

- Diesel
- Particule
- Engin
- Filtre

► Denis BÉMER, Isabelle SUBRA, INRS, département Ingénierie des procédés

► Jean-Pierre DEPAY et Florence LAUZIER, CRAMIF

DIESEL EMISSION - PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF PARTICLE FILTERS FOR OFF-ROAD MOBILE MACHINES

Diesel fume and exhaust gas exposure is considered the most frequent form of workplace exposure in France. These emissions are classed as probably carcinogenic to man (Group 2A) by the IARC (International Agency for Research into Cancer).

Diesel emission is the source of chemically complex pollution comprising gases and fine carbon particles, onto which complex organic compounds are adsorbed. At present, only the use of a particle filter ensures sufficient reduction in mobile machinery emissions. Multiple technologies have been developed to collect efficiently these particles at the surface of the filter medium and, above all, allow their elimination and thereby regenerate the filter pressure drop.

In association with INRS, CRAMIF [Ile de France regional health insurance fund] decided to test, on the construction site, filters fitted to mobile machines in order to confirm their initial performance characteristics and especially their conservation in time.

The study shows that certain filter technologies (CRT-type catalysed passive regeneration) do not appear to be suitable for off-road mobile machines. Only active regeneration filters with a complementary additive, which have been widely tested in some countries, would appear to be suitable at present insofar as they ensure significant reduction of soot microparticle emissions and guarantee performance characteristic conservation in time.

- Diesel
- Particule
- Filtre
- Mobile machine

EMISSION DIESEL PERFORMANCES DES FILTRES À PARTICULES POUR ENGIN NON ROUTIERS

L'exposition aux fumées et gaz d'échappement diesel est estimée comme la plus fréquente des expositions à un cancérigène sur le lieu de travail en France. Ces émissions sont classées comme cancérigènes probables pour l'homme (groupe 2A) par le CIRC (Centre international de recherche contre le cancer).

L'émission diesel forme une pollution chimiquement complexe comprenant des gaz et des particules fines carbonées sur lesquelles sont adsorbés des composés organiques de composition complexe. Actuellement, seul le recours à un filtre à particules permet de réduire suffisamment l'émission des engins. De nombreuses technologies ont été développées afin de collecter efficacement les particules à la surface du média et surtout, afin de permettre leur élimination et ainsi de régénérer la perte de charge du filtre.

La CRAMIF, associée à l'INRS, a décidé de tester sur site des filtres installés sur des engins de chantier afin de s'assurer de leurs performances initiales mais surtout de leur maintien au cours du temps.

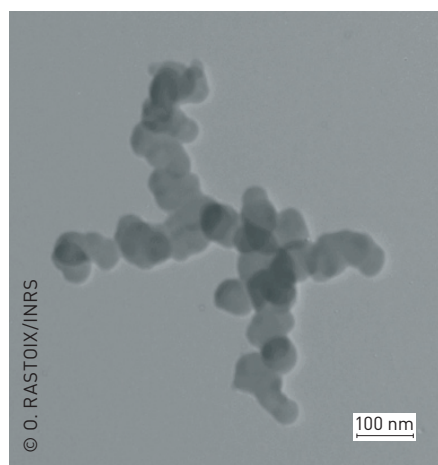
L'étude a montré que certaines technologies de filtres (régénération passive catalysée) ne semblent pas bien adaptées aux engins non routiers. Actuellement, seuls les filtres à régénération active avec ajout d'additif, largement éprouvés dans certains pays, semblent convenir, dans la mesure où ils permettent une réduction importante des émissions de microparticules de suie et garantissent un maintien des performances au cours du temps.

L'exposition aux fumées et gaz d'échappement diesel est estimée comme la plus fréquente des expositions à un cancérigène sur le lieu de travail en France (enquête SUMER 2003). Ces émissions sont classées comme cancérigènes probables pour l'homme (groupe 2A) par le CIRC et par l'Environmental Protection Agency des Etats-Unis (EPA). Elles sont reconnues pour être également responsables d'irritations transitoires, d'inflammations et d'altérations de la fon-

tion pulmonaire. Les polluants diesel exacerbent les allergies respiratoires et augmentent les risques cardiaques pour des personnes souffrant de maladies cardiovasculaires [1, 2]. Des salariés sont exposés à cette pollution, notamment lors de travaux en espaces confinés ou de travaux souterrains. Des résultats de mesure sont regroupés dans la recommandation CRAMIF n°17 concernant les travaux souterrains [3].

FIGURE 1A

Particule de suie en microscopie électronique



Hormis ces aspects relatifs à la santé des personnes, les microparticules de carbone émises par les moteurs diesel possèdent un très fort pouvoir absorbant du rayonnement infra-rouge et à ce titre, contribuent de manière importante au phénomène de réchauffement climatique [4].

Pour ces deux raisons de santé et d'environnement, la limitation des émissions diesel devient impérative.

Si des règles de prévention existent dans un certain nombre de situations de travail, l'émission des engins de BTP n'est actuellement pas maîtrisée. Certains pays ont rendu les filtres à particules obligatoires sur les engins de BTP, c'est notamment le cas de la Suisse et de la Hollande. Cette obligation est faite aux utilisateurs, c'est-à-dire aux entreprises effectuant les travaux.

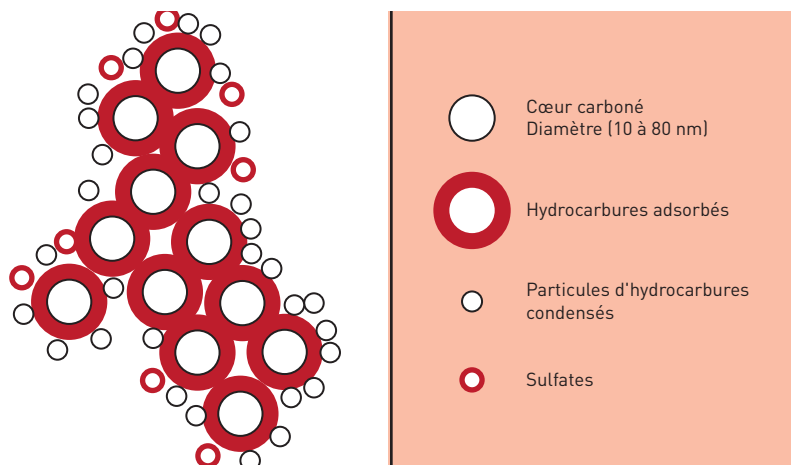
Cette solution s'avère également indispensable pour les villes se dotant des récentes Zones à faibles émissions polluantes (ou LEZ pour Low emission zones), consistant à mettre tous les moyens en œuvre afin d'améliorer la qualité de l'air sur une zone de territoire sélectionnée, on peut citer Amsterdam, Milan, Berlin... (60 LEZ dans toute l'Europe actuellement mais aucune en France) [5].

L'ÉMISSION DIESEL

L'émission diesel forme une pollution chimiquement complexe comprenant des gaz (CO, NO_x, oxydes de sou-

FIGURE 1B

Particule diesel formée par l'agglomération de noyaux nanométriques (10 à 80 nm)



fre, hydrocarbures imbrûlés C_xH_y) et des particules fines [5]. Les particules sont composées d'un noyau formé essentiellement de carbone élémentaire, de carbone organique provenant d'hydrocarbures imbrûlés, ainsi que de cendres provenant de la combustion de l'huile, de sulfates et de nitrates. Sur ce noyau sont adsorbés des composés organiques de composition très complexe (notamment des composés aromatiques polycycliques, des dioxines) [7]. Les particules sont formées par l'agglomération de ces noyaux carbonés primaires de 10 à 30 nm, pour composer un ensemble de particules de tailles comprises entre 10 et 300 nm en sortie d'échappement [8] (cf. Figure 1).

L'évaluation du risque occasionné par la pollution par les moteurs Diesel peut se faire en ne ciblant que les deux polluants principaux : les oxydes d'azote et les particules. En France, il n'existe pas de valeur limite pour les particules diesel et on doit se référer à la valeur guide, issue de la réglementation allemande, fixée à 300 µg.m⁻³ pour la fraction correspondant au carbone élémentaire pour les travaux souterrains et à 100 µg.m⁻³ pour autres travaux. Par contre, il existe une valeur limite d'exposition à court terme (VLCT) au NO₂ fixée à 3 ppm.

Le fioul rouge ou fuel oil domestique (FOD) est le carburant généralement utilisé pour les engins de chantier. Il est le moins coûteux car il bénéficie d'une TIPP spécifique réduite. Sa teneur en soufre est plafonnée à 1 000 ppm depuis début 2008, alors que celle du gazole routier (blanc) est limitée à 10 ppm depuis 2009. Si l'évolution du fioul rouge vers un fioul de traction,

se rapprochant des caractéristiques du gazole, apparaît probable dans un avenir proche, cela reste cependant au stade de projet au niveau des pouvoirs publics. La forte teneur en soufre du fioul rouge est problématique dans la mesure où celui-ci est susceptible de provoquer un mauvais fonctionnement de certains types de filtres et de dégrader les moteurs de nouvelle génération. Il est également à l'origine de la formation de dioxyde de soufre, présent sous forme gazeuse (SO₂) et particulaire (aérosol acide).

Malgré les nets progrès réalisés par les moteurs Diesel en ce qui concerne les émissions de particules fines, seul le recours à un filtre à particules (FAP) permet de réduire suffisamment les émissions pour répondre aux exigences réglementaires et de santé concernant les véhicules non routiers à l'échéance 2010 (cf. Tableau 1, extrait de [7]). En ce qui concerne les émissions de NO₂, les dispositifs actuels (réduction catalytique par l'ammoniac type SCR ou piège à NO_x [9]), ne sont pas encore opérationnels pour les engins non routiers et n'ont, de ce fait, pas été pris en compte dans le cadre de cette étude. Néanmoins, de nombreux efforts de recherche devront être effectués afin de pouvoir intégrer ces dispositifs aux engins et de satisfaire ainsi aux contraintes d'émissions NO_x de l'étape IV (cf. Tableau 1) à partir de 2013.

En ce qui concerne les particules, notons que les limites fixées par l'étape III B (cf. Tableau 1) ne pourront être atteintes qu'en recourant aux FAP et à des carburants à faible teneur en soufre, inférieure à 300 ppm, voire inférieure à 50 ppm (actuellement < 1 000 ppm).

Les valeurs d'émission en particules indiquées au niveau de l'étape IV, exprimées en masse (g/kWh) seront certainement appelées à évoluer. En effet, une nouvelle directive de l'ordonnance suisse sur la qualité de l'air, modifie les limites d'émission des particules des engins de chantier en proposant une limite exprimée en nombre de particules plutôt qu'en masse. La limite proposée est fixée à 10^{12} particules solides carbonées de diamètre > 23 nm par kWh. La référence au nombre de particules plutôt qu'à la masse est liée à la toxicologie particulière des nanoparticules [1].

Pour atteindre ces niveaux de performances, les FAP sont par conséquent les seules solutions actuellement envisageables. De nombreuses technologies ont été développées pour, dans un premier temps, collecter efficacement les particules à la surface du média et, dans un deuxième temps, éliminer les particules de suies afin de régénérer le filtre [10]. Les particules s'accumulant sur le filtre contribuent à augmenter sa résistance à l'écoulement des gaz générant une contre-pression néfaste au bon fonctionnement du moteur. En revanche, l'accumulation de particules au sein du média filtrant a un effet bénéfique en améliorant l'efficacité de filtration. La concentration en particules de carbone à l'aval du filtre est, de ce fait, plus importante après régénération (élimination du gâteau de particules) qu'en fin de cycle (accumulation).

LES FILTRES À PARTICULES

Le terme filtre à particules décrit imparfaitement la complexité du fonctionnement de ces systèmes qui sont le siège de réactions chimiques complexes.

Différents types de médias ont été développés afin de collecter les particules de suie : céramique (cordiérite, carbure de silicium SiC), métal fritté... Les médias en SiC sont à l'heure actuelle les plus performants en termes d'efficacité de filtration et de conductivité thermique. Trois systèmes de filtres applicables aux engins non routiers ont principalement été développés :

■ les filtres à régénération continue de type CRT® (continuous rege-

TABLEAU I

Réglementation des émissions de moteurs Diesel – Engins non routiers Directive 2004/26/CE

Puissance moteur (kW)	Date d'application	CO (g/kWh)	NO _x + C _x H _y (g/kWh)	C _x H _y (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	Particules (g/kWh)
Etape III A						
130-560	31.12.2005	3,5	4,0	/	/	0,2
75-130	31.12.2006	5,0	4,0	/	/	0,3
37-75	31.12.2007	5,0	4,7	/	/	0,4
19-37	31.12.2006	5,5	7,5	/	/	0,6
Etape III B						
130-560	31.12.2010	3,5	/	0,19	2,0	0,02
75-130	31.12.2011	5,0	/	0,19	3,3	0,02
56-75	31.12.2011	5,0	/	0,19	3,3	0,02
36-56	31.12.2012	5,0	4,7	/	/	0,025
Etape IV						
130-560	31.12.2013	3,5	/	0,19	0,4	0,025
56-130	31.09.2014	5,0	/	0,19	0,4	0,025

TABLEAU II

Conditions d'utilisations des FAP

Type	Condition d'utilisation, performance, effets indésirables
CRT (catalyseur)	Carburant à basse teneur en S (< 20 ppm). Température des gaz comprise entre 250 et 450 °C au moins 50 % du temps pour la régénération. Enrichissement de la teneur en NO ₂ . Génération de nanoparticules acides. Diminution CO, HC.
Additif ajouté au carburant	Emission de nanoparticules d'oxyde métallique 20 nm possible Température gaz > 340 °C, 10 min/j.
Filtre à régénération active + additif dans carburant	Indépendant de la température des gaz. Emission de nanoparticules d'oxyde métallique à la limite du mesurable si le filtre est performant. Pas d'action sur les gaz.

nerating trap) développés par Johnson Matthey. Ce système utilise un catalyseur d'oxydation du NO en NO₂ (Platine Pt) en amont du filtre, qui du fait de son grand pouvoir oxydant, va contribuer à éliminer les suies piégées sur le filtre aval, (transformées en CO₂). Selon le même principe, une partie du CO et des hydrocarbures est également transformée en CO₂. Mais cette technologie présente l'inconvénient majeur d'enrichir l'émission en NO₂ [11] ;

■ les filtres à régénération continue utilisant un additif qui est ajouté au carburant (souvent du fer, mais également du cérium). Il agit comme un catalyseur de l'oxydation du carbone, l'oxyde de fer agissant comme un pourvoyeur d'oxygène au niveau des particules de carbone, facilitant ainsi son oxydation.

Ces systèmes sont dits à régénération passive car l'élimination des suies est effectuée de manière continue, « chimiquement », sans recourir à un procédé annexe ;

■ le troisième système est à régénération active, car la combustion des suies collectées est amorcée au moyen d'une résistance électrique, d'un brûleur ou d'une bougie de chauffe. Ces systèmes utilisent, la plupart du temps, un additif ajouté au carburant, qui modifie la structure et la réactivité des suies, abaissant leur température de combustion et permettant une régénération rapide, complète et homogène du filtre à particules.

Les conditions d'utilisations de ces FAP sont très différentes et sont résumées dans le *Tableau II*.

Le système le plus performant et le plus adapté aux engins non routiers est certainement le FAP à régénération active (par voie électrique notamment) avec ajout d'additif. Il permet une combustion complète et rapide des suies, gérée automatiquement et indépendamment du régime moteur. Mais ce système est également plus coûteux et plus complexe à monter en « rétrofit » que les filtres passifs.

Une importante opération, menée au Canada et Etats-Unis [12], a montré que les filtres dont la régénération était pilotée automatiquement, étaient bien mieux acceptés par les utilisateurs que les filtres dont la régénération doit être déclenchée manuellement, par branchement du système de régénération sur le secteur (en fin de journée, par exemple).

La liste VERT¹ établie par la SUVA suisse (Caisse nationale d'assurance pour les accidents et maladies professionnelles), puis la liste OFEV publiée par l'Office fédéral de l'environnement fournissent les références des filtres répondant au cahier des charges VERT [13]. Seuls ces filtres devraient être susceptibles d'être installés sur les engins. La procédure de test VERT stipule notamment :

- que le système retienne au moins 97 % des particules solides d'un diamètre compris entre 20 et 300 nm à l'état neuf et après un fonctionnement de 1 000 heures lors d'une utilisation caractéristique ;

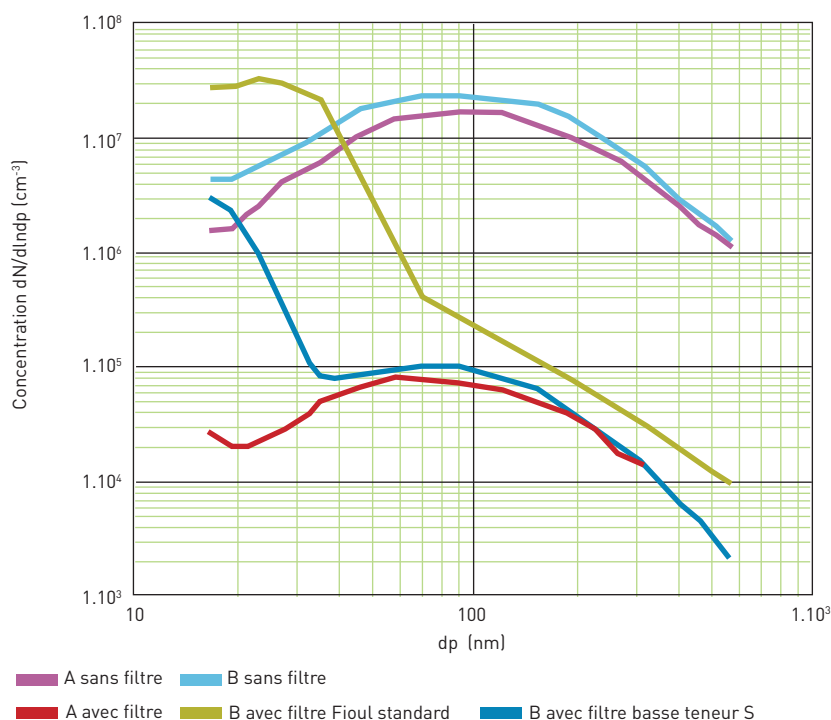
- que le système n'augmente pas les émissions de CO, HC, NO_x ;

- que le FAP ne soit pas responsable d'émissions secondaires de particules ou de gaz.

Ce dernier point est intéressant et fait actuellement l'objet de nombreuses discussions, parfois polémiques, entre spécialistes. En effet, les filtres à régénération catalysée sont susceptibles de favoriser la formation de nanoparticules acides (dimensions < 50 nm) par oxydation du SO₂ en SO₃ aux températures élevées (> 460 °C) qui se transforme ensuite en microgouttelettes d'acide sulfurique (H₂SO₄) lors du refroidissement des gaz par adsorption de vapeur d'eau [14, 15]. La température dans le filtre et la teneur en S du carburant, ainsi que de l'huile moteur, sont par conséquent des paramètres essentiels. La Figure 2 montre l'augmentation de la fraction < 50 nm dans le cas du filtre à haute

FIGURE 2

Distribution en nombre de la taille des particules à l'émission d'un moteur Diesel avec et sans FAP à deux régimes moteurs, A : température des gaz 420 °C, B : température 500 °C



Extrait de Matter U., Siegmann H.C., et al. « Distinction of volatile and nonvolatile particles in exhaust of diesel engines with particulate traps », J. Aerosol Sci., 30 (Suppl.1), p. S474-S472 (1999).
Le mode < 50 nm correspond aux nanoparticules formées par condensation des composés gazeux volatils et semi-volatils (essentiellement acides sulfurique et nitrique), le mode > 50 nm est formé par les particules de carbone agglomérées.

température et forte teneur en S. Dans ces conditions, la distribution de l'aérosol est de nature bimodale avec un mode < 50 nm correspondant aux nanoparticules d'acide sulfurique formées par nucléation homogène, et un deuxième mode (50 – 300 nm) correspondant aux particules de carbone.

Gautam [16] a montré que la suppression des particules de carbone par le filtre pouvait avoir un effet pervers, en éliminant les sites de capture des sulfates, nitrates et autres composés volatils en cours de condensation. Des particules nanométriques (< 50 nm) sont alors formées par condensation de ces composés volatils par un phénomène de nucléation homogène, qui ne se trouvent plus adsorbées par les particules de suie. Si ce phénomène est actif pour tous les types de filtres, il se trouve fortement accentué pour les filtres avec catalyseur [17]. Mais les nanoparticules acides ainsi formées ont une durée de vie courte dans l'atmosphère du fait de leur évaporation rapide [18]. Cette pollution, dont les effets sur la santé ne sont pas bien connus, ne

concerne donc que les zones situées à proximité immédiate des émissions.

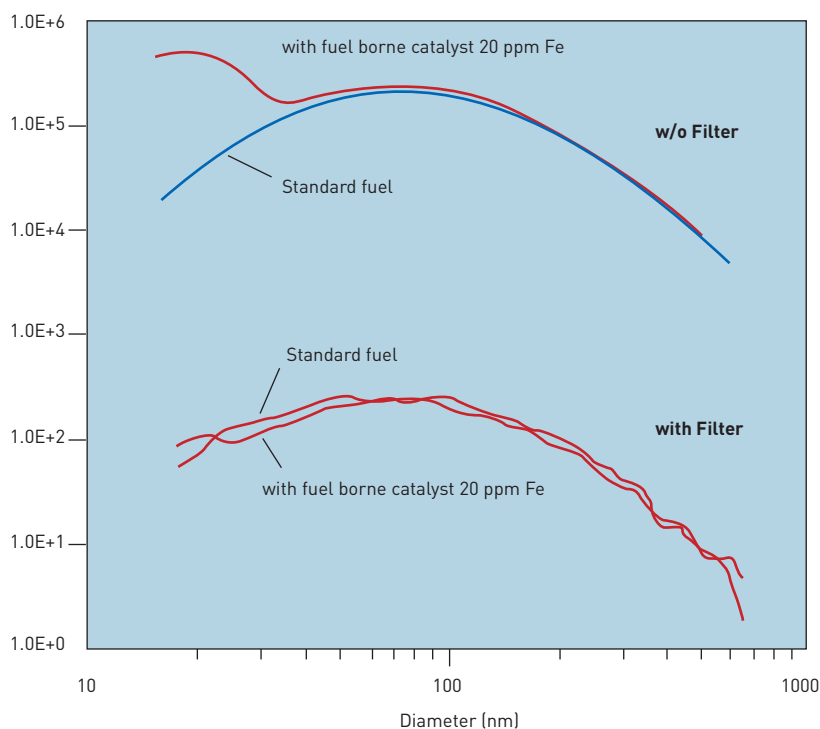
De même, les additifs ajoutés au carburant sont susceptibles de générer des nanoparticules d'oxydes métalliques. La distribution des particules en aval du FAP avec additif est encore une fois bimodale avec un pic centré à 20 nm correspondant à ces nanoparticules d'oxyde [19] (cf. Figure 3). Néanmoins, l'émission de ce mode de nanoparticules d'oxyde peut être fortement atténuée, à la limite du mesurable, par la présence d'un FAP efficace qui retiendrait les particules d'oxyde aussi efficacement que les particules de carbone.

Enfin, une attention particulière doit être portée aux filtres fonctionnant avec un additif à base de cuivre dans la mesure où ils sont susceptibles de former des dioxines [20]. Ils sont heureusement peu utilisés.

¹ Verminderung der Emissionen von Realmaschinen in Tunnelbau

FIGURE 3

Distribution en nombre de la taille des particules à l'émission d'un moteur Diesel fonctionnant avec ou sans additif, avec ou sans FAP



Extrait de A. Mayer et al. Quality standards and test procedures for particle filters, Measuring and Controlling, vol. 70, p. 52-58 (2009).

Pour résumer, les FAP permettent de réduire très fortement la teneur des fumées d'échappement en particules carbonées qui constitue la source principale de la pollution diesel, mais ne protègent pas des autres polluants notamment gazeux et des aérosols secondaires.

LA DÉMARCHÉ ENTREPRISE

La CRAMIF, associée à l'INRS, a décidé de tester sur site des FAP installés sur des engins de chantier afin de s'assurer de leurs performances initiales et de leur maintien au cours du temps. L'expérience suisse, où 14 000 engins non routiers sont équipés de FAP (200 000 dans le monde) [13], montre que cette solution est tout à fait pertinente et seule capable d'éliminer efficacement ces particules toxiques.

Le groupe de travail a procédé à un tour d'horizon des fournisseurs et des systèmes de FAP proposés pour les engins de chantier. Des réunions ont été organisées avec des fabricants d'engins afin de les

informer des risques liés aux émissions diesel [21] et de la démarche entreprise.

Les essais, initiés fin 2006, ont été très difficiles à mettre en œuvre pour diverses raisons :

- absence réelle de contraintes en France (avant 2011) malgré les risques avérés des particules diesel sur la santé ;

- pas de demande émanant des constructeurs d'engins ou des entrepreneurs qui utilisent des engins de chantier ;

- coût élevé des FAP en regard du prix d'un engin TP. Ce point a fait également polémique en Suisse mais la motion déposée pour suspendre sur les chantiers à ciel ouvert la directive Protection de l'air sur les chantiers a été rejetée par le Conseil fédéral en Octobre 2004, en arguant notamment que le coût de la dépollution de l'air était négligeable par rapport au coût global du chantier et surtout des coûts relatifs à la santé des personnes ;

- doutes sur la fiabilité des rares dispositifs proposés en France ;

- difficultés réelles d'implantation des FAP en « rétrofit », c'est-à-dire sur machines anciennes ;

■ choix difficile compte tenu des nombreux dispositifs proposés sur le marché.

Néanmoins, des essais ont pu être effectués sur des FAP de technologie de type CRT® sur différents sites. Une étude plus complète des performances d'un FAP à régénération active par voie électrique a été également entreprise en partenariat avec un fabricant de filtres, un fabricant d'engins et une entreprise de travaux publics.

Les tests complets du système ont été confiés au Laboratoire de contrôle des émissions moteurs de l'Université des sciences appliquées de Biel (Suisse) en charge des essais de certification VERT. Le suivi dans le temps était assuré par le laboratoire de l'INRS avec l'appui de la CRAMIF.

RÉSULTATS

ESSAIS SUR FILTRE CRT®

Ce type de filtre est apparu intéressant à évaluer compte tenu de la relative simplicité de son installation, de son moindre coût comparativement à celui d'un filtre à régénération active et du fait qu'il n'impose pas le recours à une électronique de gestion de la régénération des suies.

Ce filtre CRT®, non référencé sur la liste VERT 2007, a été testé sur différents sites à de multiples reprises. Il nécessite l'utilisation de carburant à teneur en soufre inférieure à 20 ppm, ce qui n'était pas le cas lors des essais, les engins utilisant du fioul rouge FOD. En effet, le soufre empêche la production catalysée du NO₂ (compétition entre l'oxydation du NO et du SO₂) et, de ce fait, conduit à une mauvaise régénération des suies qui s'accumulent progressivement au sein du média. Aucun additif n'est ajouté au carburant.

Efficacité initiale

L'efficacité du FAP neuf a été déterminée par mesure de l'émission en particules de carbone élémentaire sans et avec FAP, en veillant à se placer exactement au même régime moteur lors des prélèvements. Le FAP était installé sur une pelle moderne Ammann-Yanmar midi Vio 75.

La concentration en particules de suie a été déterminée par prélèvements sur filtre (fibres de quartz, Whatman QMA, diamètre 37 mm). La méthode d'analyse est la transformation du carbone en CO_2 dans un four et mesure de la concentration en CO_2 par coulométrie [22].

L'efficacité initiale est élevée égale 98,75 % (régime moteur ralenti) et 99,52 % (régime moteur maximum sans charge). Les concentrations massiques en carbone élémentaire à l'émission avec FAP sont inférieures à $30 \mu\text{g.m}^{-3}$.

Des essais similaires ont été effectués sur le même type de filtre installé sur une chargeuse, utilisant également du fioul rouge. L'efficacité, toujours établie pour la fraction du carbone élémentaire, mesurée environ 2 semaines après installation du FAP, est élevée, égale à 99,76 %. La concentration en aval du FAP était de $70 \mu\text{g.m}^{-3}$.

Performances au cours du temps

La concentration en carbone élémentaire à l'émission de la pelle Ammann-Yanmar midi Vio 75 équipée du FAP, a été mesurée 3 mois après son installation. La concentration était cette fois supérieure à $830 \mu\text{g.m}^{-3}$, signe d'une possible dégradation du filtre. Les profils de température des gaz d'échappement montraient de longues phases de ralenti au cours desquelles la température était inférieure à la température nécessaire à la combustion des suies comprise entre 250°C et 300°C .

En janvier 2007, soit quatre mois après le montage du filtre, un départ de feu s'est déclaré sur le compartiment moteur, dont la cause est certainement la trop grande contre-pression exercée par le filtre colmaté du fait d'une régénération insuffisante.

Des incidents similaires ont été relevés avec ce même type de filtre, testé en juillet 2008, et installé sur des chargeuses d'un centre de traitement des déchets ménagers et évalué en juillet 2008. Les mesures effectuées ont révélé des concentrations particulièrement élevées en sortie de filtre comprises entre $1\ 100$ et $4\ 580 \mu\text{g.m}^{-3}$. Des flammes en sortie d'échappement ont été signalées par les exploitants.

Bien que présentant des performances initiales élevées, ce type de FAP ne semble pas convenir aux engins non routiers qui, à la différence des bus ou camions, ne présentent généralement

FIGURE 4A

Vue de la machine



FIGURE 4B

Vue du FAP installé à la place du silencieux



FIGURE 4C

Vue des prélèvements à l'échappement (effectués par le laboratoire de contrôle des émissions de l'Université de Bienne, Suisse)



pas des profils des températures de gaz compatibles avec une bonne régénération des suies. Néanmoins, une étude canadienne [12] a montré que cette technologie pouvait être appliquée avec succès à condition de s'être assuré au préalable que le profil de température des gaz d'échappement permettait une régénération effective du filtre. De plus, la mise en œuvre de mesures complémentaires, comme l'installation d'un dispositif de suivi de la contre-pression avec une alarme et une réduction de la puissance moteur en cas d'anomalie ainsi qu'une

formation du conducteur, pourrait éventuellement rendre l'utilisation de ce type de filtre acceptable. Néanmoins, les spécialistes de la filtration des gaz d'échappement diesel s'accordent à dire que cette technologie n'est pas bien adaptée aux engins TP. Enfin, l'utilisation d'un carburant à forte teneur en soufre apparaît totalement incompatible avec un bon fonctionnement de ce type de filtre. Or, actuellement, en France, le FOD utilisé pour les engins TP contient entre 450 et 750 ppm de soufre (6 échantillons analysés au cours de cette étude).

ESSAIS SUR FILTRE À RÉGÉNÉRATION ACTIVE PAR VOIE ÉLECTRIQUE

Les essais ont été effectués avec un filtre en métal fritté, Mann+Hummel SMF-AR 1.8 monté sur une pelle Yanmar Vio 45 neuve, en mars 2008 (cf. Figure 4). La combustion des suies est contrôlée par une résistance électrique et l'adjonction d'un additif au carburant (ferrocène). Ce FAP est référencé sur la liste VERT. L'engin fonctionne avec un carburant type fioul rouge ayant une teneur en soufre de 610 ppm.

Performances initiales

Un bilan complet des performances du filtre a été effectué en confiant les mesures au laboratoire suisse en charge des essais VERT. Les résultats détaillés sont donnés en @nnexe.

Le filtre permet une réduction très importante de l'émission des particules de 20 à 300 nm avec une efficacité supérieure à 99,98 % (cf. @nnexe, Figures A1 et A3). Le mode < 20 nm correspondant aux nanoparticules d'oxyde de fer générées par l'additif est bien observé, mais cette fraction est également efficacement retenue par le filtre.

Lors de la phase de régénération des suies, on observe une augmentation momentanée (de 5 à 10 min) de la concentration en particules de carbone en sortie d'échappement du fait des phénomènes thermiques au sein du filtre. La concentration mesurée après régénération, est également supérieure à la concentration avant régénération, du fait de la disparition du « gâteau » de particules formé à la surface du média et contribuant efficacement à l'arrêt des particules.

En ce qui concerne les gaz, le FAP entraîne une diminution sensible de l'émission NO_x lors des essais effectués en charge. Aucune influence sur les hydrocarbures imbrûlés n'a été observée. Une augmentation de la concentration de CO est observée lors des essais en pleine charge : 170 ppm avant FAP pour 270 ppm à l'aval.

Performances au cours du temps

La machine équipée du FAP est suivie périodiquement afin de contrôler les performances du filtre (cf. Figure 5). Les prélèvements et mesures ont été effectués par le laboratoire de l'INRS avec l'appui de la CRAMIF.

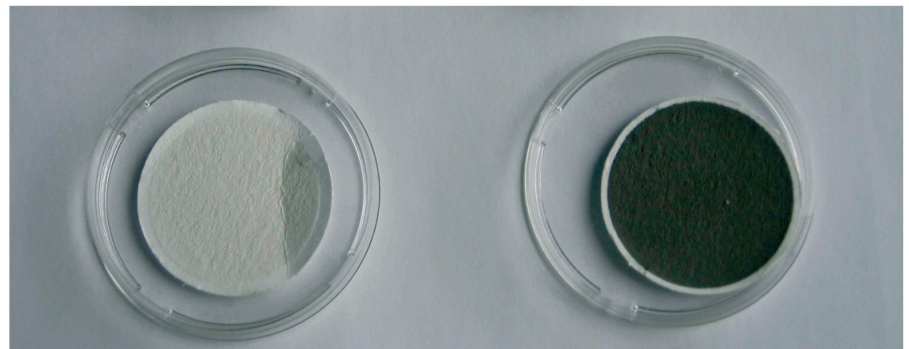
FIGURE 5A

Prélèvements réalisés à l'échappement de l'engin équipé d'un FAP



FIGURE 5B

Deux filtres de prélèvement, l'un réalisé à l'échappement de l'engin avec FAP (30 minutes), l'autre à l'échappement d'un engin sans FAP (3 minutes)



Un analyseur Testo 350 S à cellules électrochimiques a été utilisé pour la mesure des gaz. La concentration en particules de suie a été déterminée par prélèvement sur filtre et analyse par méthode coulométrique. Une sonde chauffée (120°C) a été employée pour les prélèvements de gaz et d'aérosols afin d'éviter les problèmes de condensation de vapeur d'eau. Les tests ont été effectués un peu plus de 2 mois et 6 mois après l'installation du FAP.

Les premières mesures indiquent des concentrations en particules, exprimées par rapport à la fraction du carbone élémentaire, comprises entre 20 et 220 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, en accord avec les valeurs établies lors des tests initiaux, soit 80 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Ces valeurs confirment le maintien de la très bonne efficacité du FAP. Les données relatives aux gaz CO, NO, NO_2 , sont également conformes à celles éta-

blies lors des tests initiaux et inférieures aux limites d'émissions (cf. Tableau II). Les tests effectués 4 mois plus tard confirment ces concentrations en particules de suie avec une stabilisation entre 200 et 300 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Le filtre a été contrôlé une nouvelle fois par le laboratoire suisse après 556 heures de fonctionnement. Les mesures confirment les bonnes performances du filtre établies à l'état initial à savoir, une efficacité de filtration basée sur le nombre de particules, supérieure à 99,97 % et la qualité de la régénération par voie électrique et ajout d'additif.

Des mesures complémentaires de la concentration en acides sulfurique et nitrique ont été réalisées à l'échappement. Pour cela, l'air a été échantillonné sur un filtre (fibres de quartz, Whatmann QM/A) imprégné de carbonate de sodium et les

anions minéraux ont été dosés par chromatographie ionique [23]. Les concentrations mesurées en SO_x , comprises entre 0,8 et 1,6 mg.m^{-3} sont voisines de la VME (valeur limite de moyenne d'exposition) de ce composé fixée à 1 mg.m^{-3} . Les concentrations en NO_3 , comprises entre 0,4 et 0,7 mg.m^{-3} , en sont un peu plus éloignées (VME = 5 mg.m^{-3}). Mais cette comparaison par rapport aux VLEP est discutable dans la mesure où ces valeurs correspondent à des concentrations établies dans des atmosphères de travail et non à des concentrations à l'émission.

Ces vapeurs, brutalement refroidies et diluées à leur sortie de l'échappement, se condensent rapidement, et sont à l'origine de la formation d'un aérosol acide. La toxicité de ces nanoparticules acides n'étant actuellement pas connue, il est impossible de juger de la nuisance de ces émissions et des limites à fixer.

CONCLUSION

Les filtres à particules (FAP) constituent le meilleur moyen de réduire efficacement les émissions de particules des moteurs Diesel, le problème des autres polluants restant posé. Pour les engins non routiers, le choix du FAP est plus complexe que pour d'autres applications, compte tenu des contraintes inhérentes à ces machines : fonctionnement discontinu limitant les plages stables à température élevée des gaz, utilisation de carburant riche en soufre, montage en « rétrofit » souvent difficile.

L'étude menée par l'INRS et la CRAMIF montre que certaines technologies de filtres (FAP à régénération passive type CRT®) ne semblent pas bien adaptées aux engins non routiers, sauf si une étude préalable des profils de température des gaz d'échappement, complétée par un contrôle du fonctionnement du filtre et l'utilisation de gazole sans soufre (< 10 ppm), permet de valider effectivement le dispositif. Actuellement, seuls les FAP à régénération active avec ajout d'additif, largement éprouvés dans certains pays, semblent vraiment bien adaptés : haute performance de filtration, pas ou peu d'émissions secondaires, autonomie complète de la régénération, combustion complète et rapide des suies. Enfin, l'expérience montre que seuls les filtres disposant d'un système autonome de pilotage électronique de la régénération sont susceptibles d'être acceptés par la profession des travaux publics.

Le coût, les difficultés de montage en « rétrofit », ainsi que les éventuels problèmes de gestion électroniques des différents paramètres peuvent toutefois constituer des freins au développement de cette technologie. Il apparaît clairement que seule l'implantation des FAP dès la conception des machines constituerait une solution viable.

Il semble indispensable que les utilisateurs ainsi que les services de maintenance soient informés de la mise en place d'un FAP. Le conducteur doit être en mesure de lire les indications concernant la contre-pression et d'interpréter les signaux d'alarme. Enfin, la maintenance doit être en mesure de remplacer

rapidement un FAP défaillant ou colmaté pour limiter la durée d'immobilisation de l'engin.

Ce procédé pourrait et devrait être dès à présent largement appliqué, prioritairement au parc de machines des chantiers en souterrains ou en milieux confinés mais également aux engins utilisés pour les travaux à ciel ouvert impliquant des personnes travaillant à proximité des engins (machines de construction routière, par exemple).

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les entreprises et les différentes personnes ayant contribué à la réalisation et à la mise en œuvre jusqu'à son terme de cette étude. Ils remercient plus particulièrement :

- M. Pigeon, Directeur matériel, société Eiffage Travaux Publics,
- M. Lehr, Directeur technique, société Ammann-Yanmar,
- M. Nataf, Ingénieur commercial Société Mann & Hummel,
- M. Mayer, du Technik Thermische Maschinen (TTM) pour ses précieux conseils,
- Nathalie Monta et François Diébold de l'INRS pour le temps consacré aux analyses.

Reçu le : 19/10/2009

Accepté le : 17/01/2010

@*mnexe* : retrouvez l'annexe dans la version électronique (PDF) de cet article sur notre site www.hst.fr

POINTS À RETENIR

- Le seul recours à un filtre à particules permet de réduire suffisamment l'émission en particules des engins non routiers.
- Certaines technologies de filtres (à régénération passive catalysée type CRT) ne semblent pas bien adaptées aux engins non routiers. Actuellement, seuls les filtres à régénération active avec ajout d'additif semblent vraiment convenir.
- La certification VERT suisse est une garantie des performances du filtre à l'état neuf et au cours du temps.
- Les filtres imposent certaines contraintes : difficultés de montage en « rétrofit », maintenance, information des conducteurs. Seule l'intégration de ces systèmes dès la conception permettrait de systématiser leur utilisation.

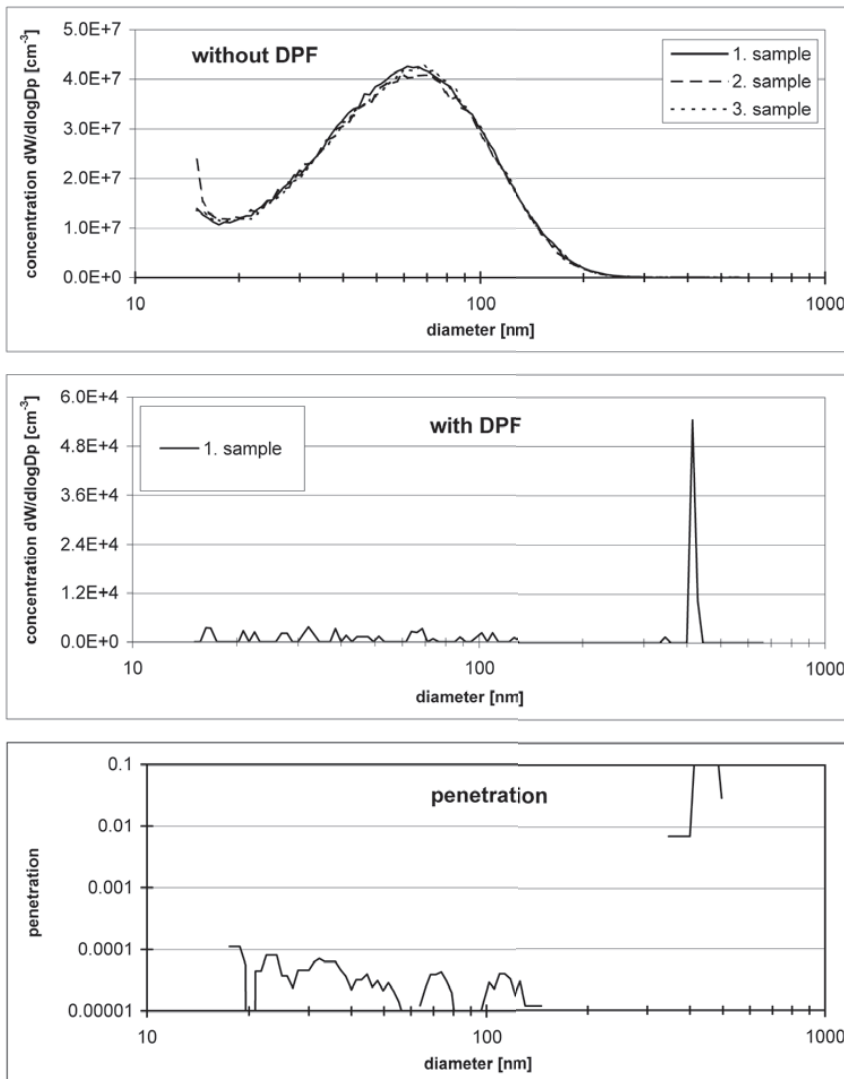
BIBLIOGRAPHIE

- [1] "Les Nanoparticules", Avis d'experts, EDP Sciences, p. 646-651 (2007).
- [2] NICHOLAS L. MILLS, M.D., HÅKAN TÖRNQVIST, M.D., MANUEL C. GONZALEZ et al. « Ischemic and Thrombotic Effects of Dilute Diesel-Exhaust Inhalation in Men with Coronary Heart Disease », *N Engl J Med*, 357, p.1075-82 (2007).
- [3] Recommandation CRAMIF n°17 "Travaux souterrains", DTE 107 (2000).
- [4] SAYANAGI K.M., "Black Carbon: The Next Big Thing in Global Warming?", *Journal of Geophysical Research*, (2008). <http://arstechnica.com/science/news/2008/04/black-carbon-the-next-big-thing-in-global-warming.ars>
- [5] SADLER L. 12th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zürich 23-25 Juin 2008.
- [6] COURTOIS B., LE BRECH A., DIÉBOLD F., LAFON D. « Moteurs Diesel et pollution en espace confiné », *Cahiers de Notes Documentaires*, ND 2239-201-05, ed. INRS (2005).
- [7] ROSSI M.J. 12th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zürich 23-25 Juin 2008.
- [8] BURTSCHER H. "Properties of nanoparticles from combustion engines", in "Particle filter retrofit for all diesel engines", *Haus der Technik* - Fachbuch band 97, Expert Verlag (2008).
- [9] MARTIN B. « Les techniques de dépollution des véhicules industriels », *Panorama 2005 - Le point sur...*, Publication IFP (2005).
- [10] BARBUSSE S., PLASSAT G. « Les particules de combustion automobile et leurs dispositifs d'élimination ». *Rapport ADEME*, 2ème édition (2005).
- [11] A. MAYER and al. "Particle filter retrofit for all Diesel engines". *Haus der Technik Fachbuch*, Expert Verlag (2008).
- [12] MCGINN S. « Final report of investigation to the diesel emission evaluation program (DEEP) » October 2004 (http://www.deep.org/reports/nordpf_final.pdf).
- [13] D'URBANO G., MAYER A. Liste VERT des filtres OFEV/SUVA – Systèmes de filtres à particules testés et éprouvés pour l'équipement des moteurs diesel – Décembre 2007. ed. OFEV – SUVA.
- [14] MATTER U., SIEGMANN H.C., et al. « Distinction of volatile and nonvolatile particles in exhaust of diesel engines with particulate traps », *J. Aerosol Sci.*, 30 (Suppl.1), p. S474-S472 (1999).
- [15] GAUTAM M. 12th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zürich 23-25 Juin 2008.
- [16] MAYER A., ULRICH A., HEEB N.V., CZERWINSKI T., NEUBERT T. "Particle filter properties after 2000 hrs real world operation", *SAE* 2008-01-0332.
- [17] BURTSCHER H. "Physical characterization of particulate emissions from diesel engines : a review". *J. Aerosol Sci.* 36, p. 896-932 (2005).
- [18] SEIGNEUR C. « Particules ultra-fines émises des véhicules » 24ème Congrès Français des Aérosols CFA Paris (2009).
- [19] Rapport d'essai INRS, VERT filter test – Phase 1 - DPF Mann + Hummel – SMFAR 1.8 (2008).
- [20] HEEB N.V., ZENNEGG M. et al. "Secondary Effects of Catalytic Diesel Particulate Filters: Copper-Induced Formation of PCDD/Fs", *Environ. Sci. Technol.*, 41, (16), p. 5789-5794 (2007).
- [21] Journée prévention CRAMIF - «BTP, les cancers professionnels sont évitables », CRAMIF, Paris, Nov. 2007.
- [22] Evaluation de l'exposition professionnelle. Méthodes de prélèvement et d'analyses de l'air. METROPOL – méthode 0038 INRS, CD-ROM 4 ou site <http://www.inrs.fr> rubrique base de données.
- [23] Fiche INRS Metropol « Anions Minéraux » 009 (2005).

PERFORMANCES INITIALES DU FILTRE MANN+HUMMEL SMF-AR 1.8
MESURES EFFECTUÉES PAR LE LABORATOIRE DE CONTRÔLE DES ÉMISSIONS MOTEURS (BIENNE, SUISSE)

FIGURE A1

Distributions granulométriques en nombre à l'amont (1^{er} graphe) et à l'aval (2^{ème} graphe) du FAP mesurées par SMPS. Le troisième graphique représente la perméance du filtre. La mesure a été effectuée avant la phase de régénération du filtre, c'est à dire pour un filtre colmaté



@nnexe

FIGURE A2

Distributions granulométriques en nombre à l'amont et à l'aval du FAP mesurées au cours de la régénération du filtre, montrant l'augmentation momentanée de la concentration en particules lors de cette phase

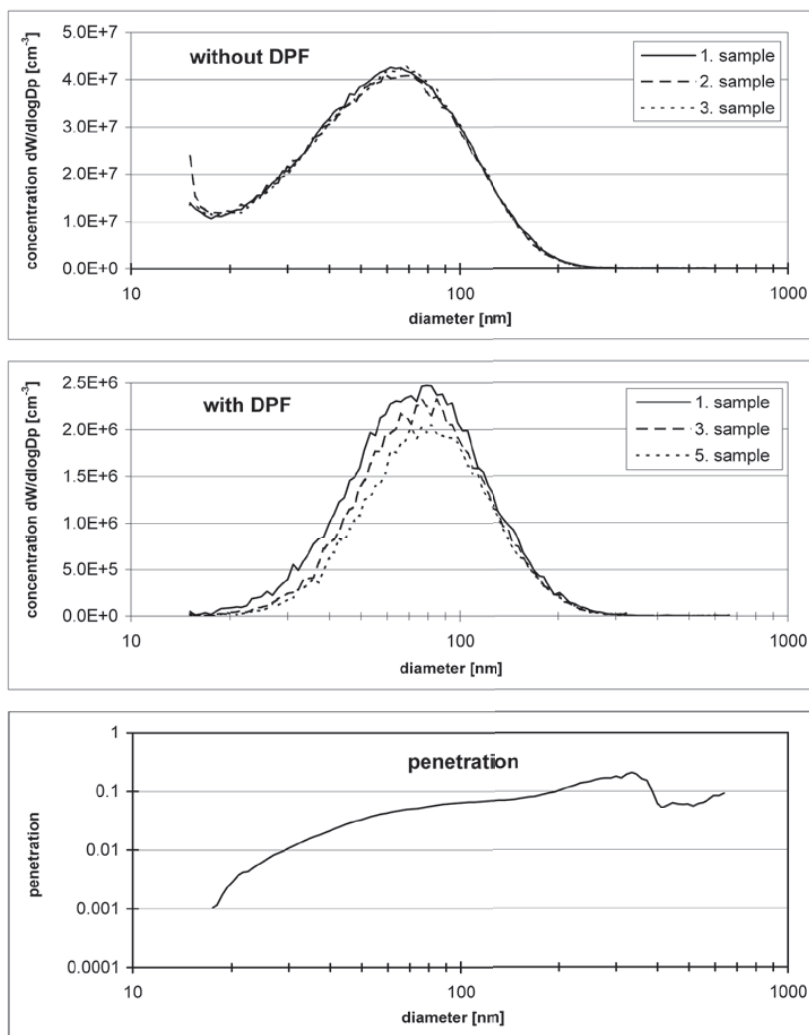


FIGURE A3

Concentrations en particules de 20 – 300 nm mesurées par SMPS à l'amont et l'aval du FAP, pour les 4 régimes moteurs testés : ralenti bas, ralenti haut, en charge basse et haute

