 :

Études antérieures de l'IVI

https://x-engineer.org/drivetrain-losses-efficiency/

https://www.researchgate.net/figure/Drag-coefficient-of-different-vehicles-type-1_fig1_331695168

https://www.tommygate.com/liftgate-central/posts/tech-and-maintenance/ev-test-on-2022-ford-lightning/

Également, 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/

15. 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 :