

## Pollution par les moteurs diesel lors de la construction de tunnels

### Bulletin 4: essais sur le terrain de systèmes de filtres à suie

#### 1. Objectif

Le projet VERT doit démontrer

- que les systèmes de traitement secondaire des gaz d'échappement actuellement disponibles peuvent parfaitement équiper les moteurs diesel des engins de chantier,
- qu'il est possible, de la sorte, de réduire durablement les émissions polluantes des moteurs directement à la source,
- qu'il est possible de respecter efficacement les valeurs VME de qualité de l'air au poste de travail, sans adopter de mesures supplémentaires de ventilation [1].

#### Editorial

Pour des raisons de rentabilité, de puissance volumique et de fiabilité, il n'est pas possible d'envisager de se passer des moteurs diesel lors de la construction de tunnels. Mais, en contrepartie, la pollution qu'ils entraînent est si importante, en particulier la quantité rejetée de fines particules nocives pour la santé (EMD), qu'en dépit d'une intensification de la ventilation dans le tunnel, il est souvent impossible de respecter les valeurs VME, en vigueur depuis 1994. Seule une réduction des émissions à la source, c'est-à-dire en l'occurrence un traitement secondaire des gaz apporte une solution à court terme.

Dans le cadre de VERT, des tests sur banc d'essais ont montré qu'il existe d'ores et déjà de tels systèmes pouvant être utilisés dans des tunnels. Avec les essais sur le terrain, l'heure de vérité a sonné. Neuf engins de chantier ont été équipés de filtres dotés de différents systèmes de régénération. L'expérience, commencée fin 1995, s'est déroulée sur une année, pendant laquelle des contrôles ont été effectués par les différentes instances responsables pour la Suva (Suisse), l'AUVA (Autriche) et le TBG (Allemagne). En Suisse, les résultats de ces essais ont été suivis par l'OFEFP, qui est compétent en matière de protection de l'air, en vue d'étendre l'application de tels systèmes de traitement secondaire à l'ensemble des engins de chantier.

AUVA, Suva, TBG

VERT est l'abréviation de **V**erminderung der **E**missionen von **R**ealmaschinen im **T**unnelbau. On entend par machines réelles les moteurs actuellement utilisés sur le terrain et non pas les développements futurs. Le premier numéro du Bulletin VERT traitait des objectifs du projet. Le second numéro présentait une sélection de filtres à particules diesel et de systèmes de régénération, tandis que la troisième édition s'intéressait aux aspects économiques du choix entre ventilation et traitement secondaire des gaz d'échappement.

\* Les EMD sont considérées comme cancérogènes et il convient donc de respecter un seuil minimal.

Les résultats des contrôles sur banc d'essais réalisés entre 1994 et 1995 [2] se sont révélés très encourageants, tous les filtres testés présentant un taux de filtration atteignant, voire dépassant 90%. Cependant, les essais sur le banc moteur ne permettent pas de reproduire les conditions exactes d'utilisation d'une machine de chantier. En dernier ressort, il faut s'en remettre à des expériences de terrain pour pouvoir déterminer si un système de traitement secondaire est adapté pour un tel usage.

Il a donc été décidé de procéder durant une année à l'essai en conditions réelles de différents filtres et systèmes de régénération considérés comme représentatifs. Les données à la clé constituent une base fiable pour juger si ces systèmes sont à même d'être employés lors de la construction de tunnels.



Figure 1: Utilisation dans les conditions difficiles régnant dans une carrière d'une chargeuse sur pneus Caterpillar 966 F, équipée d'un filtre à suie DSI

#### 2. Montage/équipement

Les engins de chantier sont de gros appareils coûteux. Leur équipement avec des filtres à suie requiert donc les conditions suivantes:

- durée d'immobilisation limitée,
- transformations techniques minimales,
- pas d'altération des fonctions de l'appareil,
- pas de dégradation des conditions de visibilité,
- pas d'augmentation des émissions de bruit.

La taille de la plupart des filtres à suie sélectionnés correspond environ à celle des silencieux. Ils sont installés à leur place sur les engins et atténuent les sons dans la même mesure et la même gamme de fréquences, une amélioration des valeurs acoustiques pouvant éventuellement en résulter.

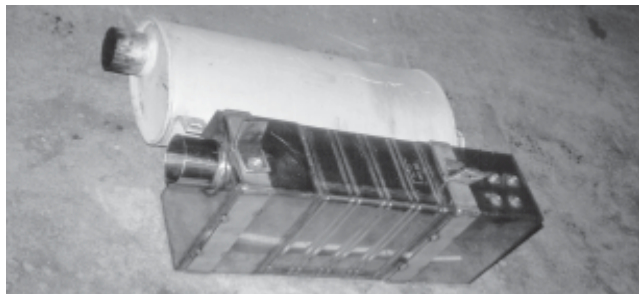


Figure 2: Filtre à suie SHW (en haut) comparé avec le silencieux d'origine de l'excavatrice LIEBHERR A912 (en bas).

### 3. Filtres

Sur la base des mesures réalisées sur le banc d'essai de l'Ecole d'Ingénieurs de Bienne, on a sélectionné pour les essais sur le terrain des filtres représentatifs de ceux employés actuellement:

- **Filtres cellulaires céramiques monolithiques:** ces filtres sont fabriqués par NGK et Corning en cordiérite. Leurs cellules ont en général une section de 2x2 mm. Ce sont des filtres de surface, dont la porosité varie de l'un à l'autre. Les systèmes ECS, DSI et UNIKAT sont représentés. Ils sont largement utilisés de par le monde. L'inconvénient réside dans le risque de rupture par suite de chocs thermiques. Ceux-ci sont la conséquence directe des températures élevées régnant en cas de combustion incontrôlée de la suie emmagasinée dans le filtre. Il convient de réduire ce phénomène à de justes proportions grâce à une régénération régulière.
- **Filtres métalliques frittés:** système SHW. Il s'agit également de filtres de surface, dont la structure est proche de celle des filtres cellulaires céramiques, à la différence près qu'ils sont fabriqués, comme leur nom l'indique, en métal. Ils sont donc plus lourds, mais en contrepartie moins sensibles aux contraintes thermiques.
- **Filtres en fibres de céramiques:** système BUCK. Il s'agit de filtres tissés, appartenant à la famille des filtres de profondeur. Ils présentent de bonnes capacités de filtration des particules plus fines. Leur volume est cependant quelque peu plus important que celui des filtres cellulaires en céramique ou métalliques.
- **Filtres en fibres de céramique,** en forme de treillis, système HUG.

Le filtre bobiné en fibres développé par 3M avait également été testé sur le banc d'essai de l'Ecole d'Ingénieurs de Bienne. Cependant, aucun des filtres actuels n'étant adapté aux dimensions du moteur pour lequel il a été opté, ce modèle n'a pu être testé en conditions réelles.

### 4. Processus de régénération

Les processus de régénération sélectionnés l'ont été en fonction de l'état de la technique:

- **Brûleurs diesel en courant principal,** système DSI. Ils sont utilisés sur deux véhicules, à chaque fois en combinaison avec un filtre cellulaire en céramique. Ce système est relativement coûteux, mais entièrement automatique, mûrement étudié et largement éprouvé.
- **Régénération électrique périodique,** représentée par le système UNIKAT. Les filtres emmagasinent la suie pendant

toute la durée d'une session de travail et doivent donc être de grandes dimensions. En règle générale, ils sont connectés au circuit électrique à raison d'une séance quotidienne de quelques heures, afin de procéder à la combustion de la suie. Bien que son application lors de la construction de tunnels se révèle quelque peu exigeante en termes d'organisation, ce système très employé et bien développé est largement plébiscité.

- **Régénération additive:** ce processus passif de régénération a été testé tant sur des filtres cellulaires ECS, que sur des filtres métalliques frittés SHW, ainsi que sur des filtres en fibres. Trois additifs sont à l'essai:

- \* EOLYS, DPX 9 de Rhône-Poulenc env. 150 mg de cérium par litre de carburant diesel
- \* Ferrocène, DF60 de PLUTO env. 18 mg de fer par litre de carburant diesel
- \* OS 960401 de LUBRIZOL env. 50 mg de cuivre par litre de carburant diesel

Cette méthode, qui consiste à mélanger en permanence au diesel de petites quantités de catalyseurs pour carburants, est rentable en termes de coûts et a donné de bons résultats lors des essais sur des moteurs. Les oxydes métalliques déclenchent le processus de régénération dans les filtres à particules à partir de 400°C et y restent presque en totalité. Les fabricants peuvent s'appuyer sur de multiples expériences, essentiellement concernant les bus et les camions; l'application à des engins de chantier est relativement récente. Pour les essais sur le terrain, les dosages ont d'abord été faits manuellement, c.-à-d. à partir des mélanges de base. A la mi 1996, des dispositifs de dosages automatiques ont été utilisés. Les quantités mélangées sont enregistrées.

- **Revêtement catalytique:** les deux types de filtres en fibres sont recouverts d'un revêtement catalytique. Ce procédé permet de réduire la température de combustion de la suie de près de 200°C.

#### Précautions spéciales lors de l'emploi d'additifs

L'utilisation d'additifs pour carburant est soumise au respect de certaines obligations. Ils tombent sous le coup de l'ordonnance sur les substances et, en fonction de leur composition, de l'ordonnance sur la protection de l'air.

Conformément aux recommandations de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), les mesures suivantes ont été prises, afin d'éviter toutes émissions secondaires indésirables, ainsi qu'à titre de garantie de la fiabilité des résultats des essais dont les additifs ont fait l'objet.

- Dans la mesure du possible, chaque système sera disponible en deux versions comparables.
- On mesurera régulièrement, en laboratoire et sur le terrain, les gaz polluants rejetés par les moteurs et toutes les émissions secondaires du système.
- On contrôlera la concentration en additifs au niveau des gaz d'échappement et des filtres.
- Dispositifs de surveillance signalant et enregistrant toute sollicitation ou tout dommage excessif au niveau du filtre.
- Contrôles finaux des systèmes de filtres par le fabricant et des laboratoires indépendants.

## 5. Surveillance

Durant les essais sur le terrain, les filtres ont été sous la surveillance constante d'un système informatique, afin de contrôler la température des gaz d'échappement et de détecter toute perte de pression. Cela a permis, d'une part, de renforcer la sécurité des moteurs et des filtres et, d'autre part, de récolter une somme d'informations relatives au fonctionnement dans le cadre des essais.

### Surveillance de la pression

Pendant leur phase d'accumulation de la suie, les filtres à suie génèrent une contre-pression importante, que le moteur doit surmonter. Le travail de refoulement augmente donc en conséquence. Une quantité un peu plus importante de gaz d'échappement demeure dans le cylindre. En cas de suralimentation du moteur, l'entraînement de la turbine est donc moindre, de sorte que le niveau de suralimentation est réduit, de même que l'excès d'air. Il y a donc dégradation du rendement du moteur, ainsi que de la consommation en carburant et du volume d'émissions polluantes rejetées dans l'air ambiant. La perte de pression est donc une valeur déterminante et doit être constamment surveillée pendant la mise en service. S'agissant de systèmes automatiques comme celui de DSI, ce contrôle est effectué par voie électronique.

### Enregistrement des données

Les cycles de fonctionnement de la plupart des engins de chantier varient d'une fois à l'autre. Une standardisation n'est guère envisageable. En outre, il ne faut pas exclure une possible modification des conditions régnant au cours des essais. Par exemple, des cendres de pétrole peuvent très bien se déposer sur les filtres. Pour pouvoir enregistrer les informations importantes pendant toute la durée d'utilisation, il faut donc une surveillance constante. A cet effet, toutes les machines ont été équipées d'un dispositif spécial d'enregistrement des données:

- Mesure de la température avant l'entrée du filtre au moyen de thermo-éléments (PHILIPS, Mantelcoax), convertisseur TCM et compensation.
- Capteur de chute de pression, domaine 0-0,5 bar (HUBA Control, type 692),
- Enregistreur de données (Smart Reader de SCHILD-KNECHT): 7 canaux avec capteur de température interne et batterie, cycle de mesure le plus court de 8 secondes, lisible sur PC. Capacité de stockage: en cas de limitation à 2 canaux et de temps d'interrogation de 2 minutes: 22 jours.
- Raccordement à la batterie de l'appareil de 24 volt, stabilisation.
- Désaccouplement des vibrations au châssis-cadre du véhicule.

Ce mode d'enregistrement des données permet, d'une part, d'enregistrer des phénomènes isolés, comme par exemple la combustion de la suie avec une résolution importante, et d'autre part de stocker durablement des données dans le but d'en dégager des tendances. La configuration standard veut que soient toujours conservées en mémoire les données des 22 derniers jours, de manière à permettre également le suivi d'évolutions lentes et la reconstitution de phénomènes peu courants.

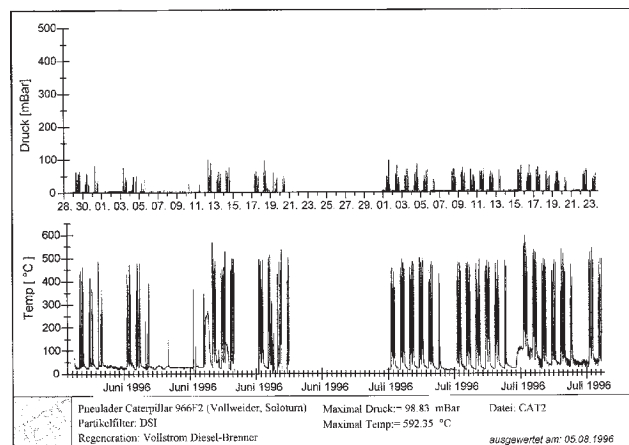


Figure 3: Pression et température avant le filtre sur une période de travail de plusieurs heures. Il est possible de zoomer sur des réactions isolées à certains moments.

Les données sont lues régulièrement et peuvent être traitées avec un logiciel pour PC approprié (DIADEM de GFS).

## 6. Mesures périodiques d'émissions

En l'espace d'environ 6 semaines, les émissions de gaz d'échappement de tous les véhicules de chantier utilisés lors des essais sur le terrain ont été contrôlées par la Suva. On s'est intéressé aux émissions de CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, HC et O<sub>2</sub>, ainsi qu'aux émissions de fumée. A cet effet, on a employé les appareils suivants, préalablement contrôlés lors des tests sur le banc d'essai<sup>1</sup>:

- Di-Smoke 435 AVL, équipé d'un banc de mesure pour 4 gaz.
- Appareil VLT d'analyse des fumées de diesel. Ces deux appareils ont été employés afin de mesurer le débit de fumée émis en phase d'accélération.
- Automatic-Smoke-Tester 407 AVL, destiné à mesurer la quantité de fumée émise en régime de pleine charge, à la sortie du filtre à suie.
- Appareil de mesure des gaz d'échappement RBR, à des fins de détection des gaz O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> et HC, ainsi que
- Analyseur de gaz de combustion MRU, mêmes fonctions que le précédent.



Figure 4: Véhicule de mesure Suva en service

<sup>1</sup> Il sera traité en détail dans un prochain numéro du Bulletin VERT de l'évaluation des appareils adaptés pour mesurer le débit de fumée, l'émission de fumée en régime de pleine charge, ainsi que les émissions gazeuses des moteurs des engins de chantier.



Les mesures des gaz polluants O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> et HC ont été effectuées en régime de ralenti bas, de ralenti élevé, et, au moins en régime de pleine charge, soit avec couple d'arrêt convertisseur, soit avec accouplement hydraulique. L'huile hydraulique chauffant, ce régime ne peut être maintenu que 2 à 3 minutes. On en profite également pour mesurer la fumée.

Afin de déterminer les caractéristiques des émissions transitoires, on mesurera également le débit de fumée en régime d'accélération libre et d'accélération sous charge [1].

Pendant qu'on effectuait les mesures, on a également relevé la température de l'huile, le régime du moteur, ainsi que la pression et la température avant le filtre.

La durée des mesures est d'environ 1 heure. On part du principe que cet effort sera possible plus tard pour la surveillance régulière des moteurs diesel lors de la construction de tunnels (env. une fois par an).

## 7. Contrôles périodiques

**Carburant:** le mécanicien tient un registre sur la consommation de carburant et l'utilisation d'additifs, de manière à permettre d'établir un bilan sur toute la durée des tests.

On prélèvera périodiquement des échantillons de carburant, essentiellement pour contrôler la qualité des mélanges effectués.

**Lubrifiant:** au bout de 250 heures de fonctionnement, il sera prélevé sur tous les appareils un échantillon de lubrifiant, qui sera analysé par la firme Ammann/Langenthal. On s'intéressera plus spécifiquement à la teneur en suie de l'huile, celle-ci étant susceptible d'augmenter suite à la contre-pression.

## 8. Travaux connexes

- Des travaux poussés ont été menés à l'EPF/Zurich et l'ETS/Bienne concernant la capacité de filtration des fines particules par différents matériaux de filtres. Les résultats en ont été rassemblés dans [4]. Les études se poursuivent.
- Il était prévu de réaliser en juin 1996 à l'ETS/Bienne des études concernant l'effet des additifs pour carburant au niveau de la répartition par taille des particules de suie.
- Parallèlement à cela, des travaux fondamentaux de recherche sont en cours à l'EPF/Zurich. L'objectif est d'améliorer la combustion par l'ajout d'additifs pour carburant. En plus de leur action au niveau des filtres à suie, il semblerait qu'ils améliorent également le processus en chambre de combustion.
- Sur l'initiative de l'OFEFP, il a été procédé à une expérience à l'automne 1996, dans les locaux du LFEM/Dübendorf. Elle visait à étudier les éventuelles émissions secondaires susceptibles de résulter de l'emploi d'additifs pour combustibles.

## 9. Evaluation

Tous les appareils doivent être testés sur le terrain pendant une durée minimale d'un an. Une fois ce délai écoulé, les filtres seront démontés pour être envoyés pour analyse aux

fabricants ainsi qu'à des laboratoires indépendants. A cet égard, on examinera plus particulièrement les points suivants:

- résistance, dommages internes, corrosion,
- dépôts de substances inertes (cendres de pétrole, cendres de combustibles, déchets dus à l'abrasion, poussières fines, produits résiduels),
- accumulation d'additifs et bilan pour l'ensemble de la durée d'utilisation.
- Dans les cas où cela présente un intérêt, après avoir été testés, les filtres feront à nouveau l'objet d'un contrôle sur le banc d'essai.

## 10. Aperçu des connaissances actuelles

Remercions tout d'abord les entreprises de construction pour avoir accepté de mettre leurs précieux engins à disposition dans le cadre de ces essais. Ce geste symbolise l'intérêt que représentent pour elles, en tant qu'utilisateurs, des méthodes permettant de réduire les émissions polluantes des moteurs diesel. A cet égard, leur image auprès du public ne constitue pas leur seule motivation. On sent également une réelle préoccupation par rapport à la qualité de l'air au poste de travail et à la charge pour l'environnement que représentent les émissions polluantes.

Les expériences réalisées concernant l'équipement ultérieur des engins de chantier sont à mettre au rang des bonnes surprises. Bien qu'il s'agisse dans tous les cas de mesures au cas par cas, on a observé que les filtres ont pu être installés dans les délais prévus. Pour la plupart des filtres, le montage a nécessité moins d'un jour de travail, installation du système de surveillance et d'enregistrement des données comprise. La mise en place des systèmes automatiques de régénération par brûleur avec leurs groupes supplémentaires et du système de commande couplé avec le circuit électrique du véhicule requiert 2 à 3 jours. Cependant, l'habitude acquise suite au montage répété de ce type de système permet certainement d'en raccourcir considérablement la durée d'installation.

Les expériences se sont déroulées en parfait accord avec les utilisateurs, les fabricants et les experts de la Suva.

L'enregistrement des données s'est avéré particulièrement utile. Les mesures périodiques réalisées au moyen des nouveaux appareils de mesure utilisés dans le cadre de ces applications font déjà partie du domaine de la routine.

Dans un seul cas, l'ajout d'un additif au carburant se révèle satisfaisant. En effet, on utilise une citerne spéciale, dans laquelle est soigneusement effectué le mélange, alors que dans tous les autres cas de figure, la qualité dudit mélange repose entièrement sur la qualité du travail du mécanicien, ce qui ne peut être accepté hors d'un cadre purement expérimental. Une utilisation conforme des additifs pour carburant nécessite l'équipement du véhicule avec des installations automatiques d'adjonction d'additifs. Les trois producteurs d'additifs équiperont les véhicules de chantier de tels dispositifs pendant les essais.

Il est encore trop tôt pour évaluer la qualité des filtres. Dans la plupart des cas, les taux de filtration attendus ont été atteints et se sont, qui plus est, maintenus sur des périodes d'utilisation prolongées. A de rares exceptions près, les chutes de pression se révèlent trop élevées. Il est impératif de

modifier la conception, ce qui, aux dires des fabricants, est tout à fait possible. Tout en tenant compte de la sensibilité des moteurs diesel avec turbocompresseurs à suralimentation, l'installation d'un dispositif automatique de surveillance

de la contre-pression des gaz d'échappement apparaît comme absolument nécessaire. Les systèmes utilisés jusqu'à présent ont une tendance à s'encrasser et ne sont donc pas assez fiables.

## Bibliographie

- 1 Bulletin VERT no 1: Problèmes, objectifs, programme
- 2 Bulletin VERT no 2: Filtrés à particules
- 3 Bulletin VERT no 3: Mesures de ventilation contre traitement secondaire des gaz d'échappement
- 4 SAE 960472, Trapping Efficiency depending on Particulate Size
- 5 SAE 960138, Passive regeneration of Catalyst coated knitted Diesel Particulated Traps
- 6 Konzept und Ergebnisse des Partikelfiltergrossversuchs der Bundesrepublik Deutschland, UBA Berlin und TÜV Rheinland 12/94
- 7 Prospectus Suva sur le projet VERT, Baumaschinenmesse Berne, mars 1996

## Abréviations:

AUVA	Allg. Unfallversicherung/Autriche
BUCK	Buck Maschinenbau GmbH, D-Bondorf
CORNING	Corning Europe, D-Wiesbaden
DSI	Deutz Service International GmbH, D-Cologne-Deutz
ECS	Engine Control System Ltd., UK-Birkshire
EMD	Emissions des moteurs diesel
GFS	Gesellschaft für Strukturanalyse mbH, D-Aschen

HUG	Hug Engineering GmbH, CH-Weisslingen
LFEM	Laboratoire fédérale d'essai des matériaux et de recherches
LUBRIZOL	Lubrizol International Laboratories, UK-Derby
3M	3M Europe, D-Neuss
NGK	NGK Europe GmbH, D-Eschborn
OFEFP	Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage
PLUTO	Chemische Betrieb Pluto, D-Herne
RHÔNE-	
POULENC	Rhône-Poulenc, projet «Diesel propre», F-Courbevoie
SAE	Society of Automotive Engineers
SHW	Schwäbische Hüttenwerke GmbH, D-Wasseraffingen
Suva	Caisse nationale suisse d'assurances en cas d'accidents
TBG	Tiefbau-Berufsgenossenschaft (syndicat allemand des employés des travaux publics)
UNIKAT	Unikat AB, S-Malmö
VERT	Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau (réduction des émissions des machines réelles lors de la construction de tunnels)
VME	Valeur Moyenne d'Exposition

## Direction du projet:

Bureau d'ingénieur TTM, A. Mayer  
Fohrhölzistr. 14b, CH-5443 Niederrohrdorf  
Tél. CH-0041 (56) 496 64 14  
Fax 0041 (56) 496 64 15

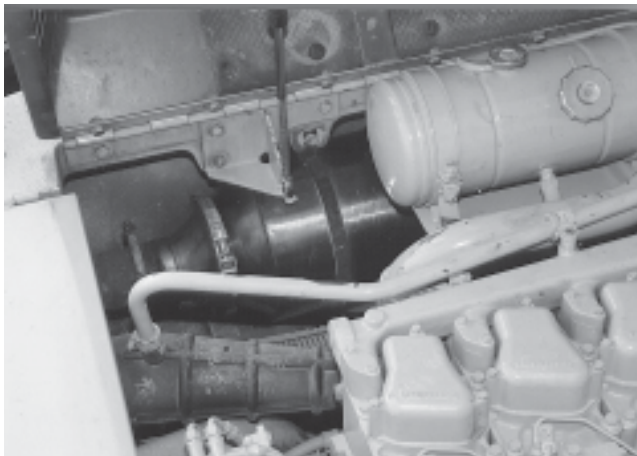
## Organismes à contacter:

AUVA: Monsieur Schuster A/0043(3842)24317  
TBG: Prof. D. Kieser D/0049(761)73135  
Suva: W. Scheidegger 0041(41)419 50 60

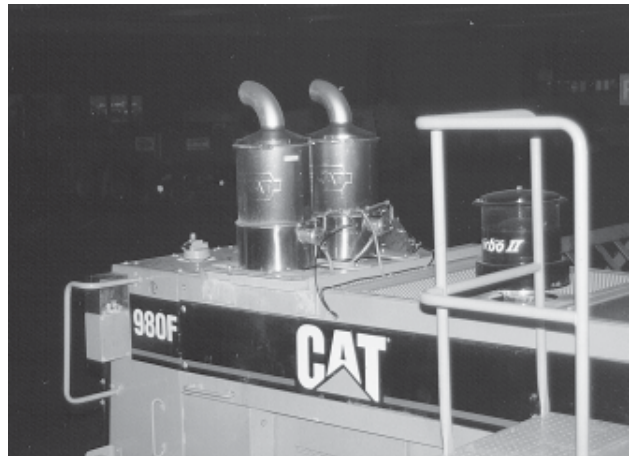
## Commandes de bulletins:

**AUVA:** Allgemeine Unfallversicherungsanstalt  
Division de la prévention des accidents et des maladies professionnelles, Adalbert-Stifterstr. 65, A-1200 Vienne (Madame Radosztics)  
Tél. 0222-33111-418, Fax. 0222-33111-347  
Référence: AUVA-Report 4/2  
**TBG:** Tiefbau-Berufsgenossenschaft, Am Knie 6 D-81241 Munich  
Tél. (089)8897-505, Fax. (089)8897-494  
**Suva:** Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents  
Service clientèle central, Case postale, 6002 Lucerne  
Tél. 041/419 58 51, Fax. 041/419 59 17

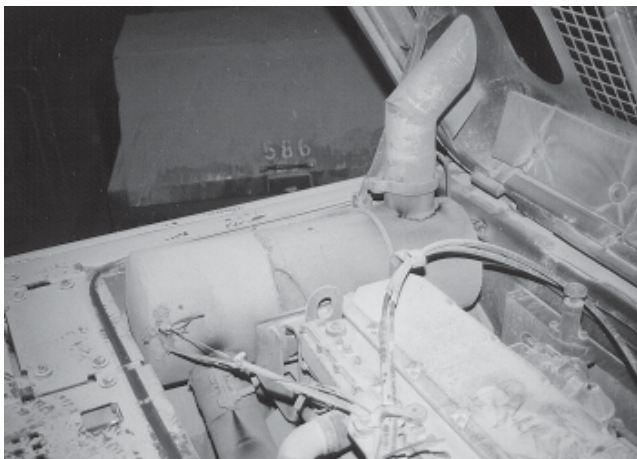
## Exemples de montage de filtres à particules lors des essais en conditions réelles de machines de chantier dans le cadre du projet VERT



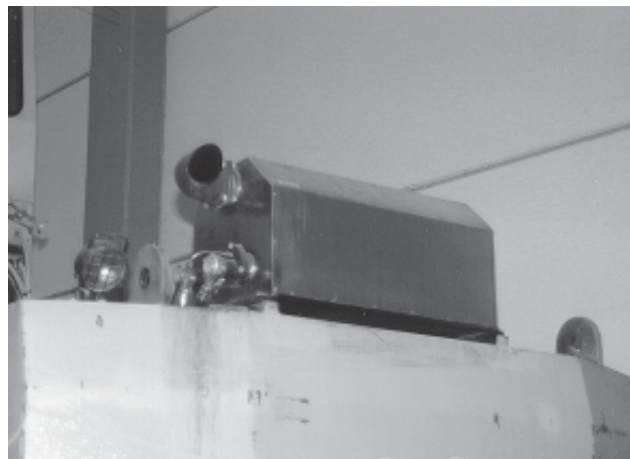
Filtre ECS monté sur un excavateur sur chenilles LIEBHERR 932, à la place du silencieux.



Filtre UNIKAT monté sur une chargeuse sur pneus CAT 980F.



Filtre BUCK monté sur un excavateur CAT 320L, à la place du silencieux.



Filtre UNIKAT en contrepoids d'une chargeuse sur pneus CAT 214B.



Filtre SHW monté sur un excavateur sur chenilles CAT 330, à la place du silencieux.



Filtre KHD/DSI monté sur un excavateur sur chenilles LIEBHERR 942. Lors des essais sur le terrain, on a toléré la limitation de la vue liée à l'installation de ce filtre. En utilisation normale, celui-ci devrait être installé sous le capot.



*Figure 1: Utilisation dans les conditions difficiles régnant dans une carrière d'une chargeuse sur pneus Caterpillar 966 F, équipée d'un filtre à suie DSI*