

Pollution par les moteurs diesel lors de la construction de tunnels

Bulletin 2: filtres à particules

1. Situation initiale et détermination des objectifs

Depuis 1988, des études toxicologiques menées à l'échelle mondiale [1] ont conduit à classer les particules issues de la combustion des moteurs diesel parmi les éléments "susceptibles d'être cancérogènes". Suite à cela ont été fixées au niveau national des valeurs limites d'immissions par rapport à la teneur totale en carbone du filtrat de particules (EMD). Par exemple, en Suisse, la concentration en EMD maximale autorisée sur le lieu de travail (pour une journée moyenne de travail d'une durée de 8 heures) est de 0,2 mg par mètre cube [2]. Les RTSD 554 (règles techniques relatives aux substances dangereuses, numéro 554) en vigueur en Allemagne rendant obligatoires des "mesures supplémentaires de protection des travailleurs" à partir d'un seuil de 0,1 mg/m³ [3].

Editorial

La concentration de particules de diesel sur le lieu de travail doit être ramenée à un taux inférieur à 0,2 g par mètre cube d'air. Avec les moteurs actuels l'utilisation d'un filtre à particules est la seule façon d'y parvenir. Dans le cadre du projet VERT, cinq filtres distincts ont été sélectionnés et testés sur deux moteurs de machines de chantier.

Tous les filtres ont atteint des rendements de filtration supérieurs à 90%, les pertes de pression restant d'un ordre acceptable et la taille de la plupart des filtres permettant un équipement ultérieur.

La fiabilité ainsi que l'adaptation des techniques utilisées pour le nettoyage périodique (régénération) seront contrôlées lors du travail sur le chantier. Cet aspect sera traité dans un des prochains numéros.

Même si l'expérience dont on dispose dans cette technologie n'est pas encore bien large, il nous semble toutefois avoir atteint un degré de technicité permettant de trouver une solution au problème des émissions polluantes lors de la construction de tunnels.

AUVA, CNA, TBG

VERT: Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau. On entend par machines réelles les moteurs réellement en service sur le terrain et non pas les développements futurs. Le premier numéro de juin 1995 du bulletin VERT traitait du fond et des objectifs du projet.



Figure 1: fine particule et agglomérats de suie de diesel déposés sur une fibre céramique de 10 μ de diamètre.

D'après l'inventaire suisse des émissions des machines de chantier [2], il faut s'attendre en moyenne à des émissions de particules d'environ 1,5 g/kWh en situation réelle. Si l'on se base sur une consommation en air d'un moteur diesel d'environ 6 m³/kWh ($\lambda = 2$), on obtient une charge en substances nocives d'approximativement 250 mg par mètre cube d'air de combustion.

Pour atteindre uniquement grâce à la méthode de dilution un niveau d'immission inférieur à 0,1 mg/m³ sur le lieu de travail, il faudrait un volume de ventilation au moins 2500 fois plus élevé que le volume d'air de combustion. Cependant en raison de l'imperfection du mélange il serait impossible d'obtenir une qualité de l'air équivalente sur tout le périmètre du lieu de travail. De même, la charge en substances dangereuses rejetée à l'extérieur par le biais des systèmes de ventilation resterait inchangée. En outre le coût de l'aération serait excessivement élevé.

Pour remédier à cette situation, il faut dépasser la logique actuelle de ventilation, l'important n'étant pas seulement de faire baisser la pollution moyenne en général (immissions), mais également l'émission polluante de chaque moteur diesel, c'est-à-dire l'émission à la source.

Les émissions de particules des moteurs actuels ne peuvent être réduites que par un traitement secondaire des gaz d'échappement, c'est-à-dire par filtration. Etant donné l'im-

portance de telles émissions. L'accent a donc été mis dans le cadre du projet VERT sur l'évaluation de mesures d'équipement. Dans les pages suivantes, il sera traité de la période intermédiaire faisant suite aux contrôles effectués sur le banc d'essai pour moteur. Les expériences sur le terrain consécutives seront examinées ultérieurement.

2. Propriétés des particules diesel

En cas de manque d'air et de préparation insuffisante du mélange, de minuscules particules apparaissent, surtout lors de la première phase de combustion des moteurs diesel. Elles ont une structure semblable à celle du graphite. Nombre de ces particules vont brûler. Celles qui restent se lient pendant la phase d'expansion à ce qu'on appelle des particules primaires de 10 à 20 nm (1 nm = 0,001 µm) et sortent ainsi du moteur. Durant le trajet jusqu'à l'extrémité du tuyau d'échappement se forment des agglomérats qui peuvent atteindre plus de 300 nm ce qui explique pourquoi la fumée d'échappement des diesel est visible.

La structure lâche et de grande surface des particules de suie est directement liée à leur processus de formation. Leur densité se situe entre 0,02 et 0,06 g/cm³ et leur surface spécifique oscille normalement entre 50 et 150 m²/g [4].

En règle générale, elles se répartissent en trois catégories; les particules moyennes (50 à 150 nm) sont les plus dangereuses du point de vue des effets toxiques qu'elles produisent dans les alvéoles pulmonaires. La figure 2 montre la répartition des particules dans le cas d'un moteur de machinier type.

Les de cette taille sont invisibles, mais pénètrent profondément dans les poumons où elles représentent un risque toxicologique en raison de leur composition et de leur surface spécifique importante.

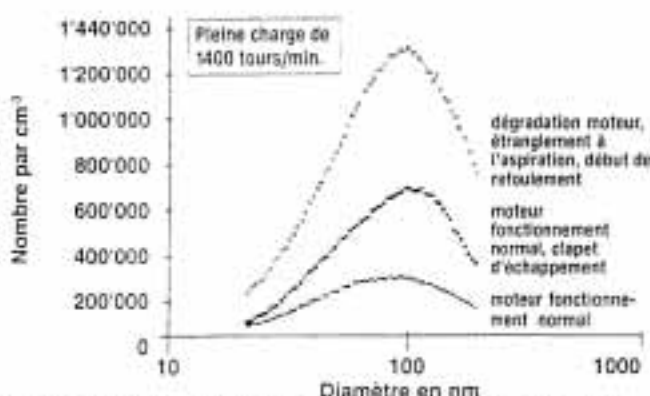


Figure 2: répartition par dimension des particules d'échappement d'un moteur diesel à injection directe (puissance nominale 100 kW) en cas d'excès d'air élevé, moyen et minime, ainsi que d'altération de la combustion par retard à retoulement.

En plus du carbone, les particules contiennent aussi des hydrocarbures fixés par adsorption, de l'acide sulfurique condensé, des constituants de cendre, issus par exemple de l'huile de moteur, et des résidus moteur. La structure reproduite à la figure 3 est caractéristique des moteurs de voitures particulières (mesures effectuées par Volkswagen AG) [5]. Elle peut varier; on remarque ainsi que de façon caractéristique la teneur en carbone est plus élevée et celle en hydrocarbures moins importante quand le moteur du véhicule utilitaire fonctionne à son niveau de charge le plus haut.

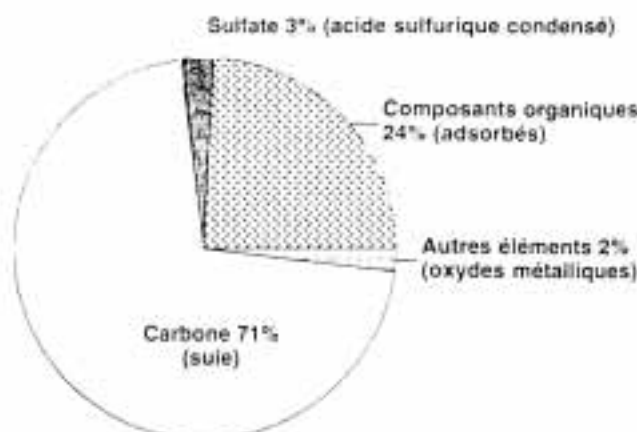


Figure 3: composition des particules diesel des moteurs de voitures particulières d'après des mesures effectuées par Volkswagen AG [5].

Bien que les particules diesel constituent principalement des substances combustibles, en règle générale un temps de séjour insuffisant et des températures trop basses ne peuvent pas entraîner de réaction ultérieure importante après sortie du moteur.

3. Méthodes de filtration

La filtration reste donc la seule possibilité d'éviter la dispersion dans la zone où se trouvent les travailleurs des particules diesel dangereuses pour la santé. En raison de la taille réduite des particules, de nombreux procédés de dépoussiérages sont inadaptés; comme la figure 4 le montre, les Cyclones, épurateur-laveurs, Venturi et autres électro-filtres sont quasiment totalement inefficaces face à ces fines fractions.

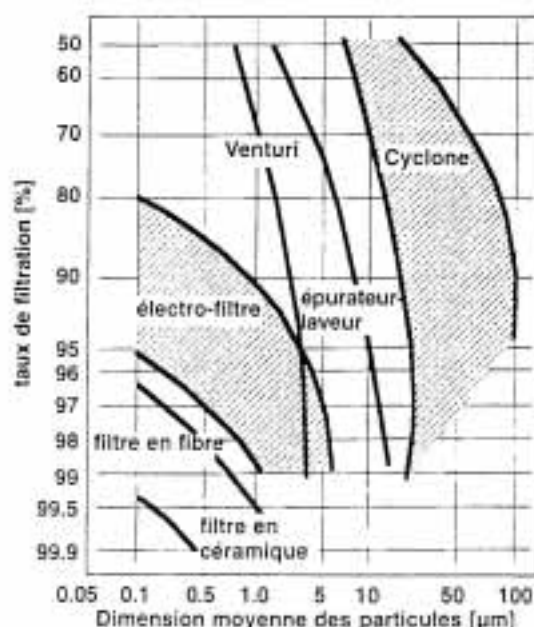


Figure 4: rendement de filtration pour les systèmes de filtres techniques en fonction de la dimension des particules (source: ZIEVERS, bulletin CERAMIC, numéro 1/1991).

On enregistre localement des températures pouvant dépasser les 1000°C au cours de la régénération du filtre, d'où l'utilisation de matériaux céramiques qui se présentent soit sous forme de structures monolithiques poreuses de surface importante soit de microfibres.

On distingue parmi les filtres à particules diesel utilisés actuellement deux groupes aux caractéristiques et utilisations différentes, à savoir les filtres de surface et les filtres de profondeur [6].

Les filtres de surface agissent par effets dits d'obstruction, ce qui signifie que la porosité du filtre doit être inférieure à la dimension des particules à filtrer. Si l'on se réfère à la taille des particules diesel, la porosité actuelle des parois des filtres céramiques ($10 - 30 \mu$) ne permet pas une filtration efficace. Il faut d'abord que se forme un gâteau de suie qui en épaississant accroîtra l'efficacité de filtrage des plus fines particules.

Le type le plus représentatif des filtres de surface, car communément utilisé est le filtre cellulaire céramique monolithique (figure 5) dont les cellules sont fermées de chaque côté et ont en général une section de 2×2 mm.

La surface de filtration est donc très importante, pour une teneur volumique d'un litre elle est d'environ 1 m^2 . Une surface de filtration importante est une condition sine qua non dans le cas de tels filtres: en effet la vitesse d'écoulement au travers des parois du filtre, eu égard à la contre-pression ne doit pas dépasser 3 à 5 cm/s. Le rendement de filtration d'un filtre à l'état neuf, non encrassé est tout d'abord réduit, la contre-pression étant elle-même relativement basse. Avec une accumulation de suie de plus en plus importante, le rendement de filtration croît rapidement et peut atteindre des valeurs très élevées. Les filtres de ce type peuvent emmagasiner de grandes quantités de suie; cependant cela peut conduire à une obstruction des cellules et à une forte augmentation de la contre-pression, situation qui doit être évitée en pratique.

Les filtres de profondeur ont en général une structure fibreuse. Dans le cas de filtres papier ou de filtres non tissés, ils peuvent atteindre un important rendement de filtration dans le cadre de la technique en salle blanche. Les filtres de profondeur peuvent servir pour la filtration de la suie en utilisant des fibres céramiques. Les pores de structures typiques de

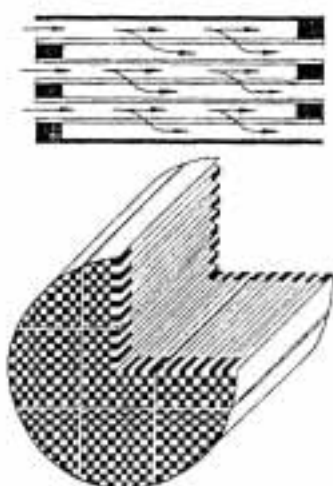


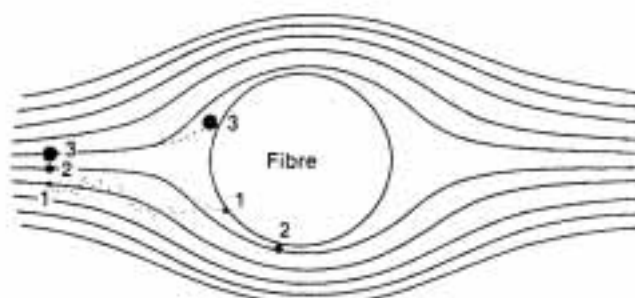
Figure 5: filtre cellulaire céramique monolithique, dit filtre „wall flow“ (source: CORNING)

filtres de profondeur sont si grands qu'il n'y a ni effet d'obstruction ni formation d'un bouchon de suie. Dans leur ensemble, les fibres représentent une grande surface (pour ce type, de 250 m^2 par litre de volume filtre) sur laquelle les particules infimes se déposent par effet d'inertie ou de diffu-

sion. On voit sur la figure 1 que des agglomérats se forment en outre sur ces fibres, ce qui augmente encore la surface du filtre.

Les filtres de profondeur présentent une grande porosité, généralement de 65% et plus. En conséquence, la vitesse d'écoulement est plus élevée que pour les filtres de surface, à savoir d'environ 20 à 60 cm/s.

Les filtres de profondeur ont un rendement de filtration au plus haut, ainsi qu'une contre-pression à son plus bas niveau quand ils ne sont absolument pas encrassés et donc propres. L'accumulation augmentant, le rendement de filtra-



1. Diffusion 2. Interception 3. Séparation par effet d'inertie

Figure 6: mécanismes de filtration sur une seule fibre (source: documents 3M).

tion diminue jusqu'à saturation. La contre-pression augmente par paliers dégressifs jusqu'à une valeur limite -le filtre n'est jamais complètement bouché.

Normalement lors de leur fabrication, les filtres sont construits en forme de bougies, des tuyaux de tôle perforée font office de support; pour les filtres dits enroulés le fil est enroulé de façon serrée autour du tube intérieur de tôle (cela augmente la surface), alors que pour les filtres dits tissés la cavité cylindrique est rendue plus lâche par un tricotage tubulaire plissé [7].

De nombreux filtres techniques sont en fait des hybrides. S'ils ont une dimension appropriée, les filtres de profondeur, tout comme les filtres de surface peuvent atteindre un rendement de filtration dépassant les 90%. Tandis que la qualité de la filtration ne dépend que très peu de la vitesse d'écoulement et de la taille du filtre, pour la contre-pression, plus la taille est petite, plus la contre-pression est élevée, parallèlement la capacité de retenue diminue.

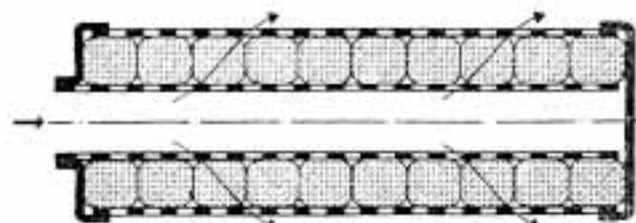


Figure 7: filtre bougie en fibres tissées

La perte de pression du filtre influe sur la consommation de combustible du moteur: à 100 mbar on peut escompter une détérioration de l'efficacité d'environ 2%, voire même plus dans le cas de moteurs turbos. La réaction à la contre-pres-

sion est de ce fait souvent déterminante s'agissant du dimensionnement du filtre.

Tous ces matériaux de filtres présentent l'avantage d'étouffer efficacement le bruit d'échappement.

4. Nettoyage périodique du filtre

En une heure un moteur 100 kW moyen produit plus de 50 g de suie, ce qui correspond en raison de la répartition peu serrée des agglomérats à un volume d'environ 1l. En conséquence, les filtres doivent soit avoir de grandes dimensions, soit être nettoyés fréquemment. Isolément on a essayé d'éliminer la suie en procédant de la même façon que pour les aspirateurs, mais cela ne fonctionne que dans le cas de gaz d'échappements à très basse température (<250°C) et de petites quantités de suie et à condition d'utiliser des filtres papier spéciaux, le risque d'inflammation demeurant toujours. D'autres méthodes, s'appuyant sur des techniques de dépoussiérage industrielles, consistent à éliminer le gâteau de suie par un procédé combiné de soufflerie et d'évacuation par éclusage des résidus [8].

La plupart des procédés de nettoyage actuellement sur le marché utilisent le fait que la suie est brûlée avec les résidus d'oxygène présents dans les gaz d'échappement, d'où l'appellation de „filtre à combustion de suie... Comme indiqué à la figure 8 la combustion totale de la suie exige une température supérieure à 600°C (en régime moyen d'une machine de chantier, cela ne se produit que rarement après détente des gaz par le turbocompresseur), ainsi qu'un pourcentage d'oxygène d'au moins 6 à 8%. Une telle auto-régénération ne se déclenche généralement que dans le cas de filtres très fortement encrassés. La combustion du gâteau de suie libère une quantité de chaleur supplémentaire qui peut faire augmenter la température dans la zone du filtre jusqu'à 500-700°C.

Cela peut donner lieu à des charges thermiques auxquelles le matériau céramique n'est pas adapté.

Les processus de régénération suivants permettent une régénération sûre, de ménager le filtre et de maintenir la contre-pression sous contrôle.

Processus actifs de régénération: des détecteurs de pression surveillent l'encrassement du filtre. Si l'on atteint une valeur limite, il y a déclenchement automatique d'un mécanisme d'augmentation de la température dans le filtre jusqu'à combustion de la suie de diverses façons.

Le réchauffement peut être produit par un brûleur couplé en série (brûleur diesel en circuit principal, voir figure 9) lequel réchauffe le courant de gaz d'échappement par utilisation d'huile diesel et apport supplémentaire d'air de combustion (soufflerie). Le processus est réglé de telle façon à permettre une combustion relativement lente de la suie et donc une évacuation régulière de la chaleur dégagée, ce qui permet d'éviter toute charge thermique du matériau.

Dans le cas où le filtre doit être régénéré à un moment quelconque de fonctionnement du moteur, le brûleur et le moteur doivent être de puissance équivalente. Une régulation minutieuse est la condition d'une régénération sûre.

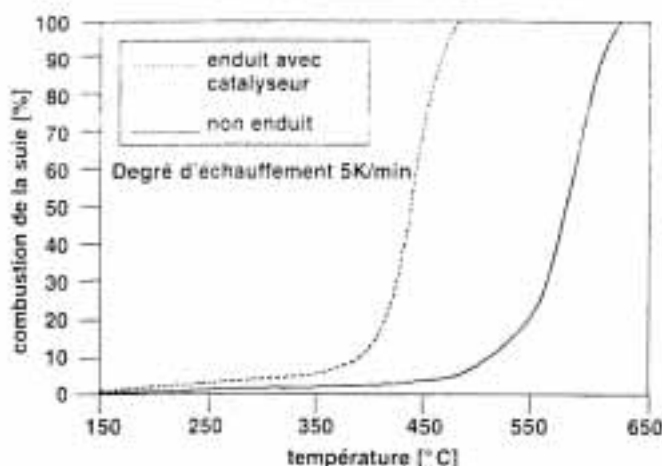


Figure 8: comportement de combustion de la suie dans le cas de structures microfibrilles non enduites ou enduites par catalyse (source: firme BUCK)

Le brûleur doit être de faible puissance quand on utilise un système de filtre jumeaux couplé en parallèle: en effet, ce ne sont pas alors des gaz d'échappement qui passent à travers le filtre à régénérer, mais uniquement des gaz du brûleur. La régénération se fait alors plus lentement, mais peut également être contrôlée plus facilement - la consommation totale du système étant cependant bien plus importante.

Le processus peut être grandement simplifié si l'on se contente de procéder à la régénération quand le véhicule est à l'arrêt car le moteur est arrêté ou tourne au ralenti. Le circuit électrique peut alors fournir l'énergie nécessaire au chauffage électrique. Un tel processus de régénération prend beaucoup plus de temps et ne peut être effectué que périodiquement entre des sessions de travail. Les filtres doivent être de très grandes dimensions de façon à pouvoir emmagasiner toute la suie pendant une durée de 8 à 16 heures sans qu'il y ait pour autant une contre-pression insupportable. Durant cette régénération périodique à l'arrêt, les autres systèmes maintiennent le chauffage par brûleur, ce qui diminue quelque peu la durée de régénération. Les filtres facilement remplaçables, tels qu'on les trouve pour les chariots élévateurs, ne sont pratiquement pas utilisables dans la construction de tunnels.

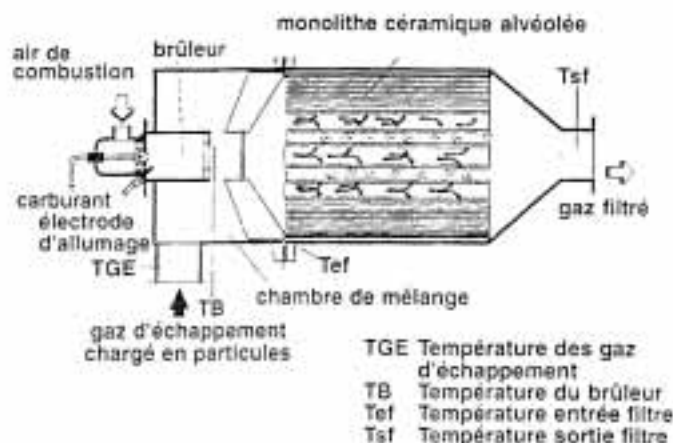


Figure 9: système de filtre à particule avec brûleur diesel en circuit principal (DSi GILLET)

Processus passifs de régénération:

Régénération additive: certains oxydes métalliques ont la propriété de réduire par action catalytique la température d'inflammation de la suie. On le sait depuis longtemps concernant le cuivre (ramonage des cheminées), mais c'est aussi vrai de l'oxyde ferreux et de l'oxyde de cérium. Les métaux, formant des complexes organiques sont mélangés au combustible en petites quantités (20-50 ppm). Ils se retrouvent ensuite en quantité infime dans la suie et peuvent déclencher, comme représenté figure 10 la combustion de la suie à basse température. A côté des régénérations aléatoires qui peuvent se produire à partir de températures de 200-300°C par l'inflammation provoquée par les hydrocarbures adsorbés, les équilibres de régénération se trouvent eux à partir de 400°C [9].

Une régénération ne peut se déclencher que s'il y a un chargement minimale, qui multiplie par 2 ou 4 la contre-pression par rapport à celle d'un filtre propre. Plus le char-

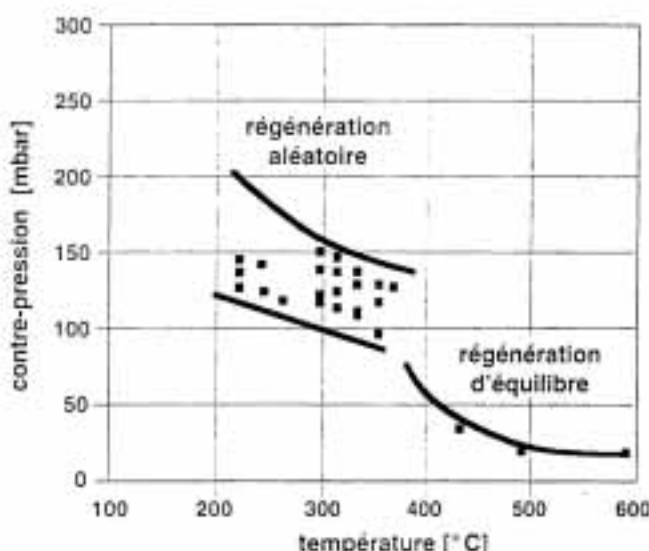


Figure 10: régénération par additifs dans le carburant (Rhône-Poulenc)

gement est limité, plus la température nécessaire de régénération est élevée. Les oxydes métalliques restent presque entièrement dans le filtre et comme ils ne peuvent pas brûler, cela conduit à une obstruction irréversible des pores par ces oxydes métalliques ajoutés aux résidus non combustibles des particules (cendres d'huile, déchets). Le filtre doit alors être changé ou bien nettoyé par lavage et soufflerie.

Revêtement catalytique: on peut réduire de manière très efficace la température d'inflammation de la suie par un revêtement bien dispersé du matériau du filtre. On utilise pour cela des substances très efficaces en catalyse comme l'oxyde de vanadium. La figure 8 décrit une diminution de la température de combustion de la suie jusqu'à 200°C. L'effet en est particulièrement ressenti par les structures fibreuses en raison de leur surface importante. D'autres métaux et oxydes métalliques peuvent être utilisés et cette méthode ne se limite évidemment pas aux filtres en fibre.

Les méthodes passives de régénération par additifs dans le combustible et enduction catalytique du matériau du filtre permettent de réduire considérablement la consumma-

tion du système, mais ne peuvent être utilisées que dans des cas limités, à savoir quand la température des gaz d'échappement atteint fréquemment des valeurs de 400°C sur de longues périodes, de nombreuses machines remplissant cette condition.

Pendant de courtes périodes d'opération, il est également possible de provoquer de telles pointes de températures simplement par étranglement du moteur, augmentation de la recirculation des gaz d'échappement ou modification du début de refoulement. Des procédés équivalents sont en cours d'élaboration, mais ils supposent un système de régulation électronique.

5. Sélection de systèmes de filtres à particules pour le programme d'évaluation VERT

Plus de 30 firmes*) proposent des systèmes de filtres à particules pour l'équipement des machines de chantier. Tester et comparer tous ces systèmes ne rentrait pas dans le cadre de cette enquête. En fait, sur le fond ces systèmes ne sont pas très différents les uns des autres, souvent les mêmes matériaux de filtres sont utilisés et combinés avec différents processus de régénération.

Une étude des principales matières de filtres et un essai des processus de régénération les plus courants sur ces différents filtres sont suffisants pour avoir une vue d'ensemble.

La sélection suivante a donc été effectuée:

Filtres:

- filtre cellulaire en céramique (NGK et CORNING)
- filtre métallique fritté à structure cellulaire (SHW)
- filtre bobiné en fibre (3M)
- filtre tissé en fibre (BUCK)

Processus de régénération:

- brûleur diesel (DSI)
- allumage électrique (HUSS, UNIKAT)
- additifs (PLUTO, RHÔNE-POULENC, LUBRIZOL)
- revêtement catalytique (BUCK)

Certains de ces filtres présentent en plus une enduction en métal précieux: elle ne sert pas à la combustion de la suie filtrée, mais à la réoxydation des substances nocives gazeuses comme le monoxyde de carbone et les hydrocarbures dont la quantité augmente au cours de la régénération (évaporation des hydrocarbures et combustion incomplète).

*) La liste peut être obtenue auprès de la direction du projet.

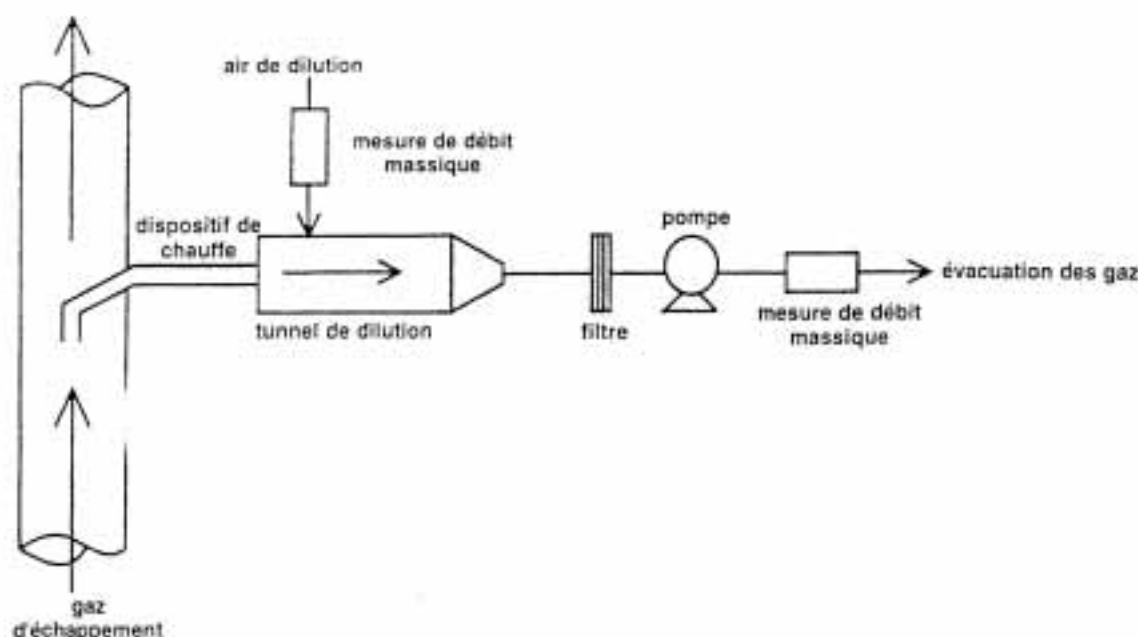


Figure 11: tunnel de dilution en courant de dérivation AVL

6. Méthodes de tests

Tous les tests ont été effectués sur le banc d'essai du poste de contrôle des gaz d'échappement de l'Ecole d'Ingénieurs de Bienne (Suisse) [10], dans des conditions stationnaires, mais aussi transitoires. On a choisi comme cas typiques transitoires pour des machines de chantier le passage en accélération libre du ralenti bas au régime maximal, ainsi que le passage en accélération avec convertisseur du ralenti bas au couple d'arrêt convertisseur.

Les procédés suivants ont été utilisés:

Gravimétrie avec technique du tunnel de dilution

Comme indiqué à la figure 11, un échantillon de gaz est prélevé par isocinétique conformément à la norme et amené à une température inférieure à 52°C avec l'air environnant dans un tunnel de dilution. Le gaz ainsi refroidi et dilué est conduit dans un filtre de mesure qui a été pesé avant et après le test. Selon la norme internationale en vigueur dans le domaine des véhicules, le poids total de ce filtrat est défini comme une «émission de particules».

Analyses de filtrat

Une analyse thermique en 2 étapes suivant le procédé de la coulométrie permet de déterminer la quantité totale de carbone du filtrat et donc de juger de la conformité de l'émission des moteurs diesel (EMD) par rapport à la définition de concentration maximale au poste de travail (définition VME). Une analyse chimique du filtrat sur la base du procédé d'extraction permet en outre de déterminer la proportion d'hydrocarbures et de sulfate. Il a été décidé de ne pas procéder à une analyse supplémentaire concernant l'origine des particules (carburant ou huile moteur).

Analyse de la répartition par taille des particules à différents régimes

La répartition par taille des particules d'un diamètre de 10 à 200 nm a été étudiée à différents régimes. A cet effet, on a utilisé un analyseur différentiel de mobilité de la firme TSI. Les particules y sont réparties en séquence temporelle

dans environ 30 classes de dimension et le nombre de particules de chaque classe est transmis à un compteur de noyau de condensation. En l'espace de vingt minutes, on peut ainsi mesurer des spectres de répartition par taille de 30 classes.

Emissions transitoires

Seule l'émission de fumées est observée par opacimétrie dans des conditions transitoires. Cela permet non seulement d'enregistrer l'allure de noircissement des gaz d'échappement, mais aussi l'intégration de la bouffée de fumée. Il n'est cependant pas possible d'établir de corrélation exacte de cette mesure en vue d'une analyse par gravimétrie.

Les mesurages stationnaires tout comme les mesurages transitoires ont été effectués de façon comparative, c'est-à-dire que l'émission du moteur a d'abord été mesurée selon les différents procédés, sans filtre, mais au niveau de contre-pression généré par l'utilisation d'un filtre, puis dans les mêmes conditions, mais cette fois avec filtre. Les critères d'évaluation suivants en ressortent:

Taux de filtration	$\frac{\text{MP sans filtre} - \text{MP avec filtre}}{\text{MP sans filtre}}$
Pénétration	$\frac{\text{NP avec filtre}}{\text{NP sans filtre}}$
Degré de conversion	$\frac{\text{CSN sans filtre} - \text{CSN avec filtre}}{\text{CSN sans filtre}}$

MP: masse particule
NP: nombre de particules
CSN: concentration substances nocives

7. Résultats

Sont répertoriés dans les tableaux suivants des extraits des résultats des mesurages effectués à un régime caractéristique, à savoir en pleine charge et couple maximal.

matière de filtre	filtre cellulaire en céramique	filtre tissé en fibre	filtre bobiné en fibre	filtre métallique trité
rendement de filtration par gravimétrie (%)	92.4	88.6	87.5	95.3
rendement de filtration des EMD (%)	99.0	90.8	93.4	99.0
pénétration (%)	7.7	9.8	9.5	14.4
pénétration des particules <30nm	10	8	10	50
degré de conversion des SOF (fractions organiques solubles)	66	55.4	72	79
perte de pression en mbar	12	61	41	56
volume de structure (l/kW)	1.25	0.3	0.67	0.26

Pour des raisons de disponibilité limitée, les filtres n'ont pas pu être optimisés: ils étaient donc de tailles différentes et ont présenté des niveaux de contre-pression très différents. Pour ce qui est du filtre cellulaire en céramique, la différence venait aussi du fait que ce système de filtre est conçu pour une régénération périodique par chauffage électrique, ainsi que pour une accumulation couvrant au moins une session de travail.

Concernant le rendement de filtration, on observe une uniformité grandissante: les analyses gravimétriques font ressortir dans tous les cas des pourcentages de presque 90%, concernant les EMD on dépasse les 90%, certains filtres atteignent même les 99% et dans le domaine de la pénétration, qui a trait à la déposition des fines particules, la plupart des filtres enregistrent de bonnes valeurs. Comme on pouvait s'y attendre, tous les filtres présentent également une diminution notable des hydrocarbures SOF fixés par adsorption (SOF: fractions organiques solubles).

Les hydrocarbures gazeux et le monoxyde de carbone ne voient leur quantité diminuer que par l'utilisation de filtres cellulaires en céramique, équipés en sus d'une enduction catalytique en métal précieux efficace. Ce genre de mesures techniques peut s'appliquer aux autres filtres.

Les oxydes d'azote ne subissent que des modifications infimes. En règle générale, leur présence diminue sous l'effet d'une contre-pression un peu plus élevée.

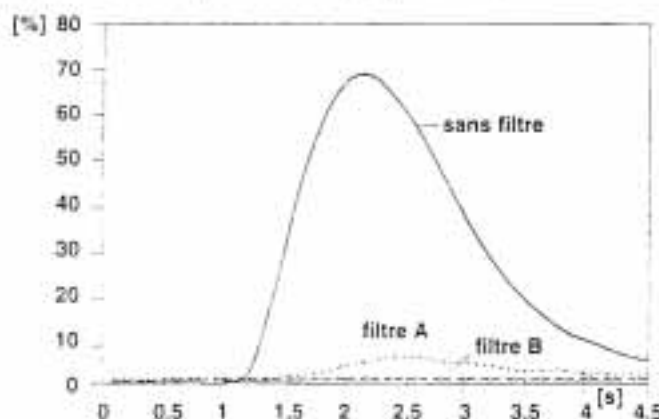


Figure 12: opacité à la sortie du filtre en comparaison avec l'opacité sans filtre, pendant l'accélération libre

Les mesurages effectués au cours de l'accélération libre et de l'accélération avec convertisseur montrent (figure 12) la qualité du filtre pour ce qui est de la séparation des particules. Ceci est d'autant plus significatif que la méthode de mesure du flot de fumée pendant les phases d'accélération -conformément à l'Ordonnance suisse pour la surveillance des véhicules diesel [12] - est particulièrement adaptée au contrôle de la qualité du filtre en conditions réelles de fonctionnement.

On peut ainsi apporter la preuve que les bons filtres retiennent les particules tout aussi efficacement en régime normal que dans des conditions de changements violents de vitesse et de charges.

La gravimétrie s'applique plutôt aux grosses particules. L'opacimétrie n'étudie que les particules pouvant être traversées par la lumière. Il faut avoir recours à l'analyse de mobilité dans le cas des fines particules < 300 nm pour obtenir des données relatives aux caractéristiques du filtre. Elle permet une analyse fiable de particules jusqu'à environ 20 nm de diamètre. La figure 13 en donne le résultat par représentation graphique de la pénétration en régime du couple maximal. Les caractéristiques de pénétration sont très différentes d'un filtre à l'autre. Un seul montre une capacité homogène, c'est-à-dire qu'on constate un rendement aussi important pour les fines particules que pour celles de taille plus élevée.

La plupart présente une dégradation du rendement de séparation pour les particules inférieures à 30-40 nm et même dans deux cas, ce phénomène se manifeste déjà pour des particules d'environ 70 nm. Il y a encore controverse au sujet de l'importance d'un point de vue toxique d'un tel fait. Cependant il nous semble important, au vu de cette découverte de privilégier des filtres retenant efficacement les particules les plus fines, dont le fort potentiel toxique a été établi.

L'étude du processus de régénération n'est pas encore à son terme. Elle sera poursuivie dans un prochain bulletin.

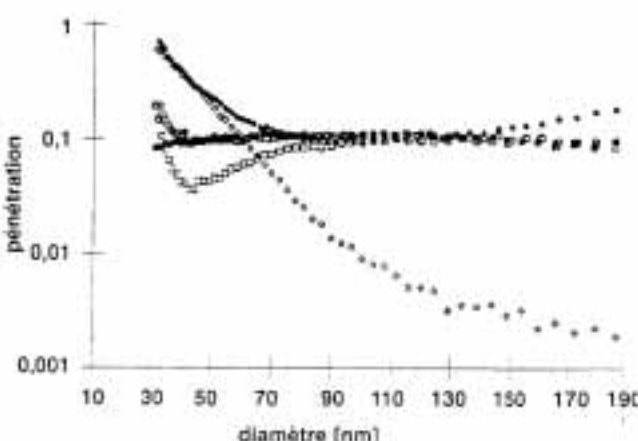


Figure 13: pénétration des particules dépendant du diamètre de mobilité dans le cas de 5 filtres à particules différents

8. Filtres à particules et expériences de terrain

Dans le cadre du programme d'évaluation VERT des expériences de terrain ont été entreprises dès le milieu de l'année 1995.

Des expériences de grandes envergures ont déjà été réalisées dans le cadre du programme d'essais à grande échelle mené en République Fédérale d'Allemagne dans le domai-

ne des filtres à particules. Ce programme s'étendait sur deux années et de nombreux fabricants de filtres et de véhicules y ont participé. Les applications concernent principalement les camions et les bus. Dans les rapports, intermédiaire et final [11], les résultats ont été jugés positifs.

Il est vrai que pour certains filtres, on a pu constater (voir figure 14) une légère dégradation du système au cours des 2 années de fonctionnement. Mais d'une manière générale, on a pu constater l'efficacité des systèmes de filtre et leur fiabilité satisfaisantes par rapport au caractère prototype de ces installations.

La plupart des fabricants ont tiré profit de ces expériences pour perfectionner leurs systèmes de filtre, si bien que sont disponibles aujourd'hui des systèmes fiables sur lesquels nous pouvons nous baser pour l'équipement ultérieur des machines de chantier utilisées dans les tunnels.

9. Situation d'un point de vue technique des filtres à particules

Sur la base des essais menés sur deux moteurs dans le cadre du projet VERT et des expériences réalisées par les

SZ Bosch

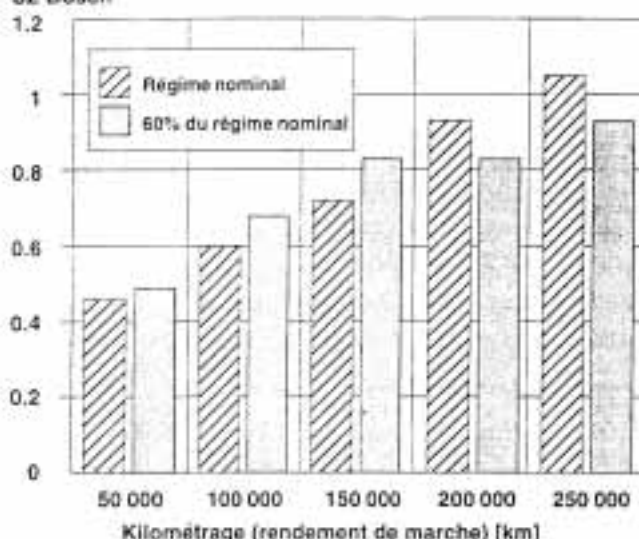


Figure 14: taux moyen de noircissement de tous les véhicules équipés de filtres bobinés en céramique (au cours des essais à grande échelle de l'UBA)

fabricants de filtres participant au projet, il est possible de définir précisément le degré de technicité des filtres actuels. Les caractéristiques en sont les suivantes:

- rendement de filtration par gravimétrie >85%
- rendement de filtration de la quantité totale de carbone >90%
- émission de carbone <0,05 g/kWh
- perte de pression du filtre non encrassé <50 mbar
- perte de pression à niveau d'encrassement maximal <150 mbar
- volumes d'ensemble <0,6 l/kW
- étouffement du bruit >25 dB(A)
- prix et coût de l'installation pour moins de 100 kW: <125 SFr./kW pour plus de 100 kW: <100 SFr./kW
- frais de maintenance/an <15% du coût du filtre
- durée de vie >6000 heures de fonctionnement

- durée d'utilisation >2000 heures de fonctionnement (nettoyage des éléments du filtre)
- intervalle entre les périodes de maintenance >500 heures de fonctionnement

Cette liste couvre les exigences essentielles à respecter dans le cadre de l'utilisation de machines de chantier dans la construction de tunnels. Elle peut servir de référence concernant les obligations à suivre dans la sélection et éventuellement l'adaptation des systèmes de filtres utilisés sur des machines de chantier dans des tunnels.

Bibliographie

1. Krebsrisiko von Diesel- und Benzinmotorabgasen, Schriftenreihe BUWAL/Schweiz Nr. 222
2. VERT-Bulletin 1, Juni 1995
3. TRGS 554: Dieselmotoremissionen (DME)
4. Charakterisierung der partikelförmigen Emissionen von Dieselmotoren, K.H. Zierock, Staubreinhaltung der Luft 43 (1983)
5. Dieselmotorabgas - Entstehung und Messung, H. Klingenberg, VDI-Berichte Nr. 888, 1991
6. Möglichkeiten der Schadstoff-Minimierung bei Dieselmotoren, K. Oblander, VDI-Berichte Nr. 888, 1991
7. Gestrickte Strukturen aus Endlofasern für die Abgasreinigung, A. Mayer et al., MTZ 56 (1995) 2
8. Diesel Exhaust Aftertreatment 1995, SP-1703, SAE, Detroit 1995
9. Verminderung der Abgasemission von Dieselmotoren, G. Lepperhoff, MTZ 55 (1994) 12
10. Particle Size Distribution Downstream Traps of Different Design, SAE 950373, H. Egli et al.
11. Konzept und Ergebnisse des Partikelfiltergrossversuchs der Bundesrepublik Deutschland, UBA Berlin und TÜV Rheinland, 12/1994
12. Verordnung über Wartung und Nachkontrolle von Motorwagen betreffend Abgas- und Rauchemissionen vom 2.9.1993

Abbreviations

- EMD Emissions des Moteurs Diesel (soit carbone totale des particules filtrées)
 CNA Caisse Nationale suisse d'Assurance en cas d'accidents
 AUVA Allg. Unfallversicherungsanstalt/Österreich
 TBG Tiefbau-Berufsgenossenschaft (syndicat allemand des employés des travaux publics)
 OFEFP Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage
 VME Valeur Moyenne d'Exposition
 RAF Russabbrand-Filter (Filtre combustion de suie)
 RTSD Règles Techniques relatives aux Substances Dangereuses
 SOF Soluble Organic Fraction (Fraction organique soluble)
 UBA Office fédéral allemand de l'environnement (Umwelt-Bundesamt Deutschland)

Direction du projet:

Bureau d'ingénieur TTM, A. Mayer, Fohrdtstr. 14b, CH-5443 Niederrhoden
 Tél. 0041(56)95 14 14, Fax 0041(56)95 14 15

Organismes à contacter:

AUVA: E. Bigga 0043(3842)23417
 TBG: Prof. D. Kieser 0049(761)73135
 CNA: 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 Radozics)
 Tél. 0222-33111-418, Fax. 0222-33111-347
 Référence: AUVA-Report 4/1
 TBG: Tiefbau-Berufsgenossenschaft, Am Knie 6
 D-81241 Munich, Tél. (089)8897-505, Fax. (089)8897-494
 CNA: Caisse nationale suisse d'assurances en cas d'accidents,
 Service clientèle, Case postale: 6002 Lucerne,
 Tél. 041-419 55 51, Fax. 041-419 59 17