

**Mesure
du monoxyde de carbone
dans l'échappement
des moteurs diesels**

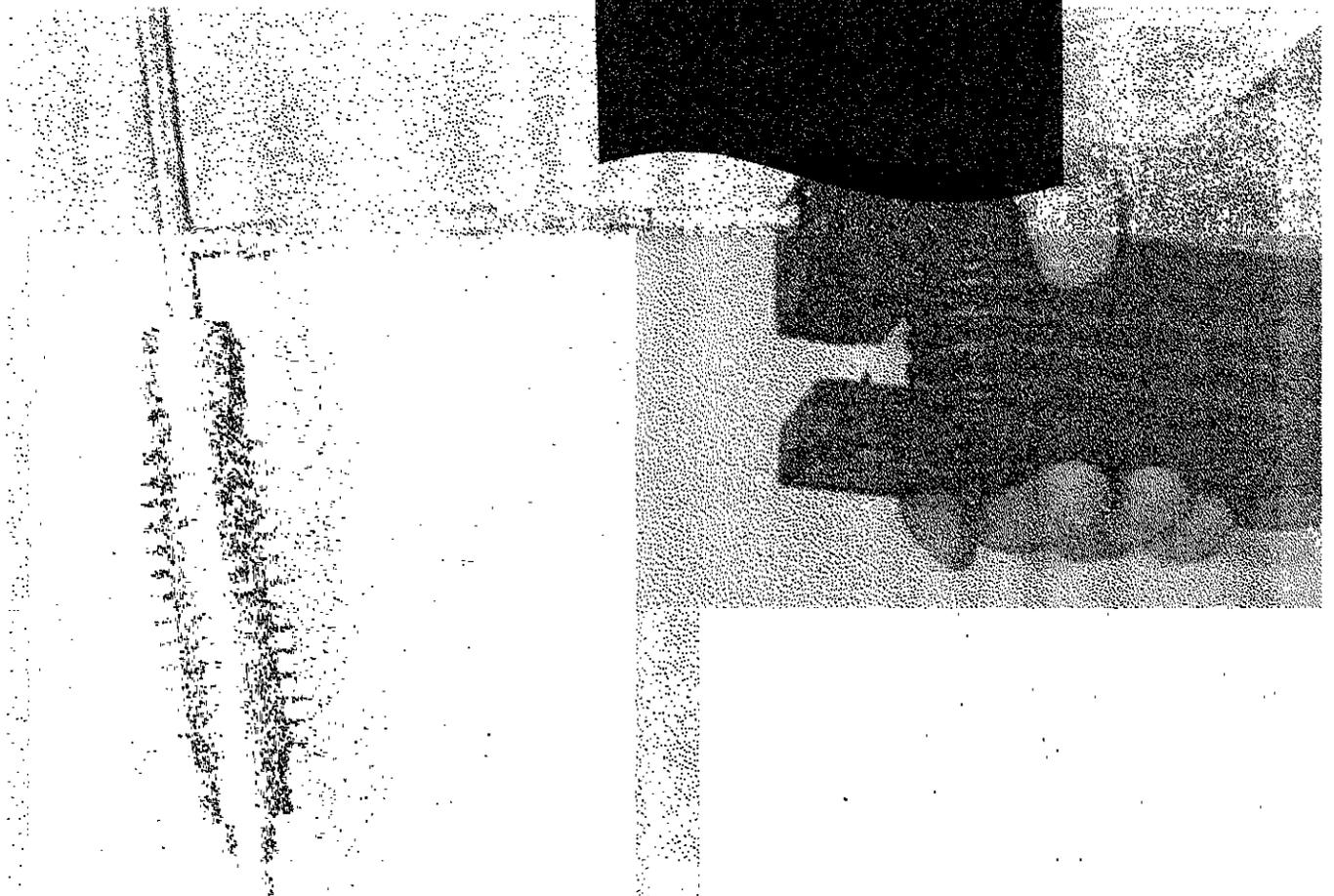
Michel Grenier

**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

Juin 1999

R-221

RAPPORT



IRSST
Institut de recherche
en santé et en sécurité
du travail du Québec

CANMET



La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et finance, par subvention ou contrats, des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

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

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications.

Il est possible de se procurer le catalogue des publications de l'Institut et de s'abonner à *Prévention au travail* en écrivant à l'adresse au bas de cette page.

ATTENTION

Cette version numérique vous est offerte à titre d'information seulement. Bien que tout ait été mis en œuvre pour préserver la qualité des documents lors du transfert numérique, il se peut que certains caractères aient été omis, altérés ou effacés. Les données contenues dans les tableaux et graphiques doivent être vérifiées à l'aide de la version papier avant utilisation.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1 551
Télécopieur: (514) 288-7636
Site internet : www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche en santé
et en sécurité du travail du Québec,

**Mesure
du monoxyde de carbone
dans l'échappement
des moteurs diesels**

Michel Grenier
CANMET

**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

RAPPORT

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	3
AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	4
OBJECTIFS	5
ÉQUIPEMENT ET MATÉRIEL	6
Tubes colorimétriques	6
Équipement additionnel	7
MÉTHODE – PERFORMANCE DES TUBES COLORIMÉTRIQUES	7
Phase 1 - Mesure en laboratoire, CO en mélange dans l'azote	7
Phase 2 - Mesure en laboratoire, CO dans l'échappement diesel	7
Phase 3 - Mesure en milieu minier	8
RÉSULTATS – PERFORMANCE DES TUBES COLORIMÉTRIQUES	8
Phase 1 - Mesure du CO en mélange dans l'azote	8
Phase 2 - Mesure en laboratoire du CO dans l'échappement diesel	9
Phase 3 - Évaluation en milieu minier	10
DISCUSSION	12
Tubes colorimétriques ou instruments à lecture en continu	12
Sélection du système de tubes colorimétriques	13
Protocole de mesure	14
Réglementation	16
CONCLUSIONS	16
RÉFÉRENCES	17
APPENDICE	18

Mesure du monoxyde de carbone dans l'échappement des moteurs au diesel

SOMMAIRE

La mesure de la concentration du monoxyde de carbone dans l'échappement des moteurs au diesel peut permettre d'identifier les véhicules dont les moteurs ont besoin d'entretien. Le choix des instruments et le protocole à suivre est très important. Les objectifs du travail qui est présenté dans ce rapport sont la sélection et l'évaluation des appareils de mesure et le choix du protocole à suivre. Le travail a été fait en laboratoire pour ce qui est de l'évaluation des appareils de mesure et, sous terre, afin d'identifier les facteurs qui pourraient influencer le protocole de mesure.

Les résultats démontrent que les tubes colorimétriques peuvent servir à faire la mesure du CO directement dans l'échappement. Des contraintes liées aux plages de concentrations anticipées (100 – 1000 ppm) et à la santé et la sécurité, font en sorte que certains systèmes de tubes colorimétriques sont avantagés. Les mesures du CO peuvent aussi se faire à l'aide d'appareils à lecture directe mais il faut s'assurer que le personnel technique est bien formé et que les instruments sont calibrés et entretenus de façon régulière.

Le protocole à suivre afin de faire la mesure du CO est décrit en détail dans le rapport. Une des questions les plus importantes au niveau du protocole est celle du régime d'opération du moteur durant le test. La plupart des pays où on exécute de telles mesures demandent que le moteur soit maintenu sous charge dynamique pendant le prélèvement de l'échantillon. Un tel régime de fonctionnement du moteur est celui qui est le plus apte à révéler un quelconque problème au niveau du moteur. Ceci soulève cependant plusieurs questions concernant la santé et la sécurité des opérateurs et des techniciens. De plus, les impacts de ce genre de test sur les composantes du véhicule, aussi bien au niveau du moteur que de la transmission sont inconnus.

Les résultats de cette étude indiquent qu'en théorie, l'usage de tubes colorimétriques selon un protocole de mesure où le moteur est maintenu sous pression dynamique serait idéal. Il s'avère cependant que certaines questions demeurent en ce qui concerne la santé et la sécurité des intervenants et les dommages potentiels aux véhicules qui font l'objet des tests.

L'utilisation d'un protocole de mesure sans charge dynamique est donc recommandée dans ce rapport. Le choix de tubes colorimétriques ou d'instruments électroniques à lecture continue est laissé aux opérateurs miniers. Le protocole est décrit en détail dans le rapport.

AVANT-PROPOS

Dans le cadre de l'application du Règlement sur la santé et la sécurité dans les mines, le comité permanent de révision de ce règlement à la CSST, a adressé une demande à l'IRSST pour élaborer un protocole de mesure du monoxyde de carbone dans le gaz d'échappement des véhicules au diesel. Ce protocole doit tenir compte de la situation actuelle dans les mines quant au profil de la flotte présentement en fonction. Celui-ci se doit donc d'être un outil qui peut être utilisé immédiatement par l'industrie minière. Le mandat d'élaboration de ce protocole a été confié à CANMET.

INTRODUCTION

L'exploitation des gisements miniers dépend en grande partie de l'utilisation efficace des véhicules moteurs au diesel. On sait que l'échappement diesel représente un risque à la santé (1). Les moteurs diesels doivent donc faire l'objet d'entretien à intervalles réguliers. L'importance de l'entretien en ce qui concerne la performance des moteurs est bien connue et la plupart des mines québécoises font l'entretien des moteurs de production selon un horaire fixe. De plus, on reconnaît maintenant que des moteurs qui sont mal entretenus peuvent être une source importante de contamination. Des tests en laboratoires ont révélé des augmentations de l'ordre de 300 % à 1000 % des concentrations des fumées de diesel et des gaz d'échappement provenant de moteurs mal entretenus (2).

La réglementation vise présentement les fumées de moteurs au diesel. On a constaté l'impact direct d'un manque d'entretien sur les concentrations de ce contaminant (3). Malheureusement, il n'existe pas de méthode simple et précise permettant de mesurer les particules de fumée diesel directement dans l'échappement. Le monoxyde de carbone (CO) est cependant un bon substitut parce qu'il est beaucoup plus facile à mesurer dans l'échappement. Le CO est aussi un bon indicateur de l'état d'entretien d'un moteur. En fait, les problèmes d'entretien qui ont un impact négatif sur les niveaux de CO sont aussi responsables de l'augmentation des concentrations des fumées du diesel (2).

La mesure de la concentration du monoxyde de carbone dans l'échappement peut se faire de plusieurs façons. On peut mesurer ce gaz à l'aide d'instruments à lecture directe ou avec des tubes colorimétriques.

Les appareils à lecture directe sont dispendieux (\$2,000 - \$15,000), délicats et doivent être calibrés à intervalles réguliers. Cependant, l'exactitude (l'étroitesse de l'accord entre la valeur vraie et le résultat moyen) et la précision (la fidélité ou l'étroitesse de l'accord entre les résultats obtenus en appliquant le procédé expérimental à plusieurs reprises) de

ces instruments quand ils sont bien calibrés sont de loin supérieures à celles des tubes colorimétriques. Les tubes colorimétriques, par ailleurs, sont moins dispendieux et bien qu'ils ne soient pas aussi performants en ce qui concerne la précision et l'exactitude, ils ne requièrent aucun calibrage.

Ce rapport résume les résultats de recherche visant à développer et évaluer une méthode simple et efficace de mesure du CO dans l'échappement des véhicules au diesel en milieu minier.

OBJECTIFS

Les objectifs de ce projet de recherche étaient :

1. Sélection d'une approche simple pour l'échantillonnage du CO dans l'échappement. Bien que les instruments à lecture directe soient plus exacts que les tubes colorimétriques, ces derniers sont moins délicats, ne nécessitent pas de calibrage et sont donc de meilleurs candidats pour l'utilisation en milieu minier.
2. Sélection et évaluation de deux systèmes de mesure par tubes colorimétriques. Les systèmes Dräger et Gastec furent évalués en trois phases. La phase initiale consistait à évaluer la mesure de diverses concentrations de CO dilué avec de l'azote pur à l'aide des deux systèmes. Il s'agissait ici de s'assurer que la performance des deux systèmes rencontre les normes décrites dans leur documentation technique respective.

La deuxième phase ressemblait à la première sauf que la mesure du CO s'est faite dans l'échappement d'un moteur au diesel sur banc d'essai en laboratoire. En plus des critères de précision et d'exactitude comme dans la première phase, on visait à évaluer l'impact de la chaleur de l'échappement et des gaz qui pourraient faire interférence lors de la mesure du CO.

La troisième et dernière phase de la recherche a consisté à évaluer l'équipement et la méthode en milieu minier afin de faire ressortir tout problème relié à l'utilisation en milieu minier, soit au niveau de la méthode, de l'équipement ou du milieu souterrain.

3. Élaboration d'un protocole de mesure immédiatement utilisable par l'industrie minière.

ÉQUIPEMENT ET MATÉRIEL

Tubes colorimétriques

Les tubes colorimétriques sont des ampoules de verre sous vide d'environ 12 centimètres de longueur et de 0,5 cm de diamètre. Ils contiennent des réactifs chimiques qui changent de couleur en présence de gaz tel que le CO. Bien que ce type d'appareil soit habituellement utilisé pour les mesures en air ambiant, ils peuvent être utilisés lors de mesures dans l'échappement (4). Les tubes manufacturés par Dräger (5) et Gastec (6) ont été sélectionnés pour fin d'évaluation. Les caractéristiques des deux systèmes sont résumées au tableau 1. Ces données révèlent que les deux systèmes sont très semblables.

Des photographies des systèmes Gastec et Dräger apparaissent aux figures 1 et 2 respectivement. Les figures ainsi que les graphiques sont placés en appendice. Le système Gastec, incluant la pompe, une sonde pour l'échantillonnage de gaz à haute température et une boîte de 10 tubes coûte environ \$420.00. Les instruments comparables de la compagnie Dräger coûtent environ \$750.00. Bien que la sonde du système Gastec soit plus longue et plus performante que la petite sonde de Dräger, ni l'une ni l'autre n'est vraiment adéquate pour faire l'échantillonnage du CO dans l'échappement des véhicules. Il est donc recommandé d'utiliser la sonde spécialisée de Dräger qui apparaît à la figure 3. Celle-ci coûte environ \$650.00, mais elle permet d'échantillonner sans accidentellement pressuriser la pompe grâce à un port d'échantillonnage perpendiculaire à l'axe des gaz d'échappement.

Paramètre	Gastec	Dräger
Plage de concentration / 1 coup (ppm)	25 – 1000	100 – 3000
Temps d'échantillonnage / 1 coup	1 minute	20 secondes
Changement de couleur	Jaune à brun foncé	Blanc à brun/vert
Exactitude *	25%	10 - 15% **
Température (°C)	0 - 40 °C	0 - 50 °C
Interférences	Aucune	Aucune***

* Selon le manufacturier

** Écart type - mesure de précision

*** Discussions avec manufacturier – application dans l'échappement diesel seulement

Tableau 1. Caractéristiques des tubes colorimétriques Gastec et Dräger.

Équipement additionnel

L'analyseur Brüel & Kjær (B&K) série 1302 (figure 4) a servi à évaluer la performance des deux systèmes d'échantillonnage à tubes colorimétriques. Cet appareil fonctionne selon des principes photo-acoustiques. Il a été calibré au préalable et a une exactitude de 5% sur l'échelle de 0-2000 ppm, ce qui équivaut à ± 100 ppm dans cette plage de valeurs.

L'évaluation des systèmes à tubes colorimétriques a été faite en laboratoire à l'aide d'une atmosphère artificielle créée à partir d'azote et de monoxyde de carbone en bonbonne. Le CO de la compagnie Praxair, est un gaz certifié et analysé à 3050 ppm $\pm 0,006\%$. L'azote qui a servi à diluer le CO est manufacturé par Matheson et certifié à 99,998%. Les mélanges gazeux sont prélevés à l'aide de sacs d'échantillonnage laminés.

MÉTHODE – PERFORMANCE DES TUBES COLORIMÉTRIQUES

Phase 1 - Mesure en laboratoire, CO en mélange dans l'azote

Durant la première phase, la mesure du CO dans un mélange d'azote seulement a été évaluée pour les systèmes Dräger et Gastec. Le CO est dilué avec de l'azote afin d'obtenir des mélanges dans une plage de concentrations entre 100 et 3000 ppm de CO. Le dispositif est présenté à la figure 5. Le mélange gazeux est prélevé dans un sac d'échantillonnage et, pour chaque concentration, deux prélèvements sont faits à l'aide de tubes colorimétriques de chaque manufacturier. Trois techniciens ont ensuite fait la lecture de chaque tube dans une chambre noire à l'aide d'une lampe de mine afin de simuler la lecture en milieu souterrain. Chaque mélange a aussi fait l'objet d'analyse à l'aide de l'appareil B&K (figure 6).

Phase 2 - Mesure en laboratoire, CO dans l'échappement diesel

Durant la deuxième phase, la mesure du CO a été faite dans l'échappement d'un moteur au diesel sur banc d'essai. Cet appareillage sert aussi à faire l'homologation des moteurs destinés à l'usage en milieu minier. Il permet de faire fonctionner le moteur à divers régimes afin de produire diverses conditions de composition de l'échappement, et de profil de température.

En plus des critères de précision et d'exactitude comme dans la première phase, on visait à évaluer l'impact de la chaleur des gaz d'échappement et celle des gaz qui pourraient interférer lors de la mesure du CO. Pour ce faire, on a installé un port d'échantillonnage tel que démontré à la figure 7. Grâce à cet orifice on peut faire un prélèvement avec les tubes colorimétriques directement dans l'échappement et on peut aussi obtenir un

échantillon en sac laminé pour faire une autre mesure avec tubes colorimétriques à température de la pièce. Comme à la phase 1, l'appareil B&K a été utilisé pour mesurer la concentration dans chaque sac afin de pouvoir comparer avec la lecture faite avec les tubes.

Phase 3 – Mesure en milieu minier. CO dans l'échappement diesel

La troisième et dernière phase de la recherche a consisté à évaluer l'équipement et la méthode en milieu minier souterrain. Il s'agissait de cibler divers types de véhicules dans les catégories de roulage/production et de véhicules de service et d'entretien. Cette portion du projet de recherche a permis entre autres de vérifier les plages de concentrations du CO en fonction du type de véhicule et du régime du moteur. Les problèmes reliés à l'échantillonnage en milieu minier ont aussi été identifiés.

RÉSULTATS – PERFORMANCE DES TUBES COLORIMÉTRIQUES

Phase 1 - Mesure du CO en mélange dans l'azote

Les résultats de l'évaluation sont résumés au tableau 2 et dans les graphiques aux figures 8 et 9. Les chiffres qui apparaissent dans ces tableaux sont calculés à partir de la lecture de deux tubes faite par trois techniciens. La moyenne de ces lectures sera comparée aux résultats de l'appareil B&K pour évaluer l'exactitude, tandis que l'écart type calculé à partir des lectures d'un même tube par trois techniciens servira à établir une mesure de précision.

En moyenne, on mesure une différence de 17,6% entre l'appareil B&K et les lectures du système Dräger. Le système Gastec, pour sa part, démontre une différence de 13,8%. L'écart type confère aussi un léger avantage au système Gastec avec des valeurs de 10,2 % et de 6,0% pour les systèmes Dräger et Gastec, respectivement. La lecture du tube Gastec, d'après les techniciens, s'avère plus facile à cause de la longueur et de la netteté de l'échelle.

Le graphique de la figure 8 démontre la relation linéaire entre les résultats obtenus avec les tubes Dräger et l'appareil B&K. Dans ce graphique on observe une légère démarcation entre les résultats obtenus sur l'échelle de 300 ppm (10 coups) et l'échelle de 3000 ppm (1 coup). Dans une analyse plus stricte, il aurait peut-être fallu faire l'étude de la relation linéaire en deux parties, une pour chaque échelle de mesure. Le coefficient de corrélation ($R^2 = 0.98$) démontre un haut niveau de linéarité entre les résultats B&K et Dräger. La valeur élevée de l'intercepte-y (-206) est causée en partie par le bris de continuité entre la basse et la haute échelle de mesure.

Caractéristique	Dräger	Gastec
Zone de mesure (1coup)	100 - 3000 ppm	25 - 1000 ppm
Écart type * (Phase 1, CO pur)	10,2%	6,0%
% Différence ** (Phase 1, CO pur)	17,6%	13,8%
% Différence ** (Phase 2, CO/diesel)	11,4% sous-estime	22,6% surestime
Effet du NO ₂	Aucun	Aucun
Effet du SO ₂	Aucun	Aucun (< 10% de la concentration du CO)
Effet de la température < 100°C	Pas apparent	Pas apparent

* Écart type moyen calculé à partir des lectures d'au moins trois techniciens

** Différence moyenne (%) entre le B&K et les tubes colorimétriques

Tableau 2. Performance des tubes colorimétriques Dräger et Gastec durant les phases d'étude en laboratoire (Phases 1 et 2).

Le graphique de la figure 9 donne les résultats du système Gastec. Ces résultats démontrent aussi un haut niveau de relation linéaire. On observe aussi une valeur de l'intercept-y de 41ppm, qui semble démontrer une meilleure transition entre les deux échelles de mesure, soit à 1000 ppm.

Phase 2 - Mesure en laboratoire du CO dans l'échappement diesel

Les résultats des travaux faits sur banc d'essai dans l'échappement diesel sont résumés au tableau 3, ainsi qu'aux figures 10 et 11. Après discussion avec les manufacturiers, il semble que les autres gaz, tel le NO₂ ou le SO₂ ne devraient pas causer d'interférence lors de la mesure du CO, en ce qui concerne la mesure dans l'échappement diesel. D'après Dräger, la mesure du CO dans l'échappement diesel devrait se faire sans problème en autant que la température est inférieure à 50 °C. D'après les résultats sur banc d'essai, il ne semble pas y avoir de liens entre la présence de SO₂ ou NO₂, et la performance du système Dräger (tableau 3). L'information du manufacturier au sujet du système Gastec note que la présence de NO₂ ne devrait pas affecter l'exactitude de la mesure du CO. Cependant, la présence de SO₂ en concentrations de 10 % ou plus de la concentration du CO pourrait causer une surestimation. Les valeurs de SO₂ mesurées dans l'échappement étaient de moins de 11ppm soit bien en dessous de 10 % de la valeur présumée du CO (tableau 3).

Les résultats au tableau 2 indiquent que le système Dräger a une performance qui est supérieure à celle du système Gastec dans l'échappement diesel. Le système Gastec

surestime de 22,6%, tandis que le système Dräger sous-estime de 11,4%. Ceci n'est pas nécessairement un problème sérieux, tout dépend de l'approche que l'on préconisera pour évaluer l'état de l'entretien des moteurs.

Les figures 10 et 11 indiquent encore une fois une bonne relation linéaire entre les valeurs mesurées par les tubes colorimétriques et l'analyseur B&K. Chacune des figures contient deux graphiques, un dont les résultats proviennent du prélèvement d'échantillons directement dans l'échappement (températures variant entre 27 °C et 90 °C) et un autre dont les résultats proviennent de prélèvements dans un sac d'échantillonnage laminé, donc à température de la pièce. Pour le système Gastec, aussi bien que pour le système Dräger, les courbes graphiques semblent indiquer que les températures en deçà de 100 °C ne semblent pas affecter l'échantillonnage du CO.

% Différence – (comparaison avec le B&K)		Température (°C)	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)
Dräger	Gastec			
17	-26	--	35	10.5
18	-29	--	70	7.9
5	-28	65	19	10.9
0	-29	46	100	10.9
-12	4	--	56	7.5
14	-19	27	71	1
-11	-25	90	--	--

Tableau 3. Observations, effets du SO₂, du NO₂ et de la température.

Phase 3 - Évaluation en milieu minier

Les résultats de mesures en milieu minier sont résumés au tableau 4. Quatre véhicules ont été échantillonnés. Il s'agit d'un tracteur Kubota (véhicule #688) qui sert au transport des ingénieurs, d'une chargeuse navette (véhicule de production #339), d'un transporteur de personnel (véhicule #649) et d'un camion qui sert au transport du minerai (véhicule de production #414). Dans tous les cas, ces véhicules ont été testés à deux régimes de fonctionnement du moteur, soit à vitesse réduite et à environ 3/4 de régime, sans charger le moteur. Pour ce qui est de la chargeuse navette, on a aussi fait la mesure en calant le moteur à haut régime à l'aide du système hydraulique (forçage du godet). Pour chaque test, on attendait que la température de l'échappement se stabilise avant de prendre une lecture. La mesure du CO se faisait en amont de tout système d'épuration grâce à des

ports d'échantillonnages à connecteurs de type Swagelok Quick-Connect. Le prélèvement se faisait grâce à la sonde haute température Dräger. Celle-ci permet de refroidir les gaz d'échappement et permet aussi de faire l'échantillonnage grâce à une ouverture à 90° par rapport à l'axe de mouvement des gaz. Ceci permet d'éviter d'accidentellement pressuriser le système d'échantillonnage (figure 3).

Véhicule	Régime	Concentration CO, ppm		
		Gastec	Dräger	B&K
Tracteur Kubota #688	Vitesse réduite/pas de charge	212	167	---
	3/4 de régime/pas de charge	408	442	---
Chargeuse navette #339	Vitesse réduite/pas de charge	210	191	---
	3/4 de régime/pas de charge	456	333	315
	3/4 de régime/charge dynamique	200	127	---
Transporteur #649	Vitesse réduite/pas de charge	325	273	208
	3/4 de régime/pas de charge	312	197	---
Camion #414	Vitesse réduite/pas de charge	208	138	---
	3/4 de régime/pas de charge	167	100	95

Tableau 4. Performance des tubes colorimétriques – échappement en milieu minier.

Les résultats au tableau 4 révèlent premièrement que tous les prélèvements sont bien en dessous de la valeur de 750 ppm qui est préconisée pour les véhicules de roulage. Ceci est vrai aussi bien pour les valeurs mesurées par voie de tubes colorimétriques ou grâce à l'appareil B&K. La plus haute valeur mesurée se situe à 456 ppm pour la chargeuse navette opérant sans charge à haut régime, tel que mesuré par le système Gastec. Ces observations indiquent que les valeurs préconisées de 750 ppm et 900 ppm pour les véhicules de production et de soutien, respectivement sont définitivement des valeurs qu'il est possible de respecter en pratique.

Les résultats supportent aussi les observations faites en laboratoire sur banc d'essai, c'est-à-dire que le système Dräger est plus exact que le système Gastec pour l'échantillonnage

dans l'échappement diesel. Ceci est évident si on observe les trois cas où un échantillon en sac laminé a été prélevé, et mesuré à l'aide du B&K, pour fin de comparaison. Les lectures d'après le système Dräger diffèrent dans une plage de 4 à 31%. Cette plage est de 45 à 74% pour le système Gastec. Les raisons qui expliqueraient ces différences ne sont pas connues en ce moment.

Une autre observation semble indiquer que la mesure à haut régime, sans charge, semble doubler la concentration de CO pour les véhicules 688 et 339 comparativement aux mesures faites à vitesse réduite du moteur. Pour les deux autres véhicules, on observe des concentrations qui sont sensiblement les mêmes, indépendamment du régime.

DISCUSSION

Tubes colorimétriques ou instruments à lecture en continu

On reconnaît en général que les méthodes qui font usage d'appareils à lecture en continu sont habituellement supérieures à celles qui utilisent les tubes colorimétriques (2,3,7). Ceci est vrai, pourvu que ces instruments soient entretenus et calibrés de façon rigoureuse et régulière. Parce que certains de ces instruments sont complexes et fragiles, il est préférable que la vérification de la qualité de l'échappement se fasse à l'atelier d'entretien, par un mécanicien ou un technicien qui a reçu un entraînement adéquat au préalable.

S'il s'avère que toutes ces conditions ne peuvent être rencontrées, il est préférable de faire usage de tubes colorimétriques. Comme l'ont démontré les résultats de ce travail, les tubes colorimétriques ont une exactitude qui varie et peut aller jusqu'à 74% quand on les utilise dans l'échappement diesel. Si les concentrations mesurées se rapprochent des valeurs ciblées par la réglementation, il est recommandé de prendre plus d'un échantillon dans l'échappement du véhicule diesel.

Les tubes colorimétriques possèdent aussi certains avantages. Ceux-ci sont prêts à utiliser, et ne nécessitent pas de calibrage. Bien qu'un minimum d'entraînement soit préférable, ils sont en général faciles à utiliser et se prêtent bien à l'usage en chantier aussi bien qu'en atelier.

Afin d'encourager les mines qui font usage d'instruments plus sophistiqués, on devrait aussi permettre de faire les tests d'évaluation de l'échappement avec les appareils à lecture directe. On recommande cependant que les mines qui choisissent de se servir de ces appareils démontrent que les techniciens ont reçu un entraînement adéquat, que les appareils sont entretenus et calibrés de façon régulière, et que des records à cet effet sont

gardés en filière. On recommande de plus que ces appareils, qui sont en général fragiles et plus ou moins portatifs, demeurent en atelier et que l'analyse se fasse à cet endroit.

Sélection du système de tubes colorimétriques

Le choix du système de tube colorimétrique dépend de l'exactitude et de la précision de l'appareillage ainsi que des restrictions au niveau du protocole d'échantillonnage et des plages de concentrations anticipées. Au niveau de l'exactitude, le système Dräger semble être supérieur au système Gastec, spécialement en ce qui concerne la mesure dans l'échappement diesel. Cependant, l'application spécifique favorise le système Gastec, et ce pour deux raisons :

1. l'échelle de mesure pour un coup de 100 ml pour le système Gastec couvre les concentrations de 25 à 1000 ppm, soit exactement la plage de concentration anticipée pour l'application présente. Le système Dräger, pour sa part, brise cette plage de concentration en deux parties à 300 ppm. Le manque de linéarité à cet endroit critique pourrait causer des problèmes.
2. le temps d'échantillonnage se doit d'être minimisé. Premièrement, pour des raisons de santé et de sécurité du personnel qui fait le prélèvement. De plus, la mesure doit se faire pendant que le moteur est chaud et qu'il tourne au haut régime, bien que ceci ne soit pas dommageable pour le moteur sur de courtes périodes de temps, il n'est pas recommandé de le laisser tourner inutilement dans ces conditions. Si on utilise les tubes Dräger et que l'échelle de 300 ppm est nécessaire à cause de basses concentrations de CO (voir les données pour le camion #414) le temps d'échantillonnage pourrait être de 4 minutes, puisque le prélèvement nécessitera 10 coups de pompe. Le système Gastec peut faire la mesure en un coup de moins de 45 secondes.

On recommande cependant l'usage de la grosse sonde de refroidissement Dräger étant donné que celle-ci est plus solide, et devrait pouvoir refroidir plus facilement les gaz d'échappement. La sonde Dräger devrait être modifiée afin d'y ajouter un connecteur de type Swagelok Quick-Connect. Celui-ci devra pouvoir s'accoupler à un autre connecteur Swagelok qui sera fixé en permanence sur le tuyau d'échappement du véhicule à l'endroit indiqué plus bas. Ce connecteur devra être du genre qui se bouche automatiquement quand il est déconnecté.

Protocole de mesure

Tous les experts s'entendent pour dire que le meilleur moyen de vérifier l'intégrité d'un moteur au diesel est de faire le test pendant que le moteur est sous charge ou pression dynamique, c'est-à-dire en calant le moteur à l'aide du convertisseur de couple (2,7,8). Ceci est possible seulement si les véhicules ciblés sont munis de convertisseurs de couple et de transmissions automatiques. Un tel protocole est difficilement applicable aux véhicules munis de transmissions manuelles.

De plus, la charge dynamique du moteur telle que décrite plus haut n'est pas utilisée au Canada. Afin d'avoir l'opinion d'experts en ce qui concerne les aspects reliés à la sécurité du processus, la méthode préconisée en Pennsylvanie (charge dynamique) a été revue par des experts du Ministère du Travail de l'Ontario. Les opinions des gens du Ministère sont résumées dans l'appendice.

On y dénote certaines appréhensions en ce qui concerne le processus de charge dynamique du moteur aussi bien au niveau de la santé et de la sécurité des intervenants, qu'à celui de la protection du moteur.

À cause de cela, les tests sous charge ne sont pas recommandés. De plus, jusqu'à ce qu'on évalue les risques de dommages aux véhicules, il est préférable de faire les tests à haut régime, sans charge. Ainsi, le protocole de mesure pourra être applicable immédiatement par l'industrie minière, pendant que la recherche en ce sens se poursuit.

Le test de mesure du CO doit être fait en amont de tout type d'épurateur, mais aussi près possible de celui-ci afin de permettre aux gaz d'échappement de se refroidir. Il faut aussi s'assurer d'offrir au technicien un accès confortable au port d'échantillonnage. Le protocole de mesure est le suivant :

1. Vérifier l'intégrité de la pompe Gastec/Dräger en y insérant un tube qui n'est pas ouvert. Activer ensuite la pompe et s'assurer que celle-ci reste sous pression au moins 10 minutes. Ceci peut se faire au début du quart de travail et permet de vérifier l'étanchéité de la pompe d'échantillonnage.
2. Avant de commencer il faut s'assurer que l'opérateur et le technicien utilisent l'équipement de protection personnelle nécessaire, c'est à dire, gants (chaleur), lunettes de sécurité et protection respiratoire (poussières et gaz d'échappement diesel).

3. Stationner le véhicule ciblé dans un endroit bien ventilé, engager les freins d'urgence et placer des blocs aux roues du véhicule. Durant toute la durée du test il faut s'assurer que la transmission demeure strictement en position neutre.
4. Connecter la sonde de refroidissement au port d'échantillonnage Swagelok situé sur le tuyau d'échappement.
5. Si le moteur est froid, laisser tourner le moteur lentement pendant une minute.
6. Appuyer sur l'accélérateur doucement pour augmenter légèrement le régime du moteur pendant 2 minutes.
7. Préparer l'équipement d'échantillonnage afin de ne pas laisser le moteur tourner inutilement.
8. Quand l'équipement d'échantillonnage est prêt, demander à l'opérateur du véhicule d'appuyer sur l'accélérateur pour maintenir un régime au trois quart des révolutions maximales du moteur.
9. Connecter l'équipement d'échantillonnage et faire le prélèvement. Si durant le test, l'opérateur pense qu'il y a des risques à la santé/sécurité des travailleurs ou si le véhicule risque d'être endommagé, il doit relâcher l'accélérateur, laisser le véhicule refroidir et consulter un mécanicien au besoin.
10. Quand le prélèvement est terminé, l'accélérateur est relâché. Il convient de laisser refroidir le véhicule avant de retourner au travail régulier. Si la valeur du CO mesurée est près de la valeur ciblée par la réglementation, on doit répéter le test.

Cette procédure est un amalgame des étapes suggérées dans divers protocoles (2,4,7). Celle-ci n'a donc pas été soumise à des tests rigoureux par l'auteur de ce rapport et devrait être vérifiée en milieu minier afin de répondre à toutes autres questions soulevées concernant la santé et la sécurité.

La mesure du CO dans l'échappement devrait se faire à intervalles réguliers, et après chaque entretien régulier du moteur. Ceci permettra de s'assurer que le processus d'entretien a effectivement amélioré la performance du moteur.

Réglementation

Le tableau 5 résume la réglementation nationale et internationale où on se sert de tests d'échantillonnage du CO dans l'échappement. Dans tous les cas, sauf celui de l'Ontario, on recommande que les tests soient faits pendant que le moteur tourne à plein régime et sous charge dynamique. En Pennsylvanie, on recommande de faire l'entretien lorsque la valeur de base du CO double.

Pays/Province	Concentration de CO permise dans l'échappement
Ontario	1500 ppm, moteur à 3/4 de régime, sans charge dynamique
Pennsylvanie	2X la concentration de base, charge dynamique du moteur
Australie	1500 ppm, charge dynamique du moteur
MSHA	2500 ppm, charge dynamique du moteur

Tableau 5. Réglementation des concentrations du CO dans l'échappement.

CONCLUSIONS

Bien que l'utilisation des tubes colorimétriques pour la mesure du CO dans l'échappement ne fasse pas l'unanimité, ceux-ci sont probablement adéquats pour l'application qui nous concerne. Ce qui n'est pas le cas du protocole de mesure lui-même. Il est recommandé pour le moment de faire les tests sans charge dynamique en sachant que ceux-ci sont moins aptes à déceler la présence de problèmes au niveau de l'entretien. Des recherches additionnelles devraient être faites en milieu minier afin d'évaluer les problèmes au niveau de la santé (émissions), de la sécurité (chaleur et immobilisation du véhicule), ainsi que les risques de bris ou de dommages au moteur et/ou au véhicule durant les tests faits sous charge.

Afin de permettre l'application immédiate de ce processus en milieu minier, le protocole sans charge tel que décrit plus haut est suggéré. Le choix de tubes ou d'appareils électroniques à lecture directe est laissé au soin des opérateurs miniers.

RÉFÉRENCES

1. Grenier, Michel, Gangal, Mahe, Hardcastle, Stephen et Don Dainty, Répertoire des techniques et technologies de contrôle des émissions des moteurs diesels en milieu minier; Rapport de recherche de l'IRSST no. R-172; oct. 1997.
2. Spears, Matthew, W., An Emission-Assisted Maintenance Procedure for Diesel-Powered Equipment; Rapport de University of Minnesota, Center for Diesel Research pour le compte du NIOSH, No. de contrat USDI/1432 C0369004; oct. 1997.
3. McGinn, Sean, Maintenance Guidelines and Best Practices for Diesel Engines; Rapport en préparation pour le compte du consortium de recherche DEEP dans le cadre du projet de recherche sur l'impact de l'entretien sur la réduction des fumées diesels, jan. 1999.
4. Mines Accident Prevention Association of Ontario, Carbon Monoxide Testing of Undiluted Diesel Exhaust; MAPAO Mine and Plant Ventilation Manual; mai 1983.
5. Dräger, Caractéristiques des tubes colorimétriques et méthode de mesure du CO; sept. 1997.
6. Gastec, Caractéristiques des tubes colorimétriques et méthode de mesure du CO
7. Commonwealth de la Pennsylvania, Bureau of Deep Mine Safety, Diesel-Powered Equipment, Act 182; 1996.
8. Fowlie, Erica, Carbon Monoxide Emission Evaluation; Rapport de projet remis à Mahe Gangal, CANMET; avril 1998.
9. Province de l'Ontario, Occupational Health and Safety Act and Regulations for Mines and Mining Plants; Revised Statutes of Ontario; sept. 1997.
10. Vergunst, J. et C. Paquette, 1996 Ontario Underground Diesel Equipment and Procedure Survey; Ontario Ministry of Labour, Occupational Health and Safety Division; oct. 1996.

APPENDICE

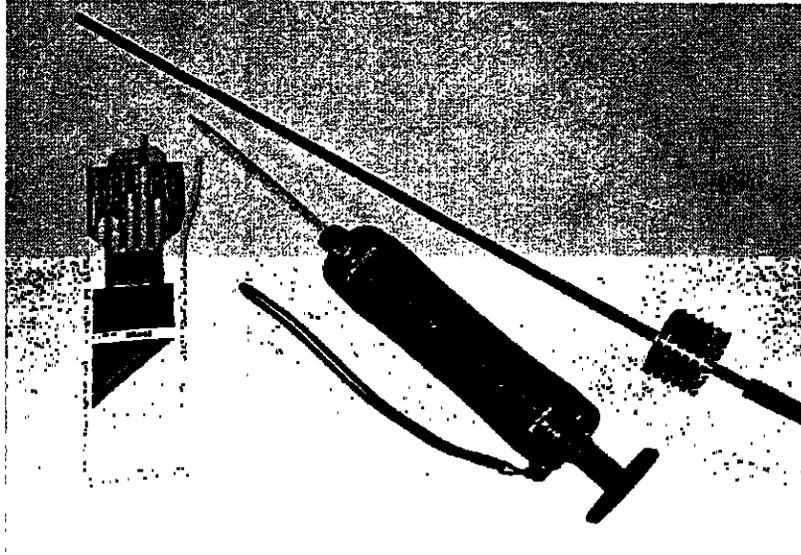


Figure 1. Système d'échantillonnage Gastec, mesure du monoxyde de carbone

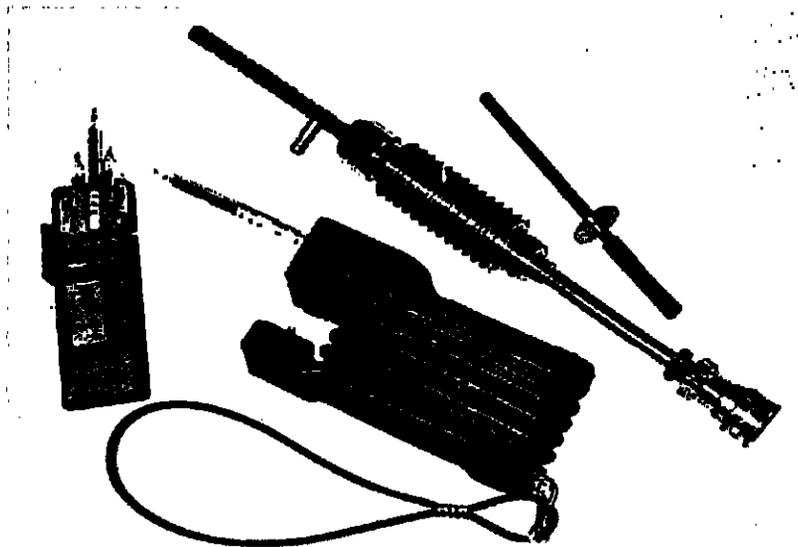


Figure 2. Système d'échantillonnage Dräger, mesure du monoxyde de carbone

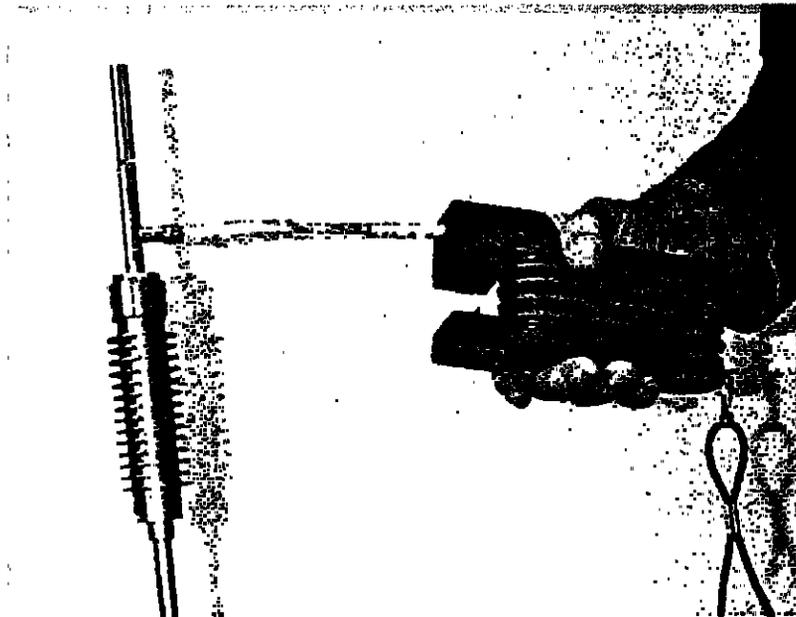


Figure 3. Sonde d'échantillonnage Dräger pour application à haute température



Figure 4. Échantillonneur de gaz photo-acoustique de marque B&K (modèle 1302)

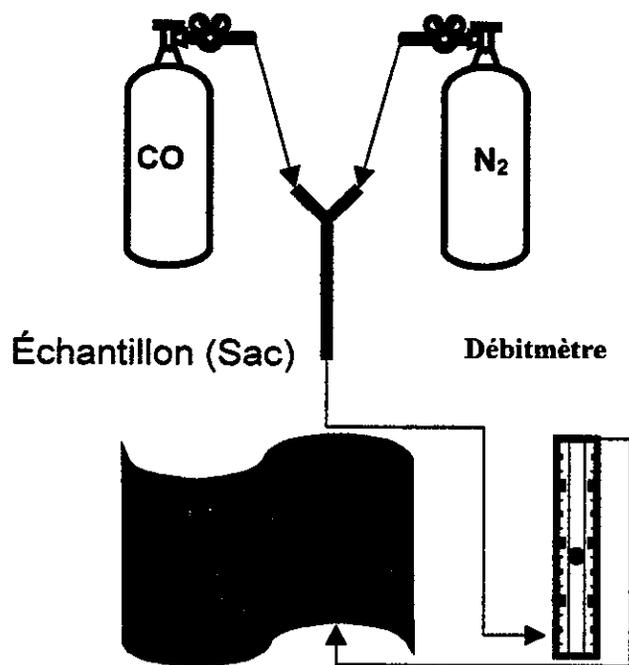


Figure 5. Préparation du mélange gazeux CO/N₂

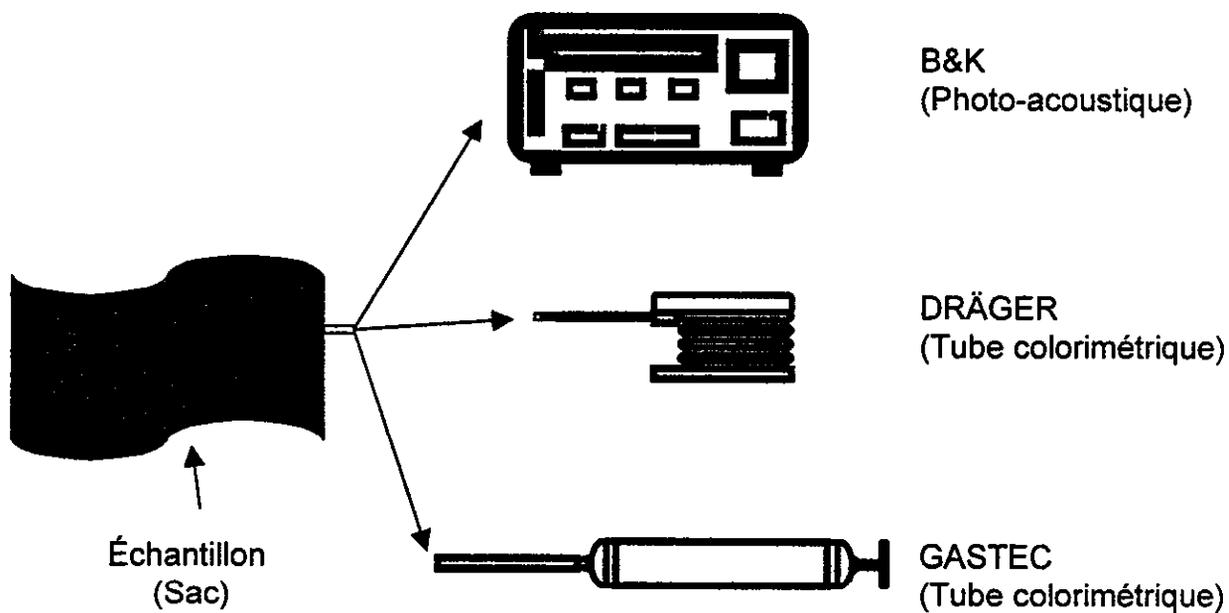


Figure 6. Échantillonnage du monoxyde de carbone prélevé en sac

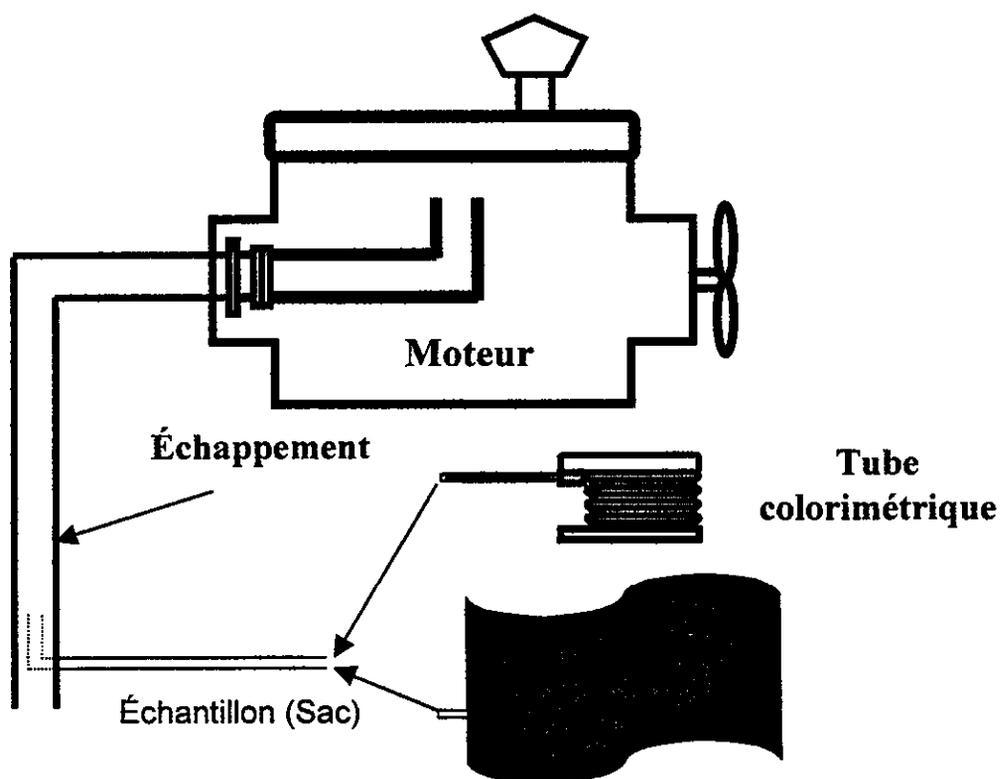


Figure 7. Appareillage d'évaluation sur banc d'essai diesel

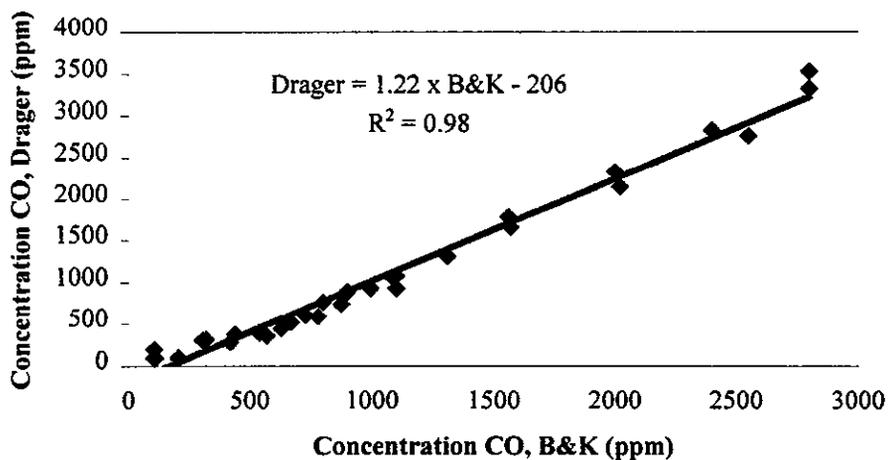


Figure 8. Comparaison Drager vs B&K – Mélange CO/N₂

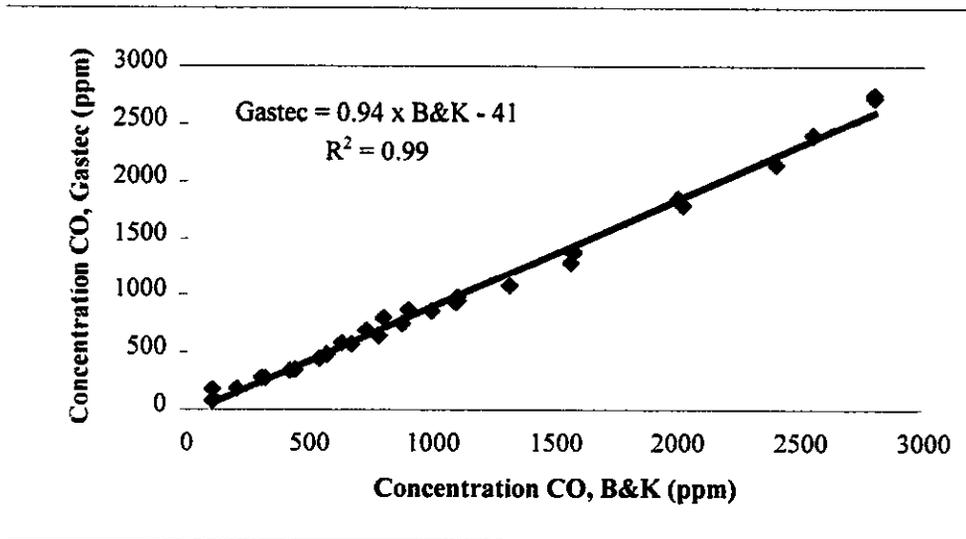


Figure 9. Comparaison Gastec vs B&K – Mélange CO/N₂

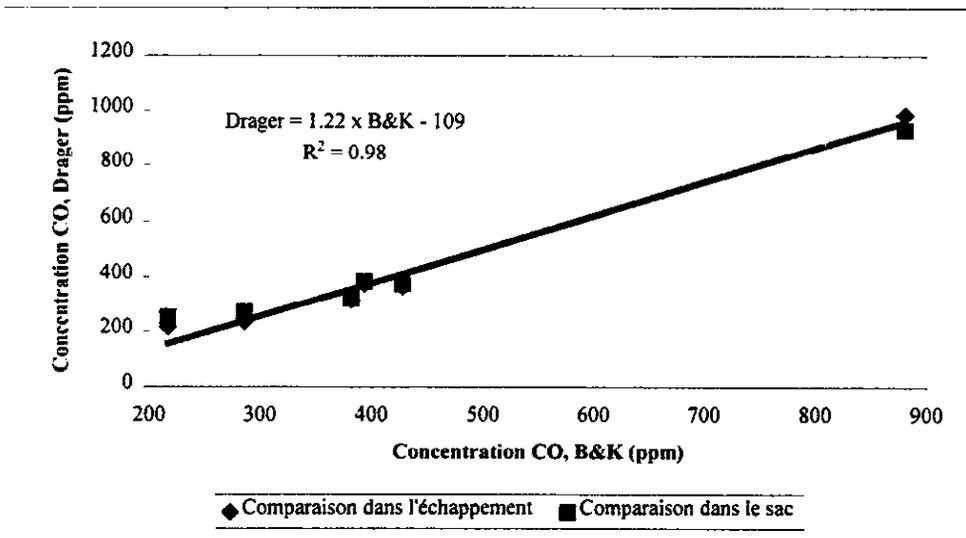


Figure 10. Comparaison Drager vs B&K – Banc d'essai diesel

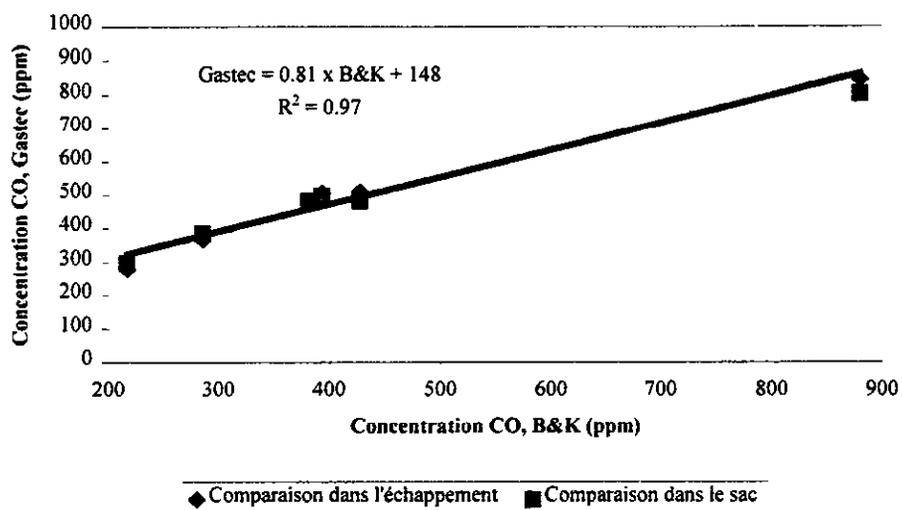


Figure 11. Comparaison Gastec vs B&K – Banc d'essai diesel

Date: November 3, 1998

Michel Grenier
Program Manager
CANMET
1079 Kelly Lake Road
Sudbury, Ontario
P3E 5P5

Dear Michel,

Re: Undiluted Carbon Monoxide Testing - Pennsylvania

I received your fax on the rules for testing undiluted CO in the Commonwealth of Pennsylvania by the Bureau of Deep Mine Safety (Diesel-Powered Equipment, Act 182 of 1996).

I found the procedure very interesting and very detailed. I see that Pennsylvania requires the use of particulate filters. To summarize their procedure for testing undiluted CO in the exhaust:

- (A) These tests must be conducted when a diesel unit first enters the mine:
- test the brakes
 - place equipment into an intake entry (not in shop)
 - set brakes and chock the wheels
 - install a portable CO sampling device into the untreated exhaust gas coupling provided in the operator's cab (they require a permanent setup)
 - allow the engine to warm up to operating temperature
 - for mobile equipment, shift into second gear and put the engine at full throttle, or for stationary equipment, induce a load and put the engine at full throttle (their regulations are silent for the testing of stationary equipment)
 - start the CO sampler and measure and record CO levels every minute for 5 minutes
- (B) Every 100 hours [the life of a Paas filter] the tests are repeated.

After talking to various manufacturers as well as our own electrical/mechanical engineers, several concerns were raised:

1. Parking brakes are intended to hold the vehicle stationary when stopped and not intended to hold the vehicle under dynamic load. Performing this test with a parking brake could over stress and weaken the parking brake. Therefore the emergency brake must be used in this test. The emergency is designed to stop the vehicle under full speed/full load conditions.
2. Because the power train is locked in place, there is also a concern with the torque convertor overheating. The cooling system on a torque convertor is designed for normal operating conditions. Will damage to the torque convertor be covered by the manufacturer's warranty?
3. Equipment with a standard transmission can only be tested under high speed no load conditions.
4. To bring up the engine to normal operating temperature, using torque/hydraulic stall is not the best method. Drive the vehicle around to bring up the engine temperature.
5. Because the CO testing is carried out with an instrument in the operator's cab the procedure is safe enough, as long as the qualified person doing the testing is out of the way.
6. If the test is to be conducted with a standard hand held cooling probe, this test procedure is inherently dangerous in case the brakes slip. In addition, the person doing the manual testing would be directly exposed to the exhaust for five minutes or more.

Hope this helps.

John Vergunst, P.Eng., CIH

Provincial Mining Specialist
Ontario Ministry of Labour