

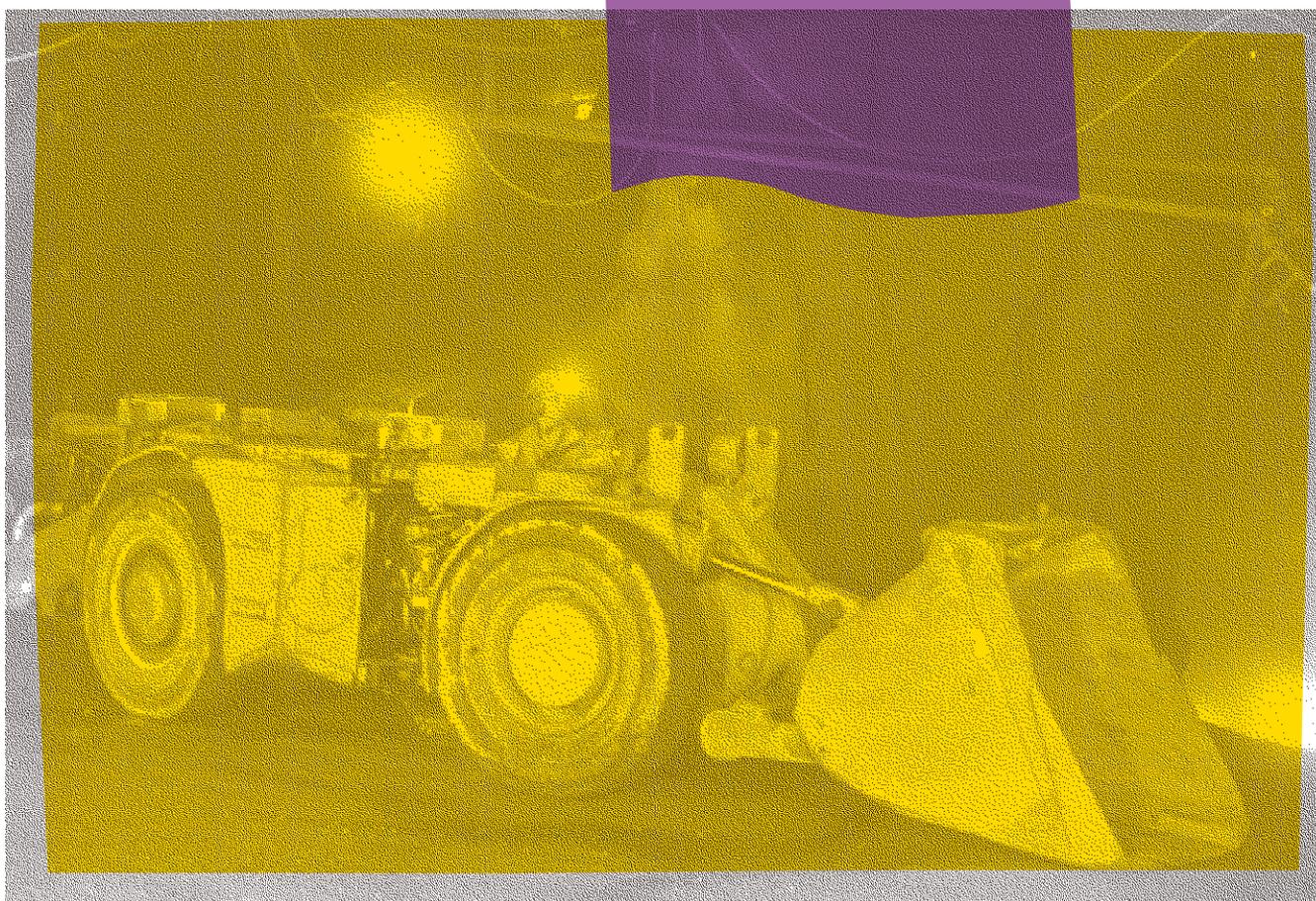
Comparaison des émissions diesels d'une chargeuse-navette classique et d'une version hybride proposée

David A. Young
Brent Rubeli
Mahe Gangal
Vince Feres
Michel Grenier

ÉTUDES ET RECHERCHES

R-374

RAPPORT





Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES *travaillent pour vous !*

MISSION

- Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.

Abonnement : 1-877-221-7046

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
juin 2004

Comparaison des émissions diesels d'une chargeuse-navette classique et d'une version hybride proposée

David A. Young, Brent Rubeli, Mahe Gangal
Vince Feres et Michel Grenier
Ressources naturelles Canada
Laboratoires des mines
et des sciences minérales - CANMET

ÉTUDES ET
RECHERCHES

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

**Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.**

SOMMAIRE

Ce rapport présente les résultats d'essais en laboratoire effectués afin de démontrer les bénéfices de la technologie hybride diesel-électrique par rapport à une technologie diesel classique. Une chargeuse-navette classique de 1,5 verge cube équipée d'un moteur Deutz F4L912W de 49 hp est comparée à une chargeuse-navette hybride équipée d'un moteur Deutz F2L2011 de 31 hp utilisé pour charger un groupe de batteries. Les batteries alimentent un moteur électrique de capacité suffisante pour effectuer les tâches de la chargeuse-navette classique. Le véhicule hybride est décrit en détail dans un autre rapport [1]. Ce travail fait partie d'une initiative visant à concevoir et à réaliser une chargeuse-navette hybride qui sera construite et mise à l'essai dans une mine souterraine.

En théorie, les avantages d'un système hybride par rapport à un système classique équivalent devraient être appréciables du point de vue de la quantité des émissions toxiques. Premièrement, la puissance requise au niveau du moteur diesel est de beaucoup inférieure pour la configuration hybride, comparativement au véhicule classique. De plus, les simulations numériques [1] ont démontré qu'il est possible de faire fonctionner le moteur diesel du véhicule hybride en régime constant à un mode de fonctionnement optimal. Le moteur sera mis à l'arrêt ou sous faible régime de fonctionnement lorsque le niveau de charge des batteries aura atteint une valeur prédéfinie. Cette façon de faire élimine la plupart des cycles de fonctionnement transitoire observés durant les cycles de travail pour ce type de véhicule en milieu minier. Une quantité importante de substances toxiques est produite pendant ces périodes de fonctionnement transitoire. De plus, les moteurs diesels sont conçus pour fonctionner à un régime élevé, ce qui signifie que l'utilisation d'un plus petit moteur diesel dans un véhicule hybride devrait être beaucoup plus efficace en comparaison avec la chargeuse classique. Enfin, les profils de température des gaz d'échappement seront probablement très stables, prévisibles et relativement élevés. Ceci pourrait rendre l'utilisation des filtres à particules diesels à haute efficacité très simple et la régénération contrôlée des filtres pourrait se faire sur une base beaucoup plus régulière.

La comparaison des deux systèmes a été faite à partir de la mesure des particules et des gaz émis lors de cycles de travail simulés sur banc d'essais. Le moteur de la chargeuse classique a été mis à l'essai dans des conditions de fonctionnement transitoires réalistes, tandis que le moteur du véhicule hybride a été essayé à divers modes de fonctionnement selon des régimes de couple et de vitesse constants. Tous ces essais ont été effectués au laboratoire diesel des Laboratoires des mines et des sciences minérales (LMSM) du CANMET à Bells Corners. La simulation des modes de fonctionnement des moteurs a été faite grâce à un banc d'essais et un dynamomètre à courant alternatif. Pour comparer les deux types de chargeuses, les débits d'air propre nécessaires, afin de diluer les produits des gaz d'échappement à un niveau sécuritaire, ont été calculés en utilisant l'indice de la qualité des émissions (IQE). De plus, un filtre à particules diesels CATRAP™, fabriqué par Engine Control Systems (ECS) Ltd., a été mis à l'essai sur la chargeuse-navette hybride et sur la chargeuse-navette classique. Les résultats de cette évaluation ont démontré que la température des gaz d'échappement de la chargeuse-navette classique n'était jamais assez élevée pour initier le processus de régénération du filtre à particules. D'autre part, la

température des gaz d'échappement du véhicule hybride était assez élevée pour brûler les poussières diesels accumulées dans le filtre, et ce, dans plusieurs modes de fonctionnement.

Les résultats des essais démontrent des réductions importantes des émissions de particules et de gaz, et donc des besoins en ventilation en ce qui concerne les véhicules hybrides. L'utilisation d'un filtre sur la chargeuse-navette classique est problématique à cause des températures de gaz d'échappement insuffisantes pour entraîner la régénération du filtre. Les besoins de ventilation pour la chargeuse hybride, équipée d'un filtre, pourraient être réduits de l'ordre de 48% à 67% en comparaison avec la chargeuse classique à échappement non-filtré.

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION.....	1
2.	DESCRIPTION DES MOTEURS ET FILTRES À PARTICULES DIESELS.....	2
3.	DESCRIPTION DE LA MÉTHODE D'ESSAIS.....	2
3.1	DÉFINITION DU CYCLE DE TRAVAIL DE LA CHARGEUSE-NAVETTE CLASSIQUE.....	3
3.2	DÉFINITION DU RÉGIME DE TRAVAIL DE LA CHARGEUSE-NAVETTE HYBRIDE	6
3.3	CYCLES DE RECHARGEMENT DES PILES DU VÉHICULE HYBRIDE ET L'IMPACT SUR LES ÉMISSIONS ET LA TEMPÉRATURE DES GAZ D'ÉCHAPPEMENT	6
4.	INSTRUMENTATION ET ÉQUIPEMENT D'ESSAIS.....	7
5.	RÉSULTATS DES ESSAIS ET DISCUSSION	8
5.1	COMPARAISON DES ÉMISSIONS – CHARGEUSE-NAVETTE CLASSIQUE ET CHARGEUSE-NAVETTE HYBRIDE	8
5.1.1	<i>Émissions de la chargeuse-navette classique</i>	8
5.1.2	<i>Émissions de la chargeuse-navette hybride</i>	9
5.1.3	<i>Autres avantages d'une chargeuse-navette hybride – périodes d'arrêt du moteur diesel ..</i>	12
5.2	APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE DES FILTRES À PARTICULES DIESELS (FPD).....	13
5.2.1	<i>Étude des températures des gaz d'échappement</i>	13
5.2.2	<i>Domages au filtre à particules diesels</i>	15
5.3	L'IMPACT DES REDÉMARRAGES DURANT LES CYCLES DE RECHARGEMENT DES PILES DU VÉHICULE HYBRIDE.....	16
5.3.1	<i>Impact des modes de fonctionnement cyclique sur la température des gaz d'échappement</i>	16
5.3.2	<i>Impact des modes de fonctionnement cyclique sur la composition des gaz d'échappement</i>	17
5.4	HOMOLOGATION DES MOTEURS DIESELS.....	18
5.5	SOMMAIRE DES RÉDUCTIONS DES ÉMISSIONS	19
6.	CONCLUSIONS	19
7.	REMERCIEMENTS	20
8.	BIBLIOGRAPHIE.....	21
	ANNEXE.....	22

1. INTRODUCTION

Les véhicules hybrides diesel-électriques ne sont pas nouveaux. En fait, les applications urbaines et routières de la technologie hybride existent depuis longtemps [2]. Il y a deux types de véhicules hybrides : la configuration en série et la configuration en parallèle. Celles-ci sont décrites dans le schéma à la figure 1. Dans le cas de la chargeuse-navette à l'essai, l'approche en série a été retenue. Les détails techniques de la chargeuse-navette hybride sont contenus dans un autre rapport [1].

Dans les protocoles d'essais décrits ci-dessous, les émissions d'une petite chargeuse-navette classique munie d'un moteur de 49 hp seront comparées à celles d'un véhicule hybride diesel-électrique possédant un moteur de 31 hp. Les émissions de particules et de gaz sont inférieures pour les véhicules hybrides, comparativement aux véhicules conventionnels, pour quatre raisons: la cylindrée du moteur est moindre, l'utilisation des véhicules hybrides se fait à régime de fonctionnement constant du moteur la plupart du temps, le moteur diesel du système hybride peut souvent être éteint dans les périodes de faible demande et, finalement, le fonctionnement du moteur en régime constant devrait permettre l'utilisation de filtres à haute efficacité pour éliminer un très haut pourcentage des particules diesels. En effet, des températures stables et élevées des gaz d'échappement devraient, en théorie, assurer la régénération régulière et contrôlée du module filtrant.

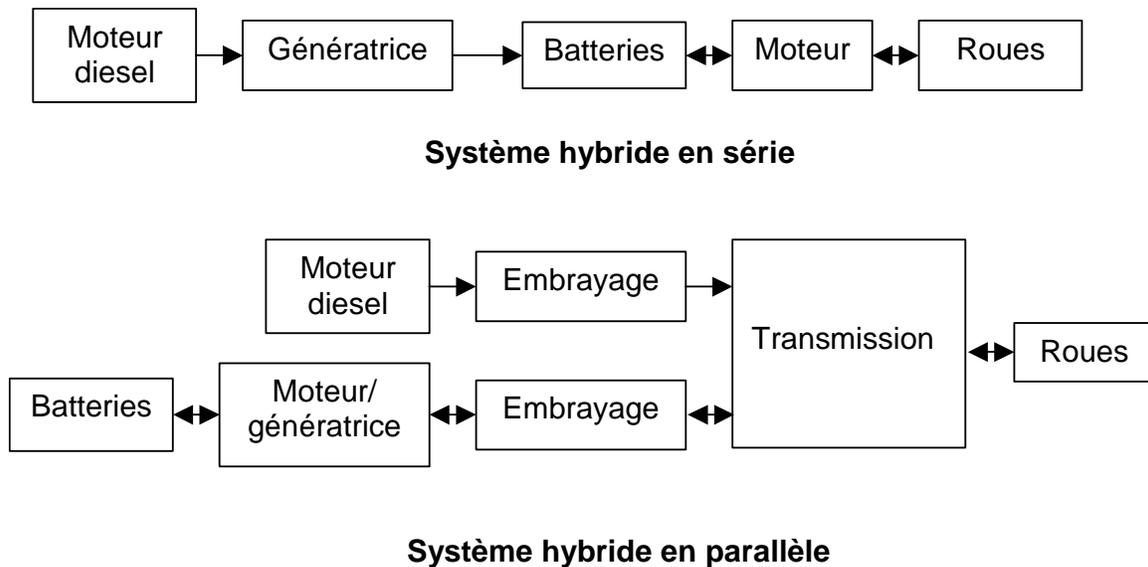


Figure 1 Configuration hybride en série et en parallèle [2]

2. DESCRIPTION DES MOTEURS ET FILTRES À PARTICULES DIESEL

Le moteur de la chargeuse-navette classique est un Deutz F4L912W de 49 hp ayant une cylindrée de 4,086 litres. Les simulations [1] effectuées avant les essais mentionnés ici démontrent qu'un moteur diesel Deutz F2L2011 de 31 hp en configuration hybride diesel-électrique suffirait pour accomplir les charges de travail de la chargeuse classique. Ce petit moteur d'une cylindrée de 1,554 litres serait utilisé pour charger les batteries au plomb alimentant le moteur électrique du véhicule. Ce sont les deux moteurs qui ont été sélectionnés pour les essais effectués en laboratoire. Ni l'un ni l'autre des moteurs n'est équipé d'un turbocompresseur.

Des filtres à particules, destinés aux deux moteurs, ont été essayés en utilisant le protocole MAPTEST [3]. Il s'agit des filtres CATRAPTM CT13 et CATRAPTM CT6 fabriqués par ECS et utilisés respectivement sur le petit et le gros moteur diesel. La température des gaz d'échappement doit se situer entre 716 °F et 788 °F (380 °C et 420 °C) afin que les particules accumulées puissent être brûlées (processus de régénération). Ces filtres en céramique éliminent jusqu'à 90 % des particules diesels. De plus, la formulation des substances catalytiques ajoutées à la surface des parois du filtre permet de réduire la production de NO₂, par oxydation du NO, à un minimum [4]. Durant tous les essais, la mesure de la température des gaz d'échappement du véhicule hybride et du véhicule classique a servi à déterminer si les filtres à particules peuvent se régénérer automatiquement au cours d'un quart de travail normal.

3. DESCRIPTION DE LA MÉTHODE D'ESSAIS

Des essais en laboratoire ont été effectués à l'aide d'un dynamomètre afin de mesurer précisément les émissions et les besoins en ventilation pour les deux types de véhicules. Les résultats des essais ont été utilisés afin de déterminer si les diminutions importantes anticipées, en matière de concentration de contaminants et d'économie de carburant, sont atteignables en ce qui concerne le véhicule hybride.

Trois méthodes d'essais et cycles de fonctionnement ont été développés : une pour la chargeuse-navette classique, une pour le véhicule hybride et, enfin, une série additionnelle d'essais effectués afin d'évaluer l'impact des démarrages en cycles répétés durant la recharge des piles électriques. Puisque le véhicule hybride devra démarrer et arrêter pendant le quart, en fonction de la charge de travail et du niveau de charge de la batterie, ces essais ont été effectués afin d'évaluer l'impact sur le niveau d'émissions survenant lors des démarrages à répétition. Il sera ainsi possible de déterminer si le moteur diesel du véhicule hybride doit être éteint ou s'il peut simplement tourner au ralenti pendant les périodes de faible demande de puissance.

3.1 Définition du cycle de travail de la chargeuse-navette classique

Le laboratoire possède les équipements nécessaires afin de mesurer les émissions diesels durant le fonctionnement transitoire des moteurs à commande mécanique et à module de contrôle électronique. Ceci permet de caractériser de façon plus réaliste les émissions produites pendant un cycle de travail d'une chargeuse-navette classique. Cependant, il a d'abord fallu recueillir des données réelles d'exploitation (couple et régime en fonction du temps) sur le terrain pour programmer le logiciel de commande du dynamomètre en laboratoire. Le dynamomètre sert à appliquer la charge simulée au moteur diesel qui est à l'essai.

Pour ce faire, des données réelles obtenues à partir du projet de véhicules légers du Programme minier d'évaluation des émissions diesels (PMEED) ont été utilisées [5]. Ces données ont été recueillies à la division minière Kidd Creek de la compagnie Falconbridge à Timmins. L'acquisition des données en provenance du module électronique de commande du moteur de chargeuses-navettes a permis de définir plusieurs types de cycles complets de travail sur un plan horizontal et sur des rampes inclinées (figure 2).



Figure 2 Acquisition en milieu minier des données portant sur le régime et le couple moteur pour divers cycles de travail

Les données sur le régime et le couple moteur normal dans une mine souterraine ont été recueillies à partir du cycle de travail de quatre chargeuses-navettes lourdes. Les mesures en temps réel du régime et du couple ont été recueillies à des intervalles de 1 seconde et ont ensuite été normalisées à la puissance nominale du moteur Deutz F4L912W de 49 hp de la chargeuse-navette classique.

Il aurait été préférable de recueillir des données à partir d'essais sur des petites chargeuses-navettes. Cependant, les paramètres de l'étude, telle que planifiée originalement, visaient un cycle conventionnel artificiel qui était très simple et d'autant plus détaché de la réalité. Les données en provenance de la mine Kidd Creek, bien que prélevées sur des véhicules lourds, sont de loin supérieures à celles d'un cycle artificiel. De plus, il n'y a aucune raison technique majeure qui porterait à croire qu'il n'est pas possible de transposer des données réelles au fonctionnement d'un véhicule léger à partir du fonctionnement d'un véhicule lourd.

À partir des cycles de travail des quatre chargeuses-navettes lourdes, les données de couple et de régime normalisées ont été programmées dans la commande du dynamomètre à l'aide du programme Dynocat. En utilisant ce logiciel avec le dispositif de commande Schenck Pegasus 6000 et le dynamomètre, le moteur du véhicule classique peut être essayé en utilisant des conditions transitoires de charge et de régime similaires à celles pouvant être observées en milieu minier. Un cycle de travail typique (cycle B) est illustré à la figure 3. Dans le cycle B, le régime et le couple moteur varient en fonction du temps selon le travail effectué (roulage, chargement du godet, etc.).

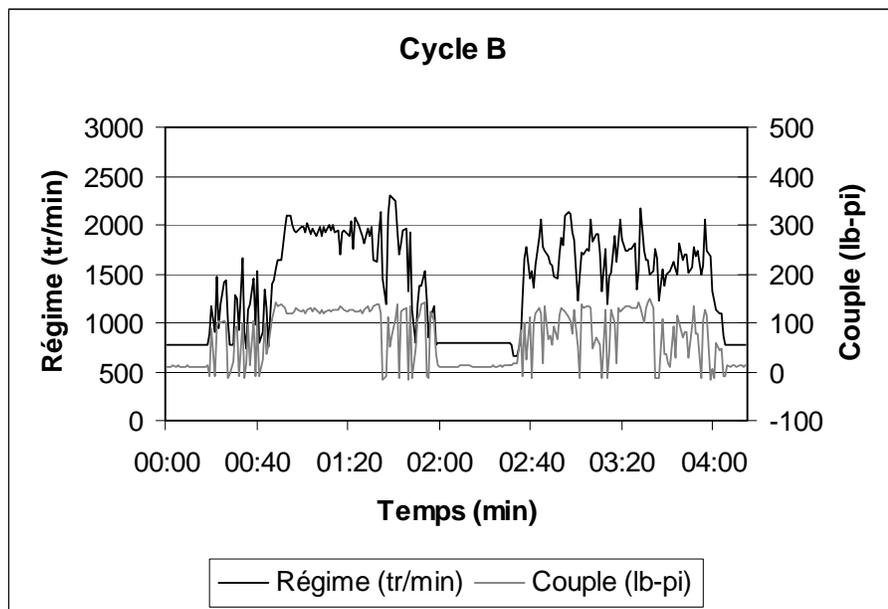


Figure 3 Le cycle de travail B - chargeuse-navette classique sur un plan horizontal

Le cycle B et trois autres cycles de travail provenant de l'étude PMEED ont été sélectionnés :

- Cycle B – cycle de chargeuse-navette, charge légère (14,1 hp en moyenne)
- Cycle C – cycle de chargeuse-navette, charge moyenne (23,4 hp en moyenne)
- Cycle D – cycle de chargeuse-navette, charge moyenne plan incliné (23,1 hp en moyenne)

- Cycle E – cycle de chargeuse-navette, charge légère (nettoyage, 12,6 hp en moyenne)

Ces quatre cycles de travail ont servi de base au développement de la méthodologie d'essais transitoires généraux pour la caractérisation des émissions de la chargeuse-navette classique équipée d'un moteur de 49 hp. Le tableau 1 résume les quantités de puissance moyenne pour chaque cycle de travail, le pourcentage de puissance moyenne calculé en fonction de la puissance nominale du moteur (49 hp) ainsi que du temps nécessaire pour compléter un cycle.

Tableau 1 - Cycles de travail utilisés pour les essais de la chargeuse-navette classique (moteur de 49 hp)

Cycle	Puissance (hp)	% de la puissance nominale	Durée du cycle (min)
B	14,1	29 %	4,2
C	23,4	48 %	3,4
D	23,1	47 %	9,4
E	12,6	26 %	3,5

Les cycles présentés au tableau 1 ont été formulés à partir d'essais en milieu minier sur des véhicules lourds durant des périodes actives d'utilisation (chargement et transport du minerai), sauf pour le cycle E qui représente un travail de nettoyage. À première vue, il peut apparaître que la demande énergétique pour les cycles de travail est basse comparativement à la valeur de puissance nominale de 49 hp. Une question peut aussi être soulevée quant à la durée de quelques minutes des cycles en question. Pour ce qui est de la durée, tout dépendant du type d'exploitation, si le travail nécessite un transport du minerai qui dépasse une vingtaine de minutes, la charge utile d'une chargeuse-navette est trop petite et l'utilisation d'un camion à benne de capacité supérieure doit être considérée. Donc, la durée des cycles dans le tableau 1 est représentative de ce qui pourrait être observé dans des exploitations minières typiques. En fait, les manufacturiers de chargeuses-navettes considèrent que l'utilisation économique de ce type de véhicule devrait habituellement viser des distances de roulage variant entre 50 et 200 mètres.

Pour ce qui est de la puissance moyenne des cycles retenus, ceux-ci varient entre 29 % et 48 % pour les processus de transport du minerai, soit les cycles B, C et D. Des études indépendantes ont établi le pourcentage de la puissance nominale pour ce type de véhicule minier à 58 % en moyenne [6]. Les valeurs de 48 % et 47 % pour les cycles C et D, respectivement, sont donc relativement représentatives. En fait, les portions du régime de travail approchant la puissance nominale de 49 hp ne sont nécessaires que durant la moitié du cycle de travail dans les cas extrêmes. Pour le reste, les besoins énergétiques sont minimes (transport sur plan plat ou incliné vers le bas). C'est ce qui fait en sorte que le concept d'un véhicule hybride est attrayant, permettant d'utiliser le moteur électrique à son plein potentiel de 49 hp en période de demande

élevée, tout en étant équipé d'un moteur diesel qui est juste assez performant pour fournir à la demande moyenne d'environ 50 % d'un cycle semblable pour un véhicule conventionnel.

3.2 Définition du régime de travail de la chargeuse-navette hybride

Le moteur diesel d'un véhicule hybride est utilisé pour charger les batteries alimentant le moteur électrique. En théorie, le moteur diesel d'un tel système fonctionne à un régime prédéterminé (charge et régime stables) ou il est mis à l'arrêt. Ainsi, les mesures de la composition des gaz d'échappement du véhicule hybride sont prises dans des conditions uniformes de fonctionnement du moteur diesel à divers régimes et à diverses charges. La méthodologie et l'équipement, servant à la prise des mesures en régime constant, ont été choisis en conformité avec la norme ISO 8178 [7], la norme CSA [8] et/ou le protocole MAPTEST [3]. Pour ces essais en régime constant ainsi que pour les essais transitoires décrits dans la section précédente, la température des gaz d'échappement a été enregistrée en continu pour évaluer la possibilité d'utiliser un filtre à particules diesels CATRAP™.

3.3 Cycles de rechargement des piles du véhicule hybride et l'impact sur les émissions et la température des gaz d'échappement

Afin de maintenir le niveau de charge de la batterie du système hybride entre deux valeurs prédéterminées, il est prévu que le moteur diesel fonctionnera de façon cyclique entre le point de fonctionnement optimal et l'arrêt complet ou un mode de fonctionnement à charge réduite. Puisque le moteur du système hybride est susceptible d'être arrêté et redémarré fréquemment, il est important de connaître la quantité d'émissions diesels produites lors de la phase transitoire de réchauffement des gaz d'échappement. Des mesures préliminaires ont montré que le temps requis pour la stabilisation de la température des gaz d'échappement est de 5 minutes lors d'un démarrage à froid.

Un protocole d'essais a été défini pour déterminer l'effet du fonctionnement du moteur à plein régime suivi d'un arrêt complet, versus le fonctionnement à plein régime suivi d'un fonctionnement au ralenti sur la composition des émissions et sur le profil de température des gaz d'échappement. Deux types de fonctionnement ont été mis à l'essai en utilisant seulement le moteur diesel du véhicule hybride (Deutz 31 hp) équipé d'un filtre à particules diesels.

Dans le premier type d'essais (**plein régime/ralenti**), le moteur est mis en marche, puis est poussé à un régime de 2 000 tr/min et à un facteur de charge de 100 % pour une période de 5 minutes, suivie d'une période de marche au ralenti de 5 minutes. Pour le besoin des essais en question, cette séquence fut répétée à quatre reprises.

Dans le deuxième type d'essais (**plein régime/arrêt**), le moteur est mis en marche et il est ensuite poussé à un régime de 2 000 tr/min et à un facteur de charge de 100 % pour une période de 5 minutes, suivie d'une période d'arrêt complet de 5 minutes. Cette séquence fut, elle aussi, répétée à quatre reprises.

4. INSTRUMENTATION ET ÉQUIPEMENT D'ESSAIS

Le laboratoire diesel des LMSM-CANMET est équipé pour effectuer une gamme complète d'essais en condition de fonctionnement transitoire et constant des moteurs diesels.

Les principales pièces d'équipement utilisées pour effectuer ces essais comprennent un dynamomètre à courant alternatif de Schenck Pegasus, un système d'automatisation de cellules d'essais Dynocat, un système informatisé d'analyse des émissions des gaz d'échappement, un système d'échantillonnage de particules diesels à micro-dilution BG-3 fabriqué par Sierra inc. et un système d'acquisition de données Dieselcom.

Le dynamomètre de Schenck Pegasus et le dispositif de commande du système d'automatisation de cellules d'essais Dynocat permettent de programmer toute une gamme de vitesses et de couples. Le dynamomètre a une puissance nominale en mode d'amortissement de 625 hp (466 kW) avec un régime de base de 1 750 tr/min et un régime maximal de 4 200 tr/min. Dynocat est un système d'automatisation de la cellule d'essais comprenant un dispositif de commande numérique, une connexion à fibre optique reliée à un ordinateur pour contrôler les essais de moteurs et de groupes motopropulseurs.

Le moteur diesel est branché au dynamomètre à l'aide d'un accouplement Kusel utilisé pour amortir les vibrations de torsion.

Le système informatisé d'analyse des gaz d'échappement permet de mesurer directement le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone, l'oxygène, les hydrocarbures totaux, le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote en utilisant des analyseurs de gaz de très haute fiabilité. Le système comprend aussi des éléments chauffants afin de prévenir la condensation. Un logiciel permet d'exercer un contrôle complet durant les essais, y compris les procédures d'étalonnage du système.

L'appareil BG-3 est un système qui permet un échantillonnage des particules diesels pour les conditions d'essais transitoires et uniformes des moteurs.

Finalement, le logiciel Dieselcom est un programme informatique qui permet d'afficher et d'enregistrer la totalité des mesures et des informations pertinentes durant les essais. Dieselcom permet à l'opérateur de surveiller le processus, ainsi que de contrôler les paramètres en mode de fonctionnement transitoire et constant. Le système Dieselcom a été intégré avec le système informatisé d'analyse des gaz d'échappement pour permettre en plus l'acquisition des données suivantes : la température et l'humidité de l'air de combustion, les pressions et les températures critiques, les valeurs de régime et de couple du moteur, de même que le débit de carburant.

5. RÉSULTATS DES ESSAIS ET DISCUSSION

5.1 Comparaison des émissions – chargeuse-navette classique et chargeuse-navette hybride

Cette section présente les résultats des mesures d'émissions diesels prises lors des essais en condition de fonctionnement transitoire (chargeuse-navette classique) et des essais en condition de fonctionnement constant (chargeuse-navette hybride). Pour comparer les deux approches, la toxicité des gaz d'échappement est déterminée à l'aide de l'indice de la qualité des émissions (IQE) selon l'équation suivante :

$$IQE = \frac{CO}{50} + \frac{NO}{25} + \frac{PD}{2} + 1,5 \times \left\{ \frac{SO_2}{3} + \frac{PD}{2} \right\} + 1,2 \times \left\{ \frac{NO_2}{3} + \frac{PD}{2} \right\}$$

Cet indice, décrit par French et Mildon [9], est à la base des calculs utilisés pour déterminer les débits d'air requis pour l'utilisation des moteurs diesels en milieu minier selon le processus d'homologation canadien.

L'IQE comprend les principaux gaz, soit le monoxyde de carbone (CO), le monoxyde d'azote (NO), l'anhydride sulfureux (SO₂) et le dioxyde d'azote (NO₂), ainsi que particules diesels (PD) retrouvés dans les gaz d'échappement des moteurs diesels. Les concentrations des gaz d'échappement en parties par million et les concentrations de particules en mg/m³ sont utilisées dans l'équation pour obtenir l'IQE. Ensuite, une quantité d'air frais (pi³/min), nécessaire pour diluer les composés à un niveau acceptable, est calculée. Ce débit d'air est calculé sur la base de la réduction de l'IQE à une valeur de 3.

5.1.1 Émissions de la chargeuse-navette classique

Le tableau 2 dresse la liste des débits d'air calculés à l'aide de la formule IQE pour les cycles transitoires d'une chargeuse-navette classique. Étant donné la nature transitoire des cycles conventionnels de travail, il est important de noter que le débit d'air en question est calculé à partir de la moyenne de la concentration des gaz d'échappement et des particules diesels mesurés durant l'essai.

Les résultats montrent que, pour les cycles transitoires B, C, D et E, les débits d'air varient entre 1 900 pi³/min et 3 000 pi³/min, respectivement. Il convient aussi de souligner que la puissance moyenne pour les cycles transitoires varie entre 12,6 hp et 23,4 hp, le moteur ayant une puissance nominale de 49 hp, étant donné que certaines parties du cycle de travail nécessitent une puissance élevée. Le fait que la puissance moyenne nécessaire soit beaucoup plus basse joue en faveur du principe hybride.

Tableau 2 - Débits d'air moyens calculés selon l'IQE pour les cycles transitoires de la chargeuse-navette classique (moteur de 49 hp)

Type d'essai	hp moyen	Débit d'air (pi ³ /min)
Homologation CANMET	---	5 000
Cycle transitoire D	23,1	3 000
Cycle transitoire C	23,4	2 800
Cycle transitoire E	12,6	2 200
Cycle transitoire B	14,1	1 900

Un volume de 5 000 pi³/min a été obtenu selon l'homologation CANMET (voir tableau 2). Ce chiffre est calculé à partir des pires valeurs de concentration des gaz et des particules diesels en régime de fonctionnement constant (plutôt que la valeur moyenne comme pour les cycles transitoires).

5.1.2 Émissions de la chargeuse-navette hybride

Le tableau 3 présente les débits d'air selon le calcul de l'IQE pour le moteur du véhicule hybride opérant à divers modes de fonctionnement constant. Les débits calculés selon l'IQE pour le moteur de la chargeuse hybride sans filtre se trouvent dans la colonne du centre et ceux basés sur l'IQE pour le moteur de la chargeuse hybride avec filtre CATTRAP™ sont dans la colonne de droite. Pour les essais du moteur avec filtre, les débits d'air sont donnés seulement pour les modes de fonctionnement où la température des gaz d'échappement était suffisante pour produire la régénération du filtre. Le plus petit débit d'air, et donc, le mode de fonctionnement où les émissions diesels sont les plus faibles, a été observé à 2 000 tr/min et à un facteur de charge de 100 % du moteur. D'après les exercices de simulation effectués ailleurs, ce mode de fonctionnement devrait permettre au véhicule hybride d'accomplir la plupart des tâches d'une chargeuse classique en milieu minier.

Le tableau 3 démontre aussi que les débits calculés pour tous les modes de travail à pleine charge (100 %) avec filtre sont relativement bas et varient dans une plage très étroite, soit 1 000 et 1 500 pi³/min. Le choix éventuel du moteur et du régime de celui-ci se fera en partie selon les résultats ci-dessus, mais aussi en fonction des besoins techniques durant la phase de conception et de construction du prototype. Pour les besoins de l'étude et de l'interprétation des résultats, le régime de 2 000 tr/min à un facteur de charge de 100 % a été retenu.

Tableau 3 - Débits d'air calculés selon l'IQE pour les modes de fonctionnement constant de la chargeuse-navette hybride (moteur de 31 hp)

Mode de fonctionnement (tr/min à x % de charge)	hp moyen	Débit d'air (pi ³ /min)	
		Sans filtre à particules diesels	Avec filtre à particules diesels
1 700 à 50 %	9,6	1 500	-
1 700 à 75 %	13,9	1 500	-
1 700 à 100 % *	13,9	2 400	1 200
2 000 à 75 %	17,8	1 500	-
2 000 à 100 % *	24,2	1 600	1 000
2 200 à 100 % *	26,2	1 700	1 100
2 400 à 100 % *	28,0	2 100	1 200
2 600 à 100 % *	29,3	2 400	1 500
2 800 à 10 %	2,0	1 800	-
2 800 à 50 %	12,7	1 800	-
2 800 à 75 %	19,4	1 600	-
2 800 à 100 % *	26,5	1 800	1 200

* indique les cycles où la température des gaz d'échappement permet l'auto-régénération du filtre à particules diesels.

La figure 4 montre le débit d'air calculé pour le régime de 2 000 tr/min à un facteur de charge de 100 % pour le véhicule hybride avec et sans filtre. Le débit d'air requis pour la chargeuse classique, selon les quatre cycles de travail, ainsi que les débits d'air requis en milieu minier selon la norme canadienne (homologation CANMET), sont aussi inclus. Il est à noter que les débits d'air pour la chargeuse classique équipée d'un filtre ne sont pas inclus puisque les températures de régénération du filtre n'ont pas été atteintes.

La valeur de 1 000 pi³/min à 2 000 tr/min et à plein régime de charge, pour le moteur du véhicule hybride muni d'un filtre, est deux à trois fois inférieure aux quatre essais transitoires évalués pour la chargeuse-navette classique. Cela signifie que la toxicité moyenne des gaz d'échappement, telle que représentée par l'IQE pour le véhicule hybride pourrait être du tiers de celle d'un véhicule classique équivalent sur la durée d'un cycle de travail.

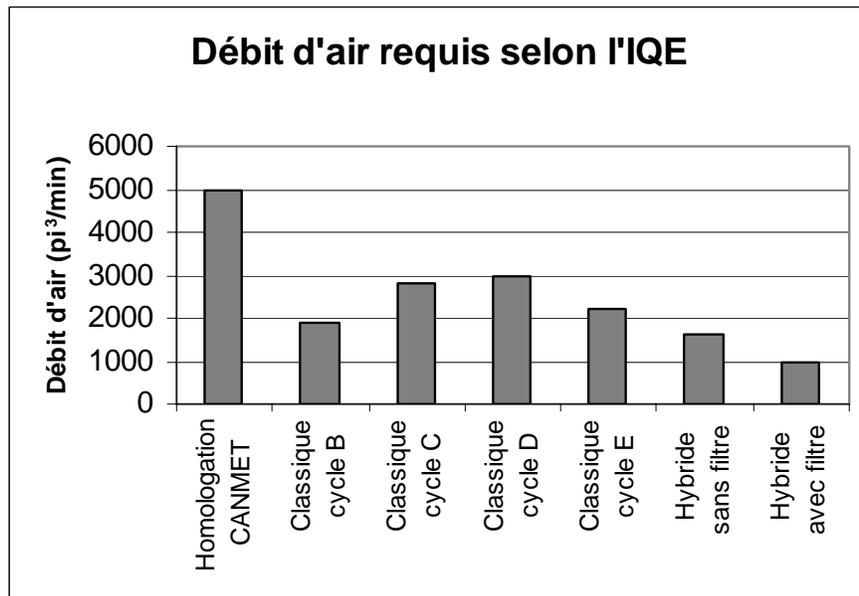


Figure 4 Comparaison des débits d'air requis selon l'IQE pour la chargeuse-navette classique (moteur de 49 hp) et hybride (moteur de 31 hp)



Figure 5 Moteur Deutz F4L912W (49 hp) de la chargeuse-navette classique avec filtre à particules diesels sur le banc d'essais CANMET

5.1.3 Autres avantages d'une chargeuse-navette hybride – périodes d'arrêt du moteur diesel

Les données examinées jusqu'à maintenant montrent que d'importantes réductions des niveaux d'émissions pourraient être réalisées en utilisant un véhicule hybride plutôt qu'une chargeuse-navette classique. Les exercices de simulation effectués ailleurs [1] montrent aussi que le véhicule hybride pourrait être arrêté pendant des portions importantes d'un quart de travail régulier si le cycle de travail était occasionnellement léger et si les batteries pouvaient permettre de travailler sans l'aide du moteur diesel.

Les données de charge et de régime des cycles de travail B, C, D et E ont été traitées à l'aide d'un programme de simulation de véhicules hybrides, qui a permis de déterminer les périodes de marche et d'arrêt pour le moteur diesel hybride fonctionnant à 2 000 tr/min et à un facteur de charge de 100 %. En utilisant ces périodes (en heures), ainsi que les taux moyens d'émissions et le taux de consommation de carburant, il a été possible de déterminer les émissions totales du véhicule hybride et la consommation totale de carburant en fonction d'un quart de travail.

De la même manière, les périodes de marche et d'arrêt, ainsi que les taux moyens d'émissions et le taux de consommation de carburant ont été utilisés pour déterminer les émissions et la consommation de carburant du véhicule classique en fonction d'un même quart de travail. Une comparaison des quantités calculées pour les deux types de véhicules a permis de déterminer le pourcentage de réduction des émissions et de consommation de carburant sur la période d'un quart de travail. Les résultats de ces exercices de modélisation, ainsi que le calcul des émissions totales et du carburant consommé par quart de travail, figurent à l'annexe. Le tableau 4 montre la comparaison théorique de temps marche/arrêt entre la chargeuse-navette classique et la chargeuse-navette hybride.

Tableau 4 - Comparaison théorique des temps marche/arrêt entre la chargeuse-navette hybride et la chargeuse-navette classique

Cycle de travail	Temps de marche/arrêt du moteur diesel (heures)		Pourcentage de réduction du temps de fonctionnement du moteur
	Chargeuse-navette hybride (31 hp)	Chargeuse-navette classique (49 hp)	
Cycle C	5,73 / 1,58	6,52 / 0,79	12 %
Cycle D	5,19 / 2,19	6,59 / 0,79	21 %
Cycle B	3,61 / 3,68	6,52 / 0,77	45 %
Cycle E	1,74 / 5,64	6,53 / 0,85	73 %

Selon le cycle de travail transitoire utilisé, le véhicule hybride pourrait être arrêté complètement pendant des périodes de temps allant de 12 % à 45 % comparativement à la chargeuse classique, pour le même montant de travail. Le cycle E devrait être exclus de ce calcul, puisque celui-ci comprend d'importantes périodes de roulage en descente de rampe, ce qui favorise le freinage électrique par récupération. Pour cette raison, l'estimation des temps d'arrêt pour le cycle de travail E doit être vue comme incertaine pour le moment.

Ces périodes de temps où le moteur diesel hybride ne fonctionne pas contribueraient à améliorer l'environnement minier souterrain, et cela au-delà de ce qui a été démontré dans les sections précédentes. Une caractéristique additionnelle de l'impact de cette technologie s'avère être la capacité d'opérer pendant certaines périodes de temps en mode électrique seulement. Cela permettrait à l'opérateur d'effectuer du travail léger pendant une courte période de temps dans des galeries avec une ventilation minimale requise (p. ex. pour le transport de matériel).

De plus, d'après les données présentées à l'annexe, la technologie hybride pourrait avoir un impact positif sur l'émission des gaz à effet de serre et l'environnement. Des réductions de CO₂ de l'ordre de 19 % à 66 % pourraient, en théorie, être réalisées.

5.2 Application de la technologie des filtres à particules diesels (FPD)

5.2.1 Étude des températures des gaz d'échappement

Avant de faire l'installation d'un filtre à particules diesels, il est important de démontrer que les particules diesels emprisonnées peuvent être éliminées par combustion à intervalles réguliers pendant le quart de travail. Sinon, les particules s'accumulent lentement dans les pores du filtre en céramique, ce qui a pour effet d'augmenter la contre-pression au niveau du système d'échappement. Ceci pourrait éventuellement endommager le moteur. De plus, ces grandes augmentations de pression peuvent entraîner une régénération incontrôlée à très haute température, ce qui pourrait endommager le filtre de façon permanente. Le type de filtre à particules diesels sélectionné n'utilise pas des catalyseurs à base de métaux précieux qui réduisent la température de régénération mais qui, en retour, augmentent la production de NO₂ à partir du NO dans l'échappement. Les catalyseurs retrouvés dans les filtres utilisés pour cette étude sont faits surtout de métaux de base, ce qui fait en sorte que ces filtres sont relativement peu coûteux.

Pour le type de filtre sélectionné, la plage de températures à l'intérieur de laquelle une régénération est possible, se situe entre 716°F et 788°F. Si la température des gaz d'échappement se situe largement en dessous de cette plage pendant la majorité du quart de travail, le filtre subira certainement des avaries, sauf si une technologie de régénération active est installée (éléments électriques, catalyseurs contenus dans le carburant, etc.)

Pour que le filtre à particules diesels puisse se régénérer sur une base régulière et, ce qui est plus important, d'une façon contrôlée, les températures de régénération enregistrées pendant le quart de travail devront habituellement dépasser la température minimale de régénération pendant au moins 30 % du temps.

Tableau 5 - Température moyenne mesurée pour la chargeuse-navette classique (49 hp) avec le filtre à particules diesels CATRAP™

Cycle	Température moyenne des gaz d'échappement (°F)
Cycle de travail C	484
Cycle de travail D	494
Cycle de travail B	380
Cycle de travail E	370

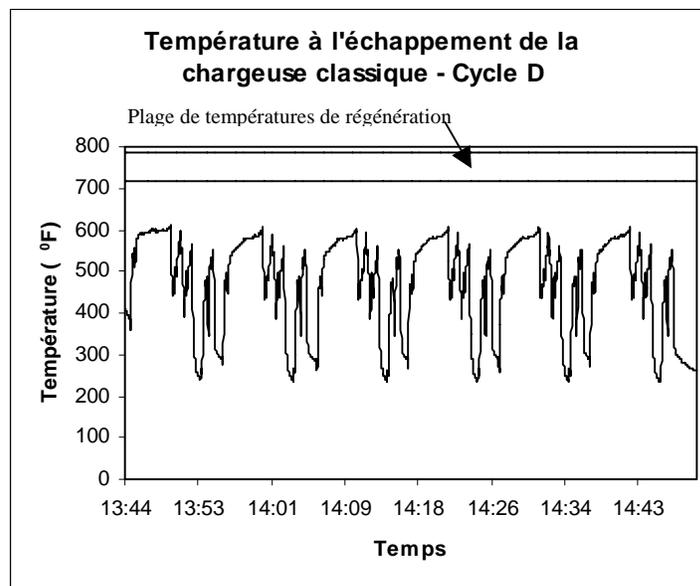


Figure 6 Profil de température pour la chargeuse-navette classique (49 hp) avec filtre à particules diesels pour le cycle D

Les données contenues dans le tableau 5 montrent les températures moyennes des gaz d'échappement mesurées pour la chargeuse-navette classique. Celles-ci varient entre 370 °F et 494 °F, soit plus de 200 °F de moins que la température minimale requise pour la combustion des particules accumulées. Il est évident que ce filtre à particules diesels subira une défaillance en raison d'un manque de régénération dans tous les cycles de travail proposés, comme le montre la

figure 6. La température des gaz d'échappement pour le cycle D, qui représente le meilleur des cas étudiés, n'atteint jamais la valeur minimale requise pour la régénération. Toutefois, même la température maximale atteinte lors de ce cycle est insuffisante pour entraîner la régénération du filtre.

Cependant, la figure 7 présente les données des essais effectués en régime constant pour la simulation hybride diesel-électrique. Les données de température pour tous les cycles uniformes, énumérés dans le tableau 3, y sont comprises.

Le diagramme à barres verticales montre la température des gaz d'échappement à l'entrée du filtre à particules diesels. La plage de températures de régénération est aussi fournie. Il est évident ici que plusieurs cycles de travail à un facteur de charge de 100 %, y compris celui retenu pour le véhicule hybride (2 000 tr/min), démontrent que les températures supporteraient normalement la régénération du filtre à particules diesels.

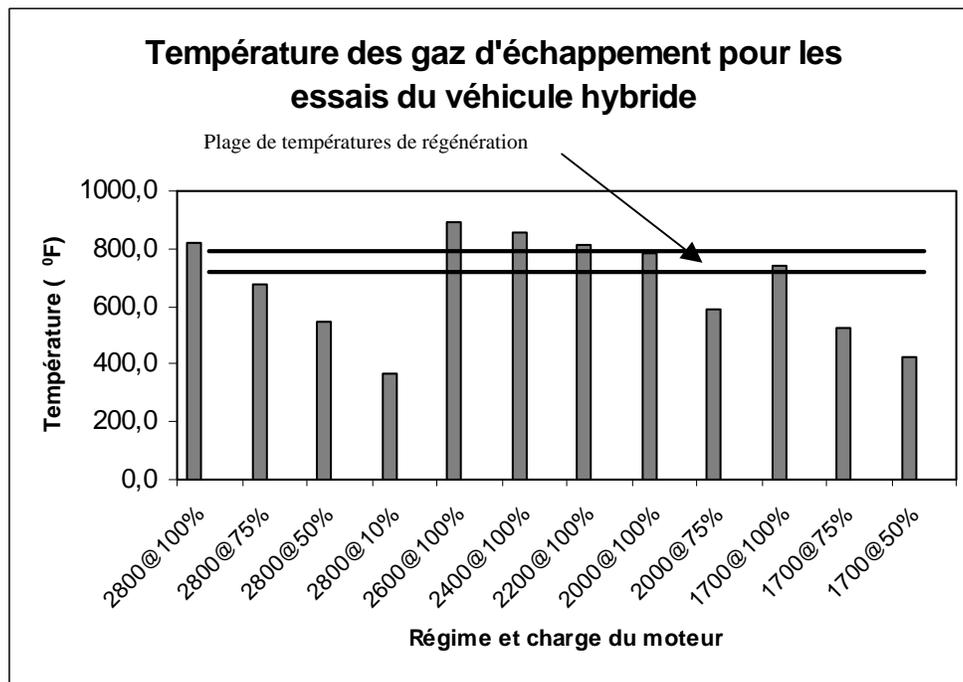


Figure 7 Température des gaz d'échappement pour les essais de la chargeuse-navette hybride (31 hp)

5.2.2 Dommages au filtre à particules diesels

Les données recueillies après les essais décrits dans la prochaine section ont démontré que l'efficacité du filtre CATRAP™, installé sur le moteur de la chargeuse hybride, était inférieure à ce qui avait été prévu. À la fin des essais, le filtre a été retourné au fabricant pour inspection et

il s'est avéré que certaines cellules du filtre étaient endommagées. Cette inspection a démontré qu'il y avait un peu de matériel fondu à la surface du substrat du côté de l'entrée du filtre. Aucun pic important de température ou événement inhabituel n'a été observé pendant les essais en question. La cause du dommage et le moment où celui-ci s'est produit sont donc inconnus. En dépit de cela, l'efficacité générale du filtre à particules était supérieure à 70 % dans tous les cas.

5.3 L'impact des redémarrages durant les cycles de rechargement des piles du véhicule hybride

Le rechargement des piles doit se faire de façon régulière durant le quart de travail. Ceci est accompli grâce à l'utilisation à haut régime du moteur diesel jusqu'à ce que les piles atteignent un niveau de charge prédéfini. Quand ce niveau est atteint, le moteur est mis à l'arrêt ou au ralenti. Le moteur diesel, par exemple, pourrait fonctionner à 2 000 tr/min et à 100 % en mode de rechargement pour ensuite être éteint ou fonctionner au ralenti lorsque les piles sont rechargées.

Pour les besoins de l'étude, deux conséquences du fonctionnement du moteur diesel en mode de redémarrage doivent être analysées. Premièrement, l'impact sur le profil de température des gaz d'échappement et la capacité du filtre à atteindre des températures de régénération et, deuxièmement, la mesure de l'impact sur les concentrations des émissions de gaz et de particules pour les redémarrages suivis d'une période de marche au ralenti, de même que pour les redémarrages suivis d'une période d'arrêt complet. Il est important de mentionner que ces essais ne visent que le moteur diesel du véhicule hybride équipé du filtre à particules diesels.

5.3.1 Impact des modes de fonctionnement cyclique sur la température des gaz d'échappement

La figure 8 montre les températures mesurées dans le système d'échappement, à l'entrée du filtre à particules diesels, pour les essais de fonctionnement à plein régime, suivis de périodes de fonctionnement au ralenti et à l'arrêt, respectivement. Pour les besoins de l'étude, des périodes de rechargement de 5 minutes furent sélectionnées.

Dans les deux cas, les courbes de température indiquent que l'entrée du filtre à particules diesels atteignait la température de régénération dans la période de 5 minutes choisie. De plus, ces données indiquent que, peu importe que le moteur soit arrêté ou qu'il fonctionne au ralenti entre les périodes de chargement, le profil de température et les valeurs maximales atteintes sont essentiellement les mêmes. En conséquence, le mode de fonctionnement au ralenti n'est pas plus avantageux en ce qui concerne l'atteinte de la température de régénération.

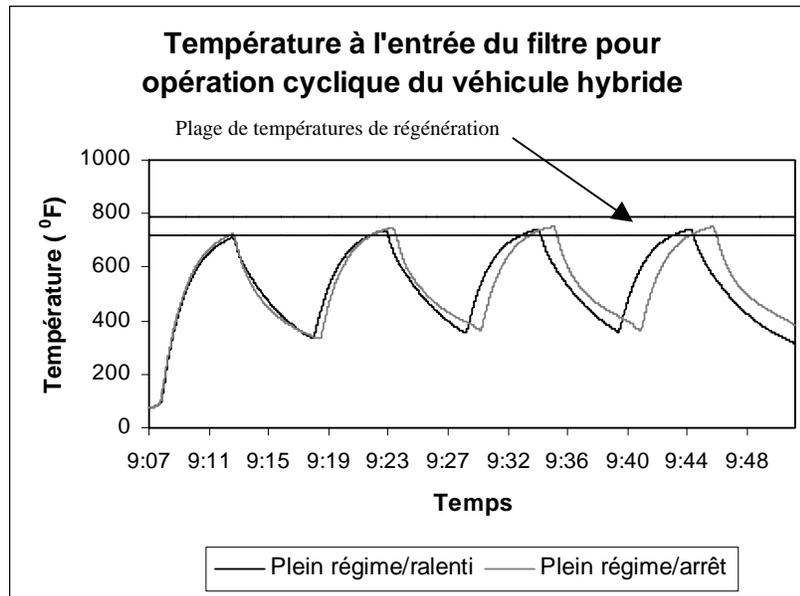


Figure 8 Comparaison des profils de température pour les cycles de charges entrecoupés de périodes d'arrêt ou de fonctionnement au ralenti pour la chargeuse-navette hybride (31 hp)

L'utilisation du filtre, selon ces paramètres de fonctionnement du moteur, n'a fourni que de courtes périodes de régénération. En ce qui concerne le véhicule hybride éventuel, il n'est pas clair qu'une régénération efficace serait possible en se basant sur le critère qui requiert que la température nécessaire soit atteinte pendant une période de temps équivalent à au moins 30 % du quart de travail. Des températures de régénération maximales ont été atteintes dans chaque cycle successif, mais le degré de régénération qui a été atteint est inconnu. Il s'avère que les périodes de rechargement des batteries devront être plus longues que 5 minutes pour permettre d'atteindre ce critère de régénération. Ceci devra être évalué et pris en considération durant la conception du véhicule prototype.

5.3.2 Impact des modes de fonctionnement cyclique sur la composition des gaz d'échappement

À la figure 9, les débits d'air sont fournis pour le véhicule hybride selon les deux modes de redémarrage à répétition, c'est-à-dire les essais plein régime/ralenti et plein régime/arrêt.

Les données démontrent que les débits selon l'IQE pour les tests de redémarrage sont légèrement supérieurs aux résultats pour le mode de fonctionnement constant de 2 000 tr/min, à un facteur de charge de 100 %, rapportés originalement au tableau 3 et à la figure 4. Ceci était à prévoir, puisque le moteur produit des concentrations plus élevées de DPM, de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures à cause des épisodes de redémarrage dans les deux cas.

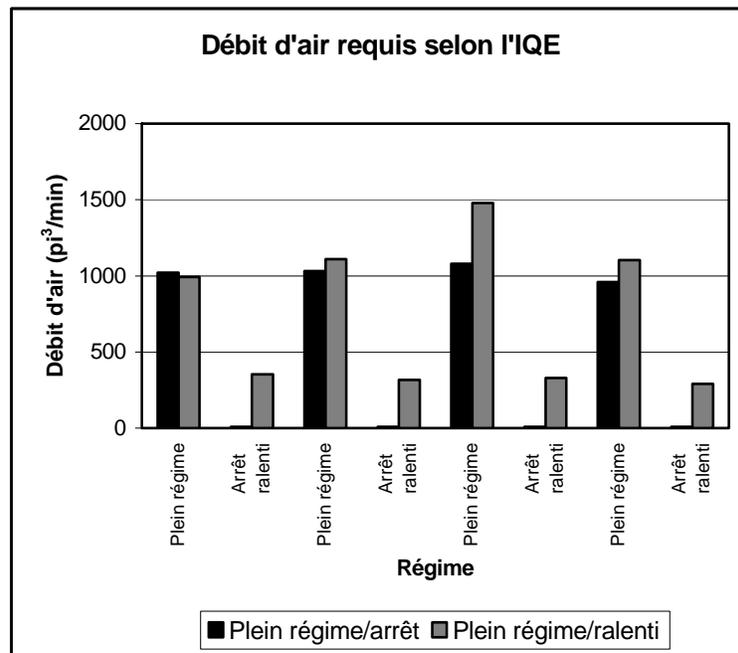


Figure 9 Débits d'air requis selon le calcul de l'IQE pour la chargeuse-navette hybride (31 hp) durant les cycles de recharge de 5 minutes suivis de périodes d'arrêt ou de fonctionnement au ralenti

Les débits moyens basés sur l'IQE pour l'essai plein régime/ralenti sont de 1 900 pi³/min et de 323 pi³/min, respectivement. Les débits d'air pour le cycle plein régime/arrêt sont de 1 023 pi³/min et de zéro, respectivement.

En résumé, la figure 9 indique qu'il serait préférable de faire fonctionner le moteur à plein régime et ensuite de l'arrêter dépendamment du niveau de charge des batteries, afin de diminuer la consommation de carburant et les émissions. Ceci n'aurait pas d'impact apparent sur le profil de température des gaz d'échappement et donc sur la probabilité de régénération du filtre à particules diesels.

5.4 Homologation des moteurs diesels

Les moteurs Deutz F4L912W et Deutz F2L2011, qui ont fait l'objet de cette étude, ont été mis à l'essai conformément au protocole d'homologation CANMET pour utilisation en milieu minier souterrain. Le débit d'air, selon la norme, pour le moteur Deutz F4L912W, est de 5 000 pi³/min (avec un taux de soufre dans le carburant inférieur à 500 ppm). Le débit nécessaire pour le moteur F2L2011 n'a pas été déterminé, car celui-ci avait des caractéristiques différentes de celles fournies par le fabricant.

5.5 Sommaire des réductions des émissions

Le tableau 6 présente une estimation des réductions des émissions d'une chargeuse-navette hybride, telles que calculées selon le principe de l'IQE, sous forme de débits d'air propre requis pour diluer les produits de la combustion à des niveaux égaux. Différents modes d'opération de la chargeuse hybride ont été évalués par rapport à ceux d'une chargeuse-navette classique pour le cycle C correspondant à une charge de travail moyenne.

Tableau 6 - Impact des différents modes d'opération de la chargeuse-navette hybride (31 hp) sur la réduction des émissions

Véhicule/mode d'opération	Débit d'air (pi ³ /min)	Réduction (%)
Chargeuse classique sans filtre Facteur d'utilisation de 100% du temps à régime variable	2 800	0 (réf.)
Chargeuse hybride sans filtre Facteur d'utilisation de 100% du temps à plein régime	1 600	43
Chargeuse hybride avec filtre Facteur d'utilisation de 100% du temps à plein régime	1 000	64
Chargeuse hybride avec filtre Facteur d'utilisation de 88% plein régime – 12% au ralenti	1 007	64
Chargeuse hybride avec filtre Facteur d'utilisation de 88% plein régime – 12% à l'arrêt	968	65

6. CONCLUSIONS

Dans le but de mesurer l'impact de la technologie hybride, plusieurs aspects doivent être évalués. Premièrement, l'impact de l'utilisation de moteurs comparativement plus petits en mode de fonctionnement constant, comparé à l'utilisation d'un plus gros moteur en fonctionnement transitoire, a été examiné. Ensuite, l'opportunité qu'offre le véhicule hybride en ce qui concerne l'utilisation d'un filtre à particules diesels et, enfin, les avantages supplémentaires associés à la capacité d'éteindre le moteur diesel sur une base cyclique ou au cours de périodes de faible demande d'énergie, ont été évalués.

Une chargeuse-navette hybride, équipée d'un moteur diesel de 31 hp fonctionnant à 2 000 tr/min et à un facteur de charge de 100 %, a été comparée à une chargeuse classique équipée d'un moteur de 49 hp. Entre autres, les débits d'air calculés selon l'IQE ont servi à comparer les débits de gaz et de particules au niveau de l'échappement.

La chargeuse-navette classique, utilisée dans les cycles transitoires B, C, D et E, a engendré des valeurs de débits d'air selon l'IQE qui sont de 2 500 pi³/min, en moyenne (tableau 2). La chargeuse-navette hybride sans filtre requiert 1 600 pi³/min, comparativement à 1 000 pi³/min si

un filtre à particules diesel est utilisé. Cela représente une réduction moyenne de 60 % en comparaison avec la chargeuse-navette classique.

Des avantages supplémentaires sont concevables si l'impact de l'arrêt du moteur diesel, en utilisation hybride, est ajouté à l'analyse. Les exercices de simulations ont montré que, pour les cycles B, C et D, le véhicule hybride pourrait être arrêté pendant des périodes allant de quelques minutes à 2,5 heures. Cela réduirait la consommation de carburant et améliorerait davantage les caractéristiques d'émissions du véhicule hybride.

Les essais effectués au niveau de l'utilisation de filtres à particules diesels sont très clairs. Les données de cette étude démontrent que des filtres simples et économiques, faits de métal de base, n'auraient pas pu être utilisés sur la chargeuse-navette classique à cause des faibles températures à l'échappement. L'utilisation de filtres à particules diesels sur ce véhicule nécessiterait une technologie plus coûteuse et plus complexe, y compris la régénération hors-véhicule et possiblement entre les quarts de travail.

En ce qui concerne la chargeuse-navette hybride, plusieurs modes de fonctionnement du petit moteur supporteraient, en théorie, la régénération. Des températures des gaz d'échappement dépassant la température de régénération minimale furent observées au cours de plusieurs modes de fonctionnement constant. Cependant, il n'est pas possible de garantir que la régénération se fera régulièrement, en se basant sur le travail présenté ici. L'impact de plusieurs facteurs, incluant le mode de fonctionnement du moteur, la fréquence de rechargement ainsi que la puissance requise selon le cycle de travail, devra faire l'objet d'essais sur le prototype. Le choix du filtre dépendra éventuellement de ces paramètres.

À partir des résultats de cette étude, il serait actuellement difficile d'essayer d'extrapoler, à l'échelle d'une mine entière, quant à l'impact sur la qualité de l'air qui serait attribuable à l'implantation de la technologie hybride. Il serait d'autant plus compliqué, à partir de ces mêmes données, d'établir les réductions des coûts de ventilation reliés à l'utilisation de véhicules hybrides en milieu minier, sauf pour dire que celles-ci seraient appréciables et que les opportunités qu'engendrerait cette technologie sont substantielles.

7. REMERCIEMENTS

Les auteurs aimeraient remercier *l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST)* pour son soutien financier; ils aimeraient aussi remercier le *sous-comité de la CSST en matière de prévention des incendies et de ventilation en ce qui a trait au diesel* pour son appui et ses recommandations. Nous aimerions aussi remercier Sylvain Ouellette, Jean-Marie Fecteau, Helen Hawkins-Lavoie et Marcel Laflamme de la Mine-laboratoire de Val-d'Or, LMSM-CANMET, pour leur contribution au niveau du soutien technique et éditorial, ainsi que John Stimpson de *Deutz Canada* et Ted Tadrous de *Engine Control Systems Ltd.*

8. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ouellette, S. Technical description and simulation of a 1.5 yd³ hybrid scooptram: MMSL 03-019(TR), CANMET, Ressources naturelles Canada, novembre 2003.
- [2] Ciccarelli, T. et Reza T. Assessment of Hybrid Configuration and Control Strategies in Planning Future Metropolitan/Urban Transit Systems: Mech. Eng. Dept., California State University, SAE 2001-01-2502.
- [3] Manufacturer's Protocol for Exhaust System Testing (MAPTEST): MMSL 97-064(CR), CANMET, Ressources naturelles Canada, septembre 1997.
- [4] Lubrizol-Engine Control Systems (ECS), CATTRAPTM, Passively Regenerated Catalytic Diesel Particulate Filter System: Operation and Maintenance Manual.
- [5] Rubeli, B., Gangal, M., Butler, K. et Aldred, W. Evaluation of the Contribution of Light Duty Vehicles to the Underground Atmosphere Diesel Emissions Burden: MMSL 03-059(CR), CANMET, Ressources naturelles Canada, novembre 2003.
- [6] Sweigard, R. Materials handling - loading and haulage: SME Mining Engineering Handbook, Section 9.3, 1992.
- [7] ISO 8178-1, 1996(E). Reciprocating Internal Combustion Engines - Exhaust Emission Measurements Part 1 - Test-bed Measurement of Gaseous and Particulate Exhaust Emissions: première édition, 5 août 1996.
- [8] CAN/CSA-M424.2-M90, Non-Rail-Bound Diesel-Powered Machines for Use in Non-Gassy Underground Mines, CSA 1990.
- [9] French, I.W. et Mildon, C.A. Health Implications of Exposure of Underground Workers to Diesel Exhaust Emissions: Rapport CANMET 16.SQ.23440-6-9025, Ressources naturelles Canada, 1990.

ANNEXE

Cette annexe contient des tableaux où se retrouvent les quantités théoriques de gaz et de particules diesels produits durant un quart de travail pour les deux types de véhicules. Les réductions d'émissions y sont aussi calculées sur la durée d'un quart de travail à la suite de périodes d'arrêt pour le moteur diesel utilisé dans une configuration hybride, selon le tableau 4. Bien que le cycle de travail E soit ajouté, celui-ci comprend de grandes périodes de freinage par récupération. À cause de cela, la durée rapportée de temps mort est très longue et possiblement pas aussi précise que pour les autres cycles de travail. De plus, il est important de préciser que les données correspondent à l'utilisation d'une chargeuse classique sans filtre et d'une chargeuse hybride avec filtre.

Tableau A1 – Comparaison des émissions totales au cours du quart de travail pour la chargeuse-navette hybride et la chargeuse-navette classique pour le cycle de travail « B ». Le temps total de production est de 6,52 heures pour les deux véhicules. Toutefois, les simulations numériques prédisent que le temps de fonctionnement du moteur diesel de la chargeuse hybride pourrait être de 3,61 heures.

Variable	Chargeuse-navette hybride (31 hp)		Chargeuse-navette classique (49 hp)		Réduction d'émissions pendant le quart de travail en %
	Taux moyen d'émissions (g/h)	Émissions totales par quart de travail (g)	Taux moyen d'émissions (g/h)	Émissions totales par quart de travail (g)	
CO ₂	13 827,7	49 918,0	9 447,8	61 599,7	19 %
CO	11,8	42,6	9,7	63,2	33 %
NO ₂	1,1	4,0	9,9	64,5	94 %
NO	88,8	320,6	67,6	440,8	27 %
N ₂ O	0,2	0,7	0,3	2,0	63 %
SO ₂	1,2	4,3	S/O	S/O	S/O
HC	3,6	13,0	2,9	18,9	31 %
NO _x	89,9	324,5	77,5	505,3	36 %
Particules diesels	0,4	1,4	2,3	15,0	90 %
Cons. de carburant	4 161,0	15 021,2	3 092,0	20 159,8	25 %

Tableau A2 – Comparaison des émissions totales au cours du quart de travail pour la chargeuse-navette hybride et la chargeuse-navette classique pour le cycle de travail « C ». Le temps total de production est de 6,52 heures pour les deux véhicules. Toutefois, les simulations numériques prédisent que le temps de fonctionnement du moteur diesel de la chargeuse hybride pourrait être de 5,73 heures.

Variable	Chargeuse-navette hybride (31 hp)		Chargeuse-navette classique (49 hp)		Réduction d'émissions pendant le quart de travail en %
	Taux moyen d'émissions (g/h)	Émissions totales par quart de travail (g)	Taux moyen d'émissions (g/h)	Émissions totales par quart de travail (g)	
CO ₂	13 827,7	79 232,7	15 472,4	101 189,5	22 %
CO	11,8	67,6	14,9	97,4	31 %
NO ₂	1,1	6,3	13,0	85,0	93 %
NO	88,8	508,8	100,0	654,0	22 %
N ₂ O	0,2	1,1	0,5	3,3	65 %
SO ₂	1,2	6,9	S/O	S/O	S/O
HC	3,6	20,6	4,7	30,7	33 %
NO _x	89,9	515,1	113,1	739,7	30 %
Particules diesels	0,4	2,3	3,8	24,9	91 %
Cons. de carburant	4 161,0	23 842,5	4 830,0	31 588,2	25 %

Tableau A3 – Comparaison des émissions totales au cours du quart de travail pour la chargeuse-navette hybride et la chargeuse-navette classique pour le cycle de travail « D ». Le temps total de production est de 6,59 heures pour les deux véhicules. Toutefois, les simulations numériques prédisent que le temps de fonctionnement du moteur diesel de la chargeuse hybride pourrait être de 5,19 heures.

Variable	Chargeuse-navette hybride (31 hp)		Chargeuse-navette classique (49 hp)		Réduction d'émissions pendant le quart de travail en %
	Taux moyen d'émissions (g/h)	Émissions totales par quart de travail (g)	Taux moyen d'émissions (g/h)	Émissions totales par quart de travail (g)	
CO ₂	13 827,7	71 765,8	16 919,6	111 500,2	36 %
CO	11,8	61,2	17,6	116,0	47 %
NO ₂	1,1	5,7	12,9	85,0	93 %
NO	88,8	460,9	94,5	622,8	26 %
N ₂ O	0,2	1,0	0,5	3,3	68 %
SO ₂	1,2	6,2	1,7	S/O	S/O
HC	3,6	18,7	6,2	40,9	54 %
NO _x	89,9	466,6	107,5	708,4	34 %
Particules diesels	0,4	2,1	4,4	29,0	93 %
Cons. de carburant	4 161,0	21 595,6	5 238,0	34 518,4	37 %

Tableau A4 – Comparaison des émissions totales au cours du quart de travail pour la chargeuse-navette hybride et la chargeuse-navette classique pour le cycle de travail « E ». Le temps total de production est de 6,53 heures pour les deux véhicules. Toutefois, les simulations numériques prédisent que le temps de fonctionnement du moteur diesel de la chargeuse hybride pourrait être de 1,74 heures.

Variable	Chargeuse-navette hybride (31 hp)		Chargeuse-navette classique (49 hp)		Réduction d'émissions pendant le quart de travail en %
	Taux moyen d'émissions (g/h)	Émissions totales par quart de travail (g)	Taux moyen d'émissions (g/h)	Émissions totales par quart de travail (g)	
CO ₂	13 827,7	24 060,2	10 717,5	69 985,3	66 %
CO	11,8	20,5	15,9	103,8	80 %
NO ₂	1,1	1,9	8,9	58,1	97 %
NO	88,8	154,5	57,5	375,5	59 %
N ₂ O	0,2	0,3	0,4	2,6	87 %
SO ₂	1,2	2,1	1,3	S/O	S/O
HC	3,6	6,3	5,4	35,3	82 %
NO _x	89,9	156,4	66,4	433,6	64 %
Particules diesels	0,4	0,7	4,1	26,8	97 %
Cons. de carburant	4 161,0	7 240,1	3 146,0	20 543,4	65 %