



Sayona Québec

**Étude du transport routier
lourd électrifié**

30 Mars 2020

Version 01

The logo for Sayona Québec, featuring the word "SAYONA" in a large, white, sans-serif font with a stylized flame or leaf graphic above the letter "A", and "QUÉBEC" in a smaller, white, sans-serif font below it.

Contrôle de document

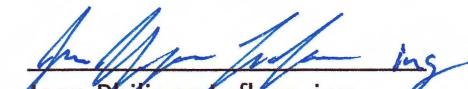
Ce document contient le livrable identifié au tableau ci-bas,

Contenu	Titre	Statut
Livrable 1	Étude du transport routier lourd électrifié	Émis pour discussions et commentaires
Modèle Excel	Étude comparative transport diesel et électrique 2020-03-30	Émis pour discussions et commentaires

L'historique d'émission de ce rapport est détaillé ci-bas.

Version	Date d'émission	Modifications
Version 01	30 mars 2020	Émission originale

Ce document a été préparé par le soussigné, employé de Carboniq.


Jean-Philippe Lafleur, ing.
Membre OIQ 5007836

2020-03-30
Date

Étude du transport routier lourd électrifié

1. Objectif

Sayona envisage plusieurs scénarios opérationnels pour ses opérations au Québec, qui diffèrents selon la nature de ses projets, et la possibilité de l'acquisition de la mine de lithium de North American Lithium. Si cette acquisition est effectuée, il est envisagé de regrouper les activités de concentration du minerai brut en spodumène à un concentrateur unique, celui déjà en place à NAL. Le minerai de la mine Authier serait donc transporté de la mine Authier, dans la région de La Motte, au concentrateur de NAL à Landrienne, une distance routière d'environ 68 km.

L'objectif de ce rapport est d'effectuer une évaluation sommaire de la possibilité de transport du minerai par camion routier électrique, au lieu d'un véhicule conventionnel au diesel, et d'estimer l'impact technique, économique et environnemental de cette substitution.

2. Besoins de transport

Le transport routier de minerai entre Authier et NAL n'est pas adressé explicitement dans l'inventaire des émissions de gaz à effet de serre effectué par SNC-Lavalin Environnement et géosciences [1], ceci ne faisant pas partie de la nature du projet étudié dans ce rapport, qui se concentre exclusivement sur le site Authier. Cette évaluation fournit toutefois des montants de minerai exploité sur le site, sur une base annuelle, et le concept de base pour le transport routier du concentré, qui sera aussi transporté par voie routière, entre le concentrateur en Abitibi et le port de Trois-Rivières, une distance de 700 km. Ces informations ont été utilisés pour élaborer, en Phase 1, le Plan d'écologisation des opérations de lithium de Carboniq [2]. Un appel subséquent a fourni plus d'information [3]. Les besoins de transport routier du minerai se décrivent donc comme suit :

1. Le transport sera effectué par train routier, composé d'un unité tracteur et de deux remorques.
2. Le transport routier doit avoir une capacité totale de transport de 38.8 t de cargaison.
3. La distance entre Authier et NAL est de 68 km, aller-simple, sauf en cas de modification du trajet par l'ajout d'un pont.
4. Ce trajet est estimé prendre environ 1 h, dans un sens.
5. Les opérations routières se dérouleront 12 heures par jour, pendant la journée.

6. L'énergie comparable est le diesel routier, avec un taux de consommation estimé de 0.018 L/t-km payant, à 50% de voyages payants.
7. Les facteurs d'émissions du diesel routier sont de 2681 g CO₂/L, 0.11 g CH₄/L et 0.151 g N₂O/L. Le PRP du CH₄ est 21, et le PRP du N₂O est 310.
8. Le montant de minerai extrait est estimé à 772kt/an pour l'année 1, 883 kt/an pour les années 2 à 13, et 733 kt/an pour l'année 14.

Ces informations seront utilisées dans le cadre de cette analyse présente, afin d'identifier un scénario d'électrification des transports et de remplacement du diesel.

3. Paramètres énergétiques

3.1 Consommation énergétique

Dans un véhicule conventionnel, le carburant diesel est détoné dans le piston du moteur, produisant de l'énergie mécanique, qui est transférée dans les engrenages mécaniques et la transmission, pour fournir l'énergie motrice du véhicule. De l'énergie thermique contenue dans le carburant, approximativement entre 35 et 45% sert d'énergie mécanique utile pour la propulsion [4] [5] [6] [7], avec une valeur moyenne d'environ 40%, variant selon les conditions opérationnelles. Les pertes énergétiques sont d'environ 60%, dans les rejets thermiques, le refroidissement, la friction et les pertes parasitiques [4]. La consommation énergétique combustible moyenne d'un camion lourd au diesel est environ 5.2 kWh/mile [5] [4] ou 3.2 kWh/km. La performance technico-économique d'un groupe motopropulseur au diesel sur le trajet envisagé est calculée au Tableau 1, ci-dessous.

Tableau 1: Performance d'un véhicule lourd au diesel sur le trajet Authier-NAL

Paramètre	Unité
Distance – aller-retour	136 km
Consommation énergétique	3.2 kWh/km
Teneur énergétique diesel [8]	38.3 MJ/L
Consommation diesel par voyage	40.9 L
Facteur d'émissions du diesel [1]	2681 g CO ₂ /L, 0.11 g CH ₄ /L, 0.151 g N ₂ O/L
Émissions totales par voyage	111.7 kg CO ₂ eq
Coût du diesel [9]	1.259 \$/L
Coût d'énergie pour un voyage	51.50 \$

Dans un véhicule électrique à batterie, l'énergie électrochimique emmagasinée dans la pile est transformée en courant, qui alimente le moteur électrique du véhicule,

produisant de la force motrice. L'efficacité énergétique d'un système électrique est nettement plus élevée, à approximativement 85% [6]. Les pertes thermiques et frictionnelles d'un système électrique sont substantiellement réduites, lorsque comparé à un véhicule au diesel. La consommation énergétique moyenne d'un camion lourd électrique à batterie est environ 2.0 kWh/mile [4] [5] [7] ou 1.2 kWh/km. La performance technico-économique d'un groupe motopropulseur électrique sur le trajet envisagé est calculée au Tableau 2, ci-dessous.

Tableau 2: Performance d'un véhicule lourd électrique sur le trajet Authier-NAL

Paramètre	Valeur
Distance – aller-retour	136 km
Consommation énergétique	1.2 kWh/km
Consommation électrique par voyage	163.2 kWh
Facteur d'émissions électricité Hydro-Québec [8]	2.04 g CO ₂ /kWh
Émissions totales par voyage	0.3 kg CO ₂ eq
Coût moyen d'électricité	0.08 \$/kWh
Coût d'énergie pour un voyage	13.06 \$

La différence de performance entre les deux systèmes de propulsion est évaluée au Tableau 3.

Tableau 3: Comparaison entre propulsion conventionnelle au diesel et véhicule à batterie électrique

Paramètre	Valeur
Coût d'énergie diesel	51.50 \$
Coût d'énergie électricité	13.06 \$
Différence coût	38.44 \$ (74.6%)
Émissions GES diesel	111.7 kg CO ₂ eq
Émissions GES électricité	0.3 kg CO ₂ eq
Différence émissions	111.4 kg CO ₂ eq (99.7%)

Dans un contexte québécois, le coût d'opération énergétique d'un véhicule électrique est le quart du coût en carburant d'un véhicule conventionnel au diesel, aux prix courants du marché énergétique en vigueur. Ceci représente une réduction intéressante du coût des opérations de transport. De plus, les tarifs de l'électricité sont contrôlés par la Régie de l'énergie. Le prix de l'électricité est donc plus stable que celui du diesel, une commodité influencée par le coût du pétrole et le marché mondial. L'utilisation d'électricité devrait stabiliser les coûts de transport à long terme, vis-à-vis une énergie plus volatile comme le diesel.

L'électricité au Québec étant presqu'exclusivement produite à partir de centrales hydroélectriques, elle possède une très faible empreinte carbone. L'opération d'un véhicule électrique est donc presque carbone nulle. La réduction des émissions liée à l'électrification du camionnage est quasi-totale.

3.2 Stockage et autonomie

Dans un véhicule conventionnel au diesel, le stockage énergétique se fait dans les réservoirs de diesel. Le diesel est un combustible avec une haute densité énergétique, à 38.3 MJ/L (10.6 kWh/L). La capacité de stockage varie selon le modèle de camion, le type et la taille des réservoirs, et l'addition de réserves supplémentaires ou de modifications après-marché. En Amérique du Nord, des camions typiques ont habituellement des réservoirs de capacités entre 100 et 300 gallons US (378 à 1136 L). Assumant aucune perte pour des opérations stationnaires ou de marche à vide, avec une consommation de 40.9 L par voyage, un camion au diesel ayant des réserves entre 378 L et 1136 L pourrait effectuer entre 9 et 27 voyages complets avant d'avoir besoin de ravitaillement.

Pour un véhicule électrique à batteries, l'électricité est emmagasinée dans les batteries. Toutefois, la densité énergétique des batteries modernes est relativement limitée. La densité énergétique de batteries à lithium-ion de cette génération commerciale est entre 220 et 300 Wh/kg, avec une valeur moyenne d'environ 243 Wh/kg [4] [6]. Les batteries requises pour avoir des autonomies respectables peuvent peser plusieurs tonnes, ce qui représente un pourcentage relativement élevé de la masse totale du véhicule. La densité énergétique volumétrique d'une cellule de pile se situe autour de 727 Wh/L [6]. Même si l'efficacité énergétique du diesel est la moitié de l'efficacité de l'électricité, sa densité énergétique est 14 fois plus élevée, ce qui explique la plus grande autonomie du diesel.

La faible densité énergétique des batteries est la grande limite à l'autonomie des véhicules électriques. Par exemple, le véhicule prototype électrique du programme Volvo LIGHTS (Low Impact Green Heavy Transport Solutions), une variante électrique du camion tracteur VNR, comporte 6 bloc-piles de 66 kWh/chaque, pour une capacité totale de stockage électrique de 396 kWh [10]. La capacité accessible sera limitée à 300 kWh, pour maximiser la durée de vie des batteries. L'entièreté du système de stockage pèse 7580 lb (3445 kg), ce qui est une masse nettement plus élevée que la réserve de diesel d'un camion conventionnel. À 163.2 kWh pour un trajet aller-retour entre Authier et NAL, un camion pourrait faire 1.85 voyages à la charge maximale accessible de 300 kWh, ou 2.43 voyages à la charge totale de la batterie de 396 kWh. Un autre exemple serait le e-Cascadia, le prototype électrique du camion lourd conventionnel Cascadia de Freightliner, qui aurait une capacité utile de batterie de 550 kWh [11]. Ils annoncent une

autonomie moyenne de 250 miles (402 km). Au taux de consommation estimé de 1.2 kWh/km, l'autonomie serait de 458 km. À une consommation estimée de 163.2 kWh par trajet aller-retour, le e-Cascadia pourrait effectuer 3.4 cycles complets. La performance d'un système individuel variera selon sa configuration exacte.

Les batteries de véhicules électriques sont aussi dispendieuses. Le coût moyen estimé pour une batterie moderne est entre 150 et 300 USD/kWh, avec une valeur moyenne de 190 USD/kWh [4], variant selon le type de technologie de la batterie, le fabricant, et l'évolution du marché. Le système Volvo LIGHTS, utilisé en exemple précédemment, n'a pas encore de prix déclaré. Utilisant une valeur de 190 USD/kWh, le prix du bloc-piles anticipé de 396 kWh pourrait être estimé à environ 75 240 USD, ou environ 100 000 \$ CAD, selon le taux de change en vigueur. Pour l'exemple du e-Cascadia, à 550 kWh utiles déclarés, un prix n'est pas encore disponible, mais le coût du bloc-piles peut être estimé à approximativement 104 500 USD (139 333 \$ CAD). Ces coûts sont seulement pour la batterie, ce qui représente un surcout non-négligeable au coût d'un camion conventionnel.

3.3 Recharge

Les batteries des véhicules électriques doivent être rechargées pour permettre l'opération des véhicules. Le montant exact variera selon le véhicule, la taille des batteries, et la programmation pour maintenir la durée de vie des batteries. L'autonomie évaluée précédemment indique qu'au taux de consommation estimé, et avec les batteries de l'exemple de Volvo, entre 1.8 et 2.4 cycles aller-retour pourraient être accomplis sur une pleine charge. Le e-Cascadia pourrait effectuer environ 3.3 cycles. Selon le cycle opérationnel journalier sélectionné pour les véhicules, cette autonomie limitée pourrait être insuffisante pour accomplir toutes les tâches requises.

Assumant un cycle d'opérations de 12 heures par jour, les camions seront hors-service pendant 12 heures. Les camions pourront être branchés et rechargés par recharge lente la nuit, lorsqu'ils sont hors service, pour commencer le matin avec des batteries pleines.

Le trajet de 68 km entre la mine Authier et le concentrateur, passant par la ville d'Amos, prend environ 1 heure. Le temps de chargement des camions à la mine, et le temps de déchargement au concentrateur vont dépendre de l'infrastructure de manutention de minerai, de la logistique opérationnelle, et de divers facteurs humains entourant ces activités. Il est estimé que ces temps peuvent prendre entre 10 minutes pour des systèmes hautement efficaces et automatisés, et 1 heure pour des systèmes lents et manuels. Un cycle complet de chargement de minerai à la mine, de transit de la mine au concentrateur, de déchargement du minerai au concentrateur et de retour à la mine

prendrait entre 2h10 et 4h00. Sur une journée de 12 heures utiles, entre 3.0 et 5.5 cycles complets pourraient être accomplis. En pratique, incluant les arrêts liés aux besoins biologiques du personnel, les erreurs humaines et imprévisibles, un estimé plus réaliste placerait le nombre de cycles pour un camion à de 3 à 4 voyages par jour. Dans ce scénario, le e-Cascadia serait en mesure d'effectuer 3 cycles par jour sans besoin de recharge, et pourrait rencontrer le bas de l'intervalle des besoins opérationnels. L'autonomie des camions Volvo étant estimé à être entre 1.8 et 2.4 cycles, il est évident que ce modèle de camion électrique aurait de la difficulté à rencontrer la demande entière quotidienne avec la capacité de ses batteries. La capacité des batteries est donc un facteur critique à déterminer la capacité d'un véhicule à rencontrer les besoins de cycles opérationnels, si le tout dépend seulement des batteries et de la recharge lente.

La recharge lente serait utilisable la nuit, pour recharger les batteries lentement et de manière à minimiser le stress sur les piles. Assumant une batterie de 396 kWh, un temps de recharge de 12 h, et une efficacité de 100%, les besoins de puissance de recharge sont d'environ 33 kW, ce qui est relativement modéré. Même la batterie du e-Cascadia ne requiert que 46 kW en recharge lente. Cette puissance est comparable avec une borne de recharge rapide automobile de 50 kW du Circuit Électrique du Québec [12]. Toutefois, la recharge lente a des restrictions, et serait limitée dans sa capacité à soutenir les opérations pendant une journée complète.

Il apparaît évident que l'utilisation des camions électriques est sensible aux capacités des batteries et de leur cycle de recharge. Elle est aussi sensible à la logistique opérationnelle des camions, incluant le temps de transit, et les durées des périodes de chargement et de déchargement de la cargaison de minerai. L'addition du temps de charge des batteries pourrait agrandir la durée d'un cycle complet, réduisant le nombre de cycles par jour possibles pour les véhicules électriques. Ceci pourrait augmenter la taille de la flotte nécessaire. De plus, l'infrastructure de chargement et de déchargement de minerai sera de toute évidence un goulot d'étranglement. Les camions ne seront pas en mesure de tous être chargés et déchargés simultanément. Une cédule de démarrage journalier sera requise pour bien gérer la flotte, avec des opérations de chargement du minerai, de transit, de déchargement du minerai, et de recharge des batteries, séquencées pour chaque camion dans la flotte. Les cycles opérationnels indiqués précédemment ne prennent pas en compte de cette séquence, ce qui pourrait aussi affecter le nombre de cycles utiles par jour.

Une option serait l'utilisation de la recharge rapide, qui utilise une haute puissance pour transférer beaucoup d'énergie en peu de temps. La recharge rapide est présentement en développement pour toutes classes de véhicules électriques à batteries, dont les camions lourds [13]. La recharge rapide requiert une station de haute puissance, pour transférer le courant. Vu les puissances électriques sollicitées, la gestion thermique devient un

enjeux. Certains systèmes à très haute puissance utilisent même des câbles réfrigérés, pour maximiser le transfert [13] [14]. La Figure 1 illustre la plage de technologies de recharge d'un fournisseur spécifique d'équipement de recharge rapide, incluant un système avec un câble refroidi. D'autres fournisseurs offrent des technologies similaires.

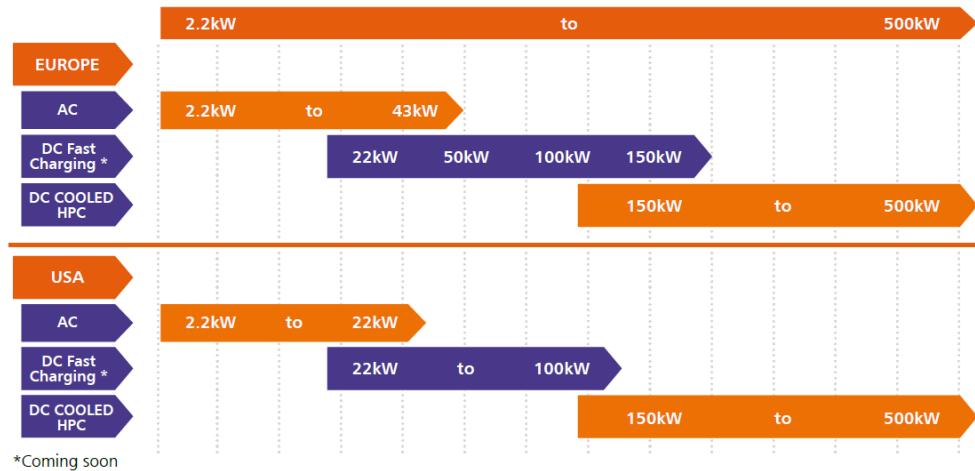


Figure 1: Plage de technologies de recharge en fonction de la puissance [14]

Le prix des systèmes de chargement varie de manière importante, selon le type de technologie et la puissance du système. Les systèmes de recharge à haute puissance DCFC (DC Fast Charging) ont un coût d'installation estimé, pour un système relativement simple, débutant entre 35 000 et 40 000 USD [13] [15]. Les prix augmentent avec la puissance et la complexité du système. De plus, l'infrastructure électrique requise pour alimenter les bornes de recharge devient plus importante, ce qui induit des coûts additionnels.

Des alternatives à la recharge câblée sont en développement. Les systèmes de recharge par induction sans fil sont une possibilité, où le véhicule peut être rechargé par un circuit électromagnétique à induction installé dans une dalle de béton au sol. La Figure 2 illustre un système de recharge sans fil de 200 kW, développé par Momentum Dynamics, des États-Unis. Ce système a été testé dans des autobus d'un système de transport en commun, un autre exemple de véhicule lourd qui accomplit un trajet cyclique avec un retour à un dépôt et un lieu de chargement prévisible. Le coût de ce type de système est encore peu détaillé, mais risque d'être plus dispendieux que la recharge câblée.

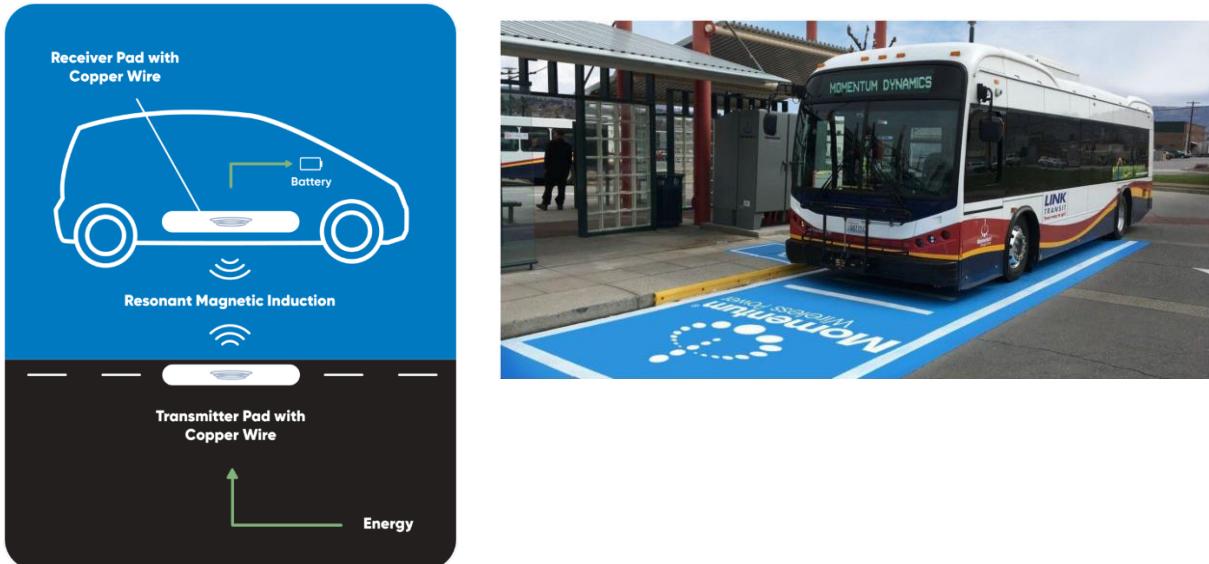


Figure 2: Système de recharge sans-fil par induction, de Momentum Dynamics [13] [16]

D'autres systèmes utilisent un pantographe statique, comme les autobus à recharge rapide de la Société de Transport de Montréal, testé sur la ligne 36 Monk en 2017, tel qu'illustré à la Figure 3.



Figure 3: Autobus à recharge rapide de la STM

Le point d'arrêt du véhicule comporte un mat avec un bras robotisé, qui déploie un pantographe du mat automatiquement lorsque le véhicule se stationne à proximité. L'autobus reçoit 5 minutes de recharge rapide, lorsqu'à la station. Un reportage de Découverte illustre le sujet [17].

Tous ces systèmes de recharge rapide sont conçus pour livrer beaucoup d'énergie en peu de temps. Un cycle de recharge pourrait être inclus dans le cycle opérationnel des camions entre la mine et le concentrateur. Idéalement, la période de recharge des batteries pourrait être intégrée aux opérations de chargement et de déchargement du minerai des camions, pour profiter d'une période d'arrêt existante, et minimiser les temps d'arrêts supplémentaires et les pertes.

Des pantographes peuvent aussi être utilisés pour opérer et recharger des véhicules en mouvement sur la route. Un système de fils caténaires est installé par-dessus la route, et un pantographe intégré au véhicule opère à partir de l'énergie du réseau électrique. Ce type de système est commun dans les systèmes de transport en commun, et aussi utilisé dans l'industrie minière. Des tests s'effectuent pour son utilisation pour les camions lourds.



Figure 4: Camion électrique à pantographe avec réseau caténaire [13]

L'équipementier Siemens teste présentement le concept eHighway en Allemagne, où l'autoroute publique a été équipée de 10 km de caténaires. Des camions lourds peuvent se connecter sur le réseau, tout en circulant à des vitesses allant jusqu'à 90 km/h [18]. Ce réseau est en test depuis 2017. D'autres expériences sont à l'essai en Californie et en Suède. L'avantage d'un tel système est que lorsqu'un camion est connecté au réseau, son autonomie est essentiellement illimitée. La taille ou l'état de charge de la batterie ne sont plus des limites à l'autonomie. Des véhicules avec des plus petites batteries deviennent possibles.

En contrepartie, certains des tests ont eu des délais [19], et un réseau de caténaires peut être dispendieux. Un des projets en Allemagne aurait couté 14.6 M€ pour équiper 5 km d'autoroute de caténaires.

4. Modélisation économique

4.1 Structure

Une modélisation économique simplifiée a été effectuée, afin d'évaluer l'impact économique de l'électrification du transport routier du minerai. Les intrants majeurs utilisés dans cette modélisation incluent :

1. Les facteurs des besoins de transport identifiés à la Section 2.
2. Les valeurs de consommation énergétique estimés à la Section 3.1, incluant les valeurs aux Tableau 1, Tableau 2 et Tableau 3.
3. Une division en deux onglets, soit un chiffrier pour le transport par voyage, en un chiffrier regroupant l'ensemble des opérations.

Ce modèle essaie d'établir les grandes lignes d'une comparaison entre l'opération de camions lourds conventionnels au diesel, ou électriques à batteries. Il est relativement simple, pour effectuer une comparaison économique à grande échelle. Il est à noter que les cellules en bleu contiennent des informations à entrée manuelle, soit provenant de sources externes ou estimées pour une première approximation.

L'onglet « Voyage individuel » compare le voyage d'un camion au diesel au voyage d'un camion électrique, selon une méthodologie identique. Son opération est relativement évidente. Les valeurs qui en découlent sont utilisées pour alimenter le second onglet « Projet complet ». Ce dernier effectue une modélisation du transport de minerai sur la durée de vie du projet complet.

Il est évident que le cycle de transport estimé dans cette analyse est simpliste. Le nombre de cycles par camion et le dimensionnement de la flotte sont évalués simplement pour obtenir un ordre de magnitude. En opération normale, les camions seraient utilisés selon un cycle opérationnel plus complexe, avec des séquences quotidiennes de démarrage et de clôture, pour séquencer les opérations des camions. Le nombre de cycles possibles par véhicule pourrait être affecté par cette séquence opérationnelle. Une évaluation d'une telle envergure requiert une connaissance accrue de la logistique des opérations, des

capacités des divers équipements, et une évaluation de temps et mouvement. Une telle étude ferait partie d'étapes subséquentes.

Le nombre de voyages requis dépend du volume de minerai à transporter dans une année donnée, et de la capacité anticipée des camions. Les cycles opérationnels sont définis selon la durée de temps des différentes portions du cycle. Pour les véhicules électriques, le recharge rapide pendant un cycle est évalué. Ce montant néglige la période de recharge lente en dehors du cycle opérationnel.

Pour l'analyse des camions au diesel, l'analyse s'effectue de manière évidente, en utilisant les facteurs par voyage individuel, projetés sur l'ensemble des voyages par année du projet. Un coût d'acquisition par véhicule est utilisé pour établir le coût de la flotte requise.

Pour les véhicules électriques, l'analyse est un peu plus complexe. La même approche est utilisée, avec les cycles des véhicules électriques. Si l'ajout d'un temps de recharge augmente la durée d'un cycle individuel, le nombre de cycles utiles par jour baisse. La taille de la flotte de camions est donc majorée, en fonction de la durée des cycles. Le coût des camions est basé sur deux facteurs, soit le coût d'un camion de base, importé des camions diesel, et le coût additionnel pour l'acquisition d'un véhicule électrique. Le coût additionnel est principalement lié au coût de la batterie. Une première estimation du coût d'un bloc-piles est utilisée. Cette méthodologie est utilisée pour évaluer l'impact de la différence de la taille des flottes respectives entre le diesel et les camions à batteries.

Une évaluation sommaire est aussi effectuée pour les coûts d'acquisition d'équipement de recharge. Pour les chargeurs lents, le montant de chargeurs requis est déterminé par la taille de la flotte. Le nombre de chargeurs rapides est un estimé. Les coûts des équipements de recharge sont estimés selon certaines informations industrielles, mais nécessiteront d'être validées.

La valeur actualisée nette de chaque mécanisme est évaluée, en utilisant les coûts d'acquisition des équipements mobiles, les coûts des infrastructures spécifiques de recharge, et les coûts opérationnels d'énergie, pour effectuer une comparaison des deux mécanismes.

4.2 Omissions

Ce modèle néglige pour l'instant quelques facteurs importants, dont l'entretien des véhicules, et la durée de vie des batteries. Ces deux éléments sont encore indéterminés. Pour les coûts d'entretien, il est anticipé que la simplification des systèmes mécaniques

d'un véhicule électrique réduira de manière importante les coûts d'entretien mécanique. Toutefois, l'ajout de systèmes électriques plus complexes pourrait avoir son lot de complexités. En moyenne, l'électrification devrait réduire les coûts globaux d'entretien, mais le montant de la réduction est encore indéterminé. La durée de vie des batteries est aussi un enjeu complexe. Les batteries de véhicules électriques souffrent d'une dégradation progressive à long terme. Certaines mesures d'ingénierie sont prises en compte pour réduire l'impact de ces réductions sur les cycles opérationnels, comme l'illustre l'exemple des camions Volvo, qui réduisent la capacité accessible, pour ménager la durée de vie des batteries. En contrepartie, l'utilisation agressive de recharge rapide à très haute puissance peut accélérer le vieillissement des batteries. La modélisation assume une capacité relativement constante des batteries selon la durée du projet. Dans des cas où les capacités seraient réduites, le nombre de cycles opérationnels atteignables pourraient être réduits. Le modèle ne contient pas de provisions pour le remplacement des batteries, si leur dégradation serait suffisante pour nécessiter un remplacement complet.

Un autre facteur important qui n'est pas adressé est l'impact du froid sur les batteries des camions. Peu de littérature technique est disponible sur l'effet de la température sur les batteries des camions lourds. Dans les véhicules légers, il est connu que les grands froids peuvent réduire la charge utile des batteries et l'autonomie des véhicules. Il est inconnu si les camions lourds seront similairement affectés, et l'étendu de l'impact du froid sur cette classe de véhicules.

4.3 Résultats préliminaires

Au niveau d'un voyage individuel, tel que discuté précédemment au [Tableau 3](#), l'électrification et la substitution du diesel réduisent les coûts en énergie de 74.6%, et réduit les émissions de GES de 99.7%. À cette échelle opérationnelle, l'électrification a un avantage économique et environnemental.

Au niveau du projet complet, les réductions des coûts énergétiques et de GES sont les mêmes. L'avantage économique est toutefois moins prononcé, en incluant les coûts des équipements. L'électrification élimine la consommation de diesel, mais se traduit par une augmentation des dépenses en capital pour l'acquisition d'équipement. En premier lieu, les camions électriques sont plus dispendieux que des équivalents au diesel, en coût par unité. De plus, si une étape distincte de recharge est rajoutée aux opérations de transport, rallongeant le cycle complet, le nombre de cycles par jour par véhicule est réduit. Pour obtenir les mêmes résultats de transport, des véhicules électriques additionnels seraient requis. L'augmentation peut donc être double, sur le coût par véhicule et la quantité de

véhicules requis. En surcoût, l'infrastructure de recharge impose des dépenses supplémentaires de capital.

Les VAN des coûts deux mécanismes de transport ont été évalués. Le transport électrifié, même avec des coûts en capital plus importants au début du projet, à une valeur plus intéressante que le transport au diesel pour beaucoup de scénarios. Cet avantage découle du plus faible coût d'énergie. Ces résultats dépendent fortement des paramètres utilisés dans le modèle, en premier lieu la présence et durée d'un cycle dédié de recharge rapide.

5. Conclusion et prochaines étapes

L'évaluation sommaire du transport du minerai par camion routier électrique, en comparaison avec un véhicule conventionnel au diesel, démontre que le transport électrique est techniquement viable, et avantageux au niveau économique et environnemental.

Au niveau technique, des camions lourds à batteries peuvent effectuer plusieurs cycles routiers entre la mine et le concentrateur. Le nombre de cycles pourrait être limité, et dépend fortement de la capacité des batteries et de l'infrastructure de recharge disponible, mais des options techniquement viables sont disponibles.

Au niveau environnemental, la substitution du diesel par de l'électricité provenant d'Hydro-Québec pour le transport réduit les émissions de GES de 99.7% par voyage. Les opérations de transport de minerai par camion électrique auraient des émissions presque nulles, lorsque comparées au diesel.

Au niveau économique, le résultat exact varie selon certaines valeurs clés dans la modélisation économique. Dans le cas illustré dans la modélisation ci-jointe, jugé relativement représentatif, l'utilisation de camions électriques est économiquement avantageuse, même avec des coûts d'équipement plus élevés.

Les prochaines étapes de l'évaluation du transport routier électrifié reposent sur plusieurs éléments critiques, dont :

- Une évaluation de la logistique opérationnelle des camions, de leur chargement et déchargement de minerai, et de leur cycle opérationnel.
- L'intégration du chargement des batteries dans le cycle opérationnel.
- Une étude de temps et mouvement, incluant des cédules de démarrage et de fermeture quotidiennes.

6. Références

- [1] S. Piché et J. Vieira, «Projet Authier - Inventaire des émissions de gaz à effet de serre - Rapport Ref. Interne 657208-SLQA-RP03-00_GES,» SNC-Lavalin Environnement et géosciences, Montréal, 2019.
- [2] J.-P. Lafleur, «Sayona Québec - Plan d'écologisation des opérations de lithium - Phase 1 - Version 02-F,» Carboniq, Montréal, 2020.
- [3] Sayona Québec, *Appel conférence Sayona, BBA et Carboniq, 29 janvier*, Montréal, 2020.
- [4] A. Thiruvengadam, S. Pradhan, P. Thiruvengadam, M. Besch, D. Carder et O. Delgado, «Heavy-Duty Vehicle Diesel Engine Efficiency Evaluation and Energy Audit,» Center for Alternative Fuels, Engines & Emissions WVU, Morgantown, 2014.
- [5] Z. Gao, Z. Lin et O. Franzese, «The energy consuption and cost savings of truck electrification for heavy duty vehicule applications,» *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2628, n° %11, pp. 99-109, 2017.
- [6] E. Çabukoglu, G. Georges, L. Küng, G. Pareschi et K. Boulouchos, «Battery electric propulsion: An option for heavy duty vehicles? Results from a Swiss case-study,» *Transportation Research Part C*, vol. 88, pp. 107-123, 2018.
- [7] NACFE, «Guidance report - Electric trucks - Where they make sense,» North American Council for Freight Efficiency, 2018.
- [8] Transition énergétique Québec, «Facteurs d'émission et de conversion,» Ministère de l'énergie et des ressources naturelles, Québec, 2018.
- [9] Régie de l'énergie du Québec, «Carburant diesel - Prix moyen affiché - Par région administrative du Québec,» 03 12 2019. [En ligne]. Available: http://www.regie-energie.qc.ca/energie/archives/diesel/diesel_moyen2019.pdf. [Accès le 19 12 2019].
- [10] B. Stewart, «Gentle Giant: We Drive Volvo's Electric Heavy Duty VNR Regional Big Rigs,» 25 02 2020. [En ligne]. Available: <https://www.autoweek.com/drives/a31077651/gentle-giant-we-drive-volvos-electric-heavy-duty-vnr-regional-big-rigs/>. [Accès le 16 03 2020].
- [11] Freightliner, «e-Mobility: Leading the charge,» [En ligne]. Available: <https://freightliner.com/e-mobility/>. [Accès le 17 03 2020].
- [12] Le Circuit Électrique, «Bornes et prix,» [En ligne]. Available: <https://lecircuitelectrique.com/bornes-et-tarifs>. [Accès le 18 03 2020].
- [13] NACFE, «Guideance report - Amping up: Charging infrastructure for electric trucks,» North American Council for Freight Efficiency, 2019.

- [14] ITT Cannon Inc., «Liquid Cooled CCS1 & CCS2 High Power Charging Solutions,» 2018. [En ligne]. Available: <https://www.ittcannon.com/Core/medialibrary/ITTCannon/website/Literature/Catalogs-Brochures/ITT-Cannon-EVC-DC-Liquid-Cooled-Brochure.pdf?ext=.pdf>. [Accès le 18 03 2020].
- [15] M. Smith et J. Castellano, «Costs associated with non-residential electric vehicle supply equipment,» U.S. Department of Energy, 2015.
- [16] Momentum Dynamics, «Wireless EV Charging; Technology overview,» [En ligne]. Available: <https://momentumdynamics.com/thetech/>. [Accès le 17 03 2020].
- [17] Découverte Radio-Canada, «Bus Électrique,» Découverte - Radio-Canada, 17 04 2017. [En ligne]. Available: <https://ici.radio-canada.ca/tele/decouverte/2016-2017/segments/reportage/19983/autobus-bus-electrique?isAutoPlay=1>. [Accès le 17 03 2020].
- [18] Siemens, «eHighway - Innovative road freight transport,» 2017. [En ligne]. Available: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:7bcd4aee10a34603eea30c4e8b8941478c164092/version:1500537078/ehighway-2017.pdf>. [Accès le 17 03 2020].
- [19] Electrive.com, «Delays in German electric highway project Elisa,» 30 09 2019. [En ligne]. Available: <https://www.electrive.com/2019/09/30/delays-in-german-electric-highway-project-elisa/>. [Accès le 17 03 2020].



Sayona Québec

**Plan d'écologisation des
opérations de lithium**

Phase 1

30 Janvier 2020

Version 02-F

SAYONA
QUÉBEC

Contrôle de document

Ce document contient les trois livrables identifiés au tableau ci-bas, tel que spécifié dans le document « Liste de livrables 2019-11-28 », émis par courriel le 28 novembre. Cette liste est aussi jointe à ce document en annexe, à titre indicatif. Une présentation préparée par Énergir au sujet de l'utilisation du gaz naturel est fournie à l'Annexe B.

Contenu	Titre	Statut
Livrable 1	Compensation de la dette carbone des activités de déboisement	Émis pour discussions et commentaires
Livrable 2	Gestion de l'empreinte du transport routier	Émis pour discussions et commentaires
Livrable 3	Gestion de l'empreinte du transport minier	Émis pour discussions et commentaires
Annexe A	Liste de livrables 2019-11-28	Pour information
Annexe B	Camions à plus faibles émissions de GES pour le transport sur route du minerai et du concentré – D. Ducasse, Énergir	Pour information

L'historique d'émission de ce rapport est détaillé ci-bas.

Version	Date d'émission	Modifications
Version 01	19 décembre 2019	Émission originale
Version 02-F	30 janvier 2020	<ul style="list-style-type: none"> • Corrections typographies. • Clarifications mineures. • Corrections références. • Production d'une traduction anglaise (Version 02-E, séparée)

Ce document a été préparé par le soussigné, employé de Carboniq.


 Jean-Philippe Lafleur, ing.
 Membre OIQ 5007836

2020-01-30
 Date

Livrable 1

Compensation de la dette carbone des activités de déboisement

Livrable 1: Compensation de la dette carbone des activités de déboisement

Actuellement, le site du projet Authier est principalement recouvert de forêt boréale typique d'une zone continentale tempérée. Une étape initiale importante des activités de préproduction de la mine Authier du projet Sayona est le déboisement nécessaire pour l'implantation de la fosse de la mine, les infrastructures opérationnelles et logistiques, et les installations connexes nécessaires pour les activités de la mine. Ce déboisement créé une dette carbone initiale, avant le début des opérations. Le but de ce livrable est d'identifier cette dette initiale, de proposer certaines méthodes de réduction de la dette, d'identifier des mécanismes possibles pour la compensation de l'empreinte résultante, et de souligner certains enjeux critiques à prendre en considération lors de la compensation.

1. Quantification de la dette initiale

Le document *Projet Authier – Inventaire des émissions de gaz à effet de serre* [1] produit par SNC-Lavalin identifie les sources de GES associées au projet de Sayona Lithium. Le sujet du déboisement est adressé à la section 3.1.1. *Déboisement*.

Le montant total de la dette initiale du déboisement s'estime à 44 152 t CO₂ eq. Ce montant se décline en trois composantes, soit :

- La perte en stock de carbone associée au déboisement : 42 494 t CO₂ eq
- La consommation en carburant des équipements : 953 t CO₂ eq
- La transformation du bois coupé : 731 t CO₂ eq

Il faut noter une variation entre la somme des montants calculés et le montant total, qui est attribuable à des variations dans la méthodologie de calcul de SNC-Lavalin.

La vaste majorité des émissions de la dette initiale découlent du premier élément de la dette, la perte en stock de carbone. Cet élément représente environ 96% de la dette initiale. Le deuxième élément de la dette est la consommation en carburant diesel qui découle de l'utilisation des équipements motorisés de sciage, d'abatage et de manutention pour effectuer le déboisement, qui est estimée à environ 2%. Le troisième élément est la transformation du bois, qui représente l'impact ultime de l'utilisation du bois coupé lors du déboisement. À ce stade, il est simplement assumé que le bois coupé serait brûlé en combustion. Les émissions de ce troisième élément représentent environ 2% de la dette totale.

2. Réduction de la dette initiale

Deux grandes avenues sont possibles pour la réduction de la dette initiale, qui seront étudiées dans cette section.

2.1 Réduction des superficies déboisées

La majorité de l'empreinte associée au déboisement provient de la perte du stock de carbone associé au déboisement, soit la perte du carbone emmagasiné dans les parties aériennes et souterraine de la biomasse forestière. Le calcul du stock en carbone s'effectue en multipliant la superficie déboisée, le tonnage de biomasse contenu par hectare, et le contenu en carbone de la biomasse, avec un ratio pour la biomasse aérienne et souterraine. Les quantités de biomasse sur le terrain et leur contenu en carbone ne sont pas des valeurs sur lesquelles nous pouvons intervenir de façon significative. La superficie devant être déboisée peut toutefois être modifiée.

Les trois composantes des émissions du déboisement sont toutes proportionnelles à la superficie déboisée. La valeur totale des émissions du déboisement est de 44 152 t CO₂ eq., pour une superficie de 206 ha, ce qui équivaut à approximativement 214 t CO₂ eq/ha. Simplement, une réduction de la superficie déboisée se traduirait par une réduction proportionnelle de l'empreinte carbone. Différentes avenues sont possibles pour réduire l'empreinte du déboisement.

La première option est de réduire la surface totale déboisée. Ceci implique de réduire les marges de dégagement au strict minimum nécessaire, et de ne déboiser que les portions absolument requises. Le plan de déboisement pour le site Authier doit déjà être relativement conservateur, mais en questionnant chaque superficie et en resserrant les exigences, il serait probablement possible de réduire la superficie totale à déboiser, réduisant ainsi le montant initial de la dette.

La deuxième option est le déboisement par étapes, où seulement les superficies nécessaires aux opérations immédiates seraient déboisées. Contrairement à un déboisement initial complet, où toute la superficie planifiée serait déboisée d'un coup, accumulant toute la dette initiale immédiatement, un déboisement partiel se limiterait seulement aux superficies immédiatement nécessaires. La dette initiale serait donc plus limitée, et les autres éléments de la dette seraient accumulés plus lentement au fil des ans. De plus, en ne déboisant que les superficies nécessaires pour les opérations immédiates, ceci réduirait la possibilité de déboisement inutile. Le plan minier d'une mine à ciel ouvert est un document vivant, évoluant en fonction du développement de la mine et des découvertes lors de forages exploratoires. En effectuant tout le déboisement au début du projet, selon le plan minier actuel, il est possible que certaines superficies soient déboisées inutilement, après l'évolution du plan minier. En se limitant seulement au

déboisement immédiatement nécessaire, le déboisement inutile serait évité, réduisant les dettes non-essentielles.

2.2 Valorisation de la biomasse

Une autre option pour la réduction de la dette initiale affecte le volet de la transformation du bois coupé, par l'utilisation ou la valorisation de la biomasse forestière récoltée lors du déboisement. Présentement, l'inventaire assume la combustion complète de la biomasse, produisant des gaz à effet de serre. La transformation de la biomasse en bois commercialisable permettrait la fixation d'une partie de ce carbone en bois d'œuvre ou en produit dérivé, ce qui réduirait l'empreinte liée à la transformation du bois.

L'identification de mesures de transformation de la biomasse qui permettent du stockage de carbone à moyen et long terme permettrait de réduire la dette initiale. Carboniq recommande de travailler avec des spécialistes en foresterie et produit forestiers, pour identifier des pistes de valorisation du bois qui favorisent le stockage de carbone à long terme.

Toutes les options ci-avancées ne sont pas en opposition, et pourraient être déployées individuellement ou ensemble. Toute mesure qui permet de minimiser la dette initiale permet de réduire les mécanismes compensatoires nécessaires. Une dette initiale plus petite requiert moins de compensation. Les approches de compensation sont indépendantes de toutes les mesures de réduction de l'empreinte qui pourraient être déployées dans le stade précédent. Même avec les mesures de réduction les plus agressives, il est improbable que les mesures de réduction éliminent le besoin pour un programme de compensation.

3. Compensation de l'empreinte

Un programme de compensation d'empreinte carbone cherche à instaurer une ou plusieurs mesures proportionnelles à la dette, pour capturer du carbone ou réduire l'émission de GES dans l'atmosphère. Les mesures de réduction sont variées et diverses. La méthode de capture de carbone évidente est par la révégétalisation et plantation d'arbres. Des mesures de réduction peuvent aussi inclure le support d'initiatives de déplacement de carburants fossiles. Carboniq a identifié certaines pistes prometteuses pour l'implantation d'un programme de compensation.

L'acquisition de crédits compensatoires permet de compenser pour la dette initiale d'un projet. La qualité, la fiabilité, la valeur, et le prix de ces crédits varient donc de manière non-négligeable, et certains crédits sont meilleurs que d'autres. Avant de faire achat de crédits compensatoires, une analyse de la qualité de ces crédits est recommandée, afin

de vérifier que ces crédits sont valides. Selon la Fondation David Suzuki [2], les critères importants lors de l'analyse de crédits carbone sont :

- Additionalité : le critère de l'additionalité requiert que le projet ait généré la réduction ou l'élimination d'émissions qui n'auraient pas eu lieu autrement. Le crédit doit aider à financer des projets qui n'auraient pas été instaurés sans l'existence ou l'aide du revenu généré par le crédit.
- Audit : un crédit doit être validé et vérifié, pour s'assurer que la valeur d'émissions du crédit est juste et fiable. L'audit est souvent un élément clé de la certification d'un crédit, où un standard reconnu est appliqué au crédit, et un organisme se porte garant du système reconnaissant la valeur du crédit.
- Propriété unique : les crédits générés doivent être suivis et bien attribués, pour qu'un crédit unique ne soit pas vendu à plusieurs acheteurs. Les crédits doivent avoir une unicité et une traçabilité.
- Permanence : les crédits générés doivent avoir une certaine valeur temporelle, où les émissions qui sont réduites ou captées sont durables. Le carbone ainsi séquestré ne devrait donc pas subir de réversement et de retour dans l'atmosphère.
- Transparence : le fournisseur du crédit doit être transparent quant à la nature de leurs moyens de compensation, expliquant clairement l'origine et le mécanisme de leur crédit, les résultats des audits, et les autres facteurs qui influencent la valeur du crédit.
- Éducation : La Fondation David Suzuki accorde aussi une valeur aux fournisseurs de crédits qui font de l'éducation publique sur les changements climatiques et les gaz à effet de serre. Ceci n'est pas obligatoire pour la génération de crédits.

Lors de la sélection ou développement de programmes compensatoires, ou de l'achat de crédits carbone, il faut retenir ces six critères pour pouvoir évaluer la qualité des mécanismes de compensation.

Une série de crédits carbone sont disponibles de divers vendeurs sur internet, provenant de multiples différents endroits dans le monde, et utilisant une multitude de différents régimes de normalisation ou de certification. L'analyse de l'ensemble de ces différents crédits est en dehors de ce mandat immédiat. Des possibilités concrètes de programmes locaux ont été identifiés, pour la compensation de l'empreinte.

3.1 Achats de crédits compensatoires chez Carbone Boréal

Carbone Boréal [3] est un programme de compensation de GES par plantation d'arbres, opéré par la Chaire en Écoconseil de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC). Ce programme universitaire opère en générant des crédits de carbone par la plantation d'arbres dans des terrains dénudés secs dans la région du Lac-Saint-Jean. Les fonds reçus par Carbone Boréal subventionnent la plantation d'arbres et la recherche de l'UQAC. Lors de leur croissance, les arbres plantés captent du carbone, et les crédits générés sont transférés aux clients. Ces crédits sont vérifiés par le Bureau de la Normalisation du

Québec (BNQ), une entité publique indépendante et accréditée, selon les normes ISO 14064-2 et 14064-3.

Un programme de suivi et de maintien des plantations assure que les plantations sont bien établies et ont une permanence suffisante pour supporter les crédits vendus. Le coût du crédit carbone inclut la plantation de l'arbre, le support à la recherche universitaire et peut inclure une ristourne au propriétaire de la terre où sont plantés les arbres, selon le site.

Les crédits dans le volet Général ICI, sans ristourne, ressortant de collaboration entre Carbone Boréal et le MFFP sur des forêts de recherche, se vendent à 28 \$/t CO₂eq. Les crédits dans le volet Agricole ICI, avec ristourne, ressortant de collaboration entre Carbone Boréal et le MAPAQ, sur des superficies agricoles, se vendent à 35 \$/t CO₂eq. La compensation de la dette de 44 152 t CO₂eq serait donc entre 1.2 et 1.5 M\$ [4]. Il faudrait toutefois établir contact avec Carbone Boréal, pour établir s'ils sont en mesure de compenser autant d'émissions en bloc.

La portion du coût du crédit versé pour la plantation d'arbres et la recherche est considéré comme un don, et donc éligible pour les crédits d'impôts, ce qui pourrait avoir un impact fiscal intéressant. Carbone Boréal publie un registre contenant le nom des acheteurs des crédits et le montant acheté, avec l'identification du bloc d'arbres implantés et de leur localisation géographique. Ceci permet une publication et traçabilité des crédits.

Les avantages de l'utilisation du service de crédits de Carbone Boréal sont :

- Opération existante, établie et supportée par une institution reconnue au Québec.
- Crédits spécifiques, traçables, et vérifiés par une organisation accréditée et reconnue.
- Transaction simple
- Possibilité de crédits d'impôts

Les désavantages de l'utilisation du service de Carbone Boréal sont :

- Les plantations d'arbres effectués par Carbone Boréal sont principalement dans la région du Lac-Saint-Jean, et supportent la recherche à l'UQAC. Ceci implique donc peu de retombées locales à proximité de la mine Authier en Abitibi.
- Les montants de crédits nécessaires pour compenser l'entièreté de la dette initiale de la mine Authier pourrait être en dehors des capacités immédiates de Carbone Boréal.

Il serait possible d'obtenir d'autres crédits compensatoires sur le marché libre, provenant d'une variété d'autres sources à travers le monde, accrédités sous divers régimes

régulatoires. Carbone Boréal est toutefois une des seules options disponibles au Québec, et assujetti à une normalisation par un organisme québécois reconnu.

3.2 Développer un programme de compensation par plantation d'arbres local

Une option possible serait de supporter la mise en place d'un programme similaire au programme de Carbone Boréal, mais en Abitibi, dans la localité de la mine.

L'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) possède la Chaire de recherche UQAT-MFFP sur la gestion du carbone forestier [5], sous la direction du professeur Xavier Cavad, dans l'Institut de la recherche sur les forêts (IRF) de l'UQAT. La chaire de recherche a été lancée à l'hiver 2019, en collaboration avec l'UQAT, le Ministère de la forêt, de la faune, et des parcs du Québec (MFFP), le Cégep de Sept-Îles, et des industriels comme ArcelorMittal et Aluminerie Alouette. Des projets de recherche sont présents en Abitibi et dans la région de la Côte-Nord. L'UQAT possède aussi la Forêt d'enseignement et de recherche du lac Duparquet (FERLD), à environ 100 km au nord-ouest du site de la mine.

Les différents intervenants et chercheurs du domaine forestier à l'UQAT pourraient être approchés pour répliquer ou étendre le modèle de Carbone Boréal en Abitibi. Un programme universitaire de compensation par reforestation et de recherche dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue permettrait d'avoir des retombées écologiques, scientifiques et environnementales dans la région de la mine, ce qui pourrait aider à générer du support populaire pour le projet Authier et accroître son acceptabilité sociale.

Les avantages d'un plan de compensation local par reforestation sont :

- Retombées écologiques, scientifiques et économiques locales
- Accroissement de l'acceptabilité sociale locale
- Collaboration avec le milieu universitaire de l'Abitibi

Les désavantages d'un plan de compensation local par reforestation sont :

- Les montants de crédits nécessaires pour compenser l'entièreté de la dette initiale de la mine Authier sont élevés, et pourraient prendre des années à instaurer.
- Il faudrait étendre ou répliquer le modèle de Carbone Boréal à l'Abitibi. Il n'y a aucune infrastructure locale établie à présent.
- Possibilité de compétition avec Carbone Boréal.
- Nécessité d'instaurer des mécanismes opérationnels de plantation, de gestion des crédits, et de vérification.

La possibilité d'étendre le programme de Carbone Boréal en coopération avec l'UQAT permettrait d'entreprendre de la reforestation dans la région de la mine, de supporter de

la recherche universitaire locale, et d'accroître l'acceptabilité sociale de la mine dans sa région.

3.3 Support de projets de déplacement de combustibles fossiles

Une approche alternative à la génération de crédits carbone est le support pour d'autres projets de décarbonisation. Des crédits carbone peuvent être générés par des projets de migration d'énergies à haute empreinte carbone à des énergies à faible empreinte carbone. En participant financièrement en supportant ces projets, Sayona pourrait acquérir les crédits carbone qui en découlent.

Un inventaire des grands utilisateurs d'énergie fossile de la région permettrait d'identifier des institutions et installations qui utilisent présentement des grands montants d'énergie fossile, et développer des projets de migration énergétique pour ces utilisateurs. Des exemples pertinents incluent des écoles, de hôpitaux, des centres communautaires, et des réseaux électriques indépendants, fonctionnant au diesel ou au mazout. Les projets de migration pourraient inclure des conversions vers la biomasse, le gaz naturel renouvelable, ou l'électricité, ou l'ajout de systèmes de génération solaires ou éoliens. Préférablement, les projets sélectionnés devraient être dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue, pour pouvoir maximiser les retombées locales.

Toutefois, la dette du déboisement est relativement grande, et les projets de compensation développés devront être suffisamment grands pour permettre de compenser l'ensemble de la dette du déboisement. Un projet de compensation d'une infrastructure moyenne pourrait prendre des années à compenser la dette initiale du déboisement. Par exemple, le chauffage du campus de Ste-Foy de l'Université Laval émet l'équivalent de 20 000 t CO₂/an de GES. La dette initiale de la mine représente deux ans de chauffage pour un campus universitaire. Pour des infrastructures sociales présentes en Abitibi, la période nécessaire pour la compensation risque d'être plus longue.

Un bon programme de compensation sérieux générant des crédits requiert un plan de surveillance, de maintien et d'audit. L'instauration de telles mesures requiert des fonds additionnels, sur toute la durée du projet, ce qui augmente le coût total du projet.

Les avantages du support de projets de migration énergétique sont :

- Retombées économiques et environnementales locales.
- Accroissement de l'acceptabilité sociale locale.
- Support pour les infrastructures sociales de la région où opère la mine.

Les désavantages du support de projets de migration énergétique sont :

- Les montants de crédits nécessaires pour compenser l'entièreté de la dette initiale de la mine Authier sont élevés, et pourraient prendre des années à instaurer.

- Les montants de crédits nécessaires pour compenser l'entièreté de la dette initiale pourraient nécessiter le support de plusieurs projets, ce qui multiplie les efforts et la complexité.
- Il faudrait identifier les candidats possibles pour les migrations énergétiques, obtenir leur support et approbation, développer les projets et les exécuter.
- Nécessité d'instaurer des mécanismes d'exécution de projet, d'opération, de gestion des crédits, et de vérification.

Un plan de compensation par le support d'initiatives locales de migration énergétique est une option intéressante, permettant Sayona veut mettre de l'emphase sur le développement du support local et de l'accroissement de l'acceptabilité sociale de la mine Authier et de l'opération de NAL. Le développement de tels projets risque toutefois d'être plus complexe à instaurer que des programmes de compensation par reforestation.

4. Recommandations

La première initiative essentielle est l'adoption de méthodes de réduction de la dette initiale. Toute réduction de la dette se traduit par une réduction des besoins de compensation. Des efforts seront nécessaires pour réduire la surface déboisée, ce qui limite la dette initiale directement. L'identification de manières de valorisation de la biomasse qui permettent le stockage de carbone à long terme permettraient de réduire l'impact de la perte de stocks de carbone.

Carboniq recommande la tenue d'une rencontre entre Carboniq et les administrateurs et responsables des affaires publiques de Sayona, pour identifier des initiatives locales de migration énergétique prometteuses. Le support d'initiatives locales de migration énergétique est une option intéressante pour le développement de projet de compensation, qui généreraient des retombées locales dans les communautés à proximité du projet. Ces projets peuvent être complexes, et nécessiteront des efforts importants, mais pourraient améliorer l'acceptabilité sociale du projet Authier et des opération de Sayona dans la communauté.

En mesure secondaire, la prise de contact avec Carbone Boréal et l'UQAT permettrait de vérifier s'il serait possible d'étendre le programme de compensation de Carbone Boréal dans la région de l'Abitibi. Ceci permettrait d'utiliser l'infrastructure administrative de Carbone Boréal, pour la gestion des systèmes d'un programme compensation, mais d'avoir des plantations de compensation en Abitibi, dans la région de la mine Authier. Une empreinte locale serait compensée par des plantations locales, mais supportées par une infrastructure solide, réputée et reconnue.

5. Références

- [1] S. Piché et J. Vieira, «Projet Authier - Inventaire des émissions de gaz à effet de serre - 657208-SLQA-RP03-0A,» SNC-Lavalin, Montréal, 2019.
- [2] Fondation David Suzuki, «La gestion des affaires sous un nouveau climat: Un guide pour mesurer, réduire et compenser les émissions de gaz à effet de serre,» Fondation David Suzuki, Montréal, 2008.
- [3] Carbone Boréal, «Carbone Boréal,» UQAC, [En ligne]. Available: <http://carboneboreal.uqac.ca/accueil/>.
- [4] Carbone Boréal, «Compensez en ligne,» UQAC, [En ligne]. Available: <http://carboneboreal.uqac.ca/compensez-en-ligne/>.
- [5] UQAT, «Chaire de recherche UQAT-MFFP sur la gestion du carbone forestier,» UQAT, [En ligne]. Available: <https://www.uqat.ca/recherche/chaire-recherche-uqat-mffp-gestion-carbone-forestier/>.

Livrable 2

Gestion de l'empreinte du transport routier

Livrable 2: Gestion de l'empreinte du transport routier

Le projet Sayona contient une quantité importante de transport routier pour des produits intermédiaires et finaux. Le transport routier est présent dans plusieurs étapes de la chaîne logistique de la production de lithium. Le minerai produit de la mine Authier serait acheminé par camion au concentrateur de la mine de NAL, sur une distance de 68 km. Une fois traité, le concentré produit à NAL à partir des mines Authier et NAL serait acheminé par transport routier de l'Abitibi au port de Trois-Rivières, une distance d'environ 700 km. Ceci représente le transport d'une quantité impressionnante de minerai et de concentré sur des distances importantes.

Dans la conception originale du plan de projet, le transport routier sera effectué par camion semi-remorque commercial, opérant au diesel. L'utilisation de diesel pour le transport routier de minerai et de concentré représente une quantité importante de gaz à effets de serre.

L'objectif de ce livrable est de revoir les concepts du transport routier, afin de réduire l'empreinte carbone. Premièrement, l'empreinte carbone du transport dans le cas de base sera évaluée. Ensuite, des alternatives au transport par camion seront identifiées. Finalement, des mécanismes de réduction de l'empreinte du camionnage seront étudiées.

1. Évaluation de l'empreinte

Pour évaluer l'empreinte carbone des opérations de transport routier associé aux projets de Sayona, il faut premièrement évaluer la quantité de matériel transporté. Pour le projet Authier, les montants de matériel sont connus. L'inventaire des émissions de GES effectué par SNC Lavalin identifie ces montants à son Tableau 2, qui sont ci-indiqués au Tableau 1, condensé pour brévité.

Tableau 1: Paramètres d'exploitation anticipés sur une base annuelle, mine Authier [1]

Paramètre	Année														
	PP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Minerai total extrait (kt)	2	782	916	921	874	874	816	883	883	883	883	883	883	733	
Concentré total produit (kt)	0	111	120	117	126	113	122	131	113	127	126	138	132	123	88

Ce tableau fournit les montants de minerai transportés de la mine Authier au concentrateur à NAL, et du concentré fait à partir du minerai d'Authier qui serait transporté de NAL au port de Trois-Rivières. Pour une évaluation sommaire, les moyennes de production peuvent être utilisées. Pour les années de production, de l'année 1 à l'année 14, la moyenne de minerai total extrait est de 864 071 t/an, et la moyenne de concentré produit est de 120 500 t/an.

Pour la mine NAL, les informations publiquement disponibles indiquent une capacité de traitement de minerai du concentrateur de 3 800 t/j, pour un volume annuel approximatif de 1 077 000 t/an. Ce taux d'approvisionnement correspond à une disponibilité globale du concentrateur de 90 % avec un taux de récupération de lithium de l'ordre de 67,6 % [2]. Assumant un minerai similaire et un taux de concentration identique, basé sur le ratio concentré/minerai d'Authier, le volume annuel de concentré produit à partir du minerai provenant de NAL serait d'environ 150 194 t/an.

Le rapport d'SNC-Lavalin fournit les paramètres estimés pour le transport de concentré par train routier, à la section 3.2.5. Le Tableau 2, ci-dessous, reprends les paramètres identifiés.

Tableau 2: Paramètres de transport du concentré par train routier

Paramètre	Valeur	Source/Justification
Taux de consommation de diesel des camions (TC)	0,018 L/t-km payante	Taux de consommation moyen pour un camion expédiant 40 tonnes de marchandise et retournant vide à son point d'origine (ECTA 2011).
Tonnage de concentrés produits (Q)	111 – 138 kt/a	Voir tableau 2 .
Distance par voyage à l'aller seulement (D)	700 km	Distance approximative estimée entre la mine et le port de Trois-Rivières.
Facteurs d'émission de GES	CO ₂ : 2 681 g/L CH ₄ : 0,11 g/L N ₂ O : 0,151 g/L	Selon le MELCC – Carburant diesel.

Les émissions de GES sont calculées avec l'équation :

$$E_X = TC \times Q \times D \times \frac{FE_X}{10^6}$$

Où

- E_x : émissions du gaz x (t/a) (x = CO₂, CH₄ ou N₂O)

- TC : Taux de consommation de diesel selon le *Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre du MELCC* (L/t-km)
- Q : tonnage de concentré livré au port (t/a)
- D : distance à parcourir par voyage (km aller seulement)
- FE_x : facteur d'émission du gaz x pour la combustion de diesel (g/L) ($x = \text{CO}_2, \text{CH}_4$ ou N_2O)

Le mécanisme de transport identifié pour le concentré est un train routier semi-remorque, composé d'une unité tractrice motorisée et de deux remorques, d'une capacité combinée de 40 t. Le mécanisme de transport pour le minerai transporté d'Authier à NAL n'est pas identifié, mais est assumé être le même équipement que le transport de concentré, pour la simplicité des opérations. La distance routière entre Authier et NAL est estimée à être environ 68 km. La distance entre NAL et le port de Trois-Rivières est d'environ 700 km.

Utilisant les montants transportés de minerai, il est possible de calculer le nombre de voyages en train routier de 40 t, la consommation estimée de diesel pour ce transport, et les émissions totales de GES qui en découlent, indiquées au Tableau 3.

Tableau 3: Logistique et empreinte des opérations

Trajet	Tonnage (t/an)	Nombre de voyages	Consommation de diesel (L/an)	Émission totales CO ₂ eq (t/an)
Minerai Authier - Transport de Authier à NAL	864 071	21 602	1 057 623	2 887.4
Concentré Authier - Transport de NAL à Trois-Rivières	120 500	3 013	1 518 300	4 145.1
Concentré NAL - Transport de NAL à Trois-Rivières	150 194	3 755	1 892 444	5 166.6

Il faut noter que ces calculs de capacité ne prennent pas en compte les limites de capacité applicables lors de la période de dégel. Au printemps, lors du dégel, la structure des routes est fragilisée, et les camions routiers sont assujettis à des restrictions de charge. Pour cette étude, aucune restriction n'est appliquée. Une restriction de capacité de transport augmenterait le nombre de voyages nécessaires.

Il faut aussi noter que ces volumes de concentré assument que le concentrateur de NAL possède suffisamment de capacité pour pouvoir traiter l'ensemble du minerai provenant

des mines Authier et NAL. Un projet d'augmentation de la capacité du concentrateur serait en développement, pour augmenter la capacité de 3800 t/j à 4200 t/j. Il apparaît possible que la capacité totale du concentrateur soit en dessous de la capacité nécessaire pour traiter le volume combiné d'Authier et de NAL. En cas de manque de capacité, le volume total annuel de concentré produit serait limité à la capacité du concentrateur, lequel déterminera les quantités annuelles de minerai extrait, le volume de concentré à transporter et la vie de la mine ou des mines. Sur la durée de vie du projet, les mêmes volumes pourraient être produits, mais sur une plus longue période de temps. Pour cette étude, il est assumé que les montants indiqués au Tableau 3 sont corrects

Le transport du concentré est divisé entre les deux origines du minerai, soit de la mine Authier ou de la mine de NAL, mais le transport de concentré se fera de la même origine à la même destination, soit du concentrateur de NAL au port de Trois-Rivières. La division est effectuée pour identifier les tonnages respectifs et la contribution de chaque volet.

Le transport du concentré du concentrateur à Trois-Rivières représente une bonne portion des émissions du projet, vu la distance de 700 km entre le concentrateur et le port. L'empreinte du transport du minerai de la mine d'Authier au concentrateur est toutefois plus élevée qu'anticipée. La distance de transport est relativement courte, à 68 km, mais le volume de matériel à transporter est énorme, ce qui implique plusieurs milliers de voyages par an.

Il est à noter que le taux d'émissions spécifique aux transports peut varier. Le montant pour un train routier par camion cité par SNC-Lavalin au Tableau 2 est une consommation de diesel de 0.018 L/t-km payant. En ajoutant des émissions de GES, ceci équivaut à un taux d'émissions de 0.049 kg CO₂eq/t-km. Le nouveau *Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre* du MELCC, publié en Novembre 2019 [3], utilise les valeurs ci-dessous pour le transport de marchandises.

Tableau 4: Facteur d'émissions associés au transport des marchandises, par camion, train ou bateau, selon le nouveau guide du MELCC [3]

Tableau 26. Facteurs d'émission de GES associés aux différents modes de transport de marchandises, en kilogrammes d'équivalent CO₂ par tonne transportée et par kilomètre		
Mode de transport	Facteur d'émission (kg éq. CO ₂ /TKT*)	Source : Ressources naturelles Canada
Camion	0,1873	Heavy duty diesel trucks. GHGenius, version 4.03 ou plus récente, page « freight emissions »
Train	0,0191	GHGenius, version 4.03 ou plus récente, page « freight emissions »
Bateau	0,0057	GHGenius, version 4.03 ou plus récente, page « freight emissions »

TKT = Tonnes-kilomètre transportées

Pour les besoins de cette analyse, le facteur d'SNC-Lavalin sera conservé, pour harmoniser avec le reste de l'inventaire. L'utilisation du facteur du MELCC produirait une empreinte de GES approximativement 3.8 fois plus élevée.

2. Alternatives au camionnage

Cette section étudie diverses alternatives au camionnage, pour réduire l'empreinte carbone du transport du minerai et du concentré.

2.1 Transport par train

Le train est un mécanisme de transport alternatif au camionnage. Le minerai et le concentré pourraient tous les deux être chargés dans des wagons ferroviaires et transportés par rail. La capacité de transport d'un train est nettement plus élevée que le transport par camion. Les tailles communes de wagon-trémie de train cargo peuvent contenir entre 73 et 113 tonnes, selon le modèle [4], ce qui est plus par wagon que l'entièreté du train routier par camion utilisé dans l'évaluation. Un train peut être composé de dizaines, voire d'une centaine de wagons, ce qui simplifie les opérations. Tel qu'indiqué au Tableau 4, l'empreinte de transport de marchandises par rail est environ 10% de l'empreinte du transport par camion, sur une même base par tonne transportée et par kilomètre. La conversion du transport routier au transport par rail permettrait une réduction des émissions de GES de 90%, même avec une locomotive au diesel. La capacité du train de transporter des volumes beaucoup plus élevés que le transport routier permettrait aussi de réduire le nombre de voyages requis pour expédier le minerai et le concentré. Assumant un train de 50 wagons, d'une capacité individuelle de 100 tonnes par wagon, un train pourrait transporter 5000 tonnes de matériel par voyage. Pour les trajets indiqués au Tableau 3, le nombre de voyages pour le transport du minerai passerait de 21 602 voyages par an à 173 voyages par an. Le transport de concentré serait de 24

voyages pour le concentré d'Authier et 30 pour le concentré de NAL. Cette réduction importante du transport routier pourrait réduire les coûts de main d'œuvre et d'opération du transport. La réduction du nombre de camions sur la route pourrait aussi améliorer l'acceptabilité sociale du projet.

Le chemin de fer ne passe pas sur le site d'Authier ou le site de NAL, mais il passe à proximité. Pour le site Authier, une ligne de chemin de fer passe à 22 km au nord, dans la ville de Amos, à proximité de l'usine de Résolu. Une autre ligne est présente à environ 19 km au sud d'Authier, entre Malartic et la mine Lapa d'Agnico-Eagle. Pour le site de NAL, la même ligne qui passe par Amos passe à environ 8 km au nord de NAL. Toutes ces lignes sont opérées par le CN.

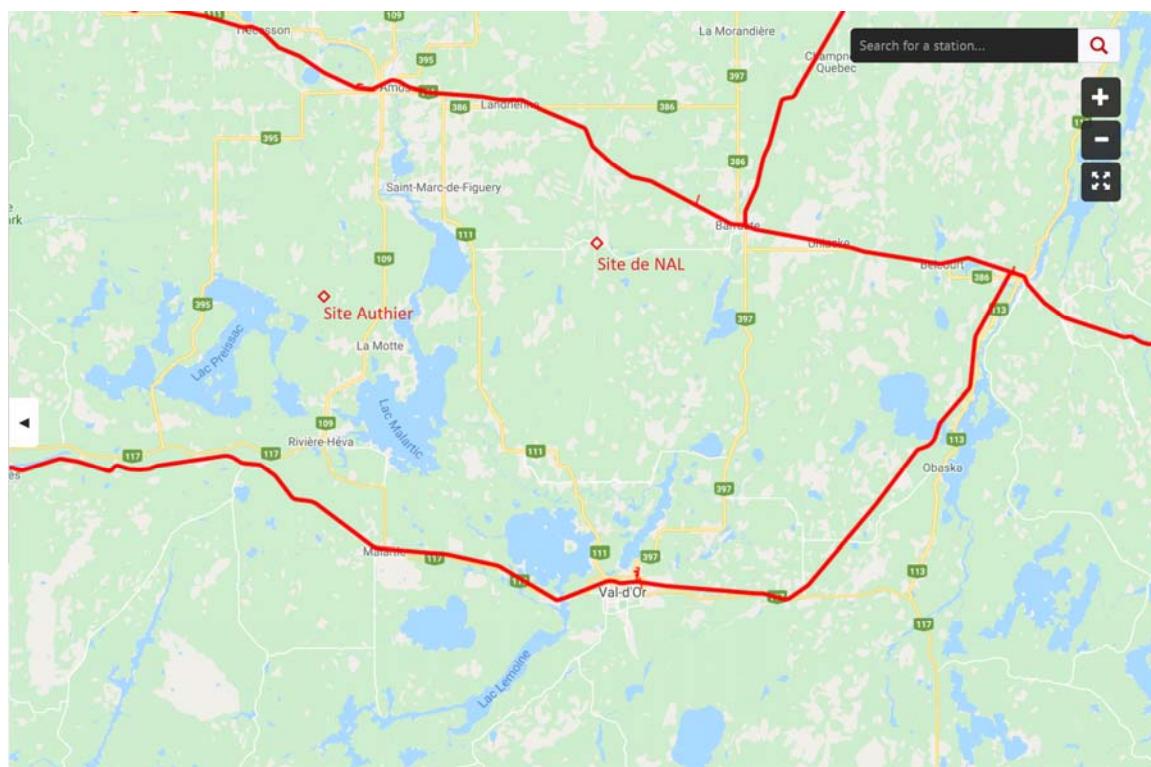


Figure 1: Carte du réseau ferroviaire de CN à proximité du projet [5]

La carte de réseau du CN indique que la ligne du nord et la ligne du sud convergent à Belcourt, pour sortir de l'Abitibi, en passant par Shawinigan. Une ligne de chemin de fer se rend jusqu'au port de Trois-Rivières. Il serait donc possible de transporter le minerai au concentrateur, et le concentré du concentrateur jusqu'au port.

Le Ministère des Transports du Québec (MTQ) opère le *Programme visant la réduction ou l'évitement des émissions de gaz à effet de serre par le développement du transport intermodal*, qui subventionne l'installation d'infrastructures intermodales pour la

réduction de GES, dont des systèmes de trains et rails [6]. Une portion des coûts d'un système ferroviaire pourrait être subventionnée par le MTQ, en fonction des GES évités.

Les avantages du transport par rail sont :

- Réduction importante de consommation de diesel par tonne-kilomètre de 90%, même avec un train au diesel, avec réduction proportionnelle des émissions.
- Augmentation de capacité de transport et réduction du nombre de voyages, ce qui pourrait réduire les coûts de transport, réduire le trafic routier, et augmenter l'acceptabilité sociale.
- Infrastructure ferroviaire présente à proximité, avec connexion au port de Trois-Rivières.
- Programmes subventionnaires du MTQ pour l'installation de transport intermodal, dont le train.

Les désavantages du transport par rail sont :

- Dépenses en capital pour extension du réseau ferroviaire.
- Dépenses en capital pour équipement ferroviaire et équipement de chargement et déchargement.

L'utilisation du transport par train semble être une solution bien adaptée pour le transport du minerai de la mine Authier au concentrateur de NAL, et pour le transport des concentrés d'Authier et de NAL au port de Trois-Rivières, tant au point environnemental que logistique. L'utilisation du train permettrait de réduire les émissions de 90%, sur une base par tonne-kilomètre. Le transport par rail est connu et éprouvé, et permettrait de réduire l'empreinte de GES de manière importante. Un programme subventionnaire du MTQ existe pour aider à défrayer en partie les coûts d'une ligne de rail. De plus, il faut souligner que le nombre de voyages nécessaires pour transporter le minerai d'Authier à NAL est élevé, avec 21 602 voyages par an, assumant des trains routiers doubles de 40 t. Ceci donne en moyenne 59 camions par jour, ou 2.5 camions par heure, traversant la ville d'Amos. Passer vers le transport par rail permettrait de réduire de manière considérable le nombre de voyages, et l'impact sur la communauté. Le train est un moyen connu et éprouvé de transporter des cargaisons en vrac sur des distances considérables à coût raisonnable. Le train permettrait de régler l'ensemble des problèmes de transport d'Authier et de NAL.

Il est recommandé d'effectuer une étude préliminaire pour le transport par train, pour évaluer la faisabilité technique, le calendrier de mise en œuvre et finalement pour pourvoir faire une comparaison entre le coût du transport par rail et le transport par camion, pour tous les trajets envisagés.

2.2 Convoyeur ou pipeline

La distance routière entre la mine Authier et le concentrateur de NAL est d'environ 68 km. En ligne directe, la distance est approximativement de 30 km. Il serait théoriquement possible d'utiliser un pipeline ou un convoyeur de type « overland » sur cette distance, pour transporter le minerai de la mine Authier au concentrateur. La source d'énergie pour un convoyeur ou un pipeline serait de l'électricité de réseau, à très faible empreinte carbone.

Une fois le minerai chargé dans un convoyeur ou un pipeline, il serait transporté dans la mine au concentrateur de manière continue, sans grande intervention d'un opération ou manipulation. Un tel système est simple et lourdement automatisé.

Pour un convoyeur, le minerai devrait être concassé grossièrement, à une taille suffisante pour être bien convoyée, sous environ 10 cm. Des convoyeurs de plusieurs kilomètre sont théoriquement possibles. Champion Iron a installé un overland de 4 km après leur redémarrage de la mine Bloom Lake [7]. Toutefois, pour une distance de 30 km ou plus, selon le tracé, le convoyage devrait être divisé sur plusieurs unités, avec des points de jonction et de transfert. Ceci augmente la complexité et le coût des opérations.

Un pipeline de transfert est aussi possible. Le minerai devrait être broyé suffisamment finement pour être mis en suspension et pompé dans le pipeline. Il faudrait installer un système de concassage et un broyeur à boulets sur le site, pour réduire la granulométrie du minerai pour une bonne fluidisation. Selon la distance et la pente du tracé, des pompes subséquentes pourraient être nécessaires pour maintenir le débit.

Il faut toutefois noter que l'installation de convoyeurs ou de pipelines sur de telles distances pourrait être problématique. Pour un convoyeur, les distances sont trop longues. Pour un pipeline, la distance serait suffisamment courte pour être permissible. Le tracé nécessaire traverserait plusieurs terrains privés et publics, et des routes publiques, ce qui nécessiterait des négociations avec les propriétaires pour des droits d'accès et servitudes, ce qui serait loin d'être simple, facile ou rapide. Le tracé le plus court traverserait aussi la rivière Harricana à la hauteur du Lac La Motte. La traversée d'un cours d'eau par un convoyeur ou un pipeline de slurry n'est pas évident au point de vue environnemental. Finalement, une telle infrastructure nécessiterait un investissement en capital.

Il semble improbable qu'une solution de transport par convoyeur soit applicable à ce projet. Un pipeline serait envisageable.

Les avantages d'un transport par pipeline sont :

- Technologie connue et éprouvée.

- Coût de transport relativement faible.
- Propulsion électrique sans empreinte carbone.

Les désavantages d'un transport par pipeline sont :

- Les négociations d'un droit de passage peuvent être longues et complexes.
- Requiert un concasseur et un broyeur à Authier pour réduire le minerai à une granulométrie suffisamment fine pour être fluidisée.
- Le processus d'approbation pour un pipeline pourrait être long et complexe, particulièrement à la traverse de la Rivière Harricana.

Le transport par pipeline apparaît comme un mécanisme dont le coût d'opération serait plus bas que le transport par camion. Il est recommandé d'effectuer une étude préliminaire pour le transport par pipeline, pour en déterminer la faisabilité et pour pourvoir faire une comparaison entre le coût du transport par pipeline et le transport par camion.

2.3 **Traitement partiel à Authier**

Une option pour réduire le montant de minerai à transporter d'Authier au concentrateur à NAL serait d'effectuer une préconcentration à Authier. En moyenne, 864 071 t/an de minerai serait transporté de la mine Authier au concentrateur de NAL, nécessitant 21 602 voyages par an avec des camions d'une capacité de 40 t. Un traitement partiel du minerai permettrait de réduire le volume de minerai transporté d'Authier à NAL, en éliminant certaines fractions stériles dans le minerai, réduisant les besoins de transport et les émissions de GES.

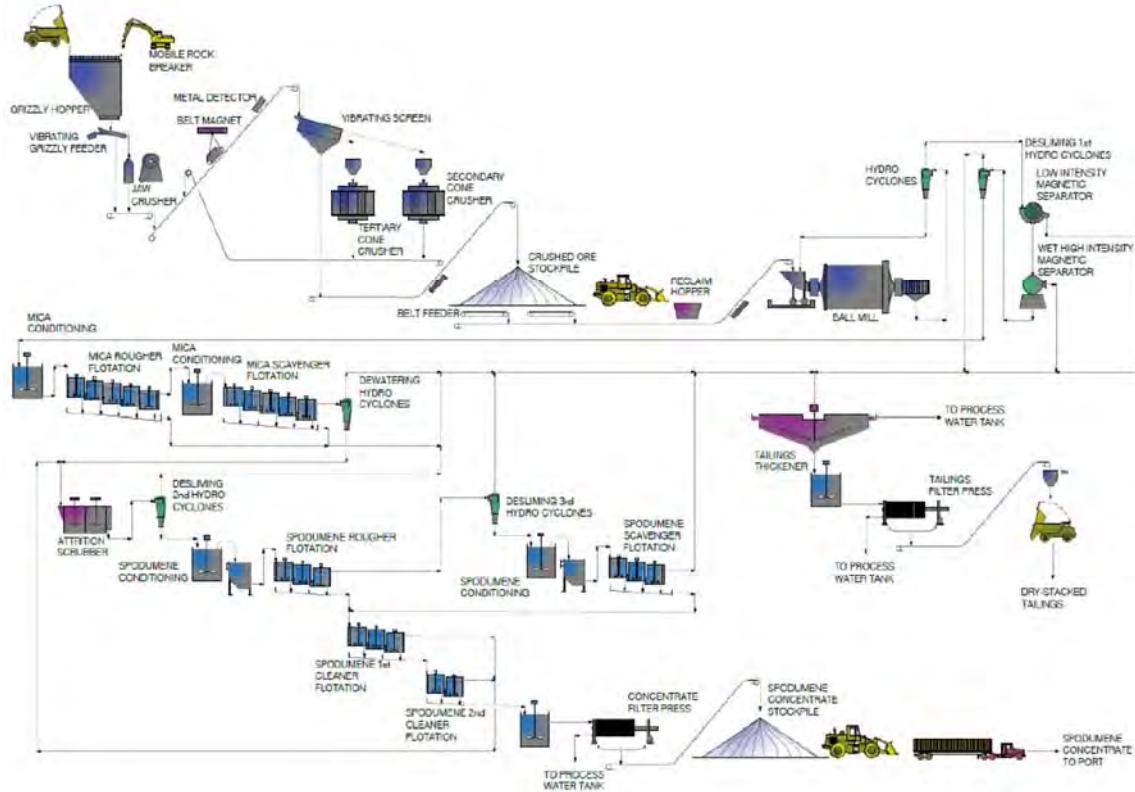


Figure 17-1: Simplified Process Flowsheet

Figure 2: Procédé simplifié de concentration du minerai d'Authier en concentré de spodumène [8]

Le procédé de concentration complet consiste d'une étape de concassage, suivi d'un broyage humide dans un broyeur à boulets avec une séparation magnétique, suivi d'une première flottation pour l'extraction du mica, un circuit de cellules dégrossisseuses/épuiseuse/finisseuses (rougher, cleaner, scavenger) pour la flottation du spodumène, et des systèmes de déshydratation concentré et de gestion des matières résiduelles.

Le but de la préconcentration serait d'identifier des points dans le procédé où le procédé pourrait être séparé en deux, à un pré-concentrateur à Authier, et le concentrateur de NAL.

Après étude du procédé complet de concentration, deux endroits sont jugés potentiellement viables pour le prétraitement. Ces deux options sont :

- Entre la sousverse du cyclone de déschlammage et l'entrée du conditionnement du mica. Point 22 « Desl Cyc UF » dans le modèle METSIM Grinding Area (6015009-000000-49-D10-0002).

- Entre la sousverse du cyclone de déshydratation de la cellule épuiseuse du mica et du laveur à attrition du circuit de flottation du spodumène. Point 35 « Dewater Cyc UF » dans le modèle METSIM Mica Flotation Area (6015009-000000-49-D10-0003).

Du modèle METSIM, on peut extraire les valeurs de ces deux flux, ainsi que du minerai initial, au point 8 « Mill Feed », avant traitement. Ces données sont indiquées au Tableau 5.

Tableau 5: Paramètres METSIM du procédé [8]

Numéro de flux	8	22	35
Nom de flux	Mill Feed	Desl Cyc UF	Dewater Cyc UF
Solides (t/h)	108	98.6	82.3
Eau (m ³ /h)	3.35	98.6	54.9
Pulpe (m ³ /h)	43.4	135	85.6
% solides (% masse)	97.0	50.0	60.0
Densité solides (t m ³)	2.70	2.70	2.69
Densité pulpe (t/ m ³)	2.57	1.46	1.60
Teneur Li ₂ O (%)	1.00%	0.99%	1.16
Distribution Li ₂ O (%)	1.08	0.98	0.96

Sur une base de solides seulement, le flux 22 contient 91.3% de la matière du flux 8, une réduction de 8.7%. Sur un montant total de minerai de 864 071 t/an, une telle réduction sauverait le transport de 75 174 t/an. Pour le flux 35, qui contient 76.2% du minerai du flux 8, cette réduction serait de 205 649 t/an.

Toutefois, il ne faut pas négliger l'eau. Le procédé étant essentiellement en phase humide au broyage et dans les étapes de flottation, le contrôle de l'humidité est critique. Dans les opérations de préconcentration, il faudrait éviter de rajouter plus de masse d'eau qu'est extrait de masse de stériles, ce qui serait contreproductif pour le transport. Pour cliver les procédés aux points 22 et 35, il faudrait inclure des étapes de filtration, pour réduire l'humidité suffisamment pour rendre le transport justifiable. Le Tableau 6 évalue l'effet de la préconcentration sur la réduction de minerai, et les besoins de filtration et de séchage pour rendre le transport efficace. Trois différents niveaux de filtration sont utilisés, pour évaluer la sensibilité de ce paramètre. Dans le rapport de projet, les filtres presse peuvent produire un gâteau à une teneur de 93.5% solides.

Tableau 6: Modélisation de préconcentration et des besoins de filtration et séchage

Paramètres	Point 8 (Intrant)	Point 22			Point 35		
Solides (t/h)	108	98.6			82.3		
Teneur solides (%)	97	50			60		
Eau (t/h)	3.3	98.6			54.9		
Masse totale (t/h)	111.3	197.2			137.2		
Portion solides de l'intrant (%)	100	91.3			76.2		
Portion totale de l'intrant (%)	100	177.1			123.2		
Teneur solides après filtration (%)	97	90	93.5	95	90	93.5	95
Solides (t/h)	108	98.6			82.3		
Eau (t/h)	3.3	11.0	6.9	5.2	9.1	5.7	4.3
Masse totale (t/h)	111.3	109.6	105.5	103.8	91.4	88.0	86.6
Fraction solides de l'intrant (%)	100.0	91.3			76.2		
Fraction masse totale de l'intrant (%)	100.0	98.4	94.7	93.2	82.1	79.1	77.8
Masse totale annuelle (t/an)	864 071	850 221	818 395	805 473	709 667	683 102	672 316
Réduction de masse totale annuelle (t/an)	0	13 850	45 676	58 598	154 404	180 969	191 755
Nombre de camions épargnés par an	0	346	1142	1465	3860	4524	4794

La préconcentration permet de réduire le volume de matières expédiées de la mine Authier au concentrateur à NAL. Il faut toutefois souligner que ceci augmenterait la quantité d'équipement devant être installé à Authier, parfois de manière importante. Pour une préconcentration jusqu'au point 22, il faudrait installer le système de concassage et broyage, ainsi que les séparateurs magnétiques. Pour un clivage au point 35, il faudrait installer les systèmes précédents, et le circuit de flottation du mica. De plus, pour ces deux systèmes de préconcentration, il faudrait des circuits de filtre presse pour la déshydratation du concentré, et la filtration et gestion des stériles. Ces systèmes peuvent être dispendieux à acquérir et opérer. En plus de ceci, il faudrait les infrastructures physiques, logistiques et humaines pour avoir et opérer un concentrateur, ce qui augmenterait les coûts en capital et en personnel, et pourrait mener à un certain dédoublement des infrastructures sur les deux sites. Il faudrait évaluer si le coût du transport évité et la réduction des GES justifie un tel investissement en capital et une augmentation des dépenses opérationnelles.

Les avantages de la préconcentration à Authier sont :

- Réduction des volumes de minerai à transporter.
- Réduction des coûts de transport.
- Réduction des émissions de GES.

Les désavantages de la préconcentration à Authier sont :

- Infrastructure complexe requise à Authier, incluant concassage, broyage, séparation magnétique, flottation, filtration.
- Dédoublement d'infrastructure.
- Augmentation des coûts en CAPEX et OPEX sur le site Authier.
- Gestion de filtration, d'eau et de stériles à Authier.

Évidemment, le cas extrême de ce scénario est l'installation d'un concentrateur complet à la mine Authier. Ce cas n'a pas été évalué, mais il éliminerait complètement le besoin de transport du minerai d'Authier à NAL. En contrepartie, ceci nécessiterait la construction d'un concentrateur complet.

La préconcentration du minerai à Authier serait une option à étudier pour réduire le volume de minerai à transporter d'Authier à NAL, si le cas économique peut être établi. Une telle approche augmenterait toutefois les dépenses en CAPEX et OPEX sur le site d'Authier. Si ces augmentations sont trop élevées par rapport aux dépenses de transport, le cas économique serait difficilement justifiable.

2.4 Remise en service de la raffinerie

Le projet actuel consiste en la concentration du minerai en spodumène, un minerai intermédiaire dans la chaîne de valeur. La mine NAL a toutefois déjà eu une raffinerie, pour produire du carbonate de lithium (Li_2CO_3) à partir du spodumène. Cette raffinerie n'est plus en service depuis plusieurs années, et certaines pièces d'équipement ont été cannibalisées pour maintenir le concentrateur de NAL en service. Il serait possible de remettre la raffinerie en service, pour transformer le spodumène de NAL et d'Authier en carbonate de lithium. Au lieu de transporter le concentré au port, il faudrait transporter un volume plus petit de carbonate de lithium.

Selon les données publiées [2] sur la raffinerie de NAL, le rendement massique entre le spodumène et le carbonate de lithium est d'environ 13.3%.

Tableau 7: Effet du raffinage sur l'expédition

Trajet	Tonnage spodumène (t/an)	Tonnage Li ₂ CO ₃ (t/an)	Voyages/an (pour Li ₂ CO ₃)	Émissions transport (pour Li ₂ CO ₃) CO ₂ eq/an
Concentré Authier Transport de NAL à TR	120 500	16 027	401	551.3
Concentré NAL Transport de NAL à TR	150 194	19 976	499	687.2

Il faut toutefois noter que l'utilisation de la raffinerie nécessiterait des investissements en CAPEX pour la remise en service, et de l'OPEX additionnel pour l'opération, l'entretien et le personnel. Il faudrait valider le portrait économique complet de cette remise en service. De plus, le procédé de raffinage utilise de la chaleur élevée pour le four de décrépitation et le four de sulfatation, générée avec des combustibles fossiles, ce qui générerait des GES additionnels.

Les avantages de la remise en service de la raffinerie de NAL sont :

- Réduction des volumes concentré à transporter, de 86.7%.
- Réduction des coûts de transport.
- Réduction des émissions de GES du transport.

Les désavantages de la remise en service de la raffinerie de NAL sont :

- Investissements en CAPEX pour la remise en service de la raffinerie. Ces montants sont estimés à 200 M\$ par Sayona
- Augmentation des OPEX de l'opération.
- Augmentation possible des émissions de GES liées à l'opération des fours.
- Changement du produit, de la stratégie de marché et de la nature de l'opération.

La remise en service de la raffinerie, pour permettre la production de carbonate de lithium, permettrait de réduire le volume de matériel, en transformant le concentré en produit fini. Toutefois, la remise en service de la raffinerie nécessiterait des dépenses en capital très importantes, et l'augmentation des opérations impliquerait des plus grands coûts opérationnels. La nature du produit vendu serait aussi changée, ce qui modifierait l'approche de vente et le marché cible. De plus, les opérations de la raffinerie génèrent des GES additionnels.

3. Écologisation du camionnage

La section précédente détaillait de méthodes pour réduire les montants de minerai à transporter, où identifier des mécanismes de transport autre que le camionnage. Dans des cas où de telles options sont impossibles, économiquement injustifiables, ou indésirables, le camionnage reste une option. Cette section cherche à identifier des méthodes pour réduire l'empreinte du camionnage lui-même.

Prix énergétiques

L'étude de diverses alternatives énergétiques requiert une compréhension du coût de ces alternatives. Cette section contient divers prix énergétiques moyens pour certaines des énergies proposées. Il faut noter que ces prix sont approximatifs, et dépendent fortement d'un nombre de facteurs, dont :

- le profil de consommation,
- la nature des ententes commerciales
- le dimensionnement des systèmes d'autoproduction, de compression ou de liquéfaction,
- du régime réglementaire, législatif et de taxation.

Tableau 8: Prix énergétiques moyens

Combustible	Coût unitaire	Coût spécifique (\$/GJ)	Spécifications et références
Diesel conventionnel	125.9 ¢/L	32.87 \$/GJ	Prix moyen diesel en Abitibi, Régie de l'énergie [9]
Diesel minier	109.52 ¢/L	28.59 \$/GJ	Revenu Québec [10]
Gaz naturel	30 à 40 ¢/m ³	7.92 à 10.56 \$/GJ	Selon profil de consommation
Gaz naturel renouvelable	16.5 à 79.4 ¢/m ³ de surcoût	4.35 à 20.96 \$/GJ de surcoût	Surcoût par rapport au prix de référence, pour acquisition de molécule [11]
Gaz naturel comprimé	7.57 à 18.95 ¢/m ³ de surcoût	2 à 5 \$/GJ de surcoût	Selon références industrielles
Gaz naturel liquéfié	18.95 à 26.52 ¢/m ³ de surcoût	5 à 7 \$/GJ de surcoût	Selon références industrielles
Électricité	8 ¢/kWh	22.22 \$/GJ	Selon références industrielles

Hydrogène	1 à 3 \$/kg	8.33 à 25 \$/GJ	Selon références industrielles
-----------	-------------	-----------------	--------------------------------

Le coût spécifique d'un type d'énergie devra être étudié, en fonction des conditions locales applicables. Il faut aussi noter que les différents systèmes propulsifs ont des efficacités énergétiques variables, ce qui doit être pris en considération.

3.1 Construction d'un pont sur la rivière Harricana

Cette option implique la construction d'un pont sur la rivière Harricana, pour réduire la distance de transport du minerai entre Authier et NAL. La distance routière entre Authier et NAL est environ 65 à 68 km. La distance en ligne droite est toutefois beaucoup plus courte, à environ 33 km.

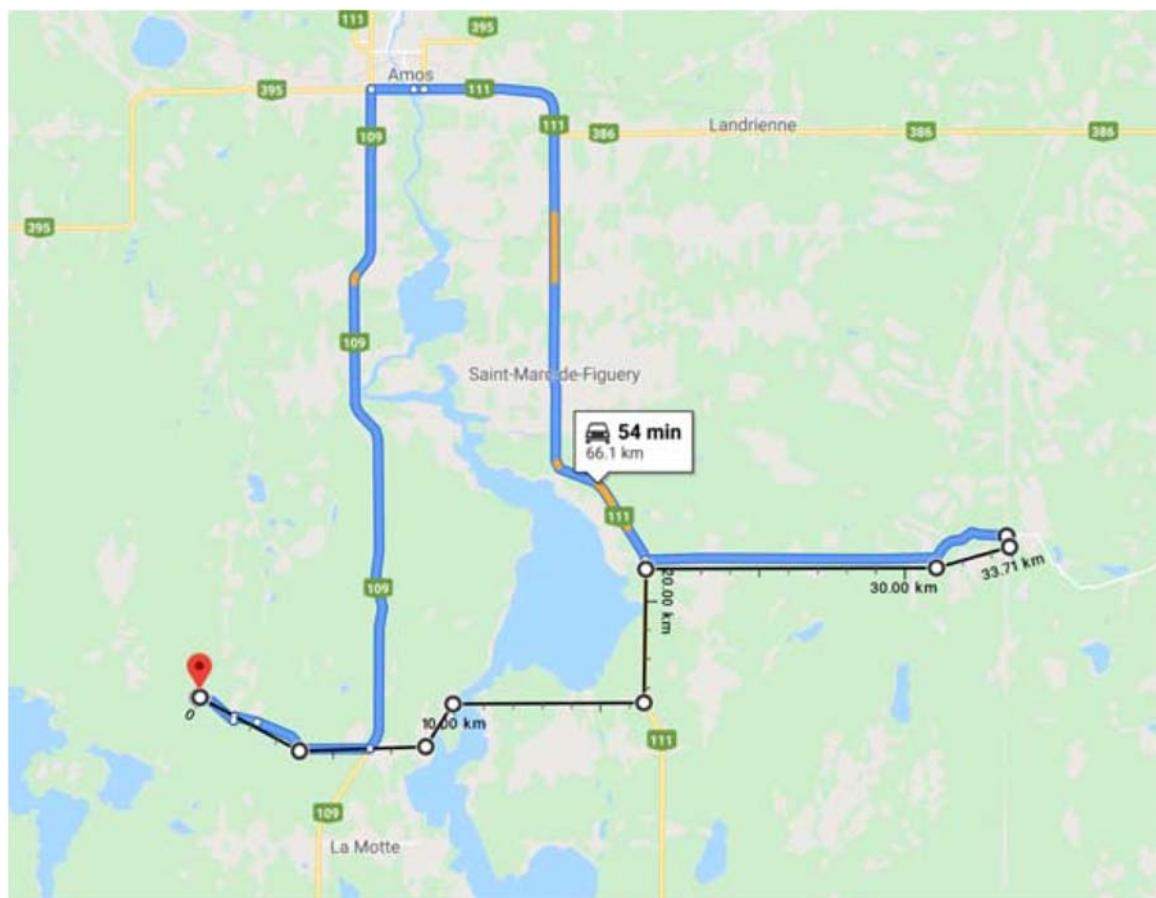


Figure 3: Trajets Authier à NAL, par route et en ligne directe

Les mines Authier et NAL sont séparés par la rivière Harricana et le Lac La Motte. D'Authier, le trajet routier le plus court implique de monter vers le nord une distance importante, pour traverser la rivière au pont le plus proche, dans la ville d'Amos, suivi d'une descente vers le sud, et l'est. L'installation d'un pont sur la rivière Harricana à un point plus proche de la mine réduirait le trajet d'environ 30 à 35 km. Cette réduction du trajet réduirait le temps de voyage entre la mine et le concentrateur, ce qui raccourcirait le cycle complet de livraison, permettant plus de trajets par camion par jour, augmentant la productivité par véhicule. Ceci permettrait de réduire le nombre total de véhicules en service.

Il faut toutefois noter la présence de résidences et de chalets sur le bord de la rivière Harricana, particulièrement à l'endroit où la rivière rétrécit au sud du Lac La Motte. Ceci pourrait compliquer l'acceptabilité sociale chez les riverains. L'emplacement du pont devrait être sélectionné pour réduire l'impact sur la communauté locale et l'environnement.

Les avantages de la construction d'un pont sont :

- Réduction importante de la distance de transport à NAL.
- Contournement d'Amos et réduction du trafic routier en ville, augmentant l'acceptabilité sociale
- Réduction de la durée du trajet, ce qui augmente la productivité par camion, permettant de réduire le nombre total de camions.
- Réduction de la distance de voyage à Val d'Or, pour le transport des employés.

Les désavantages de la construction d'un pont sont :

- Investissements en CAPEX pour la construction du pont.
- Impact environnemental du pont et des routes d'accès.
- Possibilité d'opposition de riverains du pont.
- Processus d'approbation et d'obtention de permis complexe et long.

La construction d'un pont permettrait de réduire la distance du trajet de la mine au concentrateur, de presque la moitié, ce qui aurait un impact majeur sur les émissions de GES. De plus, un pont favoriserait la circulation locale, et détournerait le trafic de camions lourds de la ville d'Amos. En contrepartie, la construction du pont pourrait engendrer de la résistance des résidents riverains. Si le camionnage est retenu comme mécanisme de transport, cette option devrait être étudiée en plus de détail.

3.2 Migration de carburant : Camions au biodiesel

Le biodiesel est un carburant liquide chimiquement similaire au diesel, produit à partir de matière organique, incluant des gras végétaux ou animaux, et de la biomasse forestière,

à travers divers procédés de transformation chimique. L'origine organique et souvent résiduelle des intrants du biodiesel leur confère leur caractère renouvelable, et les émissions de ce carburant sont considérées comme carbone neutres.

En théorie, les biodésels pourraient être consommés dans des moteurs à combustion au diesel, sans aucune modification. En pratique, des hauts taux de substitution peuvent causer des problèmes, et le biodiesel est souvent mélangé au diesel conventionnel dans un mélange 20/80.

L'avantage de l'utilisation d'un biodiesel est qu'il pourrait être utilisé dans toute la flotte de véhicules de la mine, non seulement les camions routiers de transport, mais dans les chargeuses, foreuses, et autres équipements de service. Le biodiesel pourrait également aussi être utilisé dans la fabrication d'ANFO.

Le biodiesel comporte toutefois certains problèmes. Le biodiesel est moins chimiquement stable que le diesel conventionnel, et a tendance à se dégrader ou gélifier lors d'un stockage à long terme. Il est aussi plus sensible aux températures plus froides. La corrosion peut être un problème avec ce type de carburant. Il faut aussi valider si les moteurs des équipements seraient en mesure de consommer du biodiesel non-mélangé, et si ceci ne causerait pas de problèmes pour les garanties des fournisseurs d'équipement.

Au niveau du coût, celui-ci varie en fonction de l'origine du biodiesel, et est difficile à prédire, mais le biodiesel est plus dispendieux que le diesel conventionnel fossile. Peu de producteurs sont présents au Québec à présent, ce qui limite la disponibilité à court terme, mais des producteurs pourraient arriver à plus long terme. À présent, aucun producteur n'est présent dans l'Abitibi, donc le carburant devrait être importé.

Les avantages du biodiesel sont :

- Utilisable dans des équipements actuels, sans modifications.
- Utilisable dans l'ensemble de la flotte de la mine.
- Entretien inchangé. Aucun besoin de modification des pratiques d'entretien, de la formation des mécaniciens, ou d'embauche de spécialistes.
- Possibilité d'utilisation dans la synthèse d'ANFO.

Les désavantages du biodiesel sont :

- Dans le biodiesel mélangé 20/80 avec le diesel conventionnel, la réduction des GES est modérée.
- Possibilité de problèmes de stabilité et de corrosion.
- Disponibilité limitée.
- Prix plus élevé que le diesel conventionnel.

- Possibilité d'affecter les garanties des fournisseurs d'équipement.

Le biodiesel serait une option intéressante à retenir pour la portion de la flotte des équipements mobiles qui ne peuvent être convertis vers des énergies plus propres. L'utilisation d'autres carburants ou d'énergies permettrait des réductions plus profondes des émissions, mais ces technologies ne sont pas toujours disponibles dans certains équipements, comme les foreuses, niveleuses ou bouteurs. Pour ces équipements, le biodiesel offrirait la possibilité d'avoir des réductions d'empreinte.

Pour les classes d'équipement où des alternatives plus puissantes et prometteuses sont disponibles, il faudrait favoriser ces alternatives en premier. Le biodiesel mélangé offre seulement des réductions modestes des émissions.

3.3 Migration de carburant : Camions au gaz naturel

Le gaz naturel peut être utilisé comme combustible propulsif pour l'opération de camions routiers, sous la forme de gaz naturel comprimé (GNC) ou de gaz naturel liquéfié (GNL). Ceci permet une substitution du diesel à 100%. Le GNC est du gaz naturel qui est comprimé à très haute pression, généralement en haut de 20 MPA, et stocké dans des réservoirs à pression pouvant être transporté. Le GNC occupe un volume d'environ 1% d'un équivalent de gaz naturel non-comprimé. La GNL est du gaz naturel qui est refroidi sous -162°C, où le méthane devient liquide. Le GNL peut ensuite être entreposé comme liquide dans une citerne cryogénique, occupant un volume environ 1/600^e d'un équivalent de gaz naturel à pression et température normales.

Dans les deux cas, le gaz naturel peut être utilisé dans un moteur à combustion interne. Des moteurs au gaz naturel sont commercialement disponibles, basés sur une architecture de moteur diesel conventionnel. Ces moteurs sont une option lors de l'achat de tracteurs de semi-remorque. Lorsque commandés, ils font partie de l'équipement standard sur ces tracteurs, intégrés lors de la construction au châssis, aux contrôles, à l'ordinateur de bord et aux systèmes de carburants et d'émissions. Ce ne sont pas des conversions après-marché, mais des unités commerciales provenant directement des manufacturiers avec leurs garanties et protocoles d'entretien. Plusieurs différents modèles sont disponibles. Les besoins d'entretien sont实质上 identiques au diesel, sauf quelques modifications aux protocoles et infrastructures pour bien gérer le gaz. Le GNC se ravitailler par un système de gaz comprimé et de hoses à haute pression. Le GNL se transvide comme tout liquide, quoiqu'avec des précautions pour un liquide cryogénique. Dans les deux cas, les risques de déversements sont faibles.

Le carburant peut être obtenu de plusieurs façons. Énergir opère une grande usine de GNL dans la région de Montréal, et le GNL peut être livré en camion-citerne par voie

routière. Des stations de compression de GNC ou de liquéfaction de GNL aussi peuvent être installées où le réseau de gaz naturel passe déjà. Énergir indique que le réseau de gaz naturel passe sur la route 109, à environ 6 km du site d'Authier. Une station de compression ou de liquéfaction pourrait être installée sur le site d'Authier, pour desservir des camions, et d'autre infrastructure mobile. D'autres informations indiquent qu'une ligne de gaz naturel se rendrait jusqu'au concentrateur à NAL. Des articles indiquent que des promoteurs privés développeraient aussi des capacités de liquéfaction dans la région [12]. Plusieurs stations de GNC et une station de GNL sont disponibles sur la route entre Trois-Rivières et l'Abitibi, permettant le ravitaillement en route

Il est à noter que le GNC à une densité énergétique plus faible que le GNL, à environ 42% du GNL. L'autonomie est donc réduite pour le GNC, par rapport au GNL. Ces deux carburants ont une autonomie plus faible que le diesel, pour un même volume donné de réservoirs de carburant, soit environ 25% pour le GNC et 60% pour le GNL. Pour le service de courte distance entre la mine Authier et le concentrateur de NAL, il n'y aurait aucun problème d'autonomie. Le GNC est souvent favorisé pour les flottes de véhicules qui font des trajets courts et répétitifs, avec un retour fréquent à un dépôt, comme des véhicules de livraison de courte distance ou des flottes de camions de matières résiduelles. Pour des plus longues distances, le GNL est généralement favorisé, pour sa plus longue autonomie. Elle est toutefois plus courte que le diesel. Le trajet entre le concentrateur et le port devrait être planifié pour avoir accès à des points de ravitaillement, ou les véhicules sélectionnés avec des réservoirs additionnels, pour obtenir la même autonomie.

Au niveau des émissions, le gaz naturel brûle plus proprement, avec des émissions de GES environ 30% plus faibles que le diesel, pour une même quantité d'énergie. Ainsi, le passage vers le gaz naturel réduirait l'empreinte proportionnellement, lors d'une substitution complète.

Des moteurs Cummins-Westport au gaz naturel sont autorisés et homologués au Québec. Le programme Écocamionnage du MTQ existe pour fournir des subventions à l'acquisition de ce type de véhicule, et pour réduire le différentiel de prix entre ces moteurs et les moteurs standards au diesel. La subvention serait de 30% du surcoût entre le véhicule adapté et un véhicule conventionnel comparable, limité à un montant maximal de 30 000 \$, par véhicule.

Il faut toutefois noter que seul des moteurs à 9 et 12 L sont présentement disponibles commercialement, ce qui limiterait ce type de camion à une semi-remorque simple, et pourrait sévèrement limiter l'applicabilité pour les trains routiers à 40 t. La puissance moteur la plus élevée présentement disponible est de 400 HP, ce qui limite le chargement du véhicule dans la gamme de 30-35 t.

Le coût du gaz naturel est relativement faible. Au niveau énergétique, le gaz naturel se vend à un prix qui est environ entre 30 à 40¢/m³, équivalent à 7.92 à 10.56 \$/GJ. Le prix varie en fonction du prix de la molécule de gaz, du profil de consommation du consommateur, de des coûts de livraison et service. Pour la compression ou la liquéfaction, des surcoûts d'entre 5 à 7 \$/GJ sont rajoutés, selon les équipements et infrastructures nécessaires, les coûts d'opération, et les besoins de livraison. Par comparaison, le diesel se détaille à environ 1 \$/L, ce qui équivaut à 26 \$/GJ, quoique le diesel minier est généralement exempt des taxes sur les carburants, ce qui se reflèterait par un coût de diesel plus faible. Le gaz naturel pourrait donc réduire le coût de carburant des opérations de transport de Sayona. Le prix du gaz naturel est aussi beaucoup plus stable que le diesel, et est moins porté à fluctuer, ce qui permettrait de se protéger contre la volatilité de prix à long terme.

Les avantages de l'utilisation du gaz naturel sont :

- Réduction du coût de carburant pour le transport, et prix plus stable à long terme.
- Réduction des émissions d'environ 30% contre le diesel, assumant une substitution complète.
- Camions et unités tracteurs commercialement disponibles à présent des manufacturiers, avec les moteurs autorisés et homologués.
- Procédures d'entretien connus et documentés.
- Infrastructure de compression ou liquéfaction commercialement disponible.
- Arrivée possible de fournisseurs commerciaux dans la région.
- Postes de ravitaillement disponibles sur la route vers le port de Trois-Rivières.

Les désavantages de l'utilisation du gaz naturel sont :

- Limite de charge de 30 à 35 t, imposé par la puissance du moteur, ce qui impliquerait un nombre plus élevé de voyages.
- Réduction de l'autonomie du véhicule, contre le diesel.
- Modification aux protocoles d'entretien et de ravitaillement.
- Limitation possible de la capacité des camions, particulièrement pour les trains routiers.

Énergir a préparé une présentation adressant ce type de combustible, inclus à l'Annexe B de ce document.

Le gaz naturel serait une option intéressante pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre, avec une réduction immédiate par rapport au diesel d'environ 30%. Des véhicules au gaz naturel sont présentement commercialement disponibles directement des manufacturiers, avec des moteurs homologués et tests. L'infrastructure pour le GNC et le GNL est connue, et commence à être disponible dans la région. Finalement, le coût

du gaz naturel est relativement faible et stable. Toutefois, les moteurs au gaz naturel disponibles ont une limite de chargement d'entre 30 à 35 t. Une perte de 5 à 10 t par chargement, par rapport à un train routier de 40 t, se traduirait par une augmentation du nombre de voyages nécessaires, entre 12.5 et 25%.

3.3.1 Gaz naturel renouvelable

Le gaz naturel renouvelable (GNR) est une option disponible pour le gaz naturel, soit de réseau, comprimé ou liquéfié. Le gaz naturel renouvelable provient de sources biogéniques, comme des sites d'enfouissement ou des centrales de biométhanisation, produit à partir de matières organiques résiduelles. Provenant de sources renouvelables et non-fossiles, les émissions liées au GNR sont considérées comme carbone neutres.

Quelques fournisseurs de GNR existent présentement au Québec. Le plus gros à présent est la centrale de biométhanisation de St-Hyacinthe, produisant 18 Mm³/an. D'autres fournisseurs devraient entrer en service d'ici quelques années.

Énergir cherche à devenir fournisseur de GNR, et des projets sont présentement en développement. Un projet de tarif et de programme d'approvisionnement est présentement devant la Régie de l'Énergie du Québec. À défaut d'en acquérir d'Énergir, il est possible d'en acquérir d'un fournisseur privé.

Au niveau technique, le GNR est identique au gaz naturel conventionnel. Le gaz lui-même provient du même réseau de distribution, et ne requiert aucune conversion d'équipement ou de changement technique. La transition est entièrement transparente au niveau des équipements. La seule différence est au niveau contractuel avec le fournisseur, et un surcoût. Les prix varient, et le marché du GNR est encore peu mature et relativement volatil, mais le GNR comporte un surcoût d'entre 20.5 à 83.4 ¢/m³ (5.41 \$/GJ à 22 \$/GJ), avec un surcoût moyen de 10 \$/GJ (37.5 ¢/m³), selon Énergir.

Si, pour une raison ou une autre, le GNR n'est pas disponible, l'équipement au gaz naturel, soit comprimé ou liquéfié, pourrait continuer à opérer au gaz naturel conventionnel, sans interruption des opérations.

Les avantages de l'utilisation du gaz naturel renouvelable sont :

- Carburant renouvelable considéré comme carbone neutre.
- Utilisation de l'infrastructure gazière conventionnelle, sans changement technique.

Les désavantages de l'utilisation du gaz naturel renouvelable sont :

- Augmentation du coût par rapport au gaz naturel conventionnel.

- Approvisionnement encore peu disponible, marché peu mature et volatil.

Le GNR est une option complémentaire à l'utilisation du GNC ou du GNL. Il peut venir compléter ces deux volets technologiques, et permettrait de les rendre carbone neutre, sans changement technique.

3.4 Migration de carburant : Camions électriques

L'électrification des transports est une tendance courante, particulièrement dans les véhicules personnels. Des options électriques ne sont pas encore commercialement disponibles dans les camions routiers en Amérique du Nord, mais l'électrification serait imminente. Plusieurs producteurs de véhicules, dont Daimler, Volvo et Tesla, ont annoncé des modèles électriques, opérant avec des batteries. Toutefois, aucune date d'arrivée est encore annoncée.

La littérature indique que l'autonomie des camions électriques de première génération serait relativement limitée [13]. Les autonomies déclarées seraient entre 400 et 600 km, ce qui serait insuffisant pour le trajet de NAL au port de Trois-Rivières, de 700 km. Toutefois, pour le trajet entre Authier et NAL, d'une distance de 68 km, une telle autonomie serait amplement suffisante. Les batteries des camions nécessiteraient évidemment des cycles de recharge, mais des systèmes de recharge devraient permettre une recharge suffisante des batteries pour effectuer les distances relativement courtes entre les deux mines. De plus, le cycle de recharge de la batterie pourrait possiblement être incorporé aux opérations de chargement et de déchargement du minerai des camions à la mine et au concentrateur, pour minimiser le temps perdu.

Le coût des véhicules électriques est encore incertain, mais il est fort probable que les camions électriques seront plus dispendieux que leurs équivalents au diesel. La différence de coût serait principalement liée aux batteries, qui sont encore relativement dispendieuses. En contrepartie, l'électricité est peu chère au Québec, et comporte une empreinte carbone presque négligeable. Le prix de l'électricité est aussi relativement stable, ce qui confèrera une certaine protection contre la volatilité du diesel. Par unité d'énergie, l'électricité serait moins dispendieuse que le diesel.

L'effet du froid sur les batteries des grands véhicules et leur autonomie n'est pas encore connu. Pour les véhicules de plaisance, les grands froids hivernaux peuvent réduire l'autonomie de véhicules électriques de manière importante. Il est encore inconnu si cet effet sera aussi problématique dans les véhicules plus lourds.

L'entretien de véhicules électriques ne devrait pas être beaucoup plus complexe que l'entretien de véhicules à combustion interne. Les véhicules électriques contiennent moins de pièces mécaniques, ce qui devrait réduire les besoins d'entretien. En contrepartie, les systèmes électriques des véhicules et des stations de recharge seront plus complexes et puissants, ce qui nécessitera une expertise particulière et des électriciens qualifiés. Les véhicules commerciaux devraient arriver avec des garanties et des protocoles d'entretien élaborées par les fournisseurs, ce qui réduit ce risque.

Le programme subventionnaire Écocamionnage du MTQ contient des subventions pour le coût d'acquisition de systèmes de propulsion électriques ou hybrides électriques qui mènent à la réduction d'émissions de GES. L'aide disponible serait de 50% du surcoût d'un véhicule électrique, par rapport à un comparable conventionnel, jusqu'à un maximum de 75 000\$, et ce par véhicule.

Les avantages des camions électriques sont :

- Véhicule sans émissions. L'électricité fournie par Hydro-Québec a une empreinte essentiellement nulle.
- Possibilité de recharge rapide, et d'intégration de la recharge des batteries aux opérations de chargement et déchargement du minerai.
- Tarifs d'électricité faibles et contrôlés par la Régie de l'Énergie. Augmentations limitées et contrôlées de tarifs, ce qui réduit le risque d'augmentation des coûts de transport.
- Bien adapté au transport d'Authier à NAL.

Les désavantages des camions électriques sont :

- Les véhicules ne sont pas encore commercialement disponibles à présent.
- L'autonomie des véhicules serait limitée de 400 à 600 km, insuffisant pour le trajet de NAL à Trois-Rivières.
- L'infrastructure de recharge publique pour les camions n'est pas encore disponible.
- L'effet du froid sur l'autonomie est encore inconnu.

Les véhicules électriques n'étant pas encore commercialement disponibles, il est difficile d'en acquérir à présent, sauf pour des conversions prototypiques. Il est donc recommandé de surveiller les développements commerciaux et technologiques, qui devraient être imminents. Les camions électriques pourraient être très bien adaptés au transport de courte distance entre Authier et NAL, mais semblent limités pour le transport entre NAL et Trois-Rivières.

3.5 Migration de carburant : Camions à piles à hydrogène

Une pile à combustible est une cellule électrochimique qui utilise un combustible pour produire de l'électricité. Dans une pile à hydrogène, le combustible est de l'hydrogène, combinée avec de l'oxygène atmosphérique, pour produire de l'eau et de l'électricité. L'opération d'une pile à hydrogène ne produit donc pas d'émission de GES, mais seulement de la vapeur d'eau. L'électricité produite est utilisée pour alimenter des moteurs électriques, qui assurent la propulsion du véhicule. L'intérêt pour la pile à hydrogène est que cette technologie permet d'avoir un véhicule opérant à l'électricité, mais qui peut être ravitaillé rapidement avec un combustible, comme un véhicule conventionnel.

Des véhicules de promenade à hydrogène sont commercialement disponibles à présent, mais ce n'est pas encore le cas pour des camions routiers. Hyundai a récemment dévoilé un véhicule qui devrait être disponible d'ici à 2023, avec une autonomie de plus de 1000 km [14]. D'autres producteurs seraient aussi imminents, dont Kenworth, Toyota et Nikola.

L'hydrogène peut provenir de plusieurs différentes sources. Air Liquide distribue de l'hydrogène par citerne semi-remorque, à parti de Montréal. L'hydrogène peut être produit à partir de gaz naturel, ce qui implique des émissions de GES. Toutefois, l'hydrogène peut aussi être produit par l'électrolyse d'eau. Une station d'électrolyse pourrait être installée sur ou à proximité des installations de Sayona, pour ravitailler les équipements. Le ravitaillement d'un réservoir à hydrogène se fait par tuyau à gaz pressurisé. L'électrolyse requiert de l'électricité, pour séparer l'eau en hydrogène et oxygène. Au Québec, l'électricité provenant de la grille d'Hydro-Québec a une très faible empreinte carbone. L'hydrogène produit avec cette électricité serait donc effectivement carbone neutre. Le prix de l'électricité est aussi relativement stable, ce qui confèrerait une certaine protection contre la volatilité du diesel. Des fournisseurs de système d'électrolyse sont disponibles à présent au Canada [15].

Le coût des véhicules à pile à hydrogène est encore incertain, mais il est fort probable que les camions à hydrogène seront plus dispendieux que leurs équivalents au diesel. La différence de coût serait principalement liée aux piles à combustible et aux réservoirs à hydrogène, qui sont encore relativement dispendieux. Le système d'électrolyse comporterait aussi des coûts importants.

L'entretien de ce type de véhicule est encore peu connu. La réduction en pièces mécaniques devrait simplifier une portion de l'entretien, mais les piles à combustible, les systèmes électriques et les réservoirs à hydrogène devraient avoir leurs lots de complexités. Les véhicules commerciaux devraient arriver avec des garanties et des protocoles d'entretien élaborées par les fournisseurs, ce qui réduit ce risque. Les

véhicules prototypiques seront plus risqués. Les stations d'électrolyse sont présentement disponibles de fournisseurs canadiens connus.

Les camions à hydrogène devraient avoir une autonomie suffisante pour se rendre de NAL à Trois-Rivières. Toutefois, à présent, aucune infrastructure de remplissage à l'hydrogène n'est présente sur le trajet.

Le programme subventionnaire Écocamionnage du MTQ contient des subventions pour le coût d'acquisition de systèmes de propulsion électriques ou hybrides électriques qui mènent à la réduction d'émissions de GES. Ce programme devrait être applicable aux véhicules à hydrogène. L'aide disponible serait de 50% du surcoût d'un véhicule électrique, par rapport à un comparable conventionnel, jusqu'à un maximum de 75 000\$, et ce par véhicule. Transition Énergétique Québec a supporté l'installation du premier poste d'hydrogène dans la province, à Québec [16]. Un programme provincial de support pour l'hydrogène serait pressenti pour 2020.

Les avantages des camions à pile à hydrogène sont :

- Véhicule sans émissions de GES.
- La génération d'hydrogène ne produit pas de GES si l'hydrogène est produit par électrolyse. L'électricité fournie par Hydro-Québec a une empreinte essentiellement nulle.
- Remplissage rapide, comparable au diesel.
- Tarifs d'électricité faibles et contrôlés par la Régie de l'Énergie. Augmentations limitées et contrôlées de tarifs, ce qui réduit le risque d'augmentation des coûts de transport.
- Possibilité de véhicules à propulsion électrique à grande autonomie.

Les désavantages des camions à pile à hydrogène sont :

- Les véhicules ne sont pas encore commercialement disponibles.
- Aucune infrastructure de recharge sur le trajet entre NAL et Trois-Rivières.
- L'hydrogène produit à partir de gaz naturel à une empreinte carbone.
- Systèmes d'électrolyse dispendieux.

Les véhicules à hydrogène n'étant pas encore commercialement disponibles, il est difficile d'en acquérir à présent, sauf pour des conversions prototypiques. Il est donc recommandé de surveiller les développements commerciaux et technologiques, qui devraient être imminents. Les camions à hydrogène pourraient permettre le camionnage sur des longues distances sans émissions, éliminant certains problèmes d'autonomie des véhicules électriques. Une infrastructure de génération et de ravitaillement d'hydrogène serait toutefois requise.

4. Recommandations

Carboniq formule les recommandations suivantes pour les prochaines étapes du projet.

Le transport par train permettrait de réduire les émissions de manière importante, pour les deux volets du transport, soit du minerai de la mine au concentrateur, et du concentré au port. Cette approche réduirait les aussi le nombre de trajets entre ces différentes destinations, les besoins de main d'œuvre, et pourrait améliorer l'acceptabilité sociale du projet. Le train est un mécanisme bien connu pour le transport de matières en vrac, se reposant sur des systèmes maîtrisés depuis longtemps. Le réseau de CN passe à proximité des deux installations, et se rends jusqu'au port de Trois-Rivières. Le transport par pipeline pourrait être une manière efficace d'électrifier et d'automatiser le transport du minerai d'Authier à NAL. La distance entre ces deux sites permettrait une connexion entre ces deux sites. Il est recommandé d'effectuer une étude préliminaire pour le transport par train et le transport par pipeline, pour pourvoir faire une comparaison entre le coût de ces deux mécanismes et le transport par camion. Ces deux solutions comportent des réductions substantielles des coûts d'opération du transport, mais nécessitent des dépenses en capital importantes pour planter.

Le traitement partiel à Authier pourrait être une option intéressante, mais le coût en capital et les dépenses opérationnelles pourraient être substantielles. La question de l'eau et de la filtration du préconcentré serait un enjeu majeur qui pourrait invalider le cas. Cette option est peu recommandable.

La remise en service de la raffinerie comporterait des coûts importants, et modifierait de manière substantielle la nature des opérations de Sayona. Un changement fondamental à la nature des opérations serait hors de l'étendue du mandat présent, et dépendrait de décisions stratégiques de Sayona. Ceci réduirait toutefois la quantité de concentré expédié de manière substantielle.

Si le transport par camion est retenu, l'installation d'un pont sur la rivière Harricana est fortement recommandée. Ceci réduirait le trajet entre la mine et le concentrateur de moitié, ce qui aurait un impact majeur sur la consommation de diesel et les émissions. Un raccourcissement du trajet permettrait d'augmenter le nombre de cycles de transport par véhicule, réduisant le nombre de camions sur la route. De plus, le contournement de la ville d'Amos réduirait le trafic, et améliorerait l'impact du projet sur cette population.

Pour les camions, la piste à suivre est compliquée. Le gaz naturel offre une technologie actuellement commercialement disponible de fournisseurs originaux d'équipement, ce qui permettrait une réduction des émissions de GES d'environ 30% par rapport au diesel.

L'option du GNR réduirait cette empreinte à presque nulle. En contrepartie, la limite de puissance des moteurs disponibles réduit la charge maximale possible, augmentant le nombre de trajets, possiblement de manière importante.

Les véhicules électriques, s'ils deviennent disponibles en Amérique du Nord, seraient parfaitement adaptés au transport du minerai de Authier à NAL. Ces camions sont conçus pour des trajets courts, cycliques et répétitifs, comme le trajet entre la mine et le concentrateur. Pour le transport du concentré au port de Trois-Rivières, la distance de transport est trop grande pour l'autonomie indiquée de ce type de véhicule.

Le véhicules à pile à hydrogène pourraient régler le problème d'autonomie des véhicules électriques. Il est recommandé d'effectuer une veille technologique sur la disponibilité de cette classe de véhicules.

5. Références

- [1] S. Piché et J. Vieira, «Projet Authier - Inventaire des émissions de gaz à effet de serre - 657208-SLQA-RP03-0A,» SNC-Lavalin, Montréal, 2019.
- [2] Genivar, «Quebec Lithium Inc. - Projet d'exploitation minière de carbonate de lithium - Étude approfondie - Résumé,» Genivar, Québec, 2013.
- [3] Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques, «Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre,» Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques, Québec, 2019.
- [4] Wikipedia, «Hopper car,» [En ligne]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Hopper_car. [Accès le 12 12 2019].
- [5] CN, «CN Network Map,» [En ligne]. Available: <https://cnebusiness.geomapguide.ca/>. [Accès le 12 12 2019].
- [6] Ministère des Transport du Québec, «Programme visant la réduction ou l'évitement des émissions de gaz à effet de serre par le développement du transport intermodal,» 05 2019. [En ligne]. Available: <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/aide-financiere/programmes-aide/Documents/programme-reductionEGAS.pdf>. [Accès le 14 12 2019].
- [7] L.-P. Gignac, R. Sirois, E. Bernier, S. Rivard, R. Jones, M. Bilodeau, R. Cunningham et P. R. Roberge, «Québec Iron Ore Inc. - Bloom Lake Mine - Technical Report NI43-101,» Ausenco, Montreal, 2017.
- [8] Sayona Québec, «Technical Report – Updated Definitive Feasibility Study – Authier Lithium Project,» BBA, Montreal, 2019.
- [9] Régie de l'énergie, «Carburant diesel - Prix moyen affiché - Par région administrative du Québec,» 03 12 2019. [En ligne]. Available: http://www.regie-energie.qc.ca/energie/archives/diesel/diesel_moyen2019.pdf. [Accès le 19 12 2019].
- [10] Revenu Québec, «CA-1 Tableau des taux de taxe applicables dans les différentes régions du Québec en vigueur à partir du 1er avril 2015 - Loi concernant la taxe sur les carburants,» Revenu Québec, 06 2017. [En ligne]. Available: <https://www.revenuquebec.ca/documents/fr/formulaires/ca/ca-1%282017-06%29.pdf>. [Accès le 19 12 2019].
- [11] Société en commandite Gaz Métro, «Mesures relatives à l'achat et la vente de gaz naturel renouvelable, R-4008-2017,» 07 07 2017. [En ligne]. Available: http://publicsde.regie-energie.qc.ca/projets/411/DocPrj/R-4008-2017-B-0005-Demande-Piece-2017_07_07.pdf. [Accès le 19 12 2019].
- [12] T. Deshaies, «Un promoteur développe un projet de liquéfaction de gaz naturel à Val-d'Or,» *Radio Canada - ICI Abitibi-Témiscamingue*, 21 11 2019.

- [13] S. Sripad et V. Viswanathan, «Performance Metrics Required of Next-Generation Batteries to Make a Practical Electric Semi Truck,» *ACS Energy Letters*, vol. 2, p. 1669–1673, 2017.
- [14] S. Blanco, «Hyundai's Hydrogen Semi-Truck Concept Is Built to Take on Tesla,» *Car and Driver*, 29 10 2019.
- [15] Hydrogenics, «Hydrogenics - Innovators in Hydrogen technology & Solutions,» [En ligne]. Available: <https://www.hydrogenics.com/>. [Accès le 14 12 2019].
- [16] Le Soleil, «Une première station de ravitaillement à hydrogène au Québec d'ici trois semaines,» 17 01 2019. [En ligne]. Available: <https://www.lesoleil.com/auto/une-premiere-station-de-ravitaillement-a-hydrogene-au-quebec-dici-trois-semaines-8a60bb093d5652fe5ef9697910378a80>.

Livrable 3

Gestion de l'empreinte du transport minier

Livrable 3: Gestion de l'empreinte du transport minier

Le projet de la mine Authier de Sayona Lithium est une mine de surface à ciel ouvert conventionnelle, utilisant une approche de forage et dynamitage, où le minerai et les stériles sont extraits par une excavatrice et retirés de la fosse par camion.

Dans la conception originale du plan de projet, le transport minier sera effectué par des camions miniers Komatsu HD605-8 de 60 t et des Komatsu HM400-5 de 40 t, opérant au diesel. L'utilisation de diesel pour le transport minier de minerai et de stériles génère une quantité importante de gaz à effets de serre.

L'objectif de ce livrable est de revoir les concepts du transport minier, afin de réduire l'empreinte carbone associée à cette activité. Premièrement, l'empreinte carbone du transport dans le cas de base sera évaluée. Ensuite, des alternatives au transport par camion seront identifiées. Finalement, des mécanismes de réduction de l'empreinte du diesel seront étudiés.

1. Évaluation de l'empreinte

Il faut premièrement évaluer l'empreinte carbone spécifique des opérations de transport minier de la mine Authier. L'inventaire de GES de SNC-Lavalin regroupe toutes les émissions de la machinerie lourde ensemble, pour l'équipement de mine et d'usine, sans division. Aux fins du présent rapport, cette évaluation sera considérée comme étant une estimation juste des émissions et que le plan minier qui y a conduit prévaut toujours. Si des modifications ont été apportées au plan minier depuis la préparation de cette étude il y aurait alors lieu de reconfirmer cette estimation. Pour déterminer une stratégie carbone, il n'y aurait présentement pas l'utilité de reconfirmer cette estimation. L'inventaire est repris ci-bas, au Tableau 1, sous la rubrique « Machinerie lourde (mine et usine) ».

Tableau 1: Sommaire des émissions de GES (t CO₂e/an) du projet / PRP du RDOCECA, mine Authier [1]

Source	Année du projet					
	PP	1	2	3	4	5
Déboisement	44 152	0	0	0	0	0
Machinerie lourde (mine et usine)	1 380	6 086	6 167	9 933	14 683	19 341
Unité de chauffage au mazout	62	62	62	62	62	62
Dynamitage	10	119	84	187	310	449
Transport du concentré	0	3 874	4 173	4 073	4 395	3 914

Électricité	0	84	84	84	84	84
TOTAL	45 604	10 224	10 569	14 338	19 533	23 615
Source	6	7	8	9	10	11
Déboisement	0	0	0	0	0	0
Machinerie lourde (mine et usine)	21 341	22 064	19 087	13 701	10 449	6 429
Unité de chauffage au mazout	62	62	62	62	62	62
Dynamitage	470	535	455	312	229	122
Transport du concentré	4 248	4 558	3 917	4 413	4 396	4 808
Électricité	84	84	84	84	84	84
TOTAL	26 204	27 302	23 604	18 571	15 219	11 505
Source	12	13	14	RR	TOTAL	
Déboisement	0	0	0	0	44 152	
Machinerie lourde (mine et usine)	4 247	3 737	3 155	4 825	166 390	
Unité de chauffage au mazout	62	62	62	62	926	
Dynamitage	66	55	45	0	3 448	
Transport du concentré	4 574	4 277	3 066	0	58 686	
Électricité	84	84	84	0	1 169	
TOTAL	9 032	8 215	6 411	4 825	274 773	

La contribution exacte des camions miniers peut être estimée, selon les paramètres des équipements mobiles, fournis aux Tableaux 6, 9 et 12 du rapport de SNC-Lavalin. Pour les phases de préproduction et de fermeture, les calculs sont plus simples. Le Tableau 2 ci-dessous reprend le Tableau 6 de SNC-Lavalin, et calcule les émissions de GES.

Tableau 2: Équipement mobile hors route et émissions de GES, adapté de [1]

Équipement	Nombre d'unité	Puissance nominale (P _Y)	Facteur de charge (LF _Y)	Durée d'utilisation par unité (T _Y)	Émissions de GES (t CO ₂ eq)
Pelle hydraulique Komatsu PC800LC-8	1	495 hp	0,57	2 745 h	353.1
Bouteur CAT D6T	1	210 hp	0,64	2 745 h	168.2
Niveleuse CAT 14M3	1	238 hp	0,61	1 373 h	90.9
Foreuse Sandvik DI550 T4	1	440 hp	0,75	199 h	29.9
Camion minier Komatsu HD605-8 (60 t)	1	724 hp	0,57	1 099 h	206.8
Camion minier Komatsu HM400-5 (40 t)	2	466 hp	0,57	917 h	222.1
Camion à eau	1	150 hp	0,74	1 373 h	69.5
Tour d'éclairage	3	6 hp	1,00	5 490 h	45.1

Les émissions de GES sont évaluées en utilisant la méthodologie recommandée par le MELCC, en employant l'équation :

$$E_X = \frac{CD}{\rho} \times P_Y \times LF_Y \times T_Y \times \frac{FE_X}{10^6}$$

Où :

- E_X : émissions totales du gaz x (tonne) ($x = \text{CO}_2, \text{CH}_4$ ou N_2O)
- CD : taux de consommation spécifique de diesel des équipements mobiles (= 0,371 lb/hp-h selon l'US EPA pour des moteurs de puissance supérieure à 100 hp (US EPA 2018))
- ρ : densité du carburant diesel (= 1,87 lb/L)
- P_Y : puissance nominale du moteur de l'équipement Y (hp)
- LF_Y : facteur de charge moyen du moteur de l'équipement Y (-)
- T_Y : durée d'utilisation de l'équipement Y (h)
- FE_X : facteur d'émission du gaz x pour la combustion de diesel (g/L) ($x = \text{CO}_2, \text{CH}_4$ ou N_2O)

Les facteurs d'émission utilisés sont ceux spécifiés pour le diesel hors route, soit de 2 681 g CO_2 /L; 0,073 g CH_4 /L; 0,022 g N_2O /L. Les facteurs multiplicateurs de PRP sont de 21 pour le CH_4 et 310 pour le N_2O . En utilisant cette équation et les facteurs déclarés, les émissions de GES sont évaluées, pour calculer la dernière colonne du Tableau 2.

En connaissant la contribution des camions de 40 t et 60 t dans l'ensemble des équipements mobiles, la proportion des émissions pour lesquels ces véhicules sont responsables peut être évaluée. La même méthodologie peut être appliquée pour la fermeture de la mine.

Pour la contribution des camions miniers lors des opérations de production de la mine, les nombres d'équipement et la durée d'utilisation des équipements sont des intervalles, variant selon les besoins des opérations minières.

Tableau 3: Équipement mobiles ou semi-fixes - Phase de production, adapté de [1]

Équipement	Nombre d'unité	Puissance nominale (P_Y)	Facteur de charge (LF_Y)	Durée d'utilisation par unité (T_Y)	Émissions de GES (t CO_2eq)
Pelle hydraulique Komatsu PC800LC-8	1 – 4	495 hp	0,57	2 437 – 8 395 h/a	313.5 - 4319.4
Buteur CAT D8T	0 – 1	354 hp	0,64	1 924 – 8 395 h/a	0 - 867.1
Buteur CAT D6T	1	210 hp	0,64	715 – 8 395 h/a	43.8 - 514.4

Foreuse Sandvik DI550 T4	1 – 3	440 hp	0,75	1 110 – 4 611 h/a	167 - 2081.1
Camion minier Komatsu HD605-8 (60 t)	2 – 12	724 hp	0,57	1 239 – 5 952 h/a	466.2 - 13437.6
Camion minier Komatsu HM400-5 (40 t)	2 – 3	466 hp	0,57	1 447 – 4 677 h/a	350.4 - 1699.1
Niveleuse CAT 14M3	0 – 2	238 hp	0,61	0 ou 2 190 h/a	0 - 289.9
Camion à eau	1	150 hp	0,74	2 190 h/a	110.8
Tour d'éclairage	0 – 10	6 hp	1,00	0 ou 4 380 h/a	0 - 119.8
Chargeuse sur roue CAT 980M (usine)	1	425 hp	0,68	4 745 h/a	625.2
Chargeuse sur roue CAT 980M (port)	1	425 hp	0,68	1 825 h/a	240.5

La même méthodologie est utilisée pour calculer les émissions de GES possibles selon les divers scénarios. Pour les équipements ayant un intervalle de nombre d'équipements et de durée d'utilisation, ceci donne deux cas, soit le minimum des émissions et le maximum des émissions. En calculant le pourcentage de la contribution des camions miniers, et en assumant que la proportion de la contribution des camions augmente avec le total des émissions pour une année donnée, ce qui est logique, puisque les camions sont les plus grands contributeurs possibles, on peut évaluer le montant de GES liés aux camions, et le diesel consommé pour obtenir ces émissions.

Tableau 4: Montant de GES attribués aux camions miniers et volume de diesel

Année	Émissions machinerie lourde (mine et usine) (t CO ₂ eq)	Émissions camion (t CO ₂ eq)	Diesel camion (L)
PP	1 380	500	185 779
1	6 086	2 419	899 596
2	6 167	2 457	913 798
3	9 933	4 407	1 638 764
4	14 683	7 351	2 733 670
5	19 341	10 764	4 002 932
6	21 341	12 389	4 607 339
7	22 064	13 000	4 834 617
8	19 087	10 564	3 928 728
9	13 701	6 698	2 490 800
10	10 449	4 700	1 747 956
11	6 429	2 582	960 137
12	4 247	1 594	592 912
13	3 737	1 380	513 207

14	3 155	1 143	425 086
RR	4 825	3 006	1 117 878
Total LOM	166 625	84 954	31 593 201

Les montants indiqués au Tableau 4 indiquent la contribution spécifique estimée des camions miniers de 40 t et 60 t aux émissions des équipements mobiles de la mine, et le volume de diesel ciblé pour réduction.

2. Alternatives aux camions miniers

Cette section étudie des alternatives aux camions miniers, pour réduire l'empreinte carbone du transport du minerai et des stériles.

2.1 Concassage sur site en fosse et convoyage

Une approche connue pour réduire l'utilisation de camions miniers est le concassage sur site dans la fosse et le convoyage (In-Pit Crushing and Conveying, IPCC). Dans une mine à ciel ouvert conventionnelle, le roc est grossièrement fragmenté lors de la détonation du dynamitage. Des excavatrices chargent le roc dans des camions miniers, qui remontent les rampes de la fosse pour extraire le roc. Le minerai est dirigé vers un concentrateur, et les stériles sont dirigés vers le parc à stériles. Tout le transport du roc dépend donc de camions miniers, une approche conventionnelle connue, bien maîtrisée et flexible, mais qui consomme beaucoup de diesel. Un système d'IPCC cherche à substituer les camions par des convoyeurs.

L'utilisation d'un convoyeur pour transporter du matériel est chose courante dans l'industrie minière et métallurgique. Toutefois, le minerai généré lors du dynamitage est relativement grossier, et difficile à convoyer. Pour pouvoir le convoyer plus facilement, il faut réduire la granulométrie du minerai. Le concassage sur site et convoyage est un système où un concasseur primaire est installé dans la fosse, relié à un jeu de convoyeurs pour extraire le minerai de la fosse. Au lieu d'utiliser un camion au diesel qui remonte une rampe pour transporter le minerai vers la station de concassage d'un concentrateur, les camions servent seulement à déplacer le roc vers le concasseur dans la fosse, réduisant la consommation de diesel. Dans le cas où le concasseur et les convoyeurs sont électrifiés et branchés de l'électricité renouvelable, la sortie du roc de la fosse peut être entièrement électrique, ce qui réduit considérablement l'empreinte carbone du mouvement de matériel.

Les systèmes de concassage et de convoyage peuvent être stationnaires ou mobiles, selon leur configuration et les équipements sélectionnés. L'installation de ces systèmes requiert une revue des stratégies minières et du plan minier, pour permettre l'installation de ces

systèmes et d'en tirer le maximum des bénéfices possibles. Le concept minier, la sélection des équipements, et l'ensemble des cycles opérationnels doivent être revus, et la géométrie du gisement et de la fosse doivent être compatibles avec l'installation de convoyeurs [2]. Il faut éviter de devoir déplacer cette infrastructure inutilement, ce qui génère des coûts additionnels et des arrêts de service.

Un système de IPCC réduit la quantité de roc que les camions doivent déplacer, ce qui réduit les kilomètres voyagés et la consommation de diesel. Il potentiellement réduire les besoins en entretien des véhicules, et même réduire le nombre total de camions requis, ce qui peut mener à des réductions de dépenses d'acquisition et d'entretien d'équipement. La réduction de nombre d'équipement mobile et une plus grande automatisation se traduit aussi par une réduction du nombre de personnel, et une réduction des risques de santé et sécurité. [3] L'IPCC peut donc réduire les coûts d'opération et augmenter la sécurité du personnel. De plus, l'équipement requis pour le concassage sur site en fosse et convoyage est déjà bien connu et maîtrisé. Cet équipement est commercialement disponible à présent de plusieurs grands équipementiers reconnus et fiables, avec des protocoles d'installation et d'entretien, ce qui réduit certains risques d'implémentation.

Certains problèmes sont toutefois présents avec des systèmes d'IPCC. Étant plus fixes, il est plus difficile de déplacer ou reconfigurer rapidement les convoyeurs et le concasseur. Le plan minier perd une certaine flexibilité et devient plus rigide. Dans un système à camions, si l'un camion brise, les autres peuvent prendre la relève. Lors d'un bris du concasseur ou des convoyeurs, l'ensemble de sortie de minerai de la fosse peut être arrêtée, ce qui fait du système d'IPCC un point unique de défaillance potentiel, ce qui augmente le risque d'arrêt des opérations. [2] La géométrie de la fosse doit pouvoir accepter l'installation de ces systèmes, en fournissant un chemin pour les convoyeurs et l'alimentation électrique.

Des équipements mobiles seront encore nécessaires pour charger et déplacer le roc dans la fosse, vers le système d'IPCC, donc des excavateurs, chargeurs et camions seront encore requis, mais l'utilisation des camions sera limitée, réduisant de manière importante la consommation de diesel et les émissions de GES qui en découlent. Pour pouvoir statuer les impacts sur les coûts CAPEX et OPEX, et les émissions de GES, il faudrait revoir le plan minier dans son ensemble. La littérature indique que les réductions de coûts peuvent être entre 20 à 40% [3] [4], et les réductions de GES jusqu'à 80% [2], mais plusieurs facteurs devront être analysés avant de déterminer l'impact sur la mine de Sayona.

Les avantages du concassage sur site en fosse et convoyage sont :

- Réduction de GES, potentiellement substantielle, par l'électrification.

- Technologie connue, éprouvée et commercialement disponible.
- Réduction des coûts d'opération.
- Réduction des trajets et kilomètres voyagés pour les camions, des besoins d'entretien, de consommation diesel, et du nombre de véhicules.
- Plus grande automatisation. Réduction de personnel sur équipement mobile et dans la fosse, et augmentation de la santé et sécurité des opérations.

Les désavantages du concassage sur site en fosse et convoiement sont :

- Planification minière plus complexe et rigide. Perte de flexibilité.
- Le concept minier doit être adapté pour alimenter le concasseur et permettre l'installation de convoyeur.
- Imposse des contraintes sur la géométrie de la fosse.
- Risque opérationnel d'un point unique de défaillance potentiel.

Le concassage sur site en fosse et convoiement est une option potentiellement très intéressante pour la décarbonisation des activités de transport minier. C'est une technologie connue et éprouvée, avec des équipements commercialement disponibles à présent. Bien implantée, cette technologie peut réduire les coûts d'opération et les émissions de GES des opérations minières. L'IPCC requiert toutefois de modifier le plan minier et la géométrie de la fosse, pour permettre son implantation. Cette approche devrait être étudiée en plus de détail, pour évaluer son impact économique et environnemental.

3. Écologisation du camionnage minier

La section précédente détaillait un mécanisme de transport autre que le camionnage. Le concassage sur site et convoiement permettrait de réduire l'utilisation de camions, mais ne pourrait l'éliminer. L'IPCC est un système fixe, et de l'équipement mobile serait requis pour déplacer le minerai et les stériles dans la fosse. Cette section cherche à identifier des méthodes pour réduire l'empreinte des camions miniers eux-mêmes.

Prix énergétiques

L'étude de diverses alternatives énergétiques requiert une compréhension du coût de ces alternatives. Cette section contient divers prix énergétiques moyens pour certaines des énergies proposées. Il faut noter que ces prix sont approximatifs, et dépendent fortement d'un nombre de facteurs, dont :

- le profil de consommation,
- la nature des ententes commerciales
- le dimensionnement des systèmes d'autoproduction, de compression ou de liquéfaction,

- du régime réglementaire, législatif et de taxation.

Tableau 5: Prix énergétiques moyens

Combustible	Coût unitaire	Coût spécifique (\$/GJ)	Spécifications et références
Diesel conventionnel	125.9 ¢/L	32.87 \$/GJ	Prix moyen diesel en Abitibi [5]
Diesel minier	109.52 ¢/L	28.59 \$/GJ	Revenu Québec [6]
Gaz naturel	30 à 40 ¢/m ³	7.92 à 10.56 \$/GJ	Selon profil de consommation
Gaz naturel renouvelable	16.5 à 79.4 ¢/m ³ de surcoût	4.35 à 20.96 \$/GJ de surcoût	Surcoût par rapport au prix de référence, pour acquisition de molécule [7]
Gaz naturel comprimé	7.57 à 18.95 ¢/m ³	2 à 5 \$/GJ	Selon références industrielles
Gaz naturel liquéfié	18.95 à 26.52 ¢/m ³	5 à 7 \$/GJ	Selon références industrielles
Électricité	8 ¢/kWh	22.22 \$/GJ	Selon références industrielles
Hydrogène	1 à 3 \$/kg	8.33 à 25 \$/GJ	Selon références industrielles

Le coût spécifique d'un type d'énergie devra être étudié, en fonction des conditions locales applicables. Il faut aussi noter que les différents systèmes propulsifs ont des efficacités énergétiques variables, ce qui doit être pris en considération.

3.1 Migration de carburant : Camions au biodiesel

Le biodiesel est un carburant liquide chimiquement similaire au diesel, produit à partir de matière organique, incluant des gras végétaux ou animaux, et de la biomasse forestière, à travers divers procédés de transformation chimique. L'origine organique et souvent résiduelle des intrants du biodiesel leur confère leur caractère renouvelable, et les émissions de ce carburant sont considérées comme carbone neutres.

En théorie, les biodésels pourraient être consommés dans des moteurs à combustion au diesel, sans aucune modification. En pratique, des hauts taux de substitution peuvent causer des problèmes, et le biodiesel est souvent mélangé au diesel conventionnel dans un mélange 20/80.

L'avantage de l'utilisation d'un biodiesel est qu'il pourrait être utilisé dans toute la flotte de véhicules de la mine, non seulement les camions miniers, mais dans les chargeuses, foreuses, et autres équipements de service, ainsi que l'équipement routier. Le biodiesel pourrait possiblement aussi être utilisé dans la fabrication d'ANFO.

Le biodiesel comporte toutefois certains problèmes. Le biodiesel est moins chimiquement stable que le diesel conventionnel, et a tendance à se dégrader ou gélifier lors d'un stockage à long terme. Il est aussi plus sensible aux températures plus froides. La corrosion peut être un problème avec ce type de carburant. Il faut aussi valider si les moteurs des équipement seraient en mesure de consommer du biodiesel non-mélangé, et si ceci ne causerait pas de problèmes pour les garanties des fournisseurs d'équipement.

Au niveau du coût, celui-ci varie en fonction de l'origine du biodiesel, et est difficile à prédire, mais le biodiesel est plus dispendieux que le diesel conventionnel fossile. Peu de producteurs sont présents au Québec à présent, ce qui limite la disponibilité à court terme, mais des producteurs pourraient arriver à plus long terme. À présent, aucun producteur n'est présent dans l'Abitibi, donc le carburant devrait être importé.

Les avantages du biodiesel sont :

- Utilisable dans des équipements actuels, sans modifications.
- Utilisable dans l'ensemble de la flotte de la mine.
- Entretien inchangé. Aucun besoin de modification des pratiques d'entretien, de la formation des mécaniciens, ou d'embauche de spécialistes.
- Possibilité d'utilisation dans la synthèse d'ANFO.

Les désavantages du biodiesel sont :

- Dans le biodiesel mélangé 20/80 avec le diesel conventionnel, la réduction des GES est modérée.
- Possibilité de problèmes de stabilité et de corrosion.
- Disponibilité limitée.
- Prix plus élevé que le diesel conventionnel.
- Possibilité d'affecter les garanties des fournisseurs d'équipement.

Le biodiesel serait une option intéressante à retenir pour la portion de la flotte des équipements mobiles qui ne peuvent être convertis vers des énergies plus propres. L'utilisation d'autres carburants ou d'énergies permettrait des réductions plus profondes des émissions, mais ces technologies ne sont pas toujours disponibles dans certains équipements, comme les foreuses, niveleuses ou bouteurs. Pour ces équipements, le biodiesel offrirait la possibilité d'avoir des réductions d'empreinte. Pour les classes d'équipement où des alternatives plus puissantes et prometteuses sont disponibles, il

faudrait favoriser ces alternatives en premier. Le biodiesel mélangé offre seulement des réductions modestes des émissions.

Il faut noter que des technologies sont présentement en développement pour la production de diesel synthétique, produit à partir de pyrolyse de plastiques usés. Ce diesel possède un empreinte carbone intermédiaire entre le diesel conventionnel et le biodiesel. Ce diesel pourrait servir de remplacement complet au diesel, avec une empreinte environ de 50% du diesel conventionnel. L'utilisation de plastiques usées pour la production de diesel pourrait aider à réduire l'impact de la gestion des matières résiduelles de plastique sur les collectivités locales, et le support de Sayona pourrait être clé pour démarrer le développement de telle initiative.

3.2 Migration de carburant : Camions au gaz naturel

Le gaz naturel peut être utilisé comme combustible propulsif pour l'opération de camions miniers, sous la forme de gaz naturel comprimé (GNC) ou de gaz naturel liquéfié (GNL). Le GNC est du gaz naturel qui est comprimé à très haute pression, généralement en haut de 20 MPa, et stocké dans des réservoirs à pression pouvant être transporté. Le GNC occupe un volume d'environ 1% d'un équivalent de gaz naturel non-comprimé. La GNL est du gaz naturel qui est refroidi sous -162°C, où le méthane devient liquide. Le GNL peut ensuite être entreposé comme liquide dans une citerne cryogénique, occupant un volume environ 1/600^e d'un équivalent de gaz naturel à pression et température normales.

Il est à noter que le GNC à une densité énergétique plus faible que le GNL, à environ 42% du GNL, pour un même volume donné. L'autonomie est donc réduite pour le GNC, par rapport au GNL. Ces deux carburants ont une autonomie plus faible que le diesel, pour un même volume donné de réservoirs de carburant, soit environ 25% pour le GNC et 60% pour le GNL. Le cycle minier des véhicules au gaz naturel doit donc être adapté pour prendre en compte les cycles de ravitaillement plus fréquents, et les systèmes modifiés pour pouvoir contenir un maximum de carburant. Le GNC se ravitaille par un système de gaz comprimé et de hoses à haute pression. Le GNL se transvide comme tout liquide, quoiqu'avec des précautions pour un liquide cryogénique. Dans les deux cas, les risques liés aux déversements sont faibles.

Au niveau des émissions, le gaz naturel brûle plus proprement que le diesel, avec des émissions de GES environ 30% plus faibles que le diesel, pour une même quantité d'énergie. Ainsi, le passage vers le gaz naturel réduirait l'empreinte proportionnellement.

Dans les cas du GNC et du GNL, le gaz naturel peut être utilisé dans un moteur à combustion interne de type diesel, comme ceux utilisés dans les camions miniers. Contrairement aux camions de transport routiers, aucun camion minier n'est disponible

avec un moteur conçu pour du gaz naturel comme standard. L'utilisation de gaz naturel doit donc être par conversion après-vente. Plusieurs de ces équipements sont disponibles sur le marché en kits de conversion [8]. De plus, il est rarement possible de faire une substitution complète du diesel par du gaz naturel, et la substitution est seulement partielle, dans un système hybride gaz naturel/diesel.

Gaseous Fuels Systems Corporation (GFS Corp.), de Floride, offre un système de conversion après-vente au GNL, le EVO-MT [8] [9]. Le système implique des modifications au moteur diesel pour permettre la combustion de diesel et de GNL, l'ajout d'un réservoir de GNL, et des modifications aux systèmes de contrôle. Le taux de substitution de diesel est entre 40 et 50 %. Ce système a été testé par Teck Resources sur quatre camions Komatsu 830E (230t) et deux 930E (290t) dans un projet pilote en 2015-2016, dans une de leurs mines de charbon en Colombie-Britannique. Selon GFS, le EVO-MT est disponible pour la conversion des camions miniers Caterpillar 777B, C et D, Caterpillar 793B, C et D, Caterpillar 785 B, C and D, ainsi que le Komatsu 830 DC/AC et Komatsu 930E, et récemment le Terex Unit Rig 4400 [9]. Il est inconnu si cette technologie pourrait être disponible pour des véhicules dans la classe de 40 à 60 t, mais tous les véhicules listés ont des capacités nettement supérieures.

Mine Energy Solutions, d'Australie, offre la technologie de conversion HDCNG [8] [10], de gaz naturel comprimé à haute densité. Le réservoir de diesel conventionnel est remplacé par un réservoir de diesel mince et des cylindres de gaz. Le moteur diesel est modifié pour pourvoir consommer du diesel et du GNC. Le système aurait une autonomie de 12 heures d'opération, et les cylindres au GNC seraient conçus pour un changement ultra-rapide, pour simplifier le ravitaillement. Les modèles de camion où cette technologie est disponible sont tous d'une classe de capacité entre 130 et 360 t.

Dans ces deux cas, les équipements au gaz naturel ne sont pas disponibles des fabricants d'équipement d'origine, mais dépendent de conversions après-marché secondaires. Ceci pourrait rendre l'entretien des équipements plus complexes, et invalider des garanties de performance avec le fournisseur original.

Le carburant peut être obtenu de plusieurs façons. Énergir opère une grande usine de GNL dans la région de Montréal, et le GNL peut être livré en camion-citerne par voie routière. Des stations de compression de GNC ou de liquéfaction de GNL aussi peuvent être installées où le réseau de gaz naturel passe déjà. Énergir indique que le réseau de gaz naturel passe sur la route 109, à environ 6 km du site d'Authier. Une station de compression ou de liquéfaction pourrait être installée sur le site d'Authier, pour desservir des camions, et d'autre infrastructure mobile. Des articles indiquent que des promoteurs privés développeraient aussi des capacités de liquéfaction dans la région [11].

Le coût du gaz naturel est relativement faible. Au niveau énergétique, le gaz naturel se vend à un prix qui est environ entre 30 à 40 ¢/m³, équivalent de 7.92 à 10.56 \$/GJ. Le prix varie en fonction du prix de la molécule de gaz, du profil de consommation du consommateur, de des coûts de livraison et service. Pour la compression ou la liquéfaction, des surcoûts d'entre 2 à 7 \$/GJ sont rajoutés, selon le combustible, les équipements et infrastructures nécessaires, les coûts d'opération, et les besoins de livraison. Par comparaison, du diesel à 1.26 \$/L équivaut à 33 \$/GJ, quoique le diesel minier est généralement exempt des taxes sur les carburants, ce qui se reflèterait par un coût de diesel plus faible. Le gaz naturel pourrait donc réduire le coût de carburant des opérations de Sayona. Le prix du gaz naturel est aussi beaucoup plus stable que le diesel, et est moins porté à fluctuer, ce qui permettrait de se protéger contre la volatilité de prix à long terme.

Les avantages de l'utilisation du gaz naturel sont :

- Réduction du coût de carburant pour le transport, et prix plus stable à long terme.
- Réduction des émissions d'environ 30% contre le diesel, assumant une substitution complète.
- Infrastructure de compression ou liquéfaction commercialement disponible.
- Arrivée possible de fournisseurs commerciaux dans la région.
- Modifications mineures aux cycles de ravitaillement.

Les désavantages de l'utilisation du gaz naturel sont :

- Conversions après-marché pour des systèmes hybrides gaz naturel/diesel.
- Aucune substitution du diesel à 100%.
- Pas d'équipement disponible des fournisseurs d'origine des équipements.
- Peut invalider les garanties des équipements.
- Peut rendre l'entretien plus complexe.

Énergir a préparé une présentation adressant ce type de combustible, incluse à l'Annexe B de ce document.

Le gaz naturel serait une option intéressante pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre, avec une réduction immédiate par rapport au diesel d'environ 30%, assumant une conversion complète, ce qui n'est pas le cas. Le coût du gaz naturel est relativement faible et stable, et l'infrastructure pour son approvisionnement devient disponible. En contrepartie, aucun équipement n'est disponible directement des fournisseurs d'origine. Il faut faire des conversions après-marché, ce qui pourrait être problématique. Les seuls systèmes disponibles sont des hybrides gaz naturel/diesel, avec un taux de substitution moyen.

3.2.1 Gaz naturel renouvelable

Le gaz naturel renouvelable (GNR) est une option disponible pour le gaz naturel, soit de réseau, comprimé ou liquéfié. Le gaz naturel renouvelable provient de sources biogéniques, comme des sites d'enfouissement ou des centrales de biométhanisation, produit à partir de matières organiques résiduelles. Provenant de sources renouvelables et non-fossiles, les émissions liées au GNR sont considérées comme carbone neutres.

Quelques fournisseurs de GNR existent présentement au Québec. Le plus gros à présent est la centrale de biométhanisation de St-Hyacinthe, produisant 18 Mm³/an. D'autres fournisseurs devraient entrer en service d'ici quelques années.

Énergir cherche à devenir fournisseur de GNR, et des projets sont présentement en développement. Un projet de tarif et de programme d'approvisionnement est présentement devant la Régie de l'Énergie du Québec. À défaut d'en acquérir d'Énergir, il est possible d'en acquérir d'un fournisseur privé où, dans ce cas, Énergir ne fournirait qu'un service de transport.

Au niveau technique, le GNR est identique au gaz naturel conventionnel. Le gaz lui-même provient du même réseau de distribution, et ne requiert aucune conversion d'équipement ou de changement technique. La transition est entièrement transparente au niveau des équipements. La seule différence est au niveau contractuel avec le fournisseur, et un surcoût. Les prix varient, et le marché du GNR est encore peu mature et relativement volatil, mais un surcout d'entre 16.5 à 79.4 ¢/m³ (16.5 à 79.4 \$/GJ), avec un surcout moyen de 10 \$/GJ (37.5 ¢/m³), selon Énergir.

Si, pour une raison ou une autre, le GNR n'est pas disponible, l'équipement au gaz naturel, soit comprimé ou liquéfié, pourrait continuer à opérer au gaz naturel conventionnel, sans interruption des opérations.

Les avantages de l'utilisation du gaz naturel renouvelable sont :

- Carburant renouvelable considéré comme carbone neutre.
- Utilisation de l'infrastructure gazière conventionnelle, sans changement technique.

Les désavantages de l'utilisation du gaz naturel renouvelable sont :

- Augmentation du coût par rapport au gaz naturel conventionnel.
- Approvisionnement encore peu disponible, marché peu mature et volatil.

Le GNR est une option à l'utilisation du GNC ou du GNL. Il peut venir compléter ces deux volets technologiques, et permettrait de les rendre carbone neutre, sans changement technique.

3.3 Migration de carburant : Camions électriques

L'électrification des transports est une tendance courante, particulièrement dans les véhicules personnels. Pour les camions miniers, l'arrivée des camions miniers électriques à batterie est présentement en développement, mais à différents stades selon le type de véhicule et son utilisation. Dans les mines souterraines, les camions électriques à batteries sont disponibles de fournisseurs originaux d'équipement. Leurs avantages de réduction des émissions comparativement au diesel, avec une réduction importante des besoins en ventilation de la mine, a été une grande motivation pour le déploiement de véhicules à batteries, même avec les complexités que l'électrification peut comporter. Plusieurs fournisseurs ont des équipements commercialement disponibles, dont le Z50 de Artisan Vehicles de 50 t [12] et le MT42 de Epiroc à 42 t [13], ainsi qu'une suite d'équipements de production et de support, comme le loader LH514E de Sandvik [14]. Selon plusieurs experts, dans un contexte souterrain, les réductions des émissions, de la chaleur, et des besoins de ventilation, rendent les véhicules électriques plus attrayants que le diesel aujourd'hui [15] [16].

Dans les mines de surface, l'arrivée des véhicules électriques à batterie est plus lente, la pression de réduction de ventilation étant absente. Certains projets de recherche et de précommercialisation sont en développement, mais aucun système n'est présentement disponible de fournisseurs d'origine. Trois cas spécifiques seront étudiés en détail au sections 3.3.1, 3.3.2 et 3.3.3.

Dans tous les véhicules électriques à batterie, l'électricité est stockée dans des cellules électriques conventionnelles au lithium ion, comme dans les véhicules de promenade électriques. La recharge peut se faire par recharge lente, recharge rapide, pantographe ou freinage régénératif.

La recharge lente est la recharge conventionnelle, qui recharge la batterie pendant plusieurs heures à une puissance relativement faible mais de longue durée. Ceci permet de recharger une batterie jusqu'à pleine capacité, sans abîmer la batterie, mais prends plusieurs heures. Cette longue période de recharge est acceptable dans des véhicules ayant une durée d'utilisation annuelle relativement faible et des périodes d'arrêt suffisamment longues pour permettre une recharge lente, mais difficilement acceptable dans des équipements à haute utilisation. Une approche utilisée pour contourner ce problème est le remplacement de piles. Les camion souterrains Z40 et Z50 d'Artisan illustrent ce concept. Les batteries de ces véhicules sont conçues pour être remplacées en service lors d'opérations courantes. Un véhicule rentre dans la baie de recharge, se déleste de sa batterie vide, prends une batterie pleine, et repart en service. La batterie vide peut être rechargée lentement séparément du véhicule, et remise en service lorsque

pleine [12] [15]. Le cycle de recharge des batteries et le cycle d'utilisation des véhicules sont découplés.



Figure 1: Véhicule Z40 d'Artisan, en service à la mine Macassa de Kirkland Lake, effectuant un remplacement de sa batterie (avant gauche) [15]

La recharge rapide est une recharge effectuée à haute puissance pour une période relativement courte, soit de quelques secondes ou minutes. La recharge rapide permet de recharger seulement une portion de la batterie très rapidement, mais ne recharge pas l'ensemble de la batterie, pour limiter l'impact sur la durée de vie de la batterie. La

recharge rapide opère à haute puissance pour transférer beaucoup d'énergie en peu de temps, ce qui peut créer des problèmes de chaleur dans la batterie. Le cycle de recharge rapide doit donc être conçu pour avoir une bonne gestion thermique de la batterie, pour éviter des températures excessives. La recharge rapide est bien adaptée à des utilisations où un véhicule fait un trajet court et cyclique, revenant toujours à la même position. Une courte opération de recharge rapide peut être intégrée à chaque trajet cyclique, rechargeant le véhicule à chaque passage et minimisant les temps d'arrêts de recharge associés à la recharge lente. La recharge rapide requiert des stations de recharge de haute puissance, et un réseau électrique suffisamment puissant et robuste pour les alimenter.

La recharge par pantographe, aussi appelé *trolley assist*, utilise un système composé d'un pantographe sur le véhicule et un caténaire. Le caténaire est le réseau de fils électriques disposés pour permettre l'opération et la recharge de véhicules électriques. Le pantographe est un dispositif articulé installé sur un véhicule, permettant au véhicule de se connecter au réseau électrique et de capter du courant tout en étant en mouvement. De tels systèmes sont bien connus dans l'industrie minière [17], et dans les systèmes de transport en commun.



Figure 2: Système de pantographe et caténaire, sur un camion minier en *trolley assist* [17]

Ces types de systèmes sont souvent déployés pour assister des véhicules hybrides diesel/électriques, comme le CAT 795F AC (372 tonnes US), Komatsu 860E-1K (280 tonnes US), Komatsu 960E-2K (360 tonnes US) ou le Liebherr T236 (100 tonnes). Cette classe de véhicule utilise un générateur au diesel pour alimenter une propulsion électrique. Dans ces applications, les systèmes de pantographe ne fournissent pas de recharge, mais permettent à un véhicule d'utiliser de l'électricité de réseau pour fournir de la puissance motrice à leur propulsion électrique, réduisant la charge sur la génératrice [17]. Un caténaire installé sur une rampe peut fournir à un véhicule de l'énergie supplémentaire, pour pouvoir remonter la rampe plus facilement ou de manière plus économique.

Les systèmes hybrides sont peu communs dans la classe de véhicules de 40 à 60 t, comme ceux sélectionnés par Sayona pour la mine Authier, mais un trolley assist pourrait être utilisé pour recharger des véhicules à batterie. Le système de trolley assist pourrait être configuré pour fournir suffisamment d'énergie pour opérer un véhicule et recharger ses batteries tout en étant en service.

L'installation de caténaires a un impact sur le concept de la mine. Il faut évidemment installer les fils des caténaires et leurs pylônes de support, ainsi que systèmes électriques et sous-stations pour alimenter le réseau de fils. Les routes et rampes doivent être élargies pour faciliter la circulation et permettre l'installation des caténaires, ce qui a un impact sur le plan minier et la géométrie de la fosse.

Le freinage régénératif est une capacité de certains véhicules électriques et hybrides de récupérer l'énergie au freinage sous forme d'électricité, et de la stocker pour utilisation ultérieure. Des freins conventionnels fonctionnent en actionnant une pièce mobile sur une pièce fixe, générant de la friction et dissipant l'énergie sous forme de chaleur. Dans un véhicule électrique, un moteur électrique fournit la puissance motrice aux roues. Lors d'un freinage régénératif, le moteur électrique fonctionne en l'envers en génératrice. L'énergie cinétique du véhicule est captée, produisant de l'électricité, qui peut être stockée dans les batteries du véhicule. Pour un véhicule minier descendant sur un long trajet, une quantité importante d'énergie peut être générée, particulièrement si le véhicule est pleinement chargé. Un exemple intéressant est indiqué à la section 3.3.2, plus bas. Si le plan minier peut être conçu pour profiter du freinage régénératif pour recharger au maximum les batteries, ceci peut aider à augmenter l'autonomie des véhicules à batterie.

Évidemment, pour les équipements mobiles qui sont plus stationnaires, comme des excavatrices ou des concasseurs, il est toujours possible de les connecter au réseau électrique fixe par des bobines à câbles. Ceci permet une électrification relativement simple, mais limite la mobilité des équipements au rayon de la bobine.

L'effet du froid sur les batteries des grands véhicules et leur autonomie n'est pas encore connu. Pour les véhicules de plaisance, les grands froids hivernaux peuvent réduire l'autonomie de véhicules électriques de manière importante. Il est encore inconnu si cet effet sera aussi problématique dans les véhicules plus lourds.

L'entretien de véhicules électriques ne devrait pas être nécessairement beaucoup plus complexe que l'entretien de véhicules à combustion interne. Les véhicules électriques contiennent moins de pièces mécaniques, ce qui devrait réduire les besoins d'entretien. En contrepartie, les systèmes électriques des véhicules et des stations de recharge seront plus complexes et puissants, ce qui nécessitera une expertise particulière et des électriciens qualifiés. Les véhicules commerciaux devraient arriver avec des garanties et des protocoles d'entretien élaborées par les fournisseurs, ce qui réduit ce risque, mais les véhicules plus prototypiques seront plus risqués.

Le coût des véhicules électriques est encore incertain, mais il est fort probable que les camions électriques seront plus dispendieux que leurs équivalents au diesel. La différence

de coût serait principalement liée aux batteries, qui sont encore relativement dispendieuses. En contrepartie, l'électricité est peu chère au Québec, et comporte une empreinte carbone presque négligeable. Le prix de l'électricité est aussi relativement stable, ce qui confèrera une certaine protection contre la volatilité du diesel. Par unité d'énergie, l'électricité serait moins dispendieuse que le diesel.

Les avantages des camions miniers électriques à batterie sont :

- Véhicule sans émissions. L'électricité fournie par Hydro-Québec a une empreinte essentiellement nulle.
- Tarifs d'électricité faibles et contrôlés par la Régie de l'Énergie. Augmentations limitées et contrôlées de tarifs, ce qui réduit le risque d'augmentation des coûts de transport.
- Diverses possibilités de recharge pour minimiser les temps d'arrêt, incluant la recharge rapide, le changement de batteries, le trolley assist, et le freinage régénératif.

Les désavantages des camions électriques sont :

- Les véhicules de surface ne sont pas encore commercialement disponibles à présent, contrairement aux véhicules souterrains.
- L'autonomie des véhicules pourrait être limitée.
- La recharge de batteries peut être lente, et forcer des périodes d'arrêts.
- Les batteries des véhicules miniers électriques risquent d'être dispendieuses.
- Les infrastructures de recharge rapide ou de trolley assist sont complexes, dispendieuses, et nécessitent de hautes puissances électriques.
- L'effet du froid sur l'autonomie est encore inconnu.

Les véhicules électriques n'étant pas encore commercialement disponibles, il est difficile d'en acquérir à présent, sauf pour des conversions prototypiques. Il est donc recommandé de surveiller les développements commerciaux et technologiques, qui devraient être imminents. Les camions miniers électriques pourraient permettre la réduction de l'ensemble de l'empreinte carbone des opérations de camionnage de la mine.

3.3.1 Nouveau Monde Graphite

Nouveau Monde Graphite est un promoteur qui développe le projet de mine Matawinie, dans la région de Lanaudière au Québec, pour la production de graphite. Le gisement de graphite serait extrait d'une mine à ciel ouvert, produisant environ 2 Mt/an de minerai alimenté au concentrateur [18]. Une cible de leur projet est d'avoir une mine entièrement électrique, leur graphite étant destiné principalement pour l'industrie des batteries [19]. Le projet finalise présentement sa sélection d'équipement mobile, et estime commencer

ses opérations minières en 2022. NMG vise avoir une opération minière entièrement électrique en 2027.

Pour ses camions miniers, NMG a sélectionné le camion Western Star 6900XD, d'une capacité de 36.3 t, dans une flotte de 11 véhicules [18]. Ce modèle de camion est seulement offert par le fournisseur original en format diesel. Une conversion électrique sera effectuée par MEDATECH Engineering Services, un spécialiste ontarien en groupes motopropulseurs et électrification de véhicules. Le moteur diesel sera remplacé par un moteur électrique de 259 kW, et les réservoirs diesel par des batteries à recharge rapide.

Le site de Matawinie sera équipé de stations dédiées à recharge rapide, d'une puissance de 540 kW. Les camions s'arrêteront à chaque cycle pour une période de recharge entre 0.3 et 7 minutes, selon leur niveau de charge et les distances de transport. L'impact du cycle de recharge sur la productivité des véhicules est estimé à des pertes de productivité d'entre 7.8 et 20% [18]. L'autonomie de ces véhicules est limitée par la taille de la batterie, qui est incapable d'effectuer un quart de travail complet. L'intégration de la recharge rapide permet de compenser pour cette faible autonomie, en rechargeant à chaque cycle de transport. Les camions opéreront selon l'horaire de la mine, à 5 jours par semaine, 2 quarts de travail par jour, 8 heures par quart, 51 semaines par année.

Les coûts de conversion des camions miniers ne sont pas déclarés dans le NI 43-101 de NMG. Il est évident que la conversion impose un surcoût par rapport à l'équipement de base tel que conçu par le fournisseur d'origine. En contrepartie, une portion de l'expertise développée par MEDATECH pour la conversion de tels véhicules pourrait être appliquée pour d'autres clients intéressés.

Les excavatrices sur le site seront aussi des véhicules électriques. La mine utilisera deux excavatrices hydrauliques John Deere JD870G à benne de 4.2 m³, électrifiés avec une bobine à câble, alimentés par une sous-station électrique dans la fosse.

3.3.2 E-Dumper

EMining AG est une compagnie suisse, appartenant au groupe Kuhn Schweitz AG, qui développe de l'équipement minier électrifié [20]. À l'été 2019, ils ont publié de l'information sur leur camion minier électrique E-Dumper, une conversion électrique prototypique d'un Komatsu HB605-7 usagé, une version antécédente du véhicule principal sélectionné par Sayona Lithium pour les opérations de la mine Authier [21].



Figure 3: E-Dumper, conversion électrique d'un Komatsu HB605-7 par eMining AG, [22]

La conversion de ce véhicule a impliqué l'addition d'un bloc-piles de 700 kWh, d'une masse de 8 tonnes [22]. Le moteur diesel de 739 HP a été remplacé par un moteur électrique de 789 HP. La recharge secondaire du véhicule se fait par recharge lente, à une station de recharge de 100 kW, ce qui pourrait prendre jusqu'à 10 heures pour une pleine charge [22]. En opération normale, dû à une particularité de la carrière où le E-Dumper est en service, le véhicule n'aurait pas besoin d'être rechargé dans son cycle de service. Le E-Dumper est présentement en tests dans une carrière à flanc de montagne, qui alimente une cimenterie située à la base de la montagne. Le camion remonte la montagne vide, se fait charger de roc au sommet, redescends la montagne avec une cargaison de 65 t tonnes de calcaire, rechargeant ses batteries par freinage régénératif, et largue sa cargaison à la cimenterie. La descente avec une pleine cargaison de roc en freinage régénératif permet de recharger la batterie du camion suffisamment pour lui permettre de remonter vide [21]. Le camion peut donc opérer de manière continue, sans devoir se recharger par recharge lente.

Il faut noter qu'une telle opération cyclique d'auto-recharge par freinage régénératif est très fortement dépendante de la géométrie de la mine et du cycle opérationnel. Un tel cycle de recharge nécessite que le camion monte vide au gisement et redescends avec une pleine cargaison de roc. Ce type de cycle est inhabituel, et n'est pas le cas à la mine Authier.

Ce véhicule est encore prototypique, et n'est pas disponible commercialement. Aucun prix n'est encore avancé pour une telle conversion, pour un acquéreur potentiel. Il illustre toutefois la possibilité de convertir un camion minier de classe de 60 t en véhicule électrique à batteries, particulièrement un modèle apparenté à ceux sélectionnés par Sayona Lithium pour la mine Authier. Un véhicule de ce type pourrait être combiné avec un système de recharge rapide ou un trolley assist pour sortir de la fosse. Le fait que ce véhicule existe et sert en opération permet de documenter son opération et établir des procédures d'entretien.

3.3.3 Volvo Construction Equipment

En 2018, Volvo CE a opéré un projet de démonstration de Site Électrique à carrière Vikan Kross de Skanska, proche de Gothenburg, en Suède. Pendant une période initiale de 10 semaines, ils ont remplacé les équipements conventionnels au diesel de la carrière par des véhicules entièrement électriques, en opération normale.



Figure 4: Opération conventionnelle de la carrière Vikan Kross [23]

L'opération conventionnelle de la carrière reposait sur l'utilisation de trois camions miniers au diesel de 40 t, une excavatrice de 70 t au diesel, et un loader de 50 t au diesel. Le projet de Volvo visait une électrification complète des opérations, pour réduire les émissions de CO₂ au minimum, tout en réduisant le coût des opérations. Les véhicules conventionnels au diesel ont été remplacés par des prototypes de Volvo.

THE ELECTRIC SITE WAY



Figure 5: Opération électrifiée par Volvo [23]

Les trois camions au diesel de 40 t ont été remplacés par huit porte-charges à batterie automatisés HX02 de 15 t.



Figure 6: Porte-charge à batterie automatisé HX02 15 t de Volvo, [24]

Volvo a remplacé trois gros camions par huit véhicules plus petits et automatisés. Cette décision repose sur l'idée de base que plus qu'un véhicule grossit, plus que les batteries deviennent grosses et dispendieuses, et que le temps perdu en recharge est important. En migrant vers des camions plus petits, la taille des batteries est réduite. Il faut plus d'unités pour transporter les mêmes charges, mais une plus grande flotte permet plus de flexibilité. Si une unité est hors service pour une recharge ou un entretien, le reste de la flotte peut compenser. En utilisant des véhicules automatisés, la migration vers une plus grande flotte n'augmente pas les besoins de main d'œuvre, qui sont réduits par rapport au cas de base. L'avenir serait particulièrement prometteur pour les camions miniers autonomes et cette technologie est maintenant mature.

Ces véhicules sont équipés pour une recharge rapide. Une station de recharge rapide est installée sur le trajet des porte-charges, et un cycle de recharge rapide de 90 secondes est intégré à chaque cycle minier. L'automatisation du site et des véhicules qui rapportent le statut de leurs batteries en temps réel permettent un suivi de l'ensemble du site minier et l'optimisation de l'utilisation et de la recharge des véhicules, pour minimiser les pertes de temps et les arrêts.

L'utilisation de véhicules plus petits et légers, avec des systèmes de quatre roues motrices électriques plus puissantes permet de modifier la géométrie de la mine. Les routes de la mine peuvent être plus étroites et serrées, et peuvent avoir des pentes plus fortes. La géométrie de la fosse peut être resserrée, réduisant le volume de matériel stérile à extraire.

Pour l'excavation, l'excavatrice conventionnelle a été remplacée par une excavatrice EX01 hybride diesel/électrique, branchée au réseau électrique par câble. L'excavatrice a été jumelée avec un concasseur mobile électrique pour du concassage sur site, avec une décharge automatisée dans des porte-charges. Ceci réduit la demande sur le loader. Dans le cadre du projet, le loader au diesel conventionnel de 50 t a été remplacé par le LX01, un loader hybride diesel/électrique de 20 t. La réduction de taille était nécessaire pour mieux travailler avec les porte-charges plus petits [23]. Les systèmes hybrides du loader permettent des gains de plus de 35 % d'efficacité énergétique contre un modèle diesel comparable [25].

Volvo indique que les résultats du projet de démonstration ont été impressionnantes. La réduction de l'empreinte de GES de la carrière était de 98%, avec une réduction de coûts énergétiques de 70% et de main d'œuvre de 40%. Ces réductions sont spécifiques au contexte de la carrière, située en Suède. En Suède, le diesel est dispendieux et l'électricité du réseau de distribution, provenant d'hydroélectricité, est peu dispendieuse et carbone neutre. Ce même contexte se trouve au Québec, où se trouve la mine Authier. La consommation de diesel de la carrière est passée de 3360 L/jour à 64 L/jour, et les

émissions de GES de 8700 kg CO₂eq/jour à 166 kg CO₂eq/jour, dû principalement à la réduction de consommation de diesel. La réduction des coûts de main d'œuvre découle de l'automatisation des camions, réduisant le nombre d'opérateurs. [23]

Volvo indique que le système n'est pas encore disponible commercialement, mais qu'il devrait être disponible sous peu. Volvo CE seraient prêts à discuter avec tout client intéressé à acquérir cette famille de véhicules. Les prix ne sont pas encore publiquement disponibles.

Un tel système pourrait être très intéressant pour la mine Authier. L'utilisation de véhicules électriques à batterie plus petits automatisés permettrait d'optimiser le concept minier, de réduire de façon importante les émissions de GES et les coûts énergétiques de la mine, et de réduire les besoins de main d'œuvre. Ces véhicules ont été prouvés dans un projet de démonstration dans une carrière opérationnelle, ce qui permet de valider le concept.

3.4 Migration de carburants : Camions à l'hydrogène

Une pile à combustible est une cellule électrochimique qui utilise un combustible pour produire de l'électricité. Dans une pile à hydrogène, le combustible est de l'hydrogène, combinée avec de l'oxygène atmosphérique, pour produire de l'eau. L'opération d'une pile à hydrogène ne produit donc pas d'émission de GES, mais seulement de la vapeur d'eau. L'électricité produite est utilisée pour alimenter des moteurs électriques, qui assurent la propulsion du véhicule. L'intérêt pour la pile à hydrogène est que ceci permet d'avoir un véhicule opérant à l'électricité, mais qui peut être ravitaillé rapidement avec un combustible, comme un véhicule conventionnel.

Des véhicules de promenade à hydrogène sont commercialement disponibles à présent, mais ce n'est pas encore le cas pour des camions miniers. ENGIE, une firme d'énergie française, vient d'annoncer un programme conjoint avec la minière Anglo American pour le développement d'un camion minier de 300 t à l'hydrogène [26]. Le premier véhicule devrait être opérationnel en 2020.

Le groupe de recherche en hydrogène de CanmetMINING, de Ressource naturelles Canada, rencontrés lors du Energy and Mines World Congress, ont indiqués être disponibles pour développer des technologies pour des équipements mobiles de surface dans la classe de 40 à 60 t. Ils indiquent que des fonds publics pourraient être disponibles pour faciliter le développement de ce concept.

En septembre dernier, le fabricant de moteurs Cummins faisait l'acquisition de Hydrogenics, un fabricant canadien de pile à hydrogène dans le but avoué de s'attaquer au marché de la propulsion des équipements lourds [27].

L'hydrogène peut provenir de plusieurs différentes sources. Air Liquide distribue de l'hydrogène par citerne semi-remorque, à parti de Montréal et procède à la construction d'une usine d'électrolyse à Bécancour. Greenfield Global développe présentement le même genre de projet à Varennes. L'hydrogène peut être produit à partir de gaz naturel, ce qui implique des émissions de GES. Toutefois, l'hydrogène peut aussi être produit par l'électrolyse d'eau. Une station d'électrolyse pourrait être installée sur ou à proximité des installations de Sayona, pour ravitailler les équipements. Le ravitaillement d'un réservoir à hydrogène se fait par tuyau à gaz pressurisé. L'électrolyse requiert de l'électricité, pour séparer l'eau en hydrogène et oxygène. Au Québec, l'électricité provenant de la grille d'Hydro-Québec a une très faible empreinte carbone. L'hydrogène produit avec cette électricité serait donc effectivement carbone neutre. Le prix de l'électricité est aussi relativement stable, ce qui conférera une certaine protection contre la volatilité du diesel. Des fournisseurs de système d'électrolyse sont disponibles à présent au Canada [28].

Le coût des véhicules à pile à hydrogène est encore incertain, mais il est fort probable que les camions à hydrogène seront plus dispendieux que leurs équivalents au diesel. La différence de coût serait principalement liée aux piles à combustible et aux réservoirs à hydrogène, qui sont encore relativement dispendieux. Le système d'électrolyse comporterait aussi des coûts importants.

L'entretien de ce type de véhicule est encore peu connu. La réduction en pièces mécaniques devrait simplifier une portion de l'entretien, mais les piles à combustible, les systèmes électriques et les réservoirs à hydrogène devraient avoir leurs lots de complexités. Les véhicules commerciaux devraient arriver avec des garanties et des protocoles d'entretien élaborées par les fournisseurs, ce qui réduit ce risque. Les véhicules prototypiques seront plus risqués. Les stations d'électrolyse sont présentement disponibles de fournisseurs canadiens connus.

Les avantages des camions à pile à hydrogène sont :

- Véhicule sans émissions de GES.
- La génération d'hydrogène ne produit pas de GES si l'hydrogène est produit par électrolyse. L'électricité fournie par Hydro-Québec a une empreinte essentiellement nulle.
- Remplissage rapide, comparable au diesel.

- Tarifs d'électricité faibles et contrôlés par la Régie de l'Énergie. Augmentations limitées et contrôlées de tarifs, ce qui réduit le risque d'augmentation des coûts de transport.
- Possibilité de véhicules à propulsion électrique à grande autonomie.

Les désavantages des camions à pile à hydrogène sont :

- Les véhicules ne sont pas encore commercialement disponibles.
- L'hydrogène produit à partir de gaz naturel à une empreinte carbone.
- Systèmes d'électrolyse dispendieux.

Les véhicules à hydrogène n'étant pas encore commercialement disponibles, il est difficile d'en acquérir à présent, sauf pour des conversions prototypiques. Il est donc recommandé de surveiller les développements commerciaux et technologiques, qui devraient être imminents. Les camions à hydrogène pourraient permettre d'avoir les avantages d'un véhicule avec une propulsion électrifiée, sans les problèmes d'autonomie des batteries. Une infrastructure de génération et de ravitaillement d'hydrogène serait toutefois requise.

4. Recommandations

Carboniq formule les recommandations suivantes pour les prochaines étapes du projet.

A) Concassage sur site et convoi

Le concassage sur site et convoi permettrait une réduction substantielle de la consommation de diesel et des émissions de GES. Peu importe les technologies ou carburants sélectionnées pour les équipements mobiles, l'utilisation d'infrastructure de convoi fixe pour la sortie de roc de la fosse réduirait les besoins de transport par véhicule. Le concassage sur site et convoi permettrait d'électrifier le transport de matériel, en se reposant sur une technologie connue, mature et bien maîtrisée. Le concept minier, la séquence minière et la géométrie de la fosse devront être revus pour permettre l'installation de ces systèmes. Lorsque le concept aura été revu, il sera possible d'évaluer la réduction des tonnes de matériel à transporter par camion, des kilomètres voyagés, et du nombre ultime de camions nécessaires. Cette technologie offre le potentiel de réduire les coûts d'opération, les coûts d'énergie, les coûts de main d'œuvre, et d'augmenter la santé et sécurité sur le site. Le concassage sur site et convoi devrait être analysé comme étant la solution à privilégier, dans tous les cas et peu importe les autres technologies ou énergies retenues.

B) Engins miniers électriques

Pour les camions miniers, après le déploiement du concassage et du convoi, les véhicules électriques seraient une avenue intéressante. On constate l'arrivée d'exemples

de véhicules électriques à batterie de surface de taille similaire à ceux retenus par Sayona, dont un Komatsu de 60 t du même modèle. Un tel véhicule, jumelé à un trolley assist, permettrait de maintenir une stratégie minière similaire à celle développée pour Authier. La stratégie minière peut aussi être adaptée. Les équipements retenus par NMG sont un peu plus petits que ceux de Sayona, mais dans le même ordre de grandeur. L'écosystème électrifié automatisé de Volvo est particulièrement attrayant. L'utilisation de plusieurs petits camions offre une plus grande flexibilité que des plus grosses unités. Cet écosystème intègre des camions, des chargeurs et des excavatrices électrifiés et écopéformants, tout en réduisant les coûts d'opération et de main d'œuvre, avec une empreinte de GES presque nulle. Dans un contexte québécois, où l'électricité est peu chère et renouvelable, et la main d'œuvre peut devenir un défi une telle solution est appropriée. Les systèmes de recharge rapide permettent de mitiger les craintes d'autonomie des véhicules à batterie. Le système proposé par Volvo serait à analyser en plus de détail.

L'hydrogène pourrait offrir une solution aux problèmes d'autonomie des véhicules à batteries, tout en conservant tous les bénéfices d'un moteur électrique. Toutefois, les seuls équipements possibles sont encore au stade de la recherche et développement. CanmetMINING serait prêt à assister au développement de cette classe de véhicules. Nous ne croyons pas que l'hydrogène, via une pile à combustible, puisse constituer une alternative envisageable à court terme.

C) Engins miniers au gaz naturel (renouvelable ou pas)

Les systèmes au gaz naturel offrent certaines possibilités de décarbonisation, mais elles sont relativement limitées. À un taux de substitution de 100%, l'utilisation de gaz naturel réduit les émissions d'environ 30% par rapport au diesel. Toutefois, dans les camions miniers, le taux de substitution de diesel est limité à 50%, dans des systèmes dual-fuel. Le potentiel de réduction est donc relativement faible, quoique le GNR pourrait aider à effectuer des réductions plus importantes. Le gaz naturel n'est disponible dans des véhicules miniers que par des conversions après-marché, avec les complexités que ceci pourrait engendrer. Nous ne recommandons pas de considérer cette avenue pour les engins miniers.

D) Le biodiesel

Le biodiesel serait une option à retenir pour les équipements où aucune alternative ne peut être trouvée.

5. Références

- [1] S. Piché et J. Vieira, «Projet Authier - Inventaire des émissions de gaz à effet de serre - 657208-SLQA-RP03-0A,» SNC-Lavalin, Montréal, 2019.
- [2] R. Muralidharan, T. Kirk et T. K. Blank, «Pulling the weight of heavy truck decarbonization - Exploring pathways to decarbonize bulk material hauling in mining,» Rocky Mountain Institute, 2019.
- [3] A. Topf, «In-pit crushing and conveying systems changing the way ore is moved,» Mining.com, 16 02 2017. [En ligne]. Available: <http://www.mining.com/in-pit-crushing-systems-changing-the-way-ore-is-moved/>. [Accès le 16 12 2019].
- [4] E. Isokangas, «Lower costs with in-pit crushing and conveying,» *Canadian Mining Journal*, p. 01, 04 2017 2019.
- [5] Régie de l'énergie, «Carburant diesel - Prix moyen affiché - Par région administrative du Québec,» 03 12 2019. [En ligne]. Available: http://www.regie-energie.qc.ca/energie/archives/diesel/diesel_moyen2019.pdf. [Accès le 19 12 2019].
- [6] Revenu Québec, «CA-1 Tableau des taux de taxe applicables dans les différentes régions du Québec en vigueur à partir du 1er avril 2015 - Loi concernant la taxe sur les carburants,» Revenu Québec, 06 2017. [En ligne]. Available: <https://www.revenuquebec.ca/documents/fr/formulaires/ca/ca-1%282017-06%29.pdf>. [Accès le 19 12 2019].
- [7] Société en commandite Gaz Métro, «Mesures relatives à l'achat et la vente de gaz naturel renouvelable, R-4008-2017,» 07 07 2017. [En ligne]. Available: http://publicsde.regie-energie.qc.ca/projets/411/DocPrj/R-4008-2017-B-0005-Demande-Piece-2017_07_07.pdf. [Accès le 19 12 2019].
- [8] InterGroup Consultants Ltd., «Natural gas as a fuel for mine haul trucks - NRCan Contract #: 3000631963,» InterGroup Consultants Ltd., Winnipeg, 2017.
- [9] GFS Corp, «EVO-MT® System Technology,» [En ligne]. Available: <https://www.gfs-corp.com/industry.php/mining/technology/>.
- [10] Mine Energy Solutions, «Mine Truck Conversion,» [En ligne]. Available: <https://www.mineenergysolutions.com/mine-truck-conversion/>.
- [11] T. Deshaies, «Un promoteur développe un projet de liquéfaction de gaz naturel à Val-d'Or,» *Radio Canada - ICI Abitibi-Témiscamingue*, 21 11 2019.
- [12] Artisan Vehicles, «Z50 Battery-Electric Zero Emission 50-tonne Haul Truck,» [En ligne]. Available: <https://www.artisanvehicles.com/z50/>.
- [13] Epiroc, «Minetruck MT42 Battery,» [En ligne]. Available: <https://www.epiroc.com/en-ca/products/loaders-and-trucks/electric-trucks/minetruck-mt42-battery>.

- [14] Sandvik, «Sandvik LH514E,» [En ligne]. Available: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/underground-loaders-and-trucks/electric-underground-lhds/lh514e-electric-lhd/>.
- [15] A. Schinkel, «Decarbonizing mine fleets - Key drivers and next steps - Macassa's experience adopting a battery electric fleet,» chez *Energy and Mines World Congress*, Toronto, 2019.
- [16] M. van Koppen, «All-Electric Case Study: Operating a Battery Powered Fleet,» chez *Energy and Mines World Congress*, Toronto, 2019.
- [17] I. Leblanc, D. Janusaukas et J.-F. St-Onge, «Potential economic and operational benefits and impacts of trolley assist in open pit mining,» BBA, Montreal, 2014.
- [18] B.-O. Martel, Y. Cannus, O. Peters, M. Paradis, P. Perez, E. Pengel, J. Zampini, M. Saint-Amour et C. M. Charbonneau, «NI 43-101 Feasibility study report for the Matawinie graphite project,» Met-Chem DRA, Montreal, 2018.
- [19] D. F. Lyon, «The Road To All-Electric Open-Pit Mining,» chez *Energy and Mines World Congress*, Toronto, 2019.
- [20] E Mining AG, «E Mining uses the lastest technology,» [En ligne]. Available: <https://www.emining.ch/en/technology.html>. [Accès le 17 12 2019].
- [21] G. H. Ruffo, «Meet The World's Largest EV: The Elektro Dumper,» *InsideEVs*, 22 06 2019.
- [22] G. H. Ruffo, «eDumper Fact Check Reveals Its Battery Pack Weighs 8 Tons,» *InsideEVs*, 30 06 2019.
- [23] D. Nus, «Electric Site Project - Autonomy & Electrification potential quantified,» chez *Energy and Mines World Congress*, Toronto, 2019.
- [24] Volvo CE, «Testing begins at world's first 'emission-free' quarry,» 29 08 2018. [En ligne]. Available: <https://www.volvoce.com/global/en/news-and-events/press-releases/2018/testing-begins-at-worlds-first-emission-free-quarry/>. [Accès le 17 12 2019].
- [25] Volvo CE, «LX01 prototype hybrid wheel loader delivers around 50% fuel efficiency improvement during customer testing,» 12 07 2017. [En ligne]. Available: <https://www.volvoce.com/global/en/news-and-events/press-releases/2017/lx01-prototype-hybrid-wheel-loader-delivers-50-percent-fuel-efficiency-improvement/>. [Accès le 17 12 2019].
- [26] ENGIE, «ENGIE and Anglo American to co-develop renewable hydrogen solution to decarbonize the mining industry,» 10 10 2019. [En ligne]. Available: <https://www.engie.com/en/journalists/press-releases/anglo-american-develop-renewable-hydrogen-solution-decarbonize-mining-industry>. [Accès le 17 12 2019].

- [27] M. Burgess, «Cummins closes on Hydrogenics acquisition,» *GasWorld*, 09 09 2019. [En ligne]. Available: <https://www.gasworld.com/cummins-completes-hydrogenics-acquisition/2017755.article>. [Accès le 17 12 2019].
- [28] Hydrogenics, «Hydrogenics - Innovators in Hydrogen technology & Solutions,» [En ligne]. Available: <https://www.hydrogenics.com/>. [Accès le 14 12 2019].

Annexe A

Liste de livrables 2019-11-28

Projet Sayona – Phase 1 : Liste de livrables

Ce document présente les livrables majeurs requis pour amorcer l'étude de la neutralité carbone des opérations de Sayona Québec. Ces livrables constituent des évaluations sommaires d'efforts pour la réduction des émissions du projet, divisés en éléments distincts et bien définis. Les livrables pourront, dans le futur, être intégrés dans une étude compréhensive.

1. Livrable 1 : Compensation de la dette carbone des activités de déboisement

Une étape importante de la préproduction de la mine Authier est le déboisement nécessaire pour l'implantation de la mine, des installations, et de l'infrastructure opérationnelle. Des émissions de GES sont liées à la perte en stock carbone associée au déboisement, la consommation de carburant lors des activités de déboisement, et la transformation du bois coupé. Cette première étape est inévitable, et constitue une dette initiale du projet, qui doit être compensée. L'empreinte initiale du déboisement est évaluée à environ 44 000 t CO₂eq

Les composantes de ce livrable sont :

- Évaluation de la dette initiale.
- Identification d'un inventaire de mécanismes compensatoires.
- Évaluation socio-économique des mécanismes compensatoires.
- Établissement d'un plan de compensation.

Une version préliminaire de ce livrable serait prête pour le 19 décembre 2019, comportant des éléments des deux premières composantes.

L'évaluation de l'empreinte considère qu'il n'y a aucun bois de qualité commerciale dans toute la superficie qui aura été déboisée pour le projet Authier. Il y aurait lieu de vérifier cette hypothèse, car la valorisation du bois qui serait de qualité commerciale pourrait réduire de façon sensible la perte de stock de carbone puisque ce bois serait plutôt déplacé et incorporé dans de nouvelles structures. Il ne sera pas possible de réaliser cette validation avec la première version du livrable.

2. Livrable 2 : Gestion de l'empreinte du transport routier

Le transport routier est présent dans plusieurs étapes de la chaîne logistique de la production de lithium. Le minerai produit de la mine Authier serait acheminé par camion au concentrateur de la mine de NAL, une distance de 68 km. Une fois traité, le concentré produit à NAL à partir des mines Authier et NAL serait acheminé par transport routier de l'Abitibi au port de Trois-Rivières. L'utilisation de diesel pour le transport routier de minerai et de concentré représente une quantité importante de gaz à effets de serre. Le transport routier sera revu pour réduire l'empreinte de GES.

Les composantes de ce livrable sont :

- Identification des besoins de transport et de carburant.
- Identification des alternatives de transport.
- Identification des possibilités de conversion ou de substitution de carburant, ou d'électrification.
- Évaluation de la logistique opérationnelle.
- Évaluation technique des mécanismes de conversion.
- Optimisation du trajet.
- Évaluation des réductions des émissions.

Une version préliminaire de ce livrable serait prête pour le 19 décembre 2019, comportant des éléments des quatre premières composantes. Le livrable complet nécessitera l'intervention de fournisseurs d'équipement mobile et d'infrastructure.

3. Livrable 3 : Gestion de l'empreinte du transport minier

Une mine à ciel ouvert repose sur l'utilisation de camions miniers pour le transport du minerai et des stériles. Ordinairement, ces camions opèrent au diesel. La modification des méthodes minières et la migration des camions du diesel vers des énergies plus propres permettrait une réduction de leur empreinte carbone.

Les composantes de ce livrable sont :

- Identification des besoins de transport et de carburant.
- Identification des alternatives de transport.
- Identification des possibilités de conversion ou de substitution de carburant, ou d'électrification.
- Évaluation technique des mécanismes de conversion.
- Évaluation de la logistique opérationnelle.
- Évaluation des réductions des émissions.

Une version préliminaire de ce livrable serait prête pour le 19 décembre 2019, comportant des éléments des trois premières composantes. Le livrable complet nécessitera l'intervention de fournisseurs d'équipement mobile et d'infrastructure gazière.

4. **Livrable 4 : Approvisionnement en GNC ou GNL**

La conversion des équipements de transport routier et de transport minier au gaz naturel est une voie possible pour la substitution de carburant diesel. Ceci implique des modifications à la logistique opérationnelle des sites miniers, et repose sur la disponibilité et présence d'infrastructure de compression ou liquéfaction, stockage, manutention et livraison de ces carburants. La présence de multiples sites et de partenaires externes potentiels rends la logistique encore plus complexe, mais offre des possibilités de synergies.

Les composantes de ce livrable sont :

- Identification du ou des utilisateurs potentiels.
- Identification des besoins en carburant.
- Sélection technique du type de carburant.
- Identification de l'infrastructure requise.
- Planification logistique avec le distributeur de gaz naturel.

Ce livrable serait prêt au printemps 2020.

5. **Livrable 5 : Approvisionnement en gaz naturel renouvelable**

Le gaz naturel renouvelable provient de sources biogéniques, et est considéré comme étant carboneutre. L'utilisation de gaz naturel renouvelable est une option additionnelle à l'utilisation de gaz naturel dans les transports, permettant une réduction supplémentaire de l'empreinte carbone. Le marché du GNR au Québec est toutefois encore relativement restreint, et l'approvisionnement est incertain. Un plan d'approvisionnement devrait être établi pour permettre l'acquisition des volumes de gaz requis.

Les composantes de ce livrable sont :

- Identification des besoins en carburant.
- Planification avec le distributeur de gaz naturel.
- Identification des volumes de GNR disponible.
- Développement du plan d'approvisionnement.

Ce livrable serait prêt au printemps 2020.

6. **Livrable 6 : Compensation de l'empreinte résiduelle**

Malgré toutes les mesures déployées, il sera impossible d'éliminer complètement les émissions de GES des opérations de Sayona. Pour atteindre la neutralité, les émissions résiduelles devront être compensées.

Annexe B

Camions à plus faibles émissions de GES pour le transport sur route du mineraï et du concentré

D. Ducasse, Énergir



**Camions à plus faibles émissions de GES pour le
transport sur route du minerai et du concentré**

—
Projet Sayona

David Ducasse, ing.
Novembre 2019

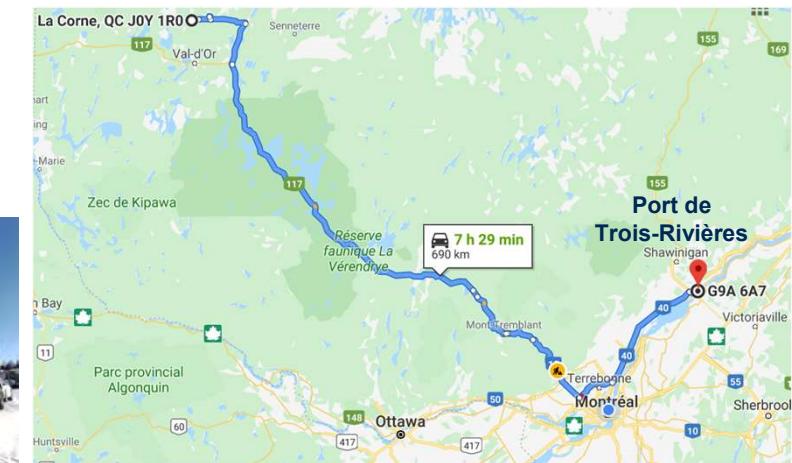
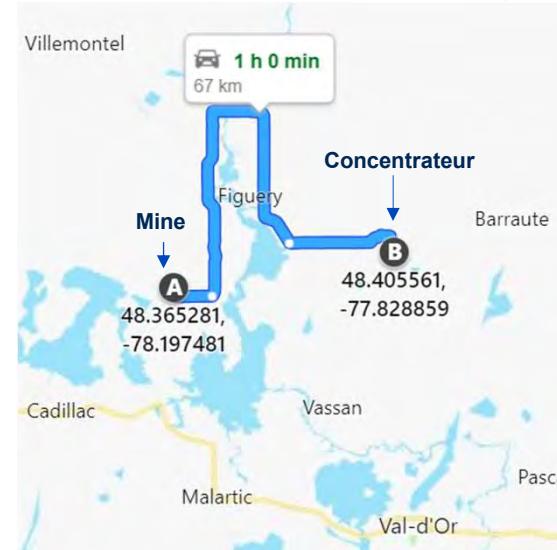
Transport du minerai et du concentré



Hypothèses:

- ❑ 2600 tonnes de minerai / jour entre la mine et le concentrateur.
 - ✓ Distance: 68 km sur routes publiques
 - ✓ Camions de **40 tonnes** de charge utile
 - ✓ 8 camions @ 6 livraisons par jour (350 jours/année)
 - ✓ 43L/100 km (38L/100km à vide et 53L/100km chargé)
 - = **982K litres diesel / an**

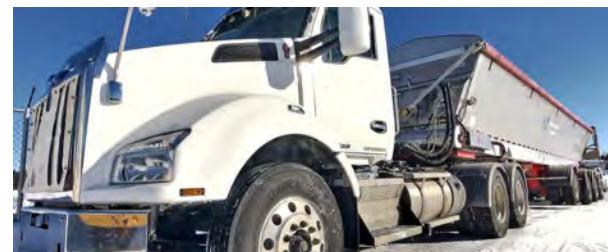
- ❑ 115 000 tonnes de concentré/an entre le concentrateur et le port de Trois-Rivières.
 - ✓ Distance: 700 km sur routes publiques
 - ✓ Camions de **40 tonnes** de charge utile
 - ✓ 18 camions @ 3 livraisons par semaine (52 semaine/année)
 - ✓ 43L/100 km (38L/100km à vide et 53L/100km chargé)
 - = **1.630M litres diesel / an**



Durée de vie des camions ≈ 1.0M à 1.5M Km

Cycle de remplacement de 5 à 7 ans

Durée de vie du projet: 16 ans



Technologies possibles camions-tracteurs PNBV > 56T



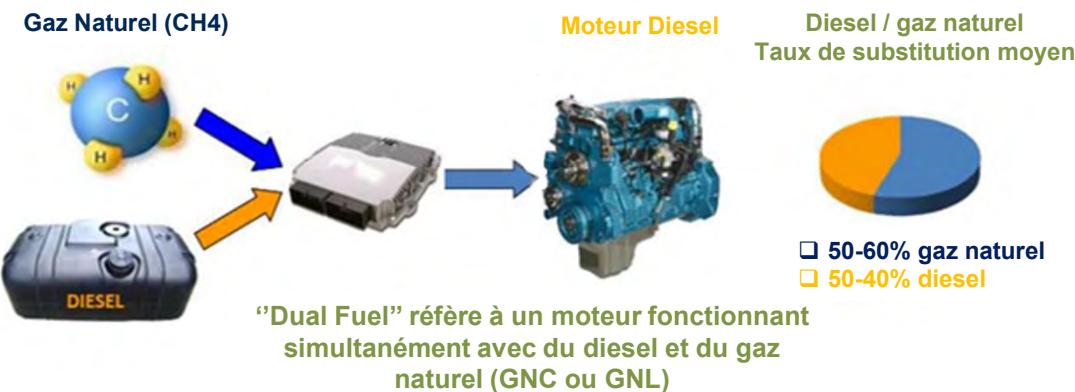
→En attendant les technologies de camions électriques et/ou hydrogène,
l'hydride diesel avec gaz naturel renouvelable demeure le compromis optimal

Motorisations	Disponibles			À venir ?		
	Diesel	Gaz Naturel (Cummins-Wesport)	Hybride Diesel + GNC	Électrique à batteries 480 kWh	Hydride électrique à batteries avec prolongateur d'autonomie GNC	Hydrogène à batteries
Disponibilité commerciale	Oui	Oui	Oui	2021 +	2023 +	2025 +
CAPEX Avec subventions	180 000\$	230 000 \$	240 000 \$	350 000 \$	350 000 \$	375 000 \$
OPEX carburant et entretien	0,50 \$/km	0,34 \$/km	0,42 \$/km	0,26 \$/km	0,30 \$/km	0,56 \$/km
Poids à vide	9.1 T	9.6 T	9.3 T	10.9 T	9.7 T	9.2 T
Puissance max	600 hp +	400 hp	600 hp +	500 hp	500 hp	1000 hp
Charge utile max	45 T	35 T	45 T	40 T	40 T	50 T
Autonomie	2 000 km	1 000 km	1 500 km	350 km (15T) 120 km (40T)	800 km	1 500 km
GES vs Diesel	-	-18% -100% (GNR)	-14% -50% (GNR)	-100%	-20% -100% (GNR)	-100%

Technologies proposées

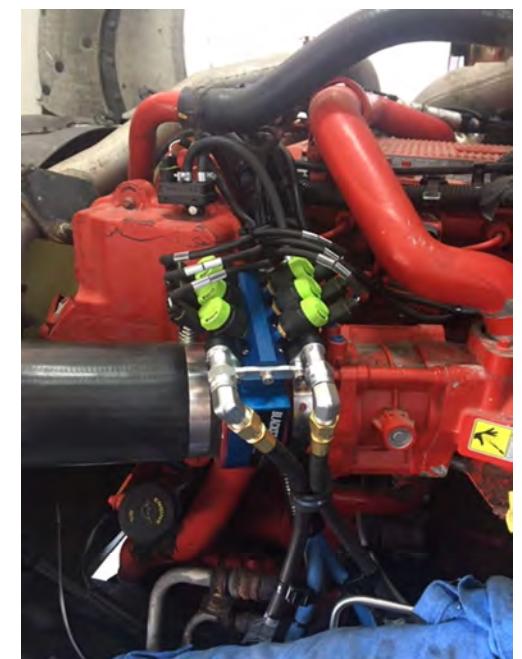


Système Hybride DUAL FUEL (Diesel - Gaz Naturel)



- S'installe sur moteur diesel de toute cylindrée
- Système du manufacturier ICOM actuellement commercialisé pour les camions routiers avec PNBV de 56 Tonnes
- Technologie ICOM supportée par NGIF: Optimization and Demonstration of Efficient Dual Fuel Technology on Heavy Duty Vehicles **NGIF Project No. 2018-0159**

Système d'injection de gaz naturel sur un moteur diesel



<http://www.icomnorthamerica.com/wp-content/uploads/ICOM-Dynamic-Dual-Fuel-Marketing-Brochure-Rev-3.pdf>

<http://www.ngif.ca/fr/>

Technologies proposées



Le gaz naturel comprimé (GNC)

Gaz naturel à l'état gazeux **comprimé à 3 600 psi** pour son stockage dans les réservoirs des véhicules.

Comprimé, le GNC occupe **300 fois moins d'espace**.



Station de ravitaillement en GNC



Le gaz naturel :

- 30% moins de GES à la combustion que le diesel
- 90% moins de particules fine
- 40% moins de NOx
- Jusqu'à 40% moins cher que le diesel

Remplissage d'un réservoir de GNC
(moins de 15 minutes)



Réseau de stations publiques



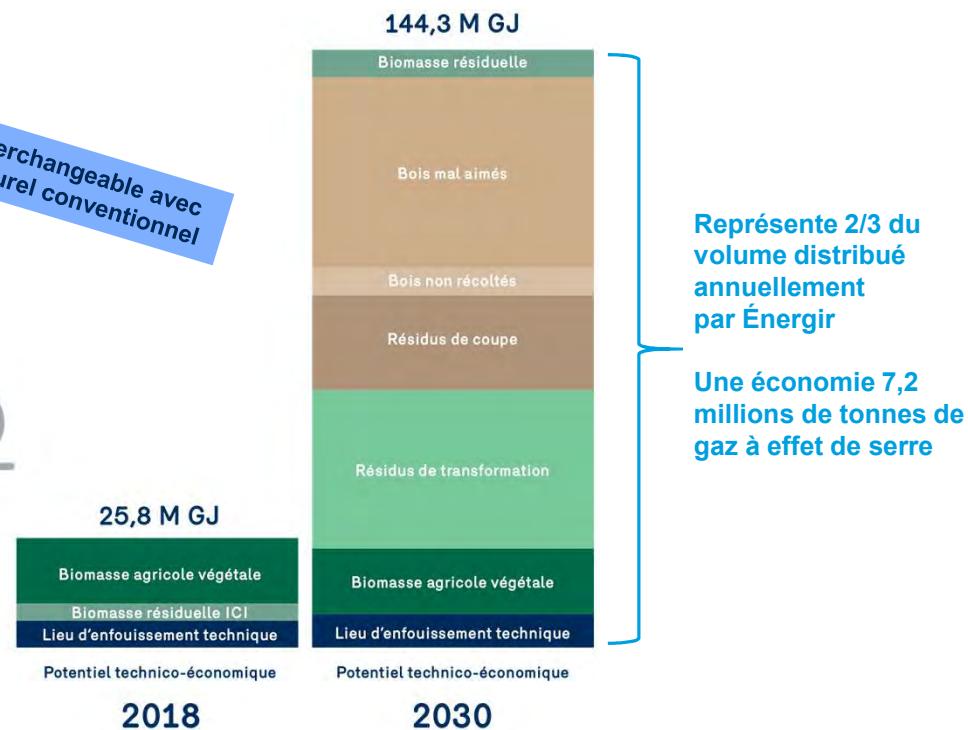
Le GNR facteur clé à la transition énergétique: une énergie propre, souple et produite localement

énergir

Chaîne de valeur simplifiée du GNR



Potentiel de production de GNR au Québec¹



Normes sur les combustibles propres (NCP)



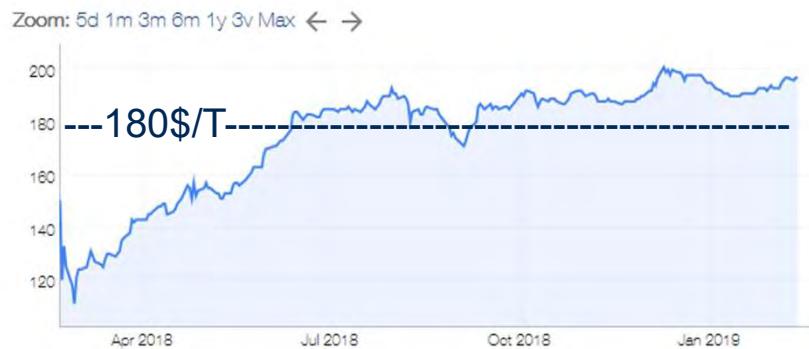
Remplacement de combustible à utilisation finale

*“Dans le groupe des combustibles liquides, le remplacement d'un combustible fossile d'intensité plus élevée en carbone utilisé pour le transport par les combustibles à plus faible teneur en carbone suivantes seront **admissibles à la génération de crédits** : le gaz naturel, le propane et les autres sources d'énergie sans carbone, comme l'électricité ou l'hydrogène.”*

- **Le projet de règlement définitif devrait être publié dans la Partie I de la *Gazette du Canada* en 2020.**

California Low Carbon Fuel Standard Credit price

USD/ton, data updated daily.
Daily figure is based on last five (5) days rolling average.



Environnement et
Changement climatique Canada

Environment and
Climate Change Canada

Canada

Bénéfices potentiels de la technologie Hydride Diesel - GNC



Transport du minerai et du concentré / année:

	GNC Conventionnel		GNC Renouvelable	
	Sans NPC	Avec NPC (2022)	Sans NPC	Avec NPC (2022)
Substitution de diesel			50% 1 300 000 L	
Réduction de GES	14% 1 000 T CO ₂ eq.		50% 3 630 T CO ₂ eq.	
Prix du Diesel ¹			1,18\$/ litre	
Prix du GNC ²	0,61\$ / DLE		0,97\$ / DLE	
Crédits NPC ³	-	- 0,089\$/DLE	-	- 0,293\$/DLE
Économies de carburant	24% 743 000 \$	29% 899 000 \$	9% 276 000 \$	21% 660 000 \$

1:Régie de l'Énergie, prix moyen affiché 60 derniers mois (avant taxes de ventes)

2:Prix moyen en station publique (avant taxes de ventes). Prime GNR de 15\$/GJ

3:Norme sur les carburants propres, en vigueur le 1^{er} janvier 2022, Valeur du crédit estimé à 100\$/T CO₂ eq.

DLE: Diesel Litres Équivalent (énergie)

Camions Hydride Diesel-GNC

énergir



- ✓ Coût du système: 50K à 75K \$
- ✓ Aide financière à l'acquisition: → à venir
- ✓ Économie sur les coûts de carburant jusqu'à 30%
- ✓ Démontable et réutilisable sur camions subséquents (amortissement du système sur plusieurs camions)
- ✓ Réduction des GES de plus de 15%
- ✓ Réduction des émissions de NOx et de PM de 40%
- ✓ Moins d'injection d'urée et système anti-pollution plus durable

Récapitulatif du projet : Phase 1

Ce document résume le contenu du *Plan d'écologisation des opérations de lithium – Phase 1*, Version 02-F, produit par Carboniq pour Sayona Lithium, en date du 30 janvier 2020.

L'analyse des émissions est basée sur le rapport *Projet Authier – Inventaire des émissions de gaz à effet de serre*, version de novembre 2019, produit par SNC-Lavalin Environnement. Une version subséquente de cet inventaire a été produite par SNC-Lavalin, mais cette version a été remise à Carboniq après la production de notre l'analyse de Carboniq.

1. Livrable 1 : Compensation de la dette carbone des activités de déboisement

Origine des émissions

Perte en stock de carbone associée au déboisement	42 494 t CO ₂ eq
Consommation en carburant des équipements	953 t CO ₂ eq
Transformation du bois coupé	731 t CO ₂ eq
Total	44 152 t CO ₂ eq

Méthode de réduction

- Réduction des surfaces déboisées : Le plan minier déboiserait 206 ha de forêt. En réduisant la superficie au minimum nécessaire, ceci réduirait les pertes.
- Déboisement par étapes : Déboiser seulement lorsqu'absolument et immédiatement nécessaire, pour éviter coupes inutiles.
- Valoriser biomasse récoltée, en maximisant séquestration.

Compensation de l'empreinte

- Achats de crédits chez Carbone Boréal. Crédits coutent entre 28 et 35 \$/ t CO₂ eq, générés par la plantation d'arbres. Coût de compensation entre 1.2 et 1.5 M\$. Retombées toutefois au Saguenay, et non en Abitibi.
- Répliquer ou étendre Carbone Boréal en Abitibi : Possibilité de travailler avec l'UQAT, pour retombées locales.
- Développer projets de migration énergétique en région.

2. Livrable 2 : Gestion de l'empreinte du transport routier

Le transport routier est estimé utilisant des camions semi-remorque, en train routier à deux remorques, d'une capacité totale de 40 t. En utilisant des moyennes annuelles des volumes de minerai et de concentré rapportés, et des distances de 68 km entre Authier et NAL, et 700 km entre NAL et Trois-Rivières, on calcule :

Trajet	Tonnage (t/an)	Nombre de voyages	Consommation de diesel (L/an)	Émission totales CO ₂ eq (t/an)
Minerai Authier - Transport de Authier à NAL	864 071	21 602	1 057 623	2 887.4
Concentré Authier - Transport de NAL à Trois-Rivières	120 500	3 013	1 518 300	4 145.1
Concentré NAL - Transport de NAL à Trois-Rivières	150 194	3 755	1 892 444	5 166.6

Alternatives au camionnage

- Transport par train
 - Réduction des émissions de plus de 90%.
 - Réduction massif du nombre de voyages, et dépenses OPEX.
 - Raccordement de 22 km pour Authier, 8 km pour NAL.
 - CAPEX élevé, estimé entre 1.2 et 2.4 M\$/km pour un chemin de fer.
 - Possibilité de raccorder seulement NAL?
- Pipeline
 - Opération simple, sans main d'œuvre, électrifiée, sans émissions.
 - Requiert infrastructure de broyage à Authier, pipeline, stations de pompe.
 - Enjeux : traverse de la rivière Harricana, risque environnemental et social.
 - CAPEX élevé. Raccordement d'environ 30-35 km.
- Traitement partiel minerai à Authier
 - Réduit volume transporté.
 - Problème avec l'ajout d'eau, ce qui augmente la masse.
 - Dédoublement des infrastructures de traitement, dispendieux et complexe. Ajout de personnel.
- Remise en service de la raffinerie, produire du carbonate de lithium
 - Réduit volume transporté de Authier à Trois-Rivières de 87%.
 - Coût très cher (200 M\$).

- Change business case de Sayona.
- Génère des GES dans les opérations de la raffinerie.

Options pour réduire impact du camionnage

- Construction d'un pont sur la rivière Haricana.
 - Réduit trajet de 68 km à environ 35 km (one way).
 - Contourne ville d'Amos, augmente acceptabilité sociale.
 - L'endroit idéal pour le pont comporte plusieurs chalets et résidences, problème d'acceptabilité sociale.
 - Coût du pont inconnu.
- Biodiesel
 - Dispensieux, et disponibilité limitée
 - Pas de substitution à 100%, mélanges souvent 20/80 avec diesel conv.
 - Utilisable sur équipements actuels, et ensemble de la flotte.
 - Impact sur garanties des fabricants?
- Gaz naturel : GNC ou GNL
 - Équipement commercialement disponible, directement des fournisseurs OEM.
 - Infrastructure de compression/liquéfaction connue et disponible.
 - Coût relativement faible et stable.
 - Réduction des émissions de 30% vs. diesel, 100% si GNR.
 - Puissance limitée. Incapable de transporter 40 t de charge, limitée à 30-35 t de chargement. Augmentation du nombre de voyages.
 - Autonomie réduite vs diesel. Requiert ravitaillement pour trajet NAL/Trois-Rivières.
- Camions électriques à batteries
 - Pas encore disponibles commercialement, mais arrivée imminente.
 - Coût en capital plus élevé qu'équipement au diesel, mais opération devrait être plus basse.
 - Possibilité de programme subventionnaire.
 - Autonomie suffisante pour service entre Authier et NAL, mais nettement insuffisante pour NAL et Trois-Rivières.
 - Possibilité de recharge rapide, intégration dans les cycles de chargement/déchargement du minerai à Authier et NAL.
- Camions à l'hydrogène
 - Pas encore disponible. Arrivée d'ici quelques années.
 - Équipement d'électrolyse encore dispensieux. Détermine le coût de l'hydrogène.
 - Remplissage rapide, comparable au diesel.
 - Aucune infrastructure de remplissage à présent.
 - Empreinte essentiellement nulle si fait à partir d'électricité.

3. Livrable 3 : Gestion de l'empreinte du transport minier

Le plan minier repose sur des camions miniers Komatsu de 60 t et 40 t, opérant au diesel. Les émissions liées au camions environ la moitié de toutes les émissions des équipements lourds, à :

Année	Émissions machinerie lourde (mine et usine) (t CO ₂ eq)	Émissions camion (t CO ₂ eq)	Diesel camion (L)
Préproduction	1 380	500	185 779
1	6 086	2 419	899 596
2	6 167	2 457	913 798
3	9 933	4 407	1 638 764
4	14 683	7 351	2 733 670
5	19 341	10 764	4 002 932
6	21 341	12 389	4 607 339
7	22 064	13 000	4 834 617
8	19 087	10 564	3 928 728
9	13 701	6 698	2 490 800
10	10 449	4 700	1 747 956
11	6 429	2 582	960 137
12	4 247	1 594	592 912
13	3 737	1 380	513 207
14	3 155	1 143	425 086
Restauration	4 825	3 006	1 117 878
Total LOM	166 625	84 954	31 593 201

Alternative au camions miniers

- In-pit crushing and conveying (IPCC)
 - Utilisation d'un concasseur dans la mine, et de convoyeurs pour sortir le minerai de la fosse, au lieu de camions. Technologie connue et mature.
 - Plus grande automatisation du mouvement de matériel. Réduction des mouvements des camions, de la consommation diesel, des km voyagés.
 - Réduction de main d'œuvre et d'OPEx.
 - Plan minier plus rigide et compliqué.

Écologisation du camionnage

- Biodiesel
 - Dispensieux, et disponibilité limitée
 - Pas de substitution à 100%, mélanges souvent 20/80 avec diesel conv.
 - Utilisable sur équipements actuels, et ensemble de la flotte.
 - Impact sur garanties des fabricants?

- Gaz naturel : GNC ou GNL
 - Équipement de conversion après-marché, pas disponible dans la taille des camions de Sayona.
 - Substitution limitée, dans des systèmes hybrides gaz nat/diesel.
 - Compliqué et pas très efficace.
 - Réductions de GES modestes.
- Camions électriques à batteries
 - Camions commercialement disponibles en souterrain, pas encore en surface.
 - Coût en capital plus élevé qu'équipement au diesel, mais opération devrait être plus basse.
 - Possibilité de programme subventionnaire.
 - Exemples de projets d'électrification : Volvo (systèmes robotiques testés en carrière), eDumper (camion en montagne qui n'a jamais besoin d'être rechargeé), Nouveau Monde Graphite (mine 100% électrique au Québec).
 - Possibilité de recharge rapide (intégrée au cycle minier) ou de trolley-assist.
- Camions à l'hydrogène
 - Pas encore disponible. Arrivée d'ici quelques années.
 - Équipement d'électrolyse encore dispendieux. Détermine le coût de l'hydrogène.
 - Remplissage rapide, comparable au diesel.
 - Empreinte essentiellement nulle si fait à partir d'électricité.
 - Le groupe CANMET mining de Ressources Naturels Canada étudie le dossier. Prêts à faire un projet de recherche.