

2001

Mesure de la matière particulaire diesel dans les mines

Michel Grenier

Mahe Gangal

Nicole Goyer

Sean McGinn

Jennifer Penney

See next page for additional authors

Suivez ce contenu et d'autres travaux à l'adresse suivante: <https://pharesst.irsst.qc.ca/fiches>

Citation recommandée

Grenier, M., Gangal, M., Goyer, N., McGinn, S., Penney, J. et Vergunst, J. (2001). *Mesure de la matière particulaire diesel dans les mines* (Fiche n° RF-287). IRSST.

Ce document vous est proposé en libre accès et gratuitement par PhareSST. Il a été accepté pour inclusion dans Fiches par un administrateur autorisé de PhareSST. Pour plus d'informations, veuillez contacter pharesst@irsst.qc.ca.

Auteurs

Michel Grenier, Mahe Gangal, Nicole Goyer, Sean McGinn, Jennifer Penney, and John Vergunst



Programme minier d'évaluation des émissions de diesels PMEED

Transfert Technologique – Octobre 2001

Mesure de la matière particulaire diesel dans les mines



Michel Grenier, Ressources naturelles Canada

Mahe Gangal, Ressources naturelles Canada

Nicole Goyer, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en
sécurité du travail

Sean McGinn, Centre de technologie Noranda

Jennifer Penney, United Steel Workers of America

John Vergunst, Ministère du travail de l'Ontario



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada



Table des matières

1.	Introduction	3
2.	Glossaire.....	4
3.	Contexte.....	9
4.	Santé, limites d'expositions et directives	10
5.	Mesure de la MPD dans les mines	12
5.1	Évaluation de l'exposition des travailleurs	12
5.1.1	Stratégie d'échantillonnage – Particules diesels	12
5.1.2	Prélèvement des échantillons personnels	14
5.1.3	Analyse des échantillons.....	16
5.2	Échantillonnage direct dans l'échappement	18
5.2.1	Évaluation de l'efficacité des technologies de réduction de la MPD.....	19
5.2.2	Échantillonnage de la MPD dans les gaz d'échappement non dilués ..	19
5.2.3	Échantillonnage des gaz d'échappement non dilués – UGAS.....	20
5.2.4	Échantillonnage du monoxyde de carbone (CO) non dilué	20
5.2.5	Mesure de l'opacité	21
6.	Conclusions	23
7.	Références.....	24
8.	Annexe 1 : Figures.....	26

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Directives proposées ou adoptées quant aux limites d'exposition	11
-------------	---	----

Liste des figures

Figure 1 :	Particules de diesel.....	27
Figure 2 :	Système d'échantillonnage des poussières.....	28
Figure 3 :	Méthode NIOSH 5040 + Thermogramme.....	29
Figure 4 :	Instrument Nanomet.....	30
Figure 5 :	Échantillonnage direct des émissions à l'aide de l'appareil UGAS/ECOM.....	31
Figure 6 :	Fenêtre du logiciel de contrôle UGAS.....	32
Figure 7 :	Échantillonnage du CO à l'aide de tubes colorimétriques.....	33

1. Introduction

L'équipement minier fonctionnant au diesel a permis à l'industrie de réaliser d'énormes gains de productivité au cours des 30 à 50 dernières années. Le diesel est une source d'énergie économique et l'équipement à moteur diesel s'avère robuste, mobile et versatile.

En contrepartie, la toxicité de certains gaz d'échappement des diesels est bien documentée. Par ailleurs, on trouve de plus en plus de données sur la **cancérogénicité** potentielle de la partie solide de l'échappement des diesels, connue sous le nom de **matière particulaire diesel (MPD)**. L'échantillonnage et le suivi de l'exposition des mineurs aux particules diesels jouent un rôle important dans l'évaluation et le contrôle du risque associé à une telle exposition. L'échantillonnage permet également d'identifier les sources précises de particules diesels et d'en établir les caractéristiques, facilitant ainsi le contrôle des émissions.

Le présent document s'adresse au personnel minier responsable de contrôler l'exposition des mineurs aux contaminants diesels, au personnel d'entretien des moteurs diesels, aux membres des comités de santé et de sécurité ainsi qu'à toute autre personne directement concernée par la santé et la sécurité dans les mines au chapitre de l'exposition à l'échappement des diesels.

Ce rapport présente un bref aperçu des caractéristiques physiques et chimiques de la MPD, de même que certains des règlements et directives relatifs au contrôle de l'exposition aux contaminants en milieu de travail. Il traite également de l'échantillonnage individuel et de **l'échantillonnage direct dans l'échappement** des véhicules, incluant une courte description des protocoles d'échantillonnage, des instruments de mesure utilisés, des méthodes d'analyse retenues et de quelques principes de base quant à l'utilisation et à la gestion des données d'exposition. Afin de rendre ce rapport plus clair, nous vous fournissons, dans la section qui suit, la définition de certains mots clés et expressions signalés en **italique gras** lors de leur première apparition dans le texte.

2. Glossaire

Adsorption :

Fixation d'une substance à une surface. En guise d'exemple, les vapeurs organiques se condensent en liquides et s'adsorbent aux particules de carbone solide qui forment le noyau de la matière particulaire diesel.

Calage du moteur à l'aide du convertisseur de couple (moteur diesel) :

État de fonctionnement stable du moteur d'un véhicule embrayé dont les freins sont bloqués et l'accélérateur entièrement enfoncé. Il s'agit là du mode d'essai qu'on privilégie normalement pour déterminer l'état d'entretien d'un moteur, que ce soit par échantillonnage des particules ou par mesure directe des gaz toxiques. **Nota : ce genre d'essai s'effectue sous une importante charge statique, et ne devrait être exécuté que par une personne qualifiée et dûment formée pour ce faire. En outre, la température de l'huile du convertisseur de couple doit être surveillée pour éviter toute surchauffe, et il faut savoir que le fait de maintenir ces conditions de fonctionnement pendant plus de 60 secondes peut gravement endommager le convertisseur de couple. Enfin, ce genre d'essai ne convient pas aux véhicules à transmission manuelle.**

Cancérogène, cancérogénicité :

Un cancérogène est une substance susceptible de causer le cancer. Ainsi la cancérogénicité peut-elle se définir comme la propriété d'une substance susceptible de causer le cancer.

Carbone élémentaire (CE) :

Particules de carbone pur au centre de la structure des particules émises par un diesel.

Carbone organique (CO) :

Regroupement de composés complexes de carbone présents dans les particules émises par un diesel, incluant des hydrocarbures tels qu'aldéhydes et hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Sont exclus du carbone organique, le carbone élémentaire et les substances inorganiques telles que les sulfates.

Carbone total (CT) :

Ensemble du carbone élémentaire et du carbone organique présents dans les émissions d'un diesel. En sont exclues les substances inorganiques telles que les sulfates. Il forme habituellement environ 85 % de la matière particulaire diesel.

Champs électromagnétiques :

Ondes d'énergie circulant librement dans l'air et produites par les moteurs électriques de même que par tout dispositif parcouru de courants électriques.

Conditions uniformes de fonctionnement (moteur diesel) :

Mode d'exploitation d'un diesel sous des conditions de fonctionnement stables. Ces conditions tiennent à une charge et à un régime constants, de même, idéalement, qu'à des températures et à des pressions constantes à l'échappement. Ainsi un moteur fonctionnant sans interruption à plein régime alors que la transmission est au neutre le ferait sous des conditions uniformes de fonctionnement.

Cyclone en nylon (10 mm) :

Séparateur inséré dans le système d'échantillonnage pour les poussières respirables. Il élimine les grosses particules de poussières non respirables de la poussière en suspension dans l'air lorsque le débit d'échantillonnage est fixé à 1,7 litre par minute (L/min).

Échantillonnage direct dans l'échappement :

Échantillonnage des contaminants émis à la sortie même du tuyau d'échappement d'un diesel plutôt que dans l'air ambiant.

Échantillon témoin :

Cassette contenant un filtre utilisée à des fins de contrôle de qualité. Elle est identique à celles qui servent à l'échantillonnage des poussières sauf qu'elle ne sert pas à l'échantillonnage comme tel. On la transporte jusqu'au site de prélèvement, où on la manipule de la même façon que les autres cassettes d'échantillonnage, après quoi on l'envoie pour analyse. On s'attend à ce qu'elle ne renferme que très peu ou aucune trace de contaminant, sinon les mesures d'exposition fournies par les autres cassettes d'échantillonnage pourraient être mises en cause.

Impacteur :

Séparateur inséré dans le système d'échantillonnage des poussières qui élimine, conformément aux exigences de MSHA, toute particule de plus de 0,9 micron présente dans un échantillon d'air. Les particules émises par un diesel sont généralement plus petites que 0,9 micron.

Interférence :

Tout dérivé de carbone ou tout composé provenant d'une autre source que l'échappement d'un diesel, qui risque de fausser les résultats à la hausse ou à la baisse, lors de l'analyse des composés émis dans l'air par les diesels.

Litre par minute (L/min) :

Mesure du débit d'un gaz ou d'un liquide. À titre d'exemple, une pompe qui déplace 60 litres d'air en une heure (60 minutes) le fait au rythme de 1 litre par minute (1 L/min).

Matière particulaire diesel (MPD) :

Partie de l'échappement d'un diesel formée de particules de carbone solide et de produits chimiques associés, y compris certaines substances organiques, comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), et inorganiques, comme les composés de sulfate.

Micron (μm) :

Unité de mesure égale à un millionième de mètre. Elle sert à mesurer de très petits objets, notamment des poussières en suspension dans l'air et des aérosols telles que les particules émises par un diesel. S'écrit et s'abrège également sous la forme de μm .

Milligrammes par mètre cube (mg/m^3) :

Aux fins de ce rapport, poids en milligrammes des particules de diesel en suspension dans un mètre cube (1 000 litres) d'air. À titre d'exemple, une concentration de 0,34 milligrammes de poussières de diesel dans un mètre cube d'air s'exprime sous la forme de $0,34 \text{ mg}/\text{m}^3$.

MSHA :

Mine Safety and Health Administration. À l'instar des ministères provinciaux du Travail (ou de leur équivalent) au Canada, la MSHA réglemente la santé et la sécurité dans toutes les mines des États-Unis.

Opacité

Mesure de la capacité d'un milieu à être opaque donc à même d'entraver la transmission de la lumière.

Poussières respirables :

Poussières suffisamment petites pour pénétrer profondément dans les poumons. Les poussières respirables sont prélevées au moyen d'un cyclone en nylon de 10 mm utilisé comme séparateur dans le système d'échantillonnage. Le débit d'échantillonnage est fixé à 1,7 L/min, et les particules ainsi prélevées ont une taille médiane d'environ 4 microns.

Poussières combustibles respirables (PCR) :

Partie d'un échantillon de poussières respirables déposées sur un filtre à membrane d'argent qui peut se consumer lorsque soumis à une température de 400 °C pendant deux heures. Dans la plupart des provinces canadiennes, la concentration de PCR sert à mesurer le degré d'exposition des mineurs à la matière particulaire diesel.

Séparateur :

Élément d'un système d'échantillonnage qui élimine les particules en suspension dans l'air n'ayant pas à être échantillonnées. Lorsque l'échantillonnage porte sur les poussières respirables, un cyclone en nylon de 10 mm est utilisé comme séparateur pour supprimer les grosses particules non respirables.

Système d'échantillonnage (poussières) :

Ensemble de tous les éléments requis pour procéder à l'échantillonnage des poussières. Il comprend une pompe à débit constant, des tubes en plastique ou en caoutchouc assortis d'attaches et un dispositif de filtration inséré dans une cassette d'échantillonnage. Il peut ou non comprendre un séparateur. Lorsque

l'échantillonnage porte sur les poussières respirables, un cyclone en nylon est utilisé comme séparateur.

Thermogramme :

Résumé graphique de l'analyse de carbone fourni par le logiciel utilisé avec la méthode NIOSH 5040. Ce diagramme indique les quantités relatives de carbone élémentaire et organique, et fait aussi état des conditions d'analyse, notamment la température du four et le temps de combustion.

3. Contexte

Que ce soit sur les routes ou sous terre, tout le monde a déjà observé l'épaisse fumée noire qui s'échappe des diesels. C'est que la combustion incomplète du carburant diesel entraîne, à l'échappement, la formation de particules solides et liquides. Or, la suie noire qui en résulte renferme des centaines de composés, dont plusieurs sont des **cancérogènes** connus.

La Figure 1 présente de façon schématique certains des composants de la **matière particulaire diesel (MPD)**. Les éléments de base en sont de très fines particules de carbone solide d'un diamètre inférieur à 0,1 **micron (um)** qui **adsorbent** à leur tour plusieurs types d'hydrocarbures, tout en servant de support à des hydrocarbures liquides condensés (1). Des sulfates peuvent également se fixer aux particules de carbone, selon la teneur en soufre du carburant.

La MPD se compose de tous ces éléments, et s'il existait une méthode d'échantillonnage et d'analyse parfaite, elle permettrait d'étudier la totalité de la MPD, et rien d'autre que la MPD. Mais ce n'est malheureusement pas le cas. Les échantillons provenant de l'échappement des diesels renferment habituellement d'autres particules présentes dans l'environnement de travail, et susceptibles de fausser à la hausse ou à la baisse les données d'exposition à la MPD.

Une caractéristique physique très importante de la MPD tient à la taille des particules qui la composent. Il s'agit en effet de poussières submicroniques, et par conséquent de **poussières respirables**, aptes à pénétrer au plus profond des poumons, là où l'oxygène fait son entrée dans le flux sanguin. Il y a donc lieu de s'en inquiéter dans la mesure où l'organisme dispose de moyens réduits pour éliminer les particules dangereuses qui se fixent aux tissus de cette région des poumons.

De plus, la très petite taille de ces particules fait que la MPD est difficilement éliminée du flux d'air. En effet, à la différence des poussières minérales, elle ne se dépose pas facilement au sol sous l'effet de la pesanteur. Une fois la MPD en suspension dans l'air, elle y demeure vraisemblablement, du moins en partie, jusqu'à la sortie de la mine. Cela signifie que la MPD contamine non seulement l'endroit de travail où elle est produite, mais aussi potentiellement tous les endroits en aval dans le réseau de ventilation de la mine. Voilà pourquoi il importe de contrôler la MPD à la source.

4. Santé, limites d'expositions et directives

Parmi les problèmes associés aux contaminants émis par les diesels en milieu de travail, il convient de mentionner l'irritation des yeux et de la gorge. Par ailleurs, un important volume d'émission diesel peut troubler la vision des conducteurs de véhicules, voire présenter un risque pour la sécurité dans un environnement où la visibilité est déjà compromise par la taille de l'équipement et le manque d'éclairage ambiant.

Certains des composés présents dans la MPD sont des cancérigènes connus, ce qui veut dire que la MPD peut être un cancérigène en soi à un certain degré d'exposition. Or, les mines présentent des risques d'exposition professionnelle à la MPD plus élevés que la moyenne (1), et c'est pourquoi le monde minier participe présentement à des recherches visant à contrôler les niveaux de MPD en milieu de travail.

Dès 1988, le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) a publié un rapport indiquant que l'émission des diesels était suspecté d'être un cancérigène en milieu de travail (2). Tout récemment, l'Environmental Protection Agency (EPA) des États-Unis a également classifié l'échappement des diesels parmi les « cancérigènes probables » (3). Au Canada, en 1990, le Comité ad hoc sur le diesel a pour sa part publié une directive suggérant que l'exposition à la MPD soit mesurée à l'aide de la méthode **PCR** qui porte sur les **poussières combustibles respirables**, et limitée à 1,50 **milligrammes par mètre cube d'air (mg/m^3)** au cours d'un quart normal de travail de huit heures (4). Cet indice d'exposition a depuis été adopté par la plupart des provinces canadiennes où il y a exploitation minière.

En janvier 2001, la Mine Safety and Health Administration (**MSHA**) a rendu une décision exécutoire concernant l'exploitation des mines métallifères et non métallifères aux États-Unis (5). Cette décision exige des mines qu'elles se conforment à une limite d'exposition de $0,40 \text{ mg}/\text{m}^3$ dans les 18 mois suivant l'adoption du règlement, après quoi elles auront jusqu'au 19 janvier 2006 pour réduire leur taux d'exposition limite à $0,16 \text{ mg}/\text{m}^3$. Cette limite d'exposition repose sur la mesure du **carbone total (CT)** et fait appel à la méthode NIOSH 5040 décrite dans le présent rapport.

L'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) est l'organisme responsable de la publication annuelle des directives relatives aux seuils d'exposition admissibles. Ses directives n'ont pas valeur de règlement en soi, mais les organismes de réglementation de nombreux pays du monde s'en inspirent pour fixer leurs limites d'exposition légales. En 1996, l'ACGIH a déposé un projet de modification des normes en vigueur visant à fixer le seuil limite d'exposition à la MPD à $0,15 \text{ mg}/\text{m}^3$ (6). En 1998, il a de nouveau proposé de réduire ce seuil, cette

fois à 0,05 mg/m³ (7). Dans les deux cas, la limite suggérée reposait sur la mesure du carbone total, comparable à celle mise de l'avant par MSHA. Puis, en 2001, l'ACGIH a proposé de ramener cette limite à 0,02 mg/m³ en s'appuyant sur la seule mesure du **carbone élémentaire (CE)** (8), tel que déterminé par la méthode NIOSH 5040.

Les projets de construction de mines et de tunnels en territoire européen doivent également respecter les limites d'exposition à la MPD. En Europe, une méthode comparable à la méthode NIOSH est employée pour mesurer le carbone élémentaire et le **carbone organique (CO)**, et différents pays ont adopté différentes normes d'exposition selon qu'ils fondent les limites admissibles sur la mesure du carbone élémentaire ou du carbone total. En Allemagne, lors du creusement de tunnels, par exemple, on mesure l'exposition à la MPD en fonction du taux de carbone élémentaire, dont la concentration ne doit pas dépasser 0,10 mg/m³. En Suisse, cette limite d'exposition à la MPD lors du creusement de tunnels est fixée à 0,20 mg/m³, et repose sur la mesure du carbone total.

Le Tableau 1 résume l'ensemble de ces directives et propositions quant aux limites d'exposition admissibles.

Tableau 1 : Directives proposées ou adoptées quant aux limites d'exposition

Agence / Comité / Organisme de réglementation	Date de dépôt	Limite d'exposition	Substance mesurée
Comité canadien ad hoc sur le diesel (directive en vigueur dans la plupart des provinces où il y a exploitation minière)	1990	1,50 mg/m ³	PCR
Mine Safety and Health Administration	2001	0,40 – 0,16 mg/m ³	CT
Suisse (tunnels)	---	0,20 mg/m ³	CT
American Conference of Governmental Industrial Hygienists	1996	0,15 mg/m ³	CT
American Conference of Governmental Industrial Hygienists	1998	0,05 mg/m ³	CT
American Conference of Governmental Industrial Hygienists	2001	0,02 mg/m ³	CE
Allemagne (tunnels)	---	0,10 mg/m ³	CE

5. Mesure de la MPD dans les mines

Il existe différentes raisons pour lesquelles les exploitants de mines procèdent à la mesure de la MPD. La plupart des prélèvements sont effectués par souci de conformité, autrement dit pour démontrer que le niveau d'exposition des travailleurs est inférieur à la limite permise par le règlement. Mais il y a plusieurs autres raisons d'évaluer la concentration de la MPD dans l'air des mines ou dans l'échappement des moteurs, notamment pour vérifier l'état d'entretien d'un moteur, mesurer l'efficacité d'un filtre particulaire ou d'un quelconque dispositif de traitement des gaz d'échappement, ou encore contrôler l'efficacité d'un système de ventilation. Vous trouverez, dans cette section, la description de plusieurs techniques utilisées pour mesurer et contrôler la MPD.

Le type d'échantillonnage le plus courant est celui qui porte sur la mesure de l'exposition des travailleurs à la MPD. Au Canada, l'échantillonnage du personnel est d'ailleurs réglementé depuis environ 10 ans dans plusieurs provinces minières. Les stratégies d'échantillonnage permettant d'exploiter au mieux les données d'exposition, de même que les grandes lignes des protocoles d'échantillonnage appliqués au Canada et aux États-Unis sont présentées ici.

On traite de l'échantillonnage de la MPD et des gaz contenus dans l'échappement brut des diesels en s'appuyant pour l'essentiel sur l'expérience acquise par le PMEED au fil des études sur le terrain. On décrit aussi le matériel et les techniques utilisées pour mesurer l'efficacité des modules de traitement de l'échappement (p. ex., filtres en céramique), de même que pour évaluer l'incidence de l'entretien de l'équipement diesel sur les émissions gazeuses et particulaires.

5.1 Évaluation de l'exposition des travailleurs

5.1.1 Stratégie d'échantillonnage – Particules diesels

La stratégie d'échantillonnage des émissions de diesel aux fins d'évaluation de l'exposition des travailleurs doit tenir compte du choix et du nombre de travailleurs à évaluer (selon leurs tâches et leur lieu de travail), de la période au cours d'un quart de travail et de la fréquence d'échantillonnage.

Dans le meilleur des cas, tous les travailleurs exposés à la matière particulaire diesel devraient faire l'objet de prélèvements. Néanmoins, dans la plupart des installations, le temps et les dépenses que nécessiterait une opération d'une telle envergure la rendent pour ainsi dire impossible. Il faut alors adopter une stratégie plus souple, axée sur les facteurs suivants :

- sélection des employés les plus à risque; pour l'étude des particules diesels, il s'agit des opérateurs d'équipements diesel, des mécaniciens ou de tout autre

groupe d'ouvriers que leurs tâches obligent à évoluer dans un environnement où circulent habituellement des véhicules à moteur diesel. Comme le niveau d'exposition au diesel peut varier considérablement et qu'il n'est pas toujours possible de déterminer quels ouvriers sont les plus exposés, il importe de contrôler le plus grand nombre possible de travailleurs à risque;

- groupement des travailleurs en groupes professionnels ou en groupes d'employés qui, du fait de leurs tâches et de leur lieu de travail, sont susceptibles d'être exposés à des concentrations comparables de matière particulaire diesel; on choisit alors des individus de façon aléatoire au sein de ces groupes pour ensuite mesurer leur exposition. Des directives concernant le nombre d'échantillons à prélever et la fréquence d'échantillonnage sont disponibles (9) (10). Elles prévoient un échantillonnage plus fréquent lorsque l'exposition moyenne du groupe est élevée ou lorsque les résultats sont très variables. Le choix des jours d'échantillonnage, également aléatoire, doit cependant tenir compte des cycles normaux de production et d'entretien. Les quarts de travail et les saisons peuvent en outre influencer sur les résultats, de sorte qu'il importe de procéder à un échantillonnage aléatoire sur l'ensemble de l'année. Enfin, dans le cas de petits groupes (moins de 10 employés), tous les individus devraient être évalués.

La communication et l'utilisation des données d'exposition doivent être tenues pour les aspects les plus importants de la procédure d'évaluation et doivent tenir compte des facteurs suivants :

- les résultats d'analyse et les données d'exposition doivent être présentés dans des documents faciles à consulter, assortis de tableaux et dans un langage facile à comprendre;
- les abréviations et les termes techniques doivent être expliqués. Les renseignements peu pertinents doivent être omis par souci de clarté;
- les données doivent faire l'objet d'une organisation logique, par date, par substance, par tâche, par emplacement ou selon toute autre considération d'intérêt; il sera ainsi plus facile d'isoler les sites ou les processus à risque, et d'envisager les mesures correctives à mettre en œuvre;
- les niveaux d'exposition élevés, ou hors normes, doivent être clairement indiqués;
- les situations qui révèlent un niveau d'exposition élevé doivent toujours faire l'objet d'une intervention, que ce soit un nouvel échantillonnage ou la mise en œuvre de mesures correctives;

- toute mesure corrective doit s'attaquer à la source du problème plutôt qu'à une situation globale; à titre d'exemple, le fait d'augmenter la ventilation dans un secteur donné ou dans l'ensemble des installations coûte très cher sans nécessairement assurer la protection de tous les individus concernés.

5.1.2 Prélèvement des échantillons personnels

L'échantillonnage personnel sert à mesurer le niveau d'exposition d'un travailleur ou à vérifier la conformité aux limites d'exposition admissibles. Pour l'évaluation de l'exposition à la matière particulaire diesel, le choix de l'indicateur retenu (poussières combustibles respirables (PCR) ou mesure du carbone) influence les techniques de prélèvement et d'analyse. Nous présentons ci-dessous les **systèmes d'échantillonnage** utilisés pour les deux principales méthodes d'évaluation de l'exposition à la MPD soit la méthode basée sur les PCR et celle exigée par MSHA. Vous trouverez plus de détails à la référence 11. Les conditions d'échantillonnage applicables aux individus et aux zones dans lesquelles ils travaillent peuvent varier d'une juridiction à une autre, si bien qu'il faut toujours consulter la réglementation en vigueur pour s'assurer de la validité de l'échantillonnage et de la technique analytique.

Méthode PCR (Canada)

Pour cette méthode, le système d'échantillonnage se compose d'un cyclone, d'une cassette contenant le filtre, de tubes assortis d'attaches et d'une pompe à débit constant. En guise de **séparateur**, on a recours à un **cyclone en nylon** de 10 mm qui supprime les grosses particules de poussière non respirables en suspension dans l'air. Le cyclone doit être nettoyé avant chaque utilisation et examiné de manière à y déceler toute obstruction ou défaut de fabrication. Le débit de la pompe doit être réglé à 1,7 **litre par minute (L/min)**. La figure 2 montre le système d'échantillonnage installé sur un travailleur.

Méthode MSHA (États-Unis)

Pour être conforme à la décision de MSHA concernant les mines métallifères et non métallifères aux États-Unis, le système d'échantillonnage doit comporter tous les éléments énumérés ci-dessus (méthode PCR) auquel s'ajoute un **impacteur** inséré entre le cyclone et la cassette. Cet impacteur permet de supprimer les particules de poussières respirables de plus de 0,9 micron. Le débit de prélèvement requis est de 1,7 L/min. MSHA exige que la méthode analytique 5040 de NIOSH soit utilisée pour doser le carbone total de l'échantillon comme mesure de l'exposition à la MPD.

Bonnes pratiques d'échantillonnage communes aux deux méthodes

Quelle que soit la méthode utilisée, il faut tenir compte des facteurs suivants au moment de recueillir les échantillons :

- la pompe doit être à débit constant, et la pile doit assurer son fonctionnement pendant tout un quart de travail (en présence du système d'échantillonnage). La pompe doit être intrinsèquement sécuritaire pour pouvoir être utilisée dans un environnement explosif. Son boîtier doit être fait d'un matériau qui la protège contre les **champs électromagnétiques**; lorsqu'une pompe est utilisée à proximité d'un gros moteur électrique, des variations rapides de ces champs, dus au démarrage ou à l'arrêt du moteur, peuvent en effet interrompre le fonctionnement de la pompe, ou encore en modifier le débit d'échantillonnage;
- le débit de la pompe doit être ajusté au moyen d'un débitmètre électronique ou d'une burette à film de savon d'une capacité d'au moins un litre;
- le débit de la pompe doit être vérifié avant et après l'échantillonnage pour s'assurer qu'il est demeuré constant tout au long de la période d'échantillonnage; la variation du débit doit être inférieure à 5 %;
- le tube reliant la cassette à la pompe d'échantillonnage doit être assez long pour permettre un ajustement confortable sur le travailleur; lorsque le tube a déjà été utilisé, il faut s'assurer qu'il est propre, en vérifier les extrémités et les tailler au besoin pour qu'il s'ajuste parfaitement à la pompe et à la cassette;
- le système d'échantillonnage doit être assemblé avec soin. Au moment de fixer la cassette au cyclone, assurez-vous que l'entrée de la cassette est bien ajustée à la sortie du cyclone. Il est possible en effet qu'accidentellement la cassette d'échantillonnage pour les PCR soit installée à l'envers;
- la position de la pompe sur le travailleur doit tenir compte du travail qu'il effectue. Dans le cas d'un mineur, elle peut être fixée à sa ceinture du côté opposé à la pile de sa lampe, légèrement vers l'arrière, ou, dans le cas du conducteur d'un véhicule, décalée sur le côté. Dans tous les cas, les tubes doivent être fixés aux vêtements du travailleur de manière à ce qu'ils n'entravent pas ses mouvements et à ce qu'ils ne soient pas pincés au cours du quart de travail;
- le cyclone doit être placé dans la zone respiratoire du travailleur (le collet de sa chemise étant un bon endroit), et la prise d'entrée d'air doit être orientée vers l'extérieur afin de demeurer dégagée tout au long du quart de travail; assurez-vous que le ciré ou le pardessus (en hiver) ne recouvre ni ne bloque l'ouverture du cyclone;

- le type de filtre utilisé varie en fonction de la méthode d'analyse de la MPD; la section suivante indique le type de filtre à utiliser pour chaque méthode;
- il est recommandé, pour des raisons de qualité et d'uniformité, que la personne responsable au site minier obtienne les cassettes d'échantillonnage d'un laboratoire d'analyse ou d'un fournisseur reconnu; il n'est pas recommandé de procéder à la préparation et au traitement des cassettes d'échantillonnage sur le site même;
- l'échantillonnage doit couvrir tout le quart de travail, puisque c'est la seule façon de comparer directement l'exposition totale relative à un quart de travail à une limite d'exposition préétablie;
- des cassettes témoins pour chaque ensemble d'échantillons doivent être conservées à titre d'**échantillons témoins** et envoyées au laboratoire pour analyse; il s'agit là d'une procédure de contrôle de qualité visant à déceler une anomalie lors de l'échantillonnage ou des manipulations.

5.1.3 Analyse des échantillons

Après le prélèvement, l'échantillon de poussières doit être analysé par un laboratoire accrédité. La matière particulaire diesel est un mélange complexe de plusieurs composants chimiques, ce qui cause notamment des difficultés analytiques. Il s'avère très difficile d'en faire directement une analyse précise et spécifique due notamment aux **interférences** causées par les autres substances communément présentes sur les lieux de travail et qui peuvent fausser la mesure de la MPD. Toutes les techniques actuellement disponibles sont d'ailleurs sujettes aux interférences. Un bon exemple en est le brouillard d'huile de forage qui pourrait être inclus dans la mesure de la MPD selon la méthode d'analyse retenue et la façon dont les données qui en résultent sont interprétées.

Il existe actuellement deux principales méthodes d'analyse pour évaluer l'exposition des travailleurs à la MPD. La première, la méthode des poussières combustibles respirables (PCR), est celle que préconisent la plupart des règlements provinciaux au Canada. La seconde est la méthode NIOSH 5040, qui mesure le carbone élémentaire, le carbone organique et le carbone total.

Méthode PCR

On peut incinérer (brûler) les poussières combustibles respirables recueillies sur un filtre d'échantillonnage en plaçant ce dernier dans un four à une température de 400 °C pendant au moins deux heures. Ceci requiert l'utilisation d'un filtre à membrane d'argent lors de l'échantillonnage. Ce métal agit comme catalyseur et

permet de brûler la poussière diesel à plus faible température. En pesant le filtre avant et après incinération, on obtient le poids des poussières consommées au cours du processus. On calcule ensuite la concentration en tenant compte du poids ainsi obtenu, du débit d'échantillonnage et du temps d'échantillonnage total. Vous trouverez plus de détails sur la méthode PCR aux références 12, 13 et 14.

Filtre : filtre à membrane d'argent d'un diamètre de 25 mm, pores de 0,8 µm.

Avantages : il s'agit là d'une méthode simple et peu coûteuse. Étant donné que l'échantillon est prélevé sur un filtre à membrane d'argent, on peut également y détecter la présence de poussières respirables de quartz (silice). Au Canada, cette méthode est spécifiée dans la plupart des règlements miniers, si bien que plusieurs laboratoires fournissent des services d'analyse.

Inconvénients : la présence de certaines poussières minérales peut entraîner une sous-estimation de la quantité de particules diesels dans l'échantillon. Ce problème risque notamment de survenir dans les mines possédant des gisements fortement sulfurés ou utilisant un carburant à forte teneur en soufre. Le brouillard d'huile de forage, la fumée de cigarette et d'autres sources de carbone peuvent par ailleurs entraîner une surestimation de l'exposition à la MPD. Étant donné que cette méthode repose entièrement sur la pesée des particules, elle n'est pas aussi précise ou exacte que la méthode NIOSH 5040 (voir ci-dessous). Dans le futur, avec la réduction des limites d'exposition et des concentrations de particules diesels dans les mines, la méthode PCR ne sera plus adéquate.

Méthode NIOSH 5040 – Analyse du carbone

La technique d'analyse liée à cette méthode s'avère plus complexe que celle de la méthode PCR. On contrôle ici la température et l'atmosphère des cellules d'analyse afin de mesurer séparément le carbone élémentaire et le carbone organique. Les proportions exactes de chacun sont déterminées à l'aide d'un faisceau laser utilisé pour mesurer la transmission de la lumière à travers le filtre. Le dioxyde de carbone produit au cours de la combustion « contrôlée » de l'échantillon de poussières est mesuré pour ensuite calculer les masses de carbone organique et de carbone élémentaire. Enfin, comme pour la méthode PCR, le débit et le temps d'échantillonnage servent à calculer la concentration des particules diesels en suspension dans l'air. L'instrumentation requise et un **thermogramme** type sont présentés à la Figure 3. Vous trouverez plus de détails sur la méthode NIOSH 5040 aux références 15 et 16.

Filtre : filtre à fibre de quartz d'un diamètre de 37 mm.

Avantages : cette méthode est plus précise et plus exacte que la méthode PCR. Cela dit, on s'interroge encore sur l'indicateur (carbone organique, carbone

élémentaire ou les deux) à utiliser comme facteur d'exposition à la MPD. Bien que le carbone élémentaire ne représente qu'une partie des particules diesels en suspension dans l'air, il demeure possible d'adopter une valeur d'exposition réduite qui tienne compte de ce fait, comme dans le projet de modification des normes en vigueur déposé par l'ACGIH en 2001 (8). Ce faisant, le risque de surestimer l'exposition en présence de substances organiques d'autres sources se trouverait réduit.

Inconvénients : à l'heure actuelle, la méthode NIOSH 5040 n'est pas très répandue. Comme les règlements miniers canadiens n'en font pas mention, seuls quelques instruments sont présentement disponibles au Canada et aux États-Unis. Considérant la nouvelle exigence de MSHA, on peut s'attendre à une augmentation du nombre de laboratoires offrant ce service d'analyse à prix compétitif. Le système d'échantillonnage préconisé par MSHA demande l'utilisation d'un séparateur supplémentaire pour éliminer les particules de poussière de plus de 0,9 µm. Il s'agit d'un impacteur jetable, recommandé notamment dans les mines où le type de poussières est connu comme pouvant causer des interférences analytiques. La présence d'un tel impacteur réduit, mais sans pour autant éliminer complètement, le risque que d'autres composés à base de carbone n'interfèrent avec l'analyse.

Recherches du PMEED sur les méthodes d'échantillonnage et d'analyse

Le Programme minier d'évaluation des émissions diesels (PMEED) a investi une grande partie de ses ressources dans l'essai sur le terrain des deux méthodes décrites ci-dessus. Les rapports résultant de ces études sont cités aux références 17, 18 et 19. On peut également en consulter le contenu intégral sur le site du PMEED à l'adresse suivante : www.deep.org.

En résumé, ces études ont révélé que, sur le terrain, la méthode PCR et la méthode NIOSH 5040 produisent des résultats comparables tant et aussi longtemps que les concentrations de matière particulaire diesel en suspension dans l'air sont suffisamment élevées. Cependant, il en ressort que pour une limite d'exposition à la matière particulaire diesel en deçà de 0,6 mg/m³, la méthode NIOSH 5040 ou une approche analytique similaire serait la seule valable, la méthode des PCR n'étant pas adéquate à basse concentration.

5.2 Échantillonnage direct dans l'échappement

L'échantillonnage de la MPD dans l'échappement direct des diesels n'est pas une pratique courante dans les mines, surtout dû au fait qu'il n'est pas requis par les règlements en vigueur, que ce soit au Canada ou aux États-Unis. De plus, ce genre d'échantillonnage exige un équipement et un protocole complexes. La mesure dans l'échappement de la MPD et des composés gazeux constitue néanmoins une

bonne façon d'évaluer le bon état de fonctionnement d'un moteur ou la nécessité de procéder à son entretien, sans compter qu'il s'agit du meilleur moyen pour déterminer l'efficacité des modules de nettoyage de l'échappement (notamment au niveau des filtres).

L'échantillonnage de la MPD dans l'échappement direct exige normalement qu'un moteur soit testé sous des **conditions uniformes de fonctionnement**, plus particulièrement à pleine puissance et pendant le **calage du moteur à l'aide du convertisseur de couple**. La présente section traite de l'instrumentation requise pour procéder à l'échantillonnage direct dans l'échappement, de même que de plusieurs de ses applications.

5.2.1 Évaluation de l'efficacité des technologies de réduction de la MPD

Dans le cadre de cette application, l'efficacité d'un filtre pour la MPD (p. ex., un filtre en céramique) ou de tout autre dispositif capable de réduire la quantité de particules diesels dans l'échappement est mesurée. Alors que le moteur fonctionne sous des conditions uniformes, on mesure la quantité de particules diesels dans le tuyau d'échappement, avant et après le filtre. L'efficacité de ce dernier est déterminée en fonction de sa capacité à réduire la concentration de particules diesels.

Un instrument a été spécialement conçu pour mesurer l'efficacité de tels filtres. Il s'agit du Nanomet, fabriqué en Suisse par Matter Engineering. Cet instrument, présenté à la Figure 4, donne la mesure indirecte du carbone élémentaire avant et après le filtre, pendant que le moteur tourne. Il comporte un module de prélèvement de l'échantillon qui y est chauffé et dilué. Ce système est adapté à l'échantillonnage direct dans l'échappement. Bien qu'il ait été conçu pour être utilisé en surface, des essais souterrains ont démontré qu'il convient tout aussi bien aux environnements difficiles, si ce n'est que son utilisation requiert beaucoup de formation et d'expérience. On se sert présentement de cet instrument pour évaluer l'efficacité des filtres à haut rendement de la Brunswick Mine dans le cadre du programme de recherche du PMEED. Plus d'informations sont disponibles sur le site Web.

5.2.2 Échantillonnage de la MPD dans les gaz d'échappement non dilués

L'échantillonnage direct de la MPD dans l'échappement peut aussi servir à évaluer l'incidence de l'entretien des moteurs diesels. Un filtre d'aspiration souillé ou une forte contre-pression au niveau du système d'échappement peut en effet produire des concentrations très élevées de particules diesels. À cette fin, un dispositif d'échantillonnage des gaz non dilués a été conçu par CANMET dans le cadre du projet d'entretien du PMEED réalisé à la mine Strathcona de la compagnie Falconbridge Ltée. (20). Étant donné que l'échantillon ainsi obtenu n'est pas dilué, des mesures doivent être prises pour le refroidir à moins de 50 °C et pour maintenir la condensation sous contrôle dans le système d'échantillonnage.

La mesure de la concentration de la MPD dans l'échappement des diesels, avant et après entretien, permet de déterminer l'incidence d'une procédure d'entretien donnée. Le rapport d'enquête final du projet d'entretien du PMEED peut également être consulté à l'adresse Internet précitée.

5.2.3 Échantillonnage des gaz d'échappement non dilués – UGAS

Le Système d'analyse des gaz non dilués^{Breveté} (UGAS) a été conçu par le Centre de technologie Noranda dans le but de faciliter l'entretien des moteurs diesels et la mesure de la pollution due aux gaz d'échappement. Il a notamment été employé pour mesurer les effets de l'entretien sur les émissions diesels dans le cadre du projet d'entretien du PMEED. Ce système fait appel à un analyseur électronique de gaz fabriqué par ECOM-AC, lequel renferme des cellules électrochimiques capables de détecter des gaz d'échappement toxiques tels que le CO, le NO et le NO₂. Il dispose également de capteurs à même de mesurer la température et la pression, et peut communiquer des données diagnostiques à un ordinateur lorsque les données doivent être enregistrées.

Le logiciel UGAS contrôle l'analyseur ECOM et a recours à un protocole d'essai intégré qui guide les mécaniciens d'un bout à l'autre du processus d'échantillonnage. Les essais peuvent ainsi être répétés tout en fournissant des résultats précis, ce qui permet de suivre rigoureusement l'état d'entretien d'un moteur au fil du temps ou par comparaison avec d'autres moteurs du même genre. L'analyseur de gaz, l'ordinateur personnel et le matériel requis sont tous montés sur un chariot de type industriel qui peut être déplacé aux abords d'un véhicule pour en vérifier le moteur et les émissions (Figures 5 et 6).

À l'heure actuelle, le logiciel UGAS demeure la propriété exclusive du groupe Noranda, mais il devrait très bientôt être offert sur le marché. D'autres échantillonneurs de gaz d'échappement sont présentement disponibles, mais ils n'ont pas été utilisés dans le cadre des projets de recherche du PMEED. Il convient par ailleurs de noter qu'aucun de ces dispositifs ne peut mesurer directement la matière particulaire diesel.

5.2.4 Échantillonnage du monoxyde de carbone (CO) non dilué

Exception faite des essais ECOM/UGAS décrits ci-dessus, la mesure de la concentration d'oxyde de carbone dans l'échappement n'a fait l'objet d'aucune des études appuyées par le PMEED. Néanmoins, cette méthode permettant de vérifier l'état d'entretien des moteurs diesels est couramment utilisée par l'industrie minière au Canada comme aux États-Unis. Les règlements miniers stipulent que les concentrations de CO dans l'échappement des diesels ne doivent pas dépasser certaines valeurs (21), ou qu'un véhicule doit être soumis à un entretien lorsque la

concentration émise de CO est le double de celle mesurée au moment de sa livraison initiale à la mine, alors qu'il était neuf (22). L'échantillonnage du CO dans l'échappement des diesels s'effectue préférentiellement dans des conditions de charge normales (sous calage du moteur avec le convertisseur de couple), mais on ne peut appliquer cette règle à l'ensemble de la flotte souterraine dans la mesure où les véhicules à transmission manuelle ne peuvent être contrôlés en toute sécurité, voire efficacement, lorsqu'ils sont sous charge et stationnaires.

On peut mesurer les concentrations au moyen d'un moniteur de CO en temps réel ou d'un tube colorimétrique (Figure 7), ces deux méthodes présentant respectivement des avantages et des inconvénients. Dans un cas comme dans l'autre, toutefois, un tube de refroidissement doit être utilisé en amont de l'échantillonneur. Vous trouverez plus de détails sur le protocole d'échantillonnage à la référence 23.

Quelle que soit la méthode retenue, il convient de garder les points suivants à l'esprit au moment de procéder à l'échantillonnage du CO :

- prenez toutes les précautions nécessaires afin de protéger la personne qui procède à l'échantillonnage contre les émissions du véhicule, la chaleur de l'échappement et les blessures corporelles que pourrait causer un mouvement soudain du véhicule;
- si vous utilisez un tube colorimétrique, assurez-vous que le soufflet de la pompe à main est en bon état (non perforé) en comprimant la pompe, en y insérant un tube fermé et en vérifiant que le vide se maintient pendant 10 minutes à l'intérieur de la pompe;
- si vous utilisez un instrument à lecture directe, veillez à ce qu'il soit périodiquement étalonné conformément aux recommandations du fabricant;
- laissez le moteur atteindre une température de fonctionnement stable, et, une fois le coefficient de charge normale atteint, attendez au moins 15 secondes avant de procéder à l'échantillonnage; la concentration de CO devrait alors diminuer et se stabiliser, un phénomène facilement observable lorsqu'on utilise un instrument à lecture directe mais pas avec un tube colorimétrique.

5.2.5 Mesure de l'opacité

On peut avoir recours à un opacimètre (appareil de mesure de l'**opacité**) pour mesurer la concentration des particules en suspension dans la fumée d'échappement des diesels. Ce genre d'instrument ne fournit pas une mesure précise des concentrations de MPD, mais il offre tout de même un moyen rapide et facile pour évaluer l'état d'un moteur ou pour détecter une faille grossière dans un

dispositif de contrôle de la MPD, tel qu'un filtre en céramique ou quelque autre unité d'épuration à rendement élevé.

Deux types d'opacimètres sont offerts sur le marché, l'un à débit intégral et l'autre à échantillonnage. L'opacimètre à débit intégral se fixe au tuyau d'échappement d'une pièce d'équipement diesel et mesure l'opacité globale du flux des gaz d'échappement; les données fournies par ce type d'appareil peuvent être altérées par les conditions ambiantes, qu'il s'agisse du vent, de l'humidité ou de la lumière vive. L'opacimètre à échantillonnage prélève, quant à lui, une partie des gaz d'échappement dans une chambre de mesure que l'échantillon de fumée doit remplir rapidement et complètement avant qu'on ne procède à la lecture des données. Dans un cas comme dans l'autre, un faisceau de lumière est émis à l'entrée du support d'échantillonnage, et le signal ainsi produit se voit traité par un récepteur à cellule photoélectrique à l'autre extrémité du support, le calcul de l'opacité s'effectuant à partir des données ainsi obtenues. L'opacité correspond à la portion de la lumière que la matière particulaire en suspension empêche d'atteindre le détecteur photoélectrique. Elle peut varier entre 0 % dans un flux d'échappement propre à 100 % dans un flux où la concentration particulaire est suffisamment élevée pour bloquer complètement le passage de la lumière.

6. Conclusions

Le contrôle de l'exposition à la MPD dans les mines sera vraisemblablement soumis à d'importants changements dans un proche avenir. Les limites d'exposition de même que les méthodes d'échantillonnage et d'analyse seront probablement révisées. Pour l'heure, cependant, nous ne saurions trop insister sur l'importance de l'échantillonnage individuel, de gérer efficacement les données d'exposition recueillies et d'appliquer les méthodes de contrôle existantes.

Par ailleurs, divers outils, options et procédures s'offrent à l'industrie en matière d'échantillonnage direct dans l'échappement. Il s'agit là d'autant de moyens pouvant contribuer à évaluer l'incidence des techniques d'intervention sur l'échappement des diesels de même que l'état d'entretien des moteurs diesels en vue d'améliorer l'environnement de travail dans les mines.

7. Références

1. Health Effects Institute. *Diesel Exhaust: A Critical Analysis of Emissions, Exposure, and Health Effects*. Report of the Special Working Group on Diesel, Cambridge MA; Avril 1995.
2. National Institute for Occupational Safety and Health. *Carcinogenic Effects of Exposure to Diesel Exhaust*. Current Intelligence Bull. 50, Dep. Health and Human Services (NIOSH), Publication 88-116, 30 p.; 1988.
3. U.S. Environmental Protection Agency. *Health Assessment Document for Diesel Exhaust*. Report EPA/600/8-90/057E; Juillet 2000.
4. Canadian ad hoc Diesel Committee. Minutes of the december meeting. DEEP, Sudbury, Ontario; Décembre 1990.
5. Mine Safety and Health Administration. *Diesel Particulate Matter Exposure of Underground Metal and Non-metal Miners*. Final Rule 30 CFR Part 57, U.S. Dept. of Labor, MSHA; Janvier 2001.
6. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. *Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents Biological Exposure Indices*. ACGIH; 1996.
7. American Conference of Governmental Industrial Hygienists: *Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents Biological Exposure Indices*. ACGIH; 1998.
8. American Conference of Governmental Industrial Hygienists: *Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents Biological Exposure Indices*. ACGIH; 2001.
9. Grenier, M. *Contaminant Sampling Strategy for the Mining Workplace – Sampling Frequency and Sampling Numbers*. Report prepared for the MAPAO's Technical Standing Committee on the Workplace Environment; Mai 1993.
10. Institut de recherche en santé et en sécurité du travail (IRSST). *Guide d'échantillonnage des contaminants de l'air en milieu de travail*. 7^e édition., Guide technique T-06, 153p.; 2000.
11. Fraser, J., Weeks, S., Walker, H. and Griffiths, D. *Gravimetric Sampling Techniques for Particulates*. Report to the MAPAO Sub-committee of the Technical Standing Committee, Workplace Environment; Novembre 1990.

12. Roach, A., Grenier, M. and Butler, K. *Respirable Combustible Dust Measurement in Underground Mines, Phase I - Determination of Blank Silver Membrane Filter Mass Loss During the Ashing Process*. Division Report MRL 92-102(OP). Natural Resources Canada, CANMET, Mining Research Laboratories; 1992.
13. Grenier, M., Roach, A., and Gangal, M. *Respirable Combustible Dust Measurement in Underground Mines, Phase II - Selection of the Optimal Ashing Time and Temperature for RCD Analysis on Silver Membrane Filters*. Division Report MRL 93-068(CL). Natural Resources Canada, CANMET, Mining Research Laboratories; 1993.
14. Grenier, M. and Butler, K. *Respirable Combustible Dust (RCD) Sampling and Analysis Protocol*. Division Report MRL 96-029(TR). Natural Resources Canada, CANMET, Mining Research Laboratories; 1996.
15. Birch, M.E. and Cary, R.A. Elemental Carbon-Based Method for Monitoring Occupational Exposures to Particulate Diesel Exhaust. *Aerosol Science and Tech.*, 68(3): 221-241; 1996.
16. National Institute for Occupational Safety and Health. *Method 5040 - Elemental Carbon, Diesel Particulate*. Issue 3 (interim); Septembre 1999.
17. Watts, W., Spears, M. and Johnson, J. *Evaluation of Biodiesel Fuel and Oxidation Catalyst in an Underground Metal Mine*. Report of Investigation submitted to the Diesel Emissions Evaluation Program (DEEP) Technical Committee; Septembre 1998.
18. Watts, W. and Ramachandran, G. *Diesel Particulate Matter Sampling Methods – Statistical Comparison*. Report of Investigation submitted to the Diesel Emissions Evaluation Program (DEEP) Technical Committee; Août 2000.
19. Grenier, M., Gangal, M., Lastra, R., Mikhail, S., Turcotte, A.-M., Butler, K., Edwardson, E. and Laflamme, E. *Evaluation of Existing Diesel Particulate Sampling Methods at a High Sulphide Ore Mine*. Report of Investigation submitted to the Diesel Emissions Evaluation Program (DEEP) Technical Committee; Décembre 1998.
20. McGinn, S. *The Relationship Between Diesel Engine Maintenance and Exhaust Emissions*. Report of Investigation submitted to the Diesel Emissions Evaluation Program (DEEP) Technical Committee; Février 2000.
21. Province de l'Ontario. *Occupational Health and Safety Act and Regulation for Mines and Mining Plants*. Revised Statutes of Ontario; Septembre 1997.

22. Commonwealth of Pennsylvania. *Diesel-Powered Equipment, Act 182*. Bureau of Deep Mine Safety; 1996.
23. Grenier, M. *Mesure du monoxyde de carbone dans l'échappement des moteurs diesels*. Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec, Études et Recherches, Rapport R-221; Juin 1999.

8. Annexe 1 : Figures

Figure 1 : Particules de diesel

Figure 2 : Système d'échantillonnage des poussières

Figure 3 : Méthode NIOSH 5040 + Thermogramme

Figure 4 : Instrument Nanomet

Figure 5 : Échantillonnage direct des émissions à l'aide de l'appareil UGAS/ECOM

Figure 6 : Fenêtre du logiciel de contrôle UGAS

Figure 7 : Échantillonnage du CO à l'aide de tubes colorimétriques

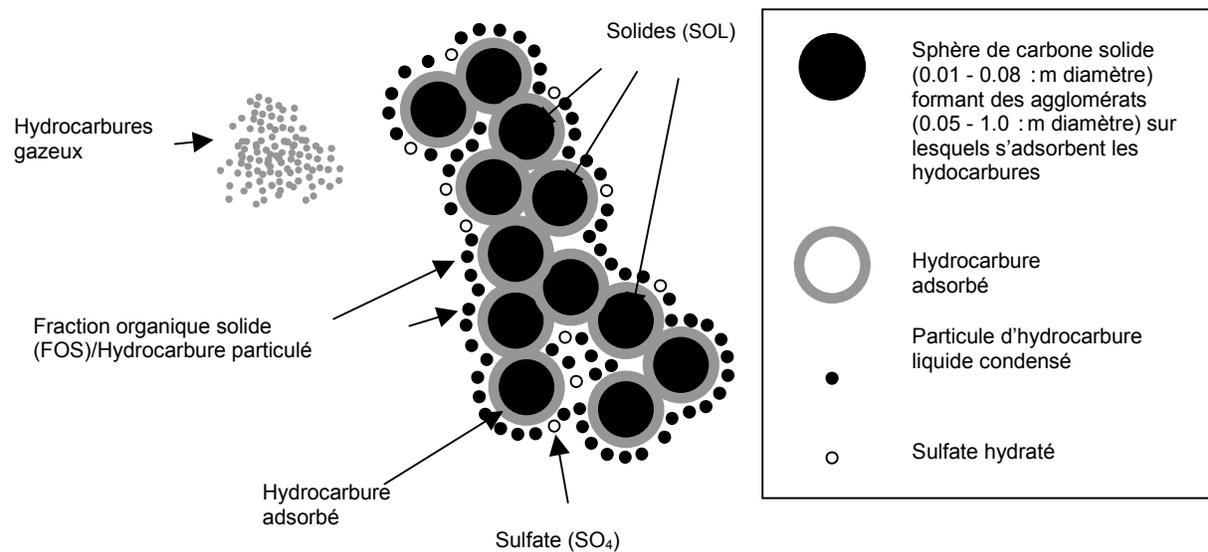


Figure 1. Particules de diesel (tiré de la Référence 1)

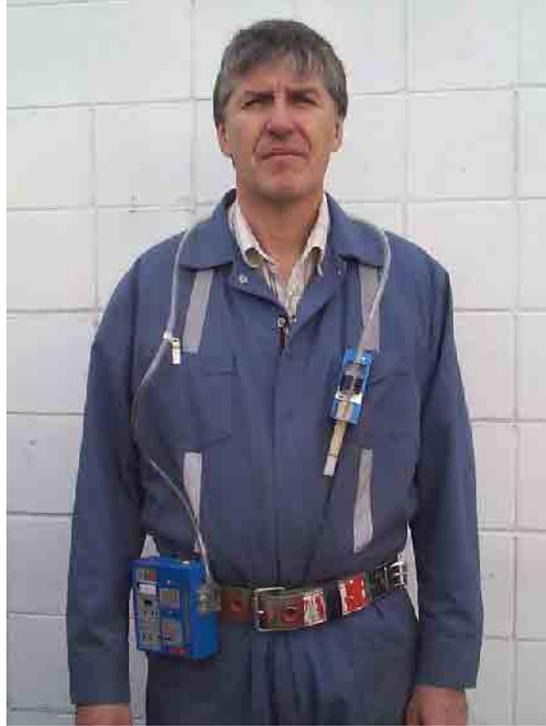


Figure 2. Système d'échantillonnage des poussières

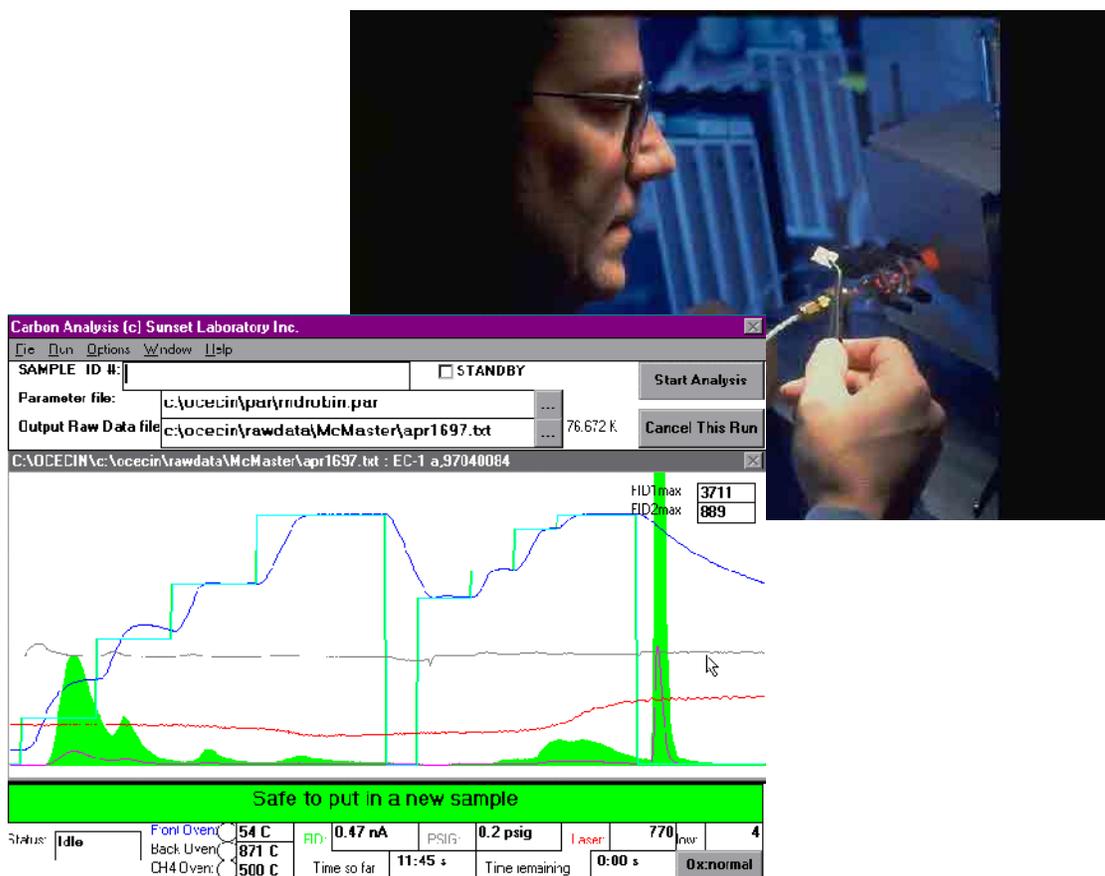


Figure 3. Méthode NIOSH 5040 - thermogramme



Figure 4. Instrument Nanomet



Figure 5. Échantillonnage direct des émissions à l'aide de l'appareil UGAS/ECOM



Figure 6. Fenêtre du logiciel de contrôle UGAS



Figure 7. Échantillonnage du monoxyde de carbone à l'aide de tubes colorimétriques