

1-1745



Energy, Mines and Resources Canada / Énergie, Mines et Ressources Canada

CANMET

Canada Centre for Mineral and Energy Technology / Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie

MRL 86-19 (OPJ) F

ORGANISATION, OBJECTIFS ET REALISATIONS D'UN PROGRAMME DE RECHERCHE ENTREPRIS CONJOINTEMENT PAR TROIS GOUVERNEMENTS SUR LA RECHERCHE ET LE DEVELOPPEMENT RELATIFS A LA REDUCTION DES EMISSIONS DE DIESEL

E.D. DAINTY, E.W. MITCHELL, G.H. SCHNAKENBERG, JR.

LABORATOIRE CANADIEN DE RECHERCHE SUR LES ATMOSPHERES EXPLOSIVES

fevrier 1986

**BIBLIOTHÈQUE
CANMET
LIBRARY**

APR 18 1986

555 r.e BOOTH ST.
OTTAWA CANADA K1A 0G1

Presented to the CIM/AGM, Montreal, May 14, 1986, and published in the Special Volume "Diesel Emission Control Technology for Underground Mines"

889

LABORATOIRES DE RECHERCHE MINIERE
RAPPORT DE DIVISION MRL 86-19 (OPJ) F

1745

ARTICLE N° 1

ORGANISATION, OBJECTIFS ET RÉALISATIONS D'UN PROGRAMME DE RECHERCHE
ENTREPRIS CONJOINTEMENT PAR TROIS GOUVERNEMENTS SUR LA RECHERCHE
ET LE DÉVELOPPEMENT RELATIFS À LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE DIESEL

par

E.D. Dainty*, E.W. Mitchell** et G.H. Schnakenberg, Jr.***

Mots clés: Émissions de diesel

RÉSUMÉ

Dans cet article, on traite brièvement de l'historique du travail de collaboration réalisé par trois organismes de financement: le United States Bureau of Mines (USBM), le Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET), le Ministère du travail de l'Ontario (MOL), et de nombreux entrepreneurs du secteur privé. Chaque organisme gouvernemental a mis en place depuis un certain temps un programme relatif au diesel, ayant réalisé le besoin de mieux comprendre l'incidence des émissions de diesel sur la santé des travailleurs de fond. La collaboration officielle a commencé le 1^{er} décembre 1981, avec la signature d'un mémoire d'entente par les trois gouvernements. Ce programme se termine officiellement le 9 juin 1987, qui est la date d'achèvement précisée dans ce document.

*Chercheur, Laboratoire canadien de recherche sur les atmosphères explosives, Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie, EMR, Ottawa, Ontario, Canada.

**Coordonnateur de la recherche, Direction de la santé et de la sécurité dans les mines, Ministère ontarien du travail, Toronto, Ontario, Canada.

***Chercheur physicien en chef, United States Bureau of Mines, Pittsburgh, PA, USA.

Le résultat de ce mémoire a été la formation du "Collaborative Diesel Research Advisory Panel" (Comité consultatif conjoint sur la recherche relative au diesel) (CDRAP), qui a entrepris de résoudre un certain nombre de problèmes, en particulier: (1) l'emploi d'un critère selon lequel on pourrait évaluer la toxicité globale des principaux composants des gaz brûlés de diesel, et ultérieurement la mise sur pied de recommandations sur la ventilation et d'études économiques et techniques, (2) la recherche et le développement de matériel additionnel pour conduites d'échappement et l'étude d'autres techniques permettant de réduire les émissions des moteurs diesel, (3) l'élaboration de moyens de mesurer l'incidence de tels dispositifs sur l'environnement du sous-sol, à l'intention des organismes de réglementation et des exploitants miniers, et finalement (4) la synthèse des principes retenus, en une stratégie globale permettant d'améliorer l'environnement des mines, de réduire les coûts de la ventilation, d'augmenter la productivité et d'augmenter la sécurité dans le sous-sol, suivant les circonstances dans chaque cas.

Dans cet article, on a discuté de façon générale de ces thèmes, qui sont traités de façon plus détaillée dans les cinq autres articles de cette série, et encore plus en détail dans la réimpression des articles et la bibliographie annotée que contient ce bref ouvrage.

INTRODUCTION

On a graduellement introduit des machines fonctionnant au diesel dans les mines souterraines d'Europe pendant les années 1940, pour améliorer certains détails de l'exploitation minière du charbon. L'introduction de ces machines dans les mines d'Amérique du Nord a commencé sérieusement pendant les années 1950. Dès le début des années 1960, beaucoup de mines nord-américaines autres que les exploitations de charbon employaient des machines diesel, dont l'usage restait limité dans les mines de charbon.

L'opinion générale était que les machines diesel non assujetties assurent une flexibilité qui à son tour favorise une amélioration du rendement et de la productivité. Jusqu'à présent, cette notion persiste, mais quelques-uns mettent en doute ce point de vue lorsqu'ils considèrent le système d'exploitation minière dans son ensemble. Certains expriment un point de vue selon lequel l'emploi combiné de machines fixes et de machines flexibles peut s'avérer plus efficace dans certains types d'exploitations minières.

Pour remédier à l'emploi croissant des machines diesel, les organismes de réglementation des principales nations minières ont entrepris de la R&D, dans le but d'élaborer des normes concernant l'emploi de telles machines dans le sous-sol. Il convient en particulier de noter les efforts déployés par John C. Holtz et al. du United States Bureau of Mines (USBM), à Pittsburgh. Dès 1960, ces travaux étaient bien établis dans (1) et ont apporté des données utiles à l'établissement des moyens de ventilation prévus dans plusieurs des normes élaborées par l'USBM, relativement au combustible diesel employé dans plusieurs types de mines (2).

La crise de l'énergie du milieu des années 1970 a amené les pays de l'Ouest à reconsidérer l'emploi de toute la gamme des produits dérivés du pétrole. Le rendement thermique élevé des moteurs diesel encourageait une augmentation de leur emploi par rapport aux autres types de moteurs dans tous les types d'applications; on a redouté une augmentation considérable des taux de polluants particuliers dans l'atmosphère des villes, qui pouvaient avoir une sérieuse incidence sur la santé humaine.

En Amérique du Nord, ces circonstances ont à nouveau éveillé l'intérêt des organismes de réglementation gouvernementaux, et ont catalysé la participation commune à la R&D, de trois organismes chargés des mines: le United States Bureau of Mines, le Ministère du travail (MOL) de la province de

l'Ontario, et le Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET).

DÉPART DE LA COLLABORATION DES TROIS GOUVERNEMENTS

Afin de protéger la santé des mineurs dans l'industrie minière du Canada fortement équipée en machines diesel (27 % du nombre total estimé de 15 000 machines diesel dans le monde libre), on a élaboré en 1977 un plan détaillé de R&D relative à la santé et à la sécurité en rapport avec l'utilisation du diesel (3). Ces travaux ont coïncidé avec la disponibilité de fonds du gouvernement canadien, libérés en rapport direct avec la crise de l'énergie. Le plan a consolidé deux initiatives prises l'année auparavant, et les a intégrées dans un programme continu, qui a évoqué le besoin de collaboration intergouvernementale. Ces deux initiatives étaient: (a) l'élaboration d'un critère détaillé, permettant d'évaluer l'incidence combinée de plusieurs des composants toxiques des gaz brûlés de diesel, et aboutissant à l'expression de l'indice de qualité de l'air décrit ci-dessous et (b) la détermination du rendement des épurateurs à l'eau et purificateurs catalytiques alors couramment employés.

Les deux tiers (c.-à-d. 2 700 machines) de la totalité des machines diesel employées dans les mines souterraines par le Canada se trouvant sous la juridiction de la province de l'Ontario, le gouvernement de cette province a lui aussi exprimé des inquiétudes profondes, en réponse aux critiques toujours plus pressantes des mineurs eux-mêmes à propos de l'utilisation des combustibles diesel.

De ce fait, en raison des inquiétudes exprimées, de la contribution substantielle du secteur minier à l'économie canadienne dans son ensemble, et de l'équipement en machines diesel d'une grande partie de l'industrie minière, on a au Canada éprouvé le sentiment qu'il était temps de se lancer dans une étude importante.

On a décrit plus haut les initiatives originales du U.S. Bureau of Mines dans ce domaine. Outre ces débuts énergiques, le Bureau of Mines a déployé des efforts qui ont abouti à une étape significative en janvier 1973. Schnakenberg (5) a décrit cette importante étape représentée par le symposium de Pittsburgh (4) sur l'emploi de matériel fonctionnant au diesel dans les mines souterraines, ainsi qu'un certain nombre d'autres thèmes importants rattachés à cette étude en cours. Celui-ci décrit la coopération du U.S. Bureau

of Mines et de ses organismes apparentés: the Mining Enforcement and Safety Administration, maintenant appelée Mining Safety and Health Administration (MSHA), le National Institute of Safety and Health (NIOSH), et aussi l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), pour la période allant de 1973 à 1978. Cette coopération a contribué à renforcer le point de vue, selon lequel il est nécessaire de poursuivre les recherches relatives à la réduction des émissions de gaz brûlés de diesel, et à l'incidence de ces émissions sur la santé.

Durant le symposium sur l'hygiène industrielle tenu en novembre 1978 par l'ACGIH, a été pour la première fois présentée la théorie du CANMET sur l'indice de qualité de l'air, formulée par I.W. French et A. Mildon (6), dont il est question dans la section suivante; les résultats initiaux des travaux de surveillance environnementale proposés par le Bureau of Mines et réalisés par la Michigan Technological University, ont été décrits, et une étude conjointe MSHA/NIOSH sur les émissions de diesel et silice, a été présentée.

Tous ces importants développements ont précédé une discussion informelle entre des représentants du Canada et des États-Unis, lors de la Conférence internationale de 1979 des instituts de recherche sur la sécurité dans les mines, qui ont proposé d'entreprendre un programme conjoint de recherches sur le développement d'un matériel permettant de réduire substantiellement les émissions de diesel, et de poursuivre la mise au point des techniques d'évaluation environnementales. Des discussions similaires tenues lors de la réunion en 1980 de l'American Mining Congress ont renforcé le besoin d'établir un programme conjoint de R&D. Ces discussions ont été suivies en 1980 d'une réunion de trois organismes de financement à Pittsburgh: l'USBM, le MOL et le CANMET, en même temps qu'un important entrepreneur, la Fondation de recherches de l'Ontario (FRO). Cette réunion avait pour but d'indiquer le statut actuel de la R&D sur les émissions de diesel, et d'établir des plans en vue d'une collaboration officielle. Ce programme de coopération a été ratifié par la signature d'un mémorandum d'entente en décembre 1981; puis le Comité consultatif conjoint de la recherche sur le diesel (Collaborative Diesel Research Advisory Panel (CDRAP)) a été constitué.

L'une des premières mesures prises a été l'établissement d'une installation expérimentale de pointe pour essais de moteurs à la Fondation de recherches de l'Ontario, avec l'important soutien du ministère du travail de l'Ontario. Cette installation comprenait:

1. des dynamomètres assistés par ordinateur permettant de simuler des cycles de fonctionnement des véhicules,
2. un système d'échantillonnage en tunnel de dilution permettant un échantillonnage dynamique de la matière particulaire,
3. des appareils d'analyse sophistiqués, nécessaires pour observer les divers composants gazeux, liquides et solides présents dans les gaz brûlés de diesel, et
4. l'élaboration d'une capacité d'évaluation mutagène par le test d'Ames, pour immédiatement déceler la présence potentielle de carcinogènes.

Le groupe d'étude a par la suite été l'instrument d'échange des résultats de R&D, non seulement entre les organismes de financement, mais aussi entre les divers entrepreneurs et industriels contributeurs du secteur privé, utilisateurs du matériel et organismes de réglementation. Ce groupe a aussi été l'instrument de consultations sur l'orientation que devrait prendre la R&D pour que soient réalisés les quatre principaux objectifs énumérés dans le sommaire. On a largement diffusé les comptes-rendus circonstanciés des réunions du groupe dans l'ensemble de la communauté minière, de façon à informer toutes les personnes concernées des activités et de l'avancement des travaux.

Dans le reste de cet article, on a décrit brièvement les détails essentiels concernant la réalisation de ces objectifs; on les approfondit dans les cinq articles suivants de ce bref ouvrage.

CHOIX DU MOYEN D'AMÉLIORATION

Les émissions de diesel contiennent un certain nombre de composants toxiques pour ceux exposés à des concentrations suffisamment élevées pendant des périodes suffisamment longues. La mise en évidence des taux et périodes d'exposition non dangereux représente un processus; la perception des valeurs appropriées de ces paramètres change avec l'expérience et le degré de compréhension acquis.

Parmi les nombreux constituants des gaz brûlés de diesel, six causent des inquiétudes à divers degrés: le monoxyde de carbone (CO), le peroxyde d'azote (NO₂), l'oxyde azotique (NO), l'anhydride sulfureux (SO₂), les aldéhydes et la suie. Le tableau 1 indique le degré d'inquiétude qu'ils suscitent, du plus faible au plus élevé, et la réduction générale des taux de

chacun d'eux au niveau du tuyau d'échappement, en fonction du temps (gamme la plus élevée de taux dans des conditions de pleine charge et de plein régime). Ces réductions sont dues aux progrès en matière de combustion en deux étapes ou d'injection indirecte de combustible (IDI), au lieu d'injection directe (DI), depuis 20 ans. Finalement, le tableau indique les rapports de dilution nécessaires pour réduire les taux au niveau du tuyau d'échappement aux valeurs limites (TLV) d'après l'ACGIH ou à d'autres valeurs limites appropriées.

Tableau 1 - Taux non dilués de contaminants dans les gaz brûlés de diesel, lorsque le moteur fonctionne à pleine charge et plein régime

Composant	Unités	Taux libérés	Taux libérés	Valeur TLV ou autre limite	Rapport de
		par les moteurs de la génération antérieure (DI)	par les moteurs de la génération actuelle (IDI)		dilution actuellement exigé
CO	ppm	2000	300	50	6
NO ₂	ppm	-	48	3	16
NO	ppm	1500	700	25	28
SO ₂ *	ppm	80	80	2***	40
Suie	mg/m ³	1000	75	1.5**	50
EQI	-	-	232	3**	77

*0,20 % de soufre dans le combustible.

**proposé dans (6).

***notez que la valeur TLV de SO₂ reste 3 ppm, lorsqu'on l'emploie dans l'expression EQI définie plus loin.

Le CO, autrefois sujet de grande inquiétude, nous préoccupe moins que les autres composants, à mesure que nous connaissons mieux l'incidence de ceux-ci sur la santé: NO₂ n'est généralement pas un constituant de première importance, bien que sa concentration tende à monter aux charges d'exploitation inférieures; le NO est modérément préoccupant; le SO₂ est peut être le gaz qui éveille à lui seul la plus grande inquiétude, parce que sa valeur TLV a récemment été réduite à 2 ppm - si le taux de soufre de combustible est inférieur à 0,2 %, le SO₂ pose peu de problèmes; les taux d'aldéhydes sont généralement maintenus au-dessous de leur TLV, lorsqu'on réduit les taux des

autres composants; il semble que la suie exige le plus grand degré de dilution par de l'air frais, sa valeur limite étant de 1,5 mg/m³.

La suie de diesel est visible, et a toujours été considérée comme inacceptable et peut-être même dangereuse par les mineurs. Toutefois, ce n'est que depuis une dizaine d'années que l'on s'inquiète ouvertement de son incidence relative sur la santé. L'Agence pour la protection de l'environnement (Environmental Protection Agency, EPA) aux États-Unis, et le ministère de l'Environnement du Canada prévoient tous deux dès 1991 les mêmes réductions substantielles des émissions de suie provenant de l'emploi du diesel en surface par rapport aux niveaux actuels, de façon à supprimer les conséquences néfastes pour la santé. De récentes études indiquent que, si l'exposition de l'organisme aux poussières de charbon est caractérisée par l'activation normale des macrophages alvéolaires (réaction normale quand les poumons sont envahis par des particules délétères), l'apparition de populations de macrophages après exposition de l'organisme à la suie de diesel suggère un empoisonnement, suivi d'une dégradation des fonctions pulmonaires (7). I.W. French and Associates, entrepreneurs au service du CANMET, après avoir étudié 1500 citations figurant dans la documentation de 1978 (6), ont conclu que la suie de diesel pouvait être le composant le plus dangereux des gaz brûlés de diesel, et suggérait d'attacher plus d'importance à la réduction du taux de ce produit.

En général, lorsqu'on apporte aux moteurs des modifications telles que le réglage de l'injection, on modifie les proportions relatives des divers composants susmentionnés. Waytulonis (8), dans un important effort de recherche réalisé pour le compte du Centre de recherches de Twin Cities du U.S. Bureau of Mines, situé à Minneapolis, a étudié en détail les variations du taux de ces composants résultant de pannes, de l'usure et du dérèglement des moteurs. Parfois, les variations se compensent mutuellement - lorsque le taux d'un composant augmente, celui des autres diminue. De plus, en diminuant le régime d'un moteur, c'est-à-dire en réduisant son taux maximum de consommation de combustible, on peut réduire les émissions de suie au-dessous du "point de fumée", peut-être parce que l'on modifie le rapport des composants principaux des gaz brûlés. Finalement, l'ajout de dispositifs de réduction des émissions peut fortement modifier les concentrations relatives des composants.

Ainsi, tous les secteurs de l'industrie minière se trouvent confrontés au dilemme suivant: en fonction de quel critère doit-on évaluer le niveau

approprié de ventilation, c'est-à-dire la qualité de l'air? En formulant un tel critère, on doit idéalement: (a) tenir compte du caractère variable des composants, (b) évaluer en détail la toxicité des composants des gaz brûlés qui suscitent la plus grande inquiétude, (c) favoriser toute amélioration de la qualité de l'air permettant des compromis économiques et techniques, et (d) autoriser les organismes de réglementation à prescrire des mesures de ventilation conformes aux articles (a), (b) et (c), et permettre que soient faites des mesures pour vérifier si les règlements sont respectés.

Lors d'une réunion des participants à Pittsburgh en 1980, on a examiné les détails susmentionnés, et décidé que le coefficient d'incidence sur la santé (Health Effects Index, HEI), rebaptisé ensuite indice de la qualité de l'air (Air Quality Index, AQI), était le meilleur critère existant pour réaliser les objectifs en question, et en particulier pour mesurer les progrès en matière de technologie antipollution, visant à réduire les émissions globales de diesel.

Durant la même réunion, le CDRAP a décidé d'employer les moteurs* Deutz à injection indirecte de combustible (IDI) qui produisent des quantités moindres d'émissions, en raison de l'utilisation à grande échelle de ceux-ci par l'industrie minière du Canada et des États-Unis. Bien que l'on ait déjà réalisé de la R&D relative au moteur F8L714, en particulier des recherches concluantes sur les émulsions d'eau dans le combustible, en vue de réduire les taux de suie et de NO, on a choisi la série 413FW, celle-ci ayant été introduite en 1976 pour finalement remplacer la version 714. Malheureusement, le système d'émulsion d'eau dans le combustible ne s'est pas avéré efficace, lorsqu'on l'a appliqué à la nouvelle série 413FW.

Excepté quelques changements mineurs et avantageux, la concentration relative des composants que l'on retrouve dans les gaz brûlés de diesel n'est pas modifiée par la dilution. Par conséquent, le critère de French-Mildon, employé pour évaluer l'air dilué ou ambiant, et appelé indice de ventilation (Ventilation Index), coefficient de l'incidence sur la santé (Health Effects Index) ou de préférence indice de la qualité de l'air (Air Quality Index,

*On se réfère dans cet article à des marques, appareils ou noms de commerce spécifiques pour faciliter la compréhension de cet article; ceci ne veut pas dire que les produits en question soient recommandés par les organismes gouvernementaux.

AQI), peut servir à évaluer la toxicité potentielle des gaz brûlés, non dilués, de diesel. Lorsqu'on l'emploie à cette fin, on le désigne par le terme d'indice de la qualité des gaz brûlés (Exhaust Quality Index, EQI). L'étude documentaire sur le critère de French-Mildon recommandait une valeur maximum de 3 pour l'indice de la qualité de l'air (AQI), au-dessus de laquelle on suggérait d'appliquer des mesures de réduction des émissions. L'expression mathématique recommandée était:

$$\text{EQI ou AQI} = \frac{\text{CO}}{50} + \frac{\text{NO}}{25} + \frac{\text{RCD}}{2} + \frac{\text{H}_2\text{SO}_4}{1} + 1,5 \left[\frac{\text{SO}_2}{3} + \frac{\text{RCD}}{2} \right] + 1,2 \left[\frac{\text{NO}_2}{3} + \frac{\text{RCD}}{2} \right]$$

dans laquelle la concentration en ppm de chaque gaz est divisée par sa valeur TLV selon l'ACGIH, à l'instant où l'expression est formulée, et RCD est le taux de poussières combustibles inhalables, limité à 2 mg/m³. En outre, on doit préciser qu'aucun composant ne doit dépasser sa propre limite, et que la somme des termes gazeux (CO, NO et NO₂ par rapport à leur TLV respective) doit être inférieure à 1.

On peut alors calculer un rapport minimum de dilution de la ventilation, à partir de $\text{EQI/AQI}_{\text{max}} = \text{EQI}/3$; l'équation relative à la norme minimum de ventilation est:

$$\text{taux de ventilation} = \text{taux de gaz brûlés secs non dilués} \times \text{EQI}/3.$$

En admettant que le taux de soufre du combustible soit de 0,20 %, et en appliquant les valeurs maxima susmentionnées aux divers composants, on obtient typiquement une valeur EQI de 232, qui lorsqu'on la divise par $\text{AQI}_{\text{max}} = 3$ donne un rapport de dilution de 77. Ainsi, si l'on emploie la valeur la plus générale d'EQI, celle-ci, et non l'un des composants individuels indiqués au tableau 1, permettra de régler la ventilation dans la plupart des cas.

Il existe un développement plus poussé de ce critère permettant de séparer les effets dus au gaz, des effets des poussières combustibles inhalables (RCD), par le biais de deux formules indépendantes ayant chacune leur propre limite. On prie le lecteur de se référer à (9) pour plus de détails. Aux fins d'évaluation du rendement de la technologie de réduction des émissions, le CDRAP a continué à utiliser l'équation unique ci-dessus pour plus de cohérence, étant donné que les deux systèmes d'équations donnent des résultats pratiquement identiques quant au rapport de dilution dans l'air frais.

Il convient de noter que l'emploi d'AQI = 3 dans la relation exprimée par une seule équation, n'augmente généralement le taux de ventilation prescrit dans le cas des gaz brûlés non traités que faiblement par rapport au critère employé aux États-Unis: NO_x (sous forme de NO_2 équivalent) divisé par une limite de 12,5 comme recommandé dans la section 36 (2).

Par conséquent, du point de vue des objectifs précisés plus haut, ce critère tient compte de la relation variable entre les composants, et évalue leurs effets globaux. Quand il s'agit d'évaluer les améliorations de la qualité de l'air, on constate que l'ajout d'un dispositif capable de réduire à 90 % les émissions de particules, réduit l'indice EQI d'environ 30 à 15 %, suivant le cas, comme le montre un examen de l'expression AQI. On peut donc établir un équilibre entre d'une part la réalisation d'un bénéfice total quant à l'amélioration de la qualité de l'air par l'utilisation d'un tel appareil et le maintien de la ventilation au niveau antérieur, et d'autre part la réalisation d'un bénéfice économique par réduction de la ventilation au niveau approprié, tel que déterminé d'après la limite maximum de l'indice AQI ou des composants individuels. De même, l'achat de combustibles faiblement soufrés a un effet que l'on évalue facilement, etc.

De plus, la technologie évolue de la façon décrite plus loin, ce qui permet d'évaluer dans les mines souterraines le taux de ces principaux composants avec des appareils de mesure in situ de la moyenne du poids en fonction du temps, donc de calculer les valeurs AQI. Ceci permet ensuite aux exploitants ou aux organismes de réglementation d'évaluer le rendement sur place des moteurs et celui des appareils ou systèmes de traitement, pour assurer des niveaux adéquats de ventilation dans un cas donné. Ainsi, l'emploi de ce critère permet de satisfaire aux quatre conditions (a) à (d) d'évaluation des progrès, décrites plus haut à la page 4.

Non seulement le CDRAP a appliqué ce critère d'indice de la qualité de l'air (AQI) à la détermination du rendement des appareils, mais encore il a fait appel à un essai supplémentaire - le test d'Ames. L'activité mutagène, telle que déterminée par l'essai microbiologique d'Ames, a manifesté une corrélation positive élevée avec un certain nombre d'autres tests (in vitro et in vivo) de mutagénicité et de carcinogénicité dans le cas de la fraction soluble de particules provenant du combustible diesel (10). Ainsi, le test d'Ames constitue un moyen peu coûteux, pratique et approprié pour comparer les contaminants dérivés du diesel, d'un moteur à l'autre, et d'un dispositif de

traitement à l'autre; on peut donc ensuite formuler des jugements sur les types de R&D à poursuivre, à davantage explorer, ou à rejeter.

MISE AU POINT D'APPAREILS DE TRAITEMENT DES GAZ BRÛLÉS

On peut employer des appareils de traitement des gaz brûlés, comme ceux mis au point dans le cadre du programme CDRAP, pour réduire les émissions de diesel dans tous les types d'exploitations souterraines: mines de charbon, autres types de mines grisouteuses, mines de minerais métalliques, et autres types d'exploitations souterraines ne contenant pas de gaz. Dans le cas des mines grisouteuses, on doit prendre d'autres mesures pour réduire les dangers d'incendie et d'explosion. Traditionnellement, on a employé du matériel d'épuration à l'eau dans les mines grisouteuses, pour éviter autant que possible ces dangers. Toutefois, il y a une décennie, ces appareils étaient déjà courants dans les mines de minerais métalliques. À cet égard, le contrat initial de 1977 conclu par le CANMET avec la Fondation de recherches de l'Ontario, contrat décrit dans (11), précisait, de toute évidence pour la première fois dans la documentation publiée, le rendement de deux épurateurs à l'eau déjà couramment employés et d'un purificateur catalytique direct, tous deux employés dans des mines de minerais métalliques. Les épurateurs ont enlevé une quantité notable (40 à 65 %) des oxydes de soufre (SO_2 et SO_3 - détail important, étant donné la réduction récente de la TLV du SO_2 de 3 à 2), mais seulement 30 % à peu près de la suie. Le purificateur catalytique réduisait 90 % du CO en gaz carbonique (CO_2), mais convertissait des quantités significatives de SO_2 en SO_3 et de NO en NO_2 (SO_3 et NO_2 sont les formes les plus toxiques). Ces premiers résultats ont suggéré que l'on pouvait encore apporter des améliorations, particulièrement pour capturer la suie. De ce fait, on a entrepris des travaux de développement sur la technologie antipollution.

Dans le cadre de ce programme de développement, a été conclu un accord sur la recherche entre le CANMET et l'Université de Waterloo; il s'agit d'étudier les produits permettant de filtrer la suie émise par des gaz brûlés de diesel. Cette étude s'est poursuivie pendant 3 ans (1977-1979) et a démontré que six produits représentaient des solutions potentielles. L'USBM et le CANMET ont étudié les deux produits les plus prometteurs en construisant et en mettant à l'épreuve dans leurs propres installations des systèmes prototypes, cela avec un succès modeste.

Immédiatement après, des représentants de la compagnie Corning Glass Works ont approché le CANMET et l'USBM, pour évaluer le potentiel d'un élément à filtre céramique poreux, comme système de contrôle des émissions de diesel dans le sous-sol. Les premiers essais ont donné des résultats concluants. Comme l'appareil semblait offrir des avantages considérables du point de vue de son volume, et en matière d'entretien et de potentiel de régénération, on a suspendu tout autre travail de développement des produits à Waterloo.

Ces études initiales ont par la suite amené le CDRAP à étudier la série suivante de matériel antipollution:

1. (a) un simple épurateur à l'eau optimisé, de type défecteur, et
(b) un système d'épuration à l'eau, de rendement élevé, de type venturi.

2. Plusieurs types de filtres céramiques poreux, pour recueillir les émissions particulaires de diesel (appareils DPF):
 - (a) de simples filtres DPF épurant les gaz brûlés à haute température, favorisant une autorégénération spontanée de la suie (combustion), et produisant ainsi des contre-pressions d'équilibre acceptables.
 - (b) l'emploi d'additifs du combustible et en même temps de l'appareil de filtration DPF susmentionné, pour abaisser de façon significative la température d'inflammation spontanée de la suie, et prolonger la durée d'utilisation du filtre ou assurer l'autorégénération passive et spontanée de ce filtre.
 - (c) l'emploi de filtres DPF imprégnés d'un catalyseur noble, permettant d'abaisser davantage la température d'auto-inflammation de la suie par rapport à (b), détail particulièrement utile dans le cas de combustibles faiblement soufrés. Des travaux préliminaires récents indiquent une conversion négligeable du SO_2 en SO_3 dans le cas d'un catalyseur noble, ce qui élimine peut-être ce problème, lorsque l'on emploie des combustibles à taux de soufre modéré,
 - (d) l'emploi de catalyseurs non nobles qui, espère-t-on, permettront de suffisamment déprimer la température d'inflammation de la suie, et montreront une insensibilité semblable aux taux de soufre du combustible,
 - (e) la combinaison des systèmes susmentionnés, par exemple l'emploi du simple appareil DPF aux températures où les gaz brûlés ne subissent

pas d'autorégénération, associé à un moyen de régénération hors service, tel que l'introduction d'une source de chaleur auxiliaire [par exemple, le réchauffeur de surface décrit dans (12)],

3. l'emploi d'un appareil de filtration à piège catalytique oxydant (CTO), comportant un treillis métallique (13),
4. la recirculation des gaz brûlés (EGR) pour réduire le NO, durant l'emploi d'un filtre DPF (14),
5. l'emploi d'émulsions d'eau dans le combustible pour réduire les taux de NO et de suie (15), et
6. les effets d'émission de divers types de combustibles et d'émulsions (16).

Dans les sections suivantes, on décrit les points essentiels des deux premiers projets de développement. Pour le reste, le lecteur est prié de consulter les références présentées à la fin de chaque article.

SYSTÈMES D'ÉPURATION À L'EAU

L'évaluation par le CANMET dans ses propres installations, du rendement d'épurateurs à l'eau commerciaux au cours de plusieurs années, a indiqué une variation de 10 à presque 50 % du taux d'élimination de la suie. De plus, les épurateurs construits en conformité avec certaines spécifications non canadiennes étaient souvent ou trop lourds ou trop chers pour qu'on puisse les importer, ou les deux. Pour cette raison, le Beaver Construction Group a approché le CANMET en 1981, pour demander à celui-ci de concevoir et de mettre à l'essai une série d'épurateurs à l'eau simples, de faible coût, de type déflecteur, anti-déflagrants. On devait les employer pour poursuivre l'avancement de la galerie menant au filon houiller de Donkin-Morien, exploité par la Breton Development Company au Cap-Breton en Nouvelle-Écosse.

Ensuite, la société Beaver, Hovey and Associates (1979), en collaboration avec le CANMET, a établi les principes de conception de cet épurateur, et conçu, construit et mis à l'épreuve deux types d'épurateurs de dimensions différentes. En observant soigneusement un critère de séparation par l'eau, on a atteint un rendement de 40 à 49 % (maximum) pour l'élimination de la

suie, et obtenu d'autres effets bénéfiques, y compris l'absorption de quelques-uns des gaz acides. Le rendement a égalé ou surpassé celui des meilleurs épurateurs disponibles, à moindre coût. Ce rendement peut représenter une limite, quant à la conception d'appareils simples.

En 1981, les chercheurs du CANMET se sont rendu compte que l'on pouvait, en faisant appel à un modèle mathématique, optimaliser le transfert et la quantité de mouvement, et par conséquent le choc des particules de suie avec des gouttelettes d'eau dans un tube Venturi à injection d'eau, inséré dans un système d'échappement des gaz, et ainsi mieux capturer la suie. C'est ainsi que l'on a conçu, fabriqué et mis à l'épreuve un système Venturi installé dans l'échappement d'un moteur Deutz FL 912W. Cet appareil a capturé 70 % de la suie, une partie des oxydes de soufre et 19 % du NO_2 , en utilisant une contre-pression de 10 kPa. Ce rendement réduit l'indice EQI d'un pourcentage substantiel de 50 à 60 %, selon la contre-pression; ceci suggère qu'on pourrait l'appliquer avec succès aux véhicules utilisés dans les mines de charbon, où il est difficile de suivre les recommandations sur les taux de suie et de poussières de charbon transportées dans l'atmosphère, et dans les autres types de mines, où l'humidité ne pose pas de problèmes.

On donne davantage de détails sur le développement des épurateurs à l'eau, dans l'article 2 de cette série.

SYSTEMES À FILTRE CÉRAMIQUE

Dans ces filtres, l'élément filtrant est un produit céramique poreux, dont la configuration est présentée dans (17) - voyez l'article 3 de cette série - et dans (18,19). On peut modifier la porosité de façon à ajuster le degré de capture de la suie selon le besoin, et à trouver un compromis entre ce degré de capture et les dimensions, la forme, la surface de filtrage de l'élément filtrant, la contre-pression en l'absence de suie, etc.

L'optimisation rapide des dimensions de l'élément céramique en fonction du débit d'échappement des moteurs Deutz à six et huit cylindres, en vue d'un rendement de capture nominal de 90 %, a rapidement abouti à plusieurs types de travaux de développement, y compris aux essais souterrains décrits dans (20) - voyez l'article 4 de cette série - et à l'étape de définition d'une option qui figure dans la liste présentée plus haut. Ces possibilités de développement sont brièvement décrites comme suit.

Essentiellement, le succès de l'emploi des filtres céramiques dépend de la capacité du filtre à traiter la suie collectée: (1) pendant une période

d'exploitation qui soit utile, (2) de sorte que la contre-pression accumulée n'amenuise pas la garantie du moteur ou ne réduise pas le degré de sécurité dans la mine. Ainsi, les méthodes visant à augmenter et à améliorer le traitement et le rejet de la suie collectée, ont été considérées prioritaires par le CDRAP, qui les a étudiées. La méthode convenant au filtre céramique DPF consiste à brûler la suie collectée, pendant le séjour de celle-ci dans le filtre DPF. Le procédé le plus avantageux consisterait à brûler la suie au fur et à mesure qu'on la recueille, procédé appelé autorégénération.

L'autorégénération de la suie résulte des effets interreliés de plusieurs paramètres, en particulier la quantité de carbone déposée sur les surfaces et dans les pores du filtre, la concentration d'oxygène des gaz brûlés traversant l'élément céramique et - détail peut-être le plus important - la température des gaz brûlés. Les essais cycliques de dynamomètre effectués à la Fondation de recherches de l'Ontario (FRO), simulant le fonctionnement d'une chargeuse-transporteuse (LHD) ont permis de définir approximativement les valeurs moyennes de certains de ces paramètres, tels qu'indiqués au tableau 2.

Tableau 2 - Paramètres du seuil de régénération
pour des filtres céramiques

Option		Filtre simple	Filtre plus additif	Filtre impregné d'un catalyseur noble
Charge minimum moyenne (%)		77	54	48
Concentrations CO ₂ /O ₂ (%)		8,0/0,7	6,0/12,2	5,4/13,0
Rapport combustible/air (-)		0,037	0,028	0,025
Température moyenne des gaz brûlés	(°C)	427	365	349
	(°F)	800	690	660

L'application des trois options de régénération présentées au tableau 2, à chaque type de véhicule actionné par un moteur classique à quatre temps, semble initialement dépendre de la détermination des caractéristiques thermiques des gaz brûlés. Ces essais ont été complétés sur le terrain par l'INCO Limited (21). Ils confirment les résultats susmentionnés, obtenus avec le dynamomètre (cycle LHD) dans le cas d'un filtre simple à autorégénération,

avec une température moyenne des gaz brûlés, et confirment aussi la nécessité de montées de température dépassant la température d'inflammation de la suie (500°C, 932°F) pendant un temps suffisamment long pour déclencher la combustion.

Il existe des exemples de régénération incontrôlée ayant causé des dommages tels que la fusion ou l'érosion en sillons de la matrice céramique du filtre, le métal pouvant rester intact (22). Ceci semble s'être produit lorsque des quantités excessives de suie se sont déposées dans le filtre, et ont finalement été soumises à des taux assez élevés d'oxygène et à des températures assez hautes pour produire une combustion continue et intense. De ce fait, l'élimination de la suie a été virtuellement interrompue, et la pression de filtration a diminué sans qu'il y ait danger immédiat.

L'expérience de l'INCO (21) indique que le fonctionnement en présence de gaz d'échappement très chauds, qui favorise une régénération continue, maintient la contre-pression à une limite d'équilibre acceptable de 4 kPa (20 dans H₂O), pour un moteur Deutz F8L 714. Dans ces conditions, le filtre ne subit pas d'autodestruction, ni de contraintes thermiques nettement excessives pendant des périodes atteignant 1830 heures de fonctionnement. Il s'agit de limiter la quantité de suie dans le filtre, pour que l'appareil fonctionne en toute sécurité. Pour limiter la quantité de produits combustibles et donc assurer le bon état du filtre, il est prudent d'installer un capteur de contre-pressions devant le filtre, et un signal lumineux sur un tableau de bord, lorsque la contre-pression dépasse constamment une limite supérieure donnée, disons 7,5 kPa (30 dans H₂O). Des expériences réalisées par le CANMET dans ses propres installations et non publiées, d'utilisation d'un moteur Deutz F6L 912W dans le cadre d'études de développement d'un réchauffeur électrique de surface, ont montré qu'il n'y avait pas inflammation de la suie, lorsqu'un filtre chargé à un niveau de contre-pression de 5 kPa était immergé dans des gaz brûlés à haute température (mais au-dessous de la température d'inflammation de la suie), puis soudainement exposé à la concentration élevée d'oxygène associée au fonctionnement à vide du moteur. Il convient aussi de noter que l'emploi d'additifs ou de catalyseurs déprime de façon significative la température d'inflammation, et donc réduit de façon appréciable la probabilité d'accumulation de la suie. Il apparaît que le type de fonctionnement décrit ci-dessus offre des conditions de sécurité, mais on espère que l'on entreprendra de la R&D pour mieux définir les paramètres de fonctionnement en toute

sécurité, et que l'on pourra mettre au point la conception des éléments céramiques pour pallier dans une certaine mesure ce type de problème.

Outre les considérations de sécurité, on a effectué à la fois en laboratoire et sur le terrain, des études détaillées sur les dispositifs de traitement des gaz brûlés, pour indirectement explorer l'incidence sur la santé des polluants dérivés du diesel. Ces études se sont présentées sous forme d'analyses des hydrocarbures aromatiques polynucléaires (PAH ou PNA), permettant de déterminer leurs taux de carcinogènes connus, et sous forme d'évaluations mutagènes par le test d'Ames, permettant d'indiquer leur potentiel carcinogène collectif apparent, avec les méthodes actuellement appliquées. Ce dernier détail est expliqué dans (10) - voyez l'article 5 de cette série, qui montre une réduction significative des taux de mutagénicité d'Ames par suite de l'emploi de nouveaux systèmes de réduction des émissions, tels que ceux élaborés dans le cadre du programme CDRA.

À la suite de cet examen diversifié des systèmes de filtration, on a estimé que l'on pouvait installer ceux-ci sur la plupart des machines LHD, et dans une partie des camions (disons environ 50 % du parc de véhicules souterrains); on pourrait ainsi réduire en majorité la contribution de ces véhicules diesel à la contamination du milieu souterrain par la suie. Les autres types d'applications exigeraient de façon périodique une régénération réduite, soit à bord soit à l'extérieur du véhicule, guidée par un signal d'avertissement lumineux monté sur un tableau indicateur qui montrerait l'accumulation des contre-pressions créées par les dépôts de suie.

MISE AU POINT DE TECHNIQUES D'ÉVALUATION SOUTERRAINE ENVIRONNEMENTALE

Le U.S. Bureau of Mines a mis en place depuis un certain temps un programme d'évaluation environnementale, y compris l'étude de notions telles que: (a) la surveillance continue de groupes de tubes (23), (b) à l'intérieur de la mine, un groupe de capteurs transmettant des signaux à la surface, (c) un Laboratoire de surveillance de la qualité de l'air dans les mines (MAQL) devant être installé dans les mines toutes les fois que possible (24) et (25) - voyez l'article 6 de ce volume - et (d), un groupe d'appareils d'analyse portatifs installés dans la mine pour surveiller les taux de contaminants de l'environnement, et fournir la moyenne pondérée en fonction du temps (TWA) et les taux instantanés de cinq contaminants (26).

Les deux premiers éléments peuvent être rattachés à la technologie basée sur l'emploi du diesel dans les mines, les deux autres ont été particulièrement utiles pour le programme CDRAP sur le diesel. Le MAQL a été employé et continue à l'être, par l'Université technologique du Michigan (Michigan Technological University, MTU), aux termes d'un contrat adjugé au Bureau of Mines, qui a été chargé d'évaluer quelques-unes des options énumérées plus haut. Parmi celles-ci, citons le filtre à catalyseur et le filtre avec additifs du combustible, installés dans une berline de la Wagner Mining Equipment Company. Le système d'épuration à l'eau équipé d'un Venturi et certains types de filtres céramiques sont actuellement évalués dans la même installation, à l'aide d'une machine LHD fournie par la Jarvis Clark Company Limited, avec l'appui de l'Organisation canadienne de recherches sur l'industrie minière (OCRIM).

On réalise ces travaux dans une galerie de mine expérimentale souterraine à Hancock, Michigan, dans laquelle on reproduit les conditions réelles d'un cycle de chargement mécanique d'une machine LHD, tout en permettant simultanément un étroit contrôle de toutes les conditions expérimentales du point de vue de la ventilation, de l'échantillonnage de multiples composants, de la précision analytique, de la répétition du cycle des véhicules, opérations très difficiles à réaliser dans les conditions réelles d'une mine en exploitation. On a décrit dans (25) les résultats de ce programme d'expérimentation des options.

Le MTU a mis au point un système portatif d'analyse, qui a été employé par une équipe du MTU ou du CANMET ou des deux, dans le cadre de plusieurs évaluations environnementales des mines, en particulier des mines de charbon, de sel, de nickel, de zinc et de potasse, dans le but d'évaluer l'incidence des nouveaux projets de réduction des émissions de diesel sur l'environnement, et d'évaluer les taux de contaminants. On a décrit en détail certains aspects de quatre études de ce type dans (20) - voyez l'article 4 de ce volume.

L'emploi de ces systèmes portatifs permet de déterminer les valeurs moyennes pondérées en fonction du temps (TWA) des taux de CO_2 , CO, NO et NO_2 gazeux (en ppm), plus les taux de poussières combustibles inhalables (RCD) exprimés en mg/m^3 , quel que soit le nombre de stations d'échantillonnage servant à une étude donnée. Ces valeurs sont nécessaires pour caractériser la toxicité exacte de tous les principaux composants des gaz brûlés de diesel;

on doit utiliser l'indice de qualité de l'air (AQI) décrit plus haut, et corréler ces valeurs avec les concentrations de CO_2 . On détermine aussi en une station d'échantillonnage les concentrations instantanées et immédiates des quatre gaz, pour confirmer leur similarité avec les valeurs TWA, et pour mieux définir les variations du cycle d'exploitation des machines.

Grâce à de telles mesures souterraines, on peut faire une évaluation comparative de la qualité de l'air, avec ou sans appareils de contrôle. Les études citées dans (20) indiquent des améliorations environnementales, dues à l'emploi de filtres céramiques, de 35 à 65 % par rapport aux résultats que donnent les purificateurs catalytiques d'après le critère AQI.

On peut formuler plusieurs généralisations importantes sur ce travail d'évaluation environnementale détaillée, que l'on résume de la façon suivante:

1. L'examen des concentrations de composants en volume dans le laboratoire MAQL nous a amenés à conclure que la concentration de CO_2 est l'équivalent d'une mesure directe de tous les autres polluants dosés. Cette méthode est particulièrement utile comme méthode industrielle de surveillance environnementale; Schnakenberg (27) du Pittsburgh Research Center, et Daniel (28) de la direction du Bureau of Mines à Washington D.C., au ministère de l'Intérieur, décrivent plus ou moins en détail cette technique de mesure.
2. Actuellement, on détermine les valeurs moyennes pondérées en fonction du temps (TWA), de NO_x et NO_2 , au moyen des échantillonneurs à diffusion de Palmes, facilement installés dans la mine. On peut, en utilisant avec soin ces appareils simples, produire une variation intérieure aux échantillons, et généralement située dans un intervalle de plus ou moins 20 % à partir de la moyenne, et obtenir des taux bien comparables à l'intégration des concentrations de composants, dérivées des traces en temps réel que produisent des analyseurs portatifs de laboratoire (20). La méthode de l'échantillonneur de Palmes est acceptable, mais exige un temps considérable de préparation préliminaire et d'analyse ultérieure à l'essai, et en plus, du matériel supplémentaire d'analyse en laboratoire. On détermine les valeurs moyennes

pondérées en fonction du temps (TWA) de CO_2 et de CO par échantillonnage en sacs et par analyse ultérieure aux expériences conduites, en employant le même type d'analyseur portatif de laboratoire (analyseur au point zéro), qui exige de même un temps supplémentaire avant l'arrivée de la réponse. On peut maintenant obtenir des tubes d'analyse par coloration sur une certaine durée (CO_2 , CO, NO et NO_2), et les pompes qui leur sont associées, pour obtenir des réponses immédiates à la fin de la période d'essai, sans devoir déployer davantage d'efforts. Même si la rupture de la pompe et la sensibilité au NO_2 posent actuellement des problèmes (20), il semble que la mise au point plus poussée de ces tubes permette de réduire l'effort nécessaire à l'évaluation rapide de l'indice de qualité de l'air (AQI) et à l'évaluation des composants individuels dans le sous-sol, d'environ 40 % par rapport aux résultats que donne le groupe actuel d'instruments.

3. La suie, qui comprendrait 75 % des poussières combustibles inhalables (RCD), est composée de carbone solide et de quantités diverses d'hydrocarbures adsorbés. La fraction d'hydrocarbures a été une source de difficultés, lors de l'évaluation du rendement de filtres céramiques dans des galeries souterraines. Les résultats d'un certain nombre d'évaluations faites dans le sous-sol, qui ont indiqué un taux de filtration égal à 40 % environ, n'ont pas confirmé les chiffres donnés par le dynamomètre (environ 90 %). On a demandé au personnel de la MTU d'examiner ce manque de concordance. Des hypothèses préliminaires, provenant d'un rapport sur l'avancement des travaux de la MTU, et indiquant "qu'une (fuite d'une) demi-once d'huile par heure pouvait décaler les résultats expérimentaux, et abaisser le rendement du système employé par les laboratoires MAQL (pour réduction des émissions) de 78 % à 36 %, en raison de la présence de cette source additionnelle de particules", se trouvent confirmées dans (25) - voyez l'article 6 de cette série. Il semble que les fuites de combustible, d'huile hydraulique, etc, atteignant des surfaces chaudes, puissent substantiellement s'ajouter aux polluants atmosphériques qui augmentent les mesures de poussières combustibles inhalables (RCD), outre la suie provenant des gaz brûlés;

on doit en tenir compte, non seulement lors des évaluations sur le terrain, mais aussi parce qu'il s'agit d'une source indésirable de particules inhalables et de vapeurs d'hydrocarbures, même si les limites acceptables de ces dernières sont parfois plus élevées que celles suggérées pour la suie.

4. Pendant des durées raisonnables, en admettant un entretien convenable du matériel, et de petites variations du cycle de fonctionnement des véhicules, les concentrations des gaz brûlés de diesel restent relativement constantes les unes par rapport aux autres et à la concentration de CO_2 . Par conséquent, pendant ces intervalles de temps, l'indice de qualité de l'air (AQI) présente une corrélation directe et constante avec la concentration de CO_2 . Donc, les mesures faciles de la concentration de CO_2 permettent d'obtenir des estimations rapides sur la qualité de la ventilation, à condition que l'on se rappelle les détails suivants. Les variations des taux d'émission dues à une usure du moteur, à des réglages du système d'alimentation en combustible, à des pannes, etc, peuvent changer le rapport relatif des taux de CO_2 par rapport à celui des autres composants. Ainsi, on doit surveiller de temps à autre les taux non dilués des composants et de CO_2 dans les gaz brûlés, pour déterminer la possibilité de telles variations, rétablir le rapport de dilution approprié, et régler en conséquence la ventilation. À court terme, en admettant qu'il n'y ait aucune variation significative des émissions du moteur ou du taux de ventilation, et que AQI (indice de la qualité de l'air) = 3, on peut déterminer la limite admissible facilement mesurée de CO_2 , en employant le rapport des valeurs mesurées de la concentration de CO_2 et de l'indice de qualité de l'air (AQI) dans le milieu ambiant. Aussi longtemps que le taux de CO_2 reste à ce niveau limite ou au-dessous, on peut admettre que l'indice de qualité de l'air (AQI) est 3 ou moins. Par exemple, durant l'évaluation d'un filtre, telle que décrite dans (29), on a déterminé une valeur AQI de 0,51 et un taux de CO_2 de 0,05 % pour la station de l'opérateur de machines LHD. Étant donné que la valeur de l'indice AQI, parmi tous les détails limitatifs possibles, se rapprochait le plus de sa limite de 3

(les concentrations de SO_2 et de NO se rapprochent également de leur limite respective), on aurait pu théoriquement réduire la ventilation d'un facteur de six, pour obtenir un taux de CO_2 égal à 0,3 % (c.-à-d. $0,05 \times 3/0,51$), en admettant que d'autres difficultés n'apparaissent pas.

On dispose donc de techniques de mesure suffisamment précises pour évaluer tous les composants que l'on doit normalement considérer dans une évaluation environnementale. Même si certains détails de ces techniques exigent actuellement du temps et des fonds, les prochains travaux de développement devraient bientôt permettre de simplifier au maximum cette situation. Une fois que ces mesures auront été faites, elles nous aideront à évaluer d'un point de vue technique la qualité de la ventilation, grâce à la corrélation directe du taux de CO_2 facilement mesuré avec le taux de chacun des composants toxiques ou avec l'indice de qualité de l'air (IQA), ou avec les deux, si l'on rapporte chacun de ces constituants à sa limite respective, et si l'on tient compte des hypothèses formulées plus haut.

CONCLUSIONS

RÉTROSPECTIVE ET PERSPECTIVES

On a estimé que le parc minier souterrain des U.S.A. contenait environ 5000 à 6000 véhicules diesel, pour tous les types de mines. De même, les mines canadiennes possèdent entre 3000 et 4000 véhicules de ce type utilisés dans les galeries souterraines (30). De façon très approximative, ceci signifie que l'industrie minière nord-américaine dispose d'un investissement substantiel en capital, qui représente entre 0,5 et 0,75 milliard de dollars directement consacré à ce matériel, sans compter les investissements qui lui sont indirectement rattachés. Cette somme substantielle suggère d'une part que ce matériel pourrait avoir une durée de vie minimum de 10 ans, et peut-être même un peu plus longue, avant son abandon. On le remplacerait alors quand des moyens techniques supérieurs et éprouvés s'avèreraient applicables. Par conséquent, l'application des techniques antipollution résultant de ce programme pourrait convenir pendant un temps approprié. Par ailleurs, il est probable que l'on aura toujours besoin d'un nombre résiduel de véhicules diesel, pour accomplir certains travaux miniers, en raison de leur flexibilité

de fonctionnement. Par conséquent, les techniques de contrôle des émissions pourraient avoir une durée d'application considérable, bien au-delà de la période prévue de 10 ans.

Il semble aussi qu'une meilleure définition de l'incidence de ces émissions de diesel sur la santé, ainsi que la mise au point de nouvelles méthodes antipollution, pourrait réduire les craintes légitimes de quelques membres de la communauté minière, qui insisteraient alors moins sur le besoin d'abandonner les systèmes diesel; il serait donc plus facile de prolonger l'existence de ce matériel au moins jusqu'au point de recouvrement des investissements, et peut-être même plus longtemps.

CONCLUSIONS SPÉCIFIQUES

On estime actuellement, à propos de la liste des technologies qui permettraient de répondre aux normes de l'EPA pour 1991 sur la suie, normes applicables aux véhicules diesel de surface, que les travaux de développement des moteurs avaient déjà contribué au maximum à réduire les émissions de polluants, et que rien ne laisse prévoir de découverte technique importante. On suppose donc que l'on ne peut fortement réduire le taux d'émissions qu'en traitant les gaz brûlés, qu'en modifiant le combustible, etc. Dans ce but, les collaborateurs du CDRAP ont mis au point deux systèmes d'épuration à l'eau (types à Venturi et à déflecteur) convenant surtout aux mines de charbon, jusqu'aux étapes de démonstration de l'un et d'application de l'autre. En outre, surtout dans le cas des mines non grisouteuses, on a étudié six modèles de filtres céramiques, y compris les systèmes de recirculation des gaz brûlés (EGR), énumérés plus haut. La façon de les appliquer dépend des circonstances. Des essais de durabilité prolongés réalisés sur le terrain, durant environ 1830 heures de service, suggèrent que la filtration est l'une des meilleures options, soit pour réduire la toxicité de l'environnement, soit pour réduire les coûts élevés de ventilation, soit pour établir un compromis entre les deux, suivant l'attitude qu'adopte l'organisme de réglementation approprié. On estime que ces modèles de filtres conviennent au maximum à la moitié du parc de véhicules diesel souterrains, qui contribueraient à 70 % à la pollution souterraine totale.

La notion d'indice AQI/EQI n'est pour l'instant pas promulguée comme norme, mais nous permet cependant d'évaluer de façon détaillée la toxicité des émissions. L'emploi de l'indice AQI comme critère de ventilation ne contribue que légèrement à accroître la norme de ventilation déduite du critère

$\text{NO}_x/12,5$. En général, les détails régissant la ventilation sont, suivant un ordre d'importance décroissante: (1) l'indice AQI, (2) la concentration de suie et (3) la concentration de SO_2 . Lorsque la teneur en soufre du combustible dépasse 0,3 %, le SO_2 peut être le composant déterminant.

Par conséquent, l'emploi du concept EQI/AQI et du principe suivant lequel la concentration de CO_2 est une mesure de remplacement facile de l'indice AQI ou du taux de chaque contaminant, permet de rationaliser le choix du moteur, du mode de traitement, du système de ventilation et de la conception de la mine, et de fermer la boucle, c'est-à-dire d'établir un système automatique de contrôle de la ventilation et des systèmes apparentés, grâce à une détection continue du taux de CO_2 ou des contaminants individuels, et à l'emploi des paramètres de ventilation, cela pour réduire considérablement les coûts d'exploitation.

RÉSULTATS DES EFFORTS DE COLLABORATION

Les nombreux développements importants décrits plus haut sont dus à la coopération volontaire de divers segments de la communauté minière en Amérique du Nord. Le grand nombre (environ 31) des organismes collaborateurs témoigne des grands efforts consacrés au problème des émissions de polluants, grâce à l'active participation aux programmes du CDRAP de tous les organismes, publics et privés. Nous remercions de ces efforts tous les participants, dans la section de ce bref ouvrage qui leur est consacrée.

BIBLIOGRAPHIE

1. Holtz, J.C. "Safety with mobile diesel-powered equipment underground"; U.S. Bureau of Mines Report on Investigations 5616; 1960.
2. U.S.A. Federal Code of Regulations:
 - Part 31 - Diesel Mine Locomotives (Sch 22).
 - Part 32 - Mobile Diesel-Powered Equipment for Non-Coal Mines.
 - Part 36 - Mobile Diesel-Powered Transportation Equipment for Gassy, Non-Coal Mines (Sch 31).

3. Dainty, E.D. "A five-year cooperative plan for underground diesel machine safety and emissions R&D"; Internal Report MRP/ERP/MRL 77-135(TR); Mining Research Laboratories; CANMET, Energy, Mines and Resources Canada; December 1977.
4. Grant, B. and Friedman, D.F. "Proceedings on the use of diesel-powered equipment in underground mining"; USBM Information Circular IC 8666; 1975.
5. Schnakenberg, G.H., Jr. "Current state-of-the-art of diesel emissions control - an overview"; USBM Pittsburgh Research Center; Presented to the Third Theodore Hatch Symposium, International Conference on the Health of Miners; Pittsburgh, PA; June 1985.
6. French, I.W. and Mildon, M.A. "Health implications of exposure of underground workers to diesel exhaust emissions"; CANMET, Energy, Mines and Resources Canada; Contract No. 16.SQ.23440-6-9025; 350 pp; 1978.
7. Castranova, V., Bowmann, L., Reasor, M.J., Lewis, T., Tucker, J. and Miles, P.R. "The response of rat alveolar macrophages to chronic inhalation of coal dust and/or diesel exhaust"; Environment Research; Vol. 36, 405-419 pp; 1985.
8. Waytulonis, R.W. "The effects of diesel engine maintenance on emissions"; USBM Twin Cities Research Center; Presented to the 86th Annual General Meeting of the Canadian Institute for Mining and Metallurgy; 30 pp; Ottawa, Canada; 1984.
9. French, I.W. and Mildon, M.A. "Health implications of exposure of underground workers to diesel exhaust emissions - an update"; CANMET, Energy, Mines and Resources Canada; Contract No. OSQ.82-00121; 607 pp; April 1984.

10. Mogan, J.P., Horton, A.J., Vergeer, H.C. and Westaway, K.C. "A comparison of laboratory and underground mutagen levels for treated and untreated diesel exhaust"; Presented to the CIM/AGM Session on Heavy Duty Emission Control, Montreal; Published by the Canadian Institute of Mining and Metallurgy; See paper No. 5 in this series; May 1986.
11. Lawson, A. and Vergeer, H.C. "Analysis of diesel exhaust emitted from water scrubbers and exhaust purifiers"; Performed by the Ontario Research Foundation under contract to the Department of Energy, Mines and Resources Canada; Contract No. OSQ.76-00014; 115 pp; May 1977.
12. Vergeer, H.C., Gulati, S.T., Mogan, J.P. and Dainty, E.D. "Electrical regeneration of ceramic wall-flow diesel filters for underground mining applications"; SAE International Congress and Exposition; Special Publication P-158 - Diesel Particulate Control; 143-151 pp; SAE No. 850152; Detroit, Michigan; February 1985.
13. Mogan, J.P., Vergeer, H.C., Westaway, K.C., Weglo, J.K., Lawson, A., Dainty, E.D. and Thomas, L.R. "Investigation of the CTO emission control system applied to heavy-duty diesel engines used in underground mining equipment"; SAE International Congress and Exposition; Special Publication P-158 - Diesel Particulate Control; 131-142 pp; SAE No. 850151; Detroit, Michigan; February 1985.
14. Stawsky, A., Lawson, A., Vergeer, H.C. and Sharp, F.A. "Evaluation of an underground emissions control strategy for underground diesel mining equipment"; SAE International Congress and Exposition; SAE Paper No. 840176; Detroit, Michigan; February 1984.
15. Lawson, A., Vergeer, H.C., Mitchell, E. and Dainty, E.D. "Update of water/fuel emulsification effects on diesel emissions reduction"; Presented to the 86th Annual General Meeting of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy; 15 pp; Ottawa, Canada; 1984.

16. "Control of diesel exhaust emissions in underground coal mines - fuel modification"; U.S. Bureau of Mines Contract No. J0188157; Performed by Southwest Research Institute of San Antonio, Texas; Technical Project Officer - R. Waytulonis, of the U.S. Bureau of Mines, Twin Cities Research Center; Minneapolis, Minnesota; 1980-1986.
17. Lawson, A., Vergeer, H.C., Roach, M.H. and Stawsky, A. "Evaluation of ceramic and wire mesh filters for reducing diesel particulate emissions"; Presented to the CIM/AGM Session on Heavy Duty Emission Control, Montreal; Published by the Canadian Institute of Mining and Metallurgy; See paper 3 in this volume; May 1986.
18. Howitt, J.S., Elliott, W.T., Mogan, J.P. and Dainty, E.D. "Application of a ceramic wall-flow filter to underground diesel emissions reduction"; SAE International Congress and Exposition; Special Publication SP-537 - Diesel Particulate Control; 131-139 pp; SAE No. 830181; Detroit, Michigan; February 1983.
19. Dainty, E.D., Mogan, J.P., Lawson, A. and Mitchell, E. "The status of total diesel exhaust filter development for underground mines"; Presented to and published in the Proceedings by the XXIst International Conference of Safety in Mines Research Institutes; 8 pp; Sydney, Australia; October 1985.
20. Dainty, E.D., Gangal, M.K., Vergeer, H.C., Carlson, D.H., Stawsky, A. and Mitchell, E.W. "A summary of underground mine investigations of ceramic diesel particulate filters and catalytic purifiers"; Presented to the CIM/AGM Session on Heavy Duty Emission Control, Montreal; Published by the Canadian Institute of Mining and Metallurgy; See paper No. 4 in this volume; May 1986.
21. Dainty, E.D., Bourre, C. and Elliott, W.T. "Characterization of ceramic diesel exhaust filter auto-regeneration in a hard rock mine"; Presented to and Published by the Mines Accident Prevention Association of Ontario; Annual General Meeting; 26 pp; Toronto; May 1985.

22. Ludecke, O.A. and Dimick, D.L. "Diesel exhaust particulate control system development"; SAE paper No. 830085; SAE International Congress and Exposition; Detroit, Michigan; February 1983.
23. Fries, E.F. "Progress report on the Bureau of Mines monitoring systems at the Black River and Bruceton Safety Research Mines"; Published in the Proceedings of the Sixth WVU Conference on Coal Electrotechnology (Bureau of Mines Contract Report J0123017); 361-377 pp; November 1982.
24. Keski-Hynnala, D.E., Reinbold, E.O. and Johnson, J. "An underground mine air quality laboratory for studying ventilation, vehicle and diesel engine pollutant control techniques"; The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin; Vol. 74, No. 835, 74-83 pp; See paper No. 50 in this volume; November 1981.
25. Carlson, D.H., Bucheger, D., Patton, M., Johnson, J.H. and Schnakenberg, G.H. "The evaluation of a ceramic diesel particulate filter in an underground mine laboratory"; Presented to the CIM/AGM Session on Heavy Duty Emission Control; Published by the Canadian Institute of Mining and Metallurgy; See paper No. 6 in this volume; Montreal; May 1986.
26. Johnson, J.H., Carlson, D.H. and Bunting, B.G. "The application of advanced air monitoring techniques to mines using diesel-powered equipment"; Annual Report to the United States Department of the Interior by Michigan Technological University; Bureau of Mines Grant Agreement No. G0166027; NTIS Springfield Virginia 22161; January 1977.
27. Schnakenberg, G.H., Jr. "An approach to air quality control for diesel mucking in underground mines"; Annals of the American Conference of Industrial Hygienists, Vol. 8, 107-117 pp; 1984.
28. Daniel, J.H., Jr. "Diesels in underground mining: a review and an evaluation of an air quality monitoring methodology"; U.S. Bureau of Mines Report of Investigation RI 8884; pp 36; 1984.

29. Gangal, M.K., Dainty, E.D., Weitzel, L. and Bapty, M. "Evaluation of diesel emission control technology at COMINCO's Sullivan Mine"; Presented to the IVth Mechanical/Electrical Engineering Symposium of the Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources; 27 pp; Victoria, British Columbia; February 1985.

30. Stewart, D.B. "Breakdown of diesel-powered equipment used in Canadian underground mines"; Internal Report MRP/MRL 77-92(TR); Mining Research Laboratories; CANMET, Energy, Mines and Resources Canada; Appended update by E. Mitchell of the Ontario Ministry of Labour; August 1977.

