

Les particules de combustion automobile et leurs dispositifs d'élimination



DONNÉES ET RÉFÉRENCES



Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

2^e édition - mise à jour 2005

LES PARTICULES DE COMBUSTION AUTOMOBILE ET LEURS DISPOSITIFS D'ÉLIMINATION

Résultats du programme mené par l'ADEME depuis 1995

« Particules automobiles »

Caractérisation physico-chimique des particules

Efficacité des dispositifs de dépollution

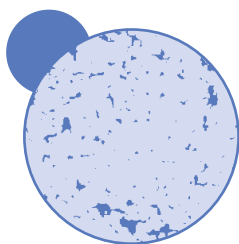
Stéphane Barbusse - Gabriel Plassat

A D E M E



Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
Direction de l'Air, du Bruit et de l'Efficacité énergétique
Département Technologies des Transports
500, route des Lucioles - 06560 Valbonne
Tél. : 04 93 95 79 00 - Fax : 04 93 65 31 96

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.



SOMMAIRE

INTRODUCTION	7
Qu'est-ce qu'une particule ?	9
• Nature	9
• Genèse	10
• Description du phénomène de nucléation	11
L'évolution des niveaux d'émissions	12
Les particules et leurs effets sur la santé	13
LES RÉSULTATS DU PROGRAMME DE RECHERCHE	16
CARACTÉRISATION PHYSICO-CIMIQUE DES PARTICULES	16
Analyse granulométrique	19
• Méthode	19
• Résultats	19
Analyse de la composition chimique	20
• Méthode	20
• Résultats sur moteur Diesel	22
Teneur en sulfates	22
Répartition SOF/IOF	23
Teneur et spéciation en HAP	23
Dosage de la fraction métallique	24
• Résultats sur moteur à essence	24
Composition	25
Granulométrie	25
EFFET DES CARBURANTS	26
Effet des propriétés physico-chimiques du carburant gazole	26
• Influence de la densité	26
• Influence de l'indice de cétane	26
• Influence de la teneur en aromatiques	27
• Influence de la teneur en composés naphténiques	27
• Influence des composés oxygénés	27
• Influence de la compressibilité	27
• Influence de la viscosité	27
Effet de la reformulation et de l'additivation du gazole	28
• Effet sur la granulométrie	28
• Effet sur la composition	29
Effet des émulsions eau-gazole	30
Effet de la formulation des essences	31

EFFET DE LA TECHNOLOGIE MOTEUR	32
Moteur Diesel	32
• Effet de l'EGR	32
• Effet de l'avance à l'injection	33
• Effet de la pression d'injection	33
Moteur à essence	33
• Effet du régime	34
• Présentation des technologies actuelles des moteurs à allumage commandé	34
• Résultats en matière d'émissions de particules	35
Le moteur à injection indirecte (stœchiométrique)	35
Le moteur à injection directe (nouvelle version)	37
Cas des motorisations des deux-roues	38
EFFET DES DISPOSITIFS DE DÉPOLLUTION	40
Catalyseur 3-voies (motorisation essence)	40
• Action sur les particules carbonées	40
• Action sur les particules volatiles	40
Catalyseur d'oxydation (motorisation Diesel)	41
Filtres à particules couplés avec un catalyseur d'oxydation	42
Filtres à particules catalytiques	44
Filtres à particules ouverts	45
BILAN DE PROGRAMME DE RECHERCHE	46
 LES RÉSULTATS DES PROGRAMMES D'ÉVALUATION	47
LA MÉTHODOLOGIE UTILISÉE POUR LES ÉVALUATIONS	49
LES TECHNOLOGIES ÉVALUÉES	49
Les filtres à particules	50
• Le CRT	50
• Le filtre Engelhard	51
• Le filtre Airmeex	51
• Le filtre Comela	51
• Le filtre Recycl'air	52
• Le filtre Bekaert	53
• Le filtre Lubrizol	53
• Les systèmes de suivi du colmatage des filtres (pour les véhicules lourds)	53
• La maintenance des FAP (pour les véhicules lourds)	54
Les cendres	55
Les suies imbrûlées	57
Installation Comela	57
Installation Eminox	58
Les émulsions (utilisables uniquement pour les véhicules lourds)	60

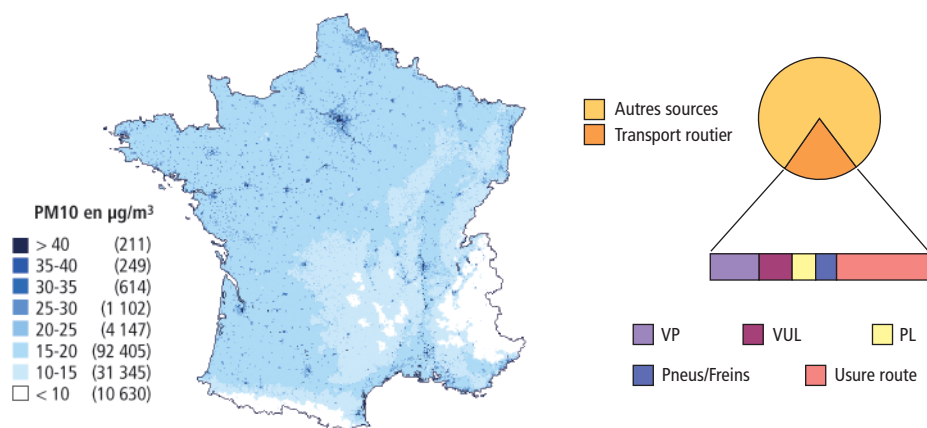
LES VÉHICULES LÉGERS	61
Le programme d'étude	62
Les résultats obtenus	63
• Essais sur cycles MVEG	63
• Émissions constatées durant les phases de régénération	66
• Suivi des véhicules	67
Consommations de carburant	67
Températures à l'échappement	67
Incidents	68
• Résultats concernant les polluants non réglementés	68
Essais effectués	68
Résultats obtenus	68
Bilan cérium	69
• Résultats concernant les particules	69
Suivi de trois tailles de particules	70
Concentration des particules	70
Granulométrie	70
Conclusions	71
LES BUS URBAINS	72
Le contexte	72
Répartition des filières	73
Les technologies évaluées	74
• Les filtres à particules	74
Le cycle utilisé	75
Les températures d'échappement mesurées en utilisation réelle	75
Les résultats	77
• Les émulsions	79
Résultats des essais réalisés à l'UTAC sur le banc à rouleaux	79
Les mesures de polluants non réglementés (PNR)	80
Les résultats des mesures réalisées par un système Autonat sur site	81
Mesures granulométriques des émissions de particules	82
Bilan émulsions	84
Les évaluations à venir sur le bus	85
À retenir sur les bus	87
LES CARS INTERURBAINS	87
Le contexte	87
Les technologies évaluées	87
Le cycle utilisé	88
Les résultats sur banc à rouleaux	88

LES BENNES À ORDURES MÉNAGÈRES (BOM)	90
Le contexte	90
Les technologies évaluées	90
• Les filtres à particules	90
Le cycle utilisé	91
Les températures d'échappement mesurées en utilisation réelle	91
Les résultats des évaluations	91
• Les émulsions	93
Les évaluations à venir	95
À retenir sur les BOM	95
LES POIDS LOURDS	95
Le contexte	95
Les technologies évaluées	96
• Les filtres à particules	96
Le cycle utilisé	96
Les températures d'échappement mesurées en utilisation réelle	97
Les résultats des évaluations	97
• Les émulsions	99
Les essais réalisés	99
Les résultats obtenus	100
- Les consommations de carburant	100
- Les analyses d'huile	100
- Les incidents	100
- Le comportement de l'émulsion en exploitation	100
- Les résultats des mesures à l'UTAC	101
- Les résultats de dispersions des mesures sur le parc de véhicules	103
Conclusions	104
Les évaluations à venir	105
À retenir sur les poids lourds	105
ET LES ENGINS NON ROUTIERS ?	106
Les bateaux	108
Les trains	109
Les engins de travaux publics	112
BILAN DU PROGRAMME D'ÉVALUATION	117
CONCLUSION	118
BIBLIOGRAPHIE	120
GLOSSAIRE	123
LES IMPLANTATIONS DE L'ADEME	126



INTRODUCTION

Malgré des progrès significatifs en matière de limitation des rejets de polluants par les automobiles, du fait de la réglementation et des avancées technologiques, il subsiste une préoccupation sur l'émission de certains polluants, comme les oxydes d'azote et les particules, en raison de l'accroissement constant des trafics de voyageurs et de marchandises.



Concentration et origine des PM10 dans l'atmosphère en France en 2000.
Source ADEME/CITEPA

En effet, le Diesel, initialement utilisé quasi exclusivement pour les véhicules lourds, a vu son emploi se développer très fortement pour les véhicules particuliers au cours de ces dernières années. Il représente à ce jour 60 % des ventes et près de 50 % du parc roulant des véhicules particuliers en France. Ce succès est lié au caractère économique de l'usage de ces motorisations (prix du gazole bas associé à une consommation volumique moindre que celle des motorisations essence) et aux progrès technologiques dont elles ont bénéficié au cours des dernières années. Les récentes solutions mises en place (injection directe haute pression, turbocompresseur à

géométrie variable) ont incontestablement permis d'augmenter les performances de ces moteurs, tout en réduisant encore leur consommation intrinsèque de carburant, les émissions de polluants, ainsi que leurs émissions sonores. D'un point de vue environnemental, le moteur Diesel est cependant pénalisé par les émissions de particules qu'il occasionne. L'étude et le traitement de ces composés solides, visibles à l'échappement et fortement critiqués quant à leur impact sur la qualité de l'air, fait l'objet de nombreux travaux de caractérisation et de développement.

Les particules émises se retrouvent en suspension dans l'air et peuvent être inhalées et se déposer en un point des voies respiratoires ou être expirées. Le site de dépôt, ou la probabilité d'expiration, dépend des propriétés des particules, des voies respiratoires et du régime respiratoire. Des effets sur la santé à court terme se manifestent pour des concentrations relativement faibles (inférieures à 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et se vérifient au niveau médical (consultations, admissions aux urgences). Pour des concentrations plus élevées, il est établi une corrélation entre la présence de particules et l'apparition de bronchites chroniques.

En ce qui concerne les effets à plus long terme (effets cardio-vasculaires, cancers des voies respiratoires), de nombreuses expertises ont été menées par les organismes sanitaires publics des pays industrialisés (IARC, 1989 ; INERIS, 1993 ; HEI (Health Effects Institute), 1995 ; Société Française de Santé Publique (SFSP), 1996 ; ...).

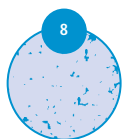
À ce jour, le caractère mutagène de ces résidus de combustion a été prouvé de manière expérimentale. Mais les effets carcinogènes de telles émanations n'ont pu être démontrés que pour certaines espèces animales et pour des concentrations en polluants très supérieures à celles rencontrées dans l'environnement. Chez l'homme, les études épidémiologiques en milieu professionnel tendent à démontrer une augmentation de l'incidence des carcinomes pulmonaires et de la vessie.

Par ailleurs, des études menées aux États-Unis tendent à démontrer une augmentation des risques de cancer pulmonaire, associée à une exposition de long terme à la pollution particulaire dans l'air ambiant. Les particules Diesel ont été classées comme cancérigènes probables par le Centre international de recherche contre le cancer.

L'intérêt croissant porté au moteur Diesel, tant pour les véhicules de transport de marchandises que pour les voitures particulières et, les impacts en matière de santé mis en évidence, incitent à poser un certain nombre de questions importantes, notamment celle de la pertinence des réglementations en matière d'émissions.

Eu égard au fait que ce sont les particules les plus fines qui pénètrent profondément dans les voies respiratoires et que leur nocivité dépend également de leur composition chimique, les deux questions auxquelles il convient d'apporter des réponses sont les suivantes :

- Les dispositifs techniques envisagés pour faire face au durcissement des normes d'émissions ne vont-ils pas avoir une action plus efficace sur les grosses particules, plus lourdes, que sur les particules plus fines, mettant ainsi en cause la pertinence de la réglementation actuelle qui porte sur la masse des particules émises ?
- Quelle est la composition chimique des particules émises, leurs composés dangereux sont-ils correctement éliminés par les dispositifs techniques ?



Pour répondre à ces questions, l'ADEME décide, dès 1990, de quantifier les performances d'un filtre à particules (FAP). À cette époque, la première application porte sur un autobus pour tenir compte des quantités émises en milieu urbain. Toutefois la technologie n'étant pas mature, les résultats ne furent pas satisfaisants.

L'ADEME décida alors de structurer un grand programme de caractérisation, articulé autour de deux axes majeurs :

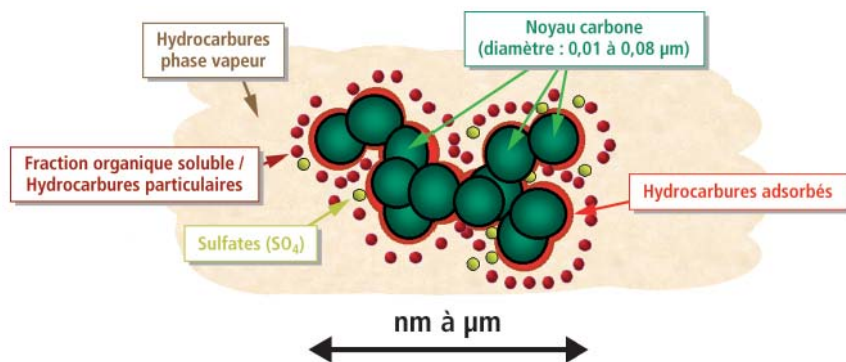
- Un programme de recherche centré sur la caractérisation physico-chimique des particules d'origine automobile. Les objectifs de ce programme, lancé en 1995 dans le cadre du programme PRIMEQUAL/PREDIT, visent d'une part à renseigner les mécanismes de formation de ces particules et d'autre part à identifier les caractéristiques des suies responsables d'effets sur la santé. Ce volet est développé en première partie du document.
- Un programme d'évaluation des performances, en utilisation sur flottes, des premiers systèmes disponibles. Les évaluations ont concerné l'ensemble des véhicules routiers, bus, bennes à ordures ménagères, poids lourds, véhicules légers. Pour chaque type de véhicules concernés, l'ensemble des systèmes pertinents est évalué, à la fois en utilisation réelle (tenue dans le temps et efficacité) et en laboratoire, pour des données précises et comparables. Ce volet fait l'objet de la deuxième partie du document.

Qu'est-ce qu'une particule ?

Nature, composition chimique et mécanisme de formation

Nature

Les particules Diesel se composent d'un matériau carboné (la suie : noyau de carbone ou « sphérule »), engendré lors de la combustion, sur lequel sont adsorbées des espèces organiques diverses, constituées de molécules condensées lors des étapes suivant la combustion. Cette partie adsorbée extractible par divers solvants (lors d'analyses en laboratoire) est appelée SOF (Soluble



Structure élémentaire d'une particule de combustion automobile.
Source ADEME

Organic Fraction). Elle renferme des hydrocarbures imbrûlés, des dérivés oxygénés (cétones, esters, aldéhydes, lactones, éthers, acides organiques) et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (les fameux HAP) accompagnés de leurs dérivés nitrés, oxygénés, etc. Se trouvent également des dérivés minéraux (SO₂, sulfates...) et métalliques.

Genèse

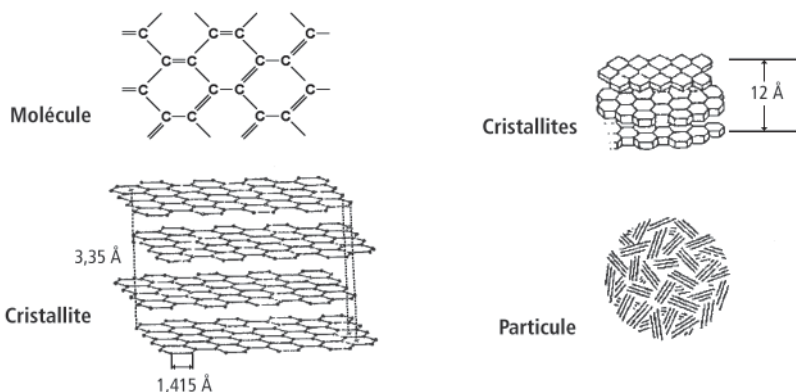
La particule se forme dans la chambre de combustion dans des zones localement trop riches en carburant, du fait du principe de fonctionnement de la motorisation Diesel. En effet, pour ce moteur, la combustion consiste en l'auto-inflammation, sous l'effet de la compression, d'un milieu hétérogène (spray de gazole pénétrant dans un air comprimé et chauffé).

Deux autres processus de formation identifiés font suite à cette première phase :

- formation de suies à partir du carburant au sein des gaz brûlés ;
- oxydation de la suie formée, après mélange dans des zones riches en oxygène.

Les précurseurs des sphérules carbonées sont des plaquettes carbonées constituées d'hydrocarbures aromatiques polycycliques qui, par accumulation et réarrangement, forment des microstructures sphériques de carbone : les sphérules de quelques nanomètres (10⁻⁹ m).

Ce processus est illustré dans le diagramme ci-dessous.



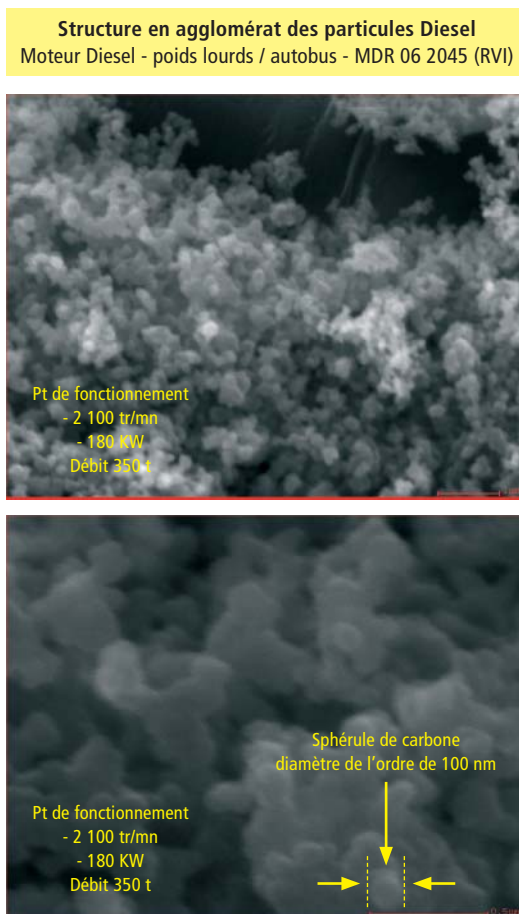
Source Thèse ADEME/PSA - F. Collin - déc. 2000



Spray Diesel, hétérogénéité du milieu.
Source PSA - CDRM - Le Moteur HDI

Cette structure élémentaire connaît une croissance par collision et agglomération jusqu'à environ 20 à 40 nm. Au delà, il y a association, sous forme d'agrégats et de chaînes, plus ou moins rami-

fiées. Cette structure grossit encore en intégrant par adsorption des composés présents dans la phase gazeuse (HAP, composés soufrés...).



Agglomérat et sphérule élémentaire de carbone des particules Diesel automobile.
Source ESIM pour ADEME

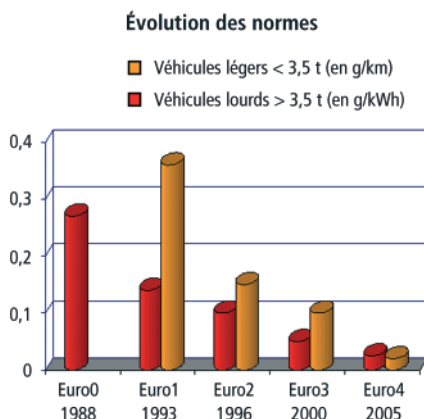
Description du phénomène de nucléation

Le processus initiateur (mode nucléation) qui s'effectue dans la chambre de combustion (carbone, cendres...), peut s'opérer également dans le tunnel de dilution ou l'atmosphère, avec une phase de nucléation (à partir d'hydrocarbures, d'acide sulfurique, d'eau) puis d'agglomération. La mise en œuvre des appareillages métrologiques et les conditions de mesures doivent de ce fait être particulièrement soignées pour obtenir une observation fidèle des particules produites et éviter des artefacts de mesure (cf. paragraphe « Moyens métrologiques et résultats »).

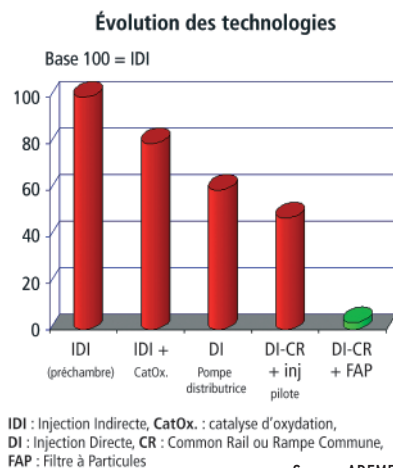
L'évolution des niveaux d'émissions

La métrologie réglementaire

Les niveaux de rejets de particules à l'échappement n'ont cessé de diminuer, du fait des contraintes réglementaires et des avancées technologiques, comme l'illustrent les diagrammes suivants.



Valeurs limites d'émissions de particules sur cycles d'essais normalisés (MVEG pour véhicules légers et ESC pour les véhicules lourds).



Niveau d'émissions de particules selon la technologie.

Les normes, pour l'homologation des véhicules, portent sur la mesure massique des rejets de particules : ces dernières sont recueillies sur un filtre normalisé de type PallFlex®, pendant toute la durée de l'essai. Par ailleurs, une méthode plus pratique mais moins précise est utilisée pour le contrôle des véhicules en circulation (forces de l'ordre, contrôle technique) ; elle consiste en la mesure de l'opacité des fumées (Unité Bosch) lors d'accélération à vide et permet de détecter les défaillances majeures du véhicule.

Pour les véhicules légers, l'étape Euro5 de la norme, applicable à compter de 2010, est en cours de validation et prévoit :

- d'une part, un abaissement de la valeur limite pour les véhicules Diesel à 0,005 g/km ;
- d'autre part, l'adoption d'une valeur limite identique pour les véhicules essence à motorisation de type injection directe mélange pauvre. C'est une première et la justification de cette réglementation figure dans les paragraphes ci-après, consacrés aux résultats sur les motorisations essence.

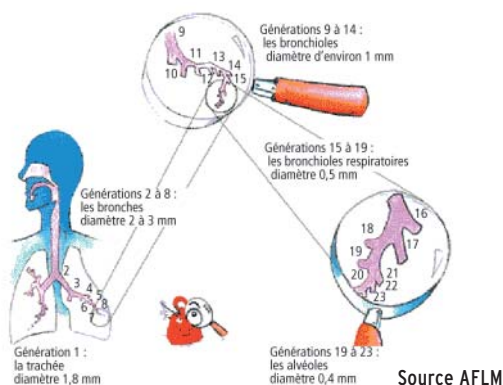
Les particules et leurs effets sur la santé

Que doit-on examiner ?

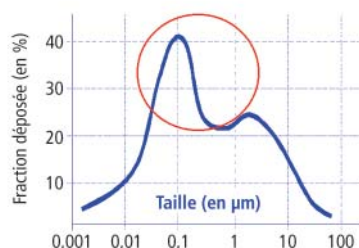
Pour apprécier les risques sanitaires liés à la présence de particules dans l'atmosphère, il convient d'apporter des éléments d'information sur les axes suivants, conformément aux attentes de la recherche médicale :

- les aspects morphologiques,
- les aspects physico-chimiques.

En effet, d'une part les particules de faible taille peuvent atteindre le poumon profond et y rester durablement, ce qui peut conduire à une atteinte des tissus par effet mécanique d'irritation (atteintes fonctionnelles respiratoires, asthmes) ; d'autre part, la phase solide sert de « vecteur » pour délivrer, au plus profond de l'arbre respiratoire, des composés adsorbés. On est sûr que certains de ces composés sont cancérogènes ou mutagènes, d'autres sont suspectés de l'être.



Fraction déposée dans les voies respiratoires



Source ADEME/INRETS

Taille des particules : une attention particulière sur la gamme 0,01 à 1 ↔ m.

Il convient donc de caractériser les rejets de particules en termes de taille, mais aussi en termes de composition chimique. La réduction de l'impact sanitaire des rejets particulaires d'origine automobile (moteur, carburant, post-traitement) devra prendre en compte ces deux aspects en agissant sur l'ensemble du spectre et sur les composés nocifs.

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont considérés, pour certains, comme probablement cancérogènes : une attention particulière (analyse des substances recueillies – par tranche de taille par exemple ou sur des points de fonctionnements donnés du moteur) devra être portée à la caractérisation de la fraction HAP des suies. En raison de leur toxicité et/ou de leur caractère mutagène ou cancérogène, supposé ou avéré, 16 HAP identifiés par l'agence pour l'environnement américaine EPA, méritent, dans la mesure du possible, une caractérisation spécifique.

Nom	Abréviation	Nombre de cycles	Formule Brute	Masse (g. mol ⁻¹)	Potentiel Cancérogène*
Naphtalène	NAPH	2	C10H8	128	–
Acénaphtylène	ACY	3	C12H8	152	–
Acénaphtène	ACE	3	C12H10	154	Nd
Fluorène	FLUO	3	C13H10	166	–
Phénanthrène	PHEN	3	C14H10	178	–
Anthracène	ANTH	3	C14H10	178	+
Fluoranthène	FLRT	4	C16H10	202	–
Pyrène	PYR	4	C16H10	202	–
Benzo(a)anthracène	B(a)A	4	C18H12	228	++
Chrysène	CHRY	4	C18H12	228	–
Benzo(b)fluoranthène	B(b)F	5	C20H12	252	+++
Benzo(j)fluoranthène	B(k)F	5	C20H12	252	++
Benzo(a)pyrène	B(a)P	5	C20H12	252	+++
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	INDENO	5	C22H12	276	++
Benzo(ghi)pérylène	B(ghi)P	6	C22H12	276	–
Dibenzo(ah)anthracène	DB(ah)A	5	C22H14	278	++

* +++ : très fort, ++ : fort, + : faible, – : nul, nd : évaluation non disponible

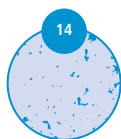
Liste des 16 HAP classés comme polluants prioritaires par l'US EPA.

Parmi les dérivés oxygénés susceptibles d'être renfermés dans les particules (SOF), une attention particulière doit être portée à la présence de formaldéhyde (HCHO). En effet, le formaldéhyde est un composé de classe 1 « cancérogène avéré » pour la dernière classification de l'IARC.

On retrouve généralement ce composé sous forme gazeuse et si, à terme, il sera contrôlé⁽¹⁾, sa détection sur les particules n'est pas, à ce jour, envisagée.

Les dioxines (les polychlorobenzodioxines ou PCDD) et les furanes (les polychlorodibenzofuranes ou PCDF), regroupés sous le terme « dioxines », appartiennent à la famille chimique des hydrocarbures aromatiques polycycliques chlorés ou HAPC et sont caractérisés par une très forte toxicité.

1. Les réglementations américaines fédérales (Tier II 2001-2008) et californienne (CARB) ont introduit des limitations sur les rejets à l'échappement de formaldéhyde.



Ce sont des polluants ubiquitaires très stables. 75 PCDD et 135 PCDF ont été identifiés. Seuls 17 d'entre eux, les plus toxiques, sont habituellement étudiés. La 2,3,7,8-tétrachlorodibenzodioxine ou TCDD est la plus toxique.

Introduites dans l'environnement, les dioxines persistent en raison de leur stabilité chimique. Elles ont une forte affinité pour les graisses. Leur demi-vie dans l'organisme humain est d'environ sept ans. Les dioxines sont des substances qui résultent essentiellement de procédés industriels : incinérateurs de déchets, fonderie, métallurgie, sidérurgie, blanchiment de la pâte à papier, fabrication d'herbicides et de pesticides... Elles peuvent également résulter d'événements naturels comme les éruptions volcaniques et les feux de forêt.

Des dibenzo-p-dioxines chlorés (famille des PCDD) et des dibenzofuranes chlorés (famille des PCDF) ont également été détectés dans des huiles usagées et de fortes concentrations ont été mesurées dans des tunnels laissant entendre que le trafic routier pouvait émettre des dioxines. Quelques données figurent dans les résultats du programme de recherche en pages suivantes.



PREMIÈRE PARTIE

LES RÉSULTATS DU PROGRAMME DE RECHERCHE

Ce programme de recherche a porté sur :

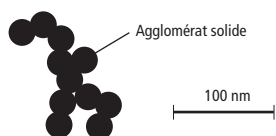
- la caractérisation des particules émises à l'échappement de moteur automobile ;
- les méthodes avancées développées pour ces mesures de caractérisation ;
- l'analyse des influences des technologies des moteurs et des carburants sur les rejets particuliers ;
- la compréhension des effets des systèmes de post-traitement sur les particules.

CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES PARTICULES **Moyens métrologiques et résultats**

Le débat que suscite l'impact des émissions de particules sur la qualité de l'air et la santé réclame une vision claire de leur nature et de leurs caractéristiques. Dans ce contexte, un ensemble de travaux a été lancé de façon à mieux cerner et comprendre les facteurs influençant la formation des particules en termes de granulométrie et de composition et à mieux connaître les phases constitutives des particules par tranche granulométrique.

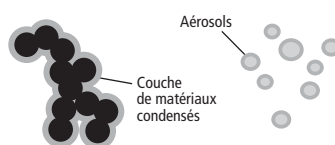
Les particules émises à la sortie du moteur sont un ensemble complexe, comprenant notamment des noyaux de carbone plus ou moins agglomérés en grappes, sur lesquels viennent s'adsorber des hydrocarbures, des sulfates ainsi que les fractions solubles des hydrocarbures particulières ; le tout entouré d'hydrocarbures en phase vapeur. Cet ensemble est évolutif, les phases solubles et les sulfates peuvent nourrir la formation de particules.

Chambre de combustion - Moteur



Formation des sphérules de carbone et agglomération
Condensation des cendres

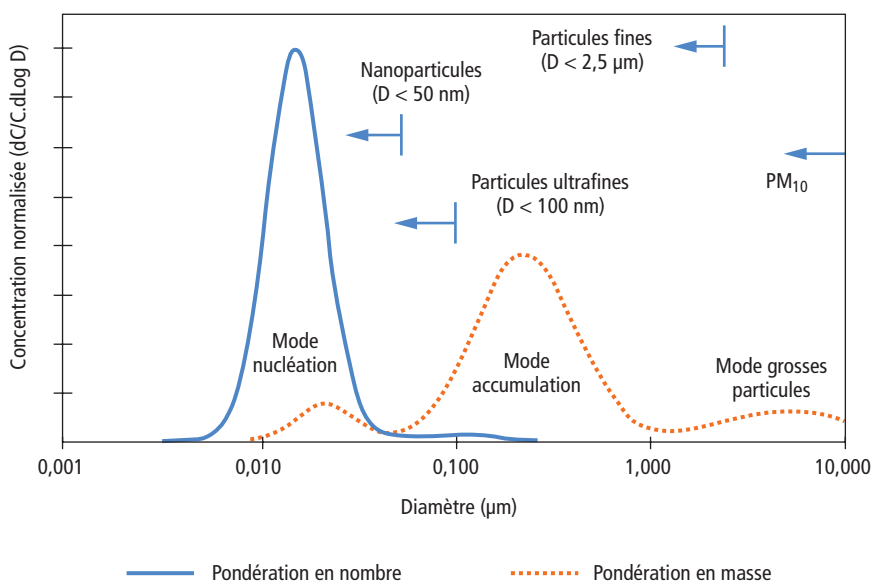
Système d'échappement - Dilution



Condensation - Nucléation de composés volatils (hydrocarbures, acide sulfurique, sulfates, eau)

Source ACEA "2nd Programme on the emissions of fine particles from passenger cars" - juillet 2002

Ainsi l'examen des mesures, en termes de nombre (concentration) et de taille à l'échappement, révèle des particules de nature différente.



Source Thèse ADEME/PSA - F. Collin - déc. 2000

Il faut notamment porter une attention particulière aux conditions de mesure : le taux de dilution et la température des gaz recueillis doivent être maîtrisés, pour éviter des phénomènes de condensation dans la ligne de prélèvement, conduisant à une lecture erronée.

Le « Thermodenuder » est un dispositif conçu pour enlever les composés volatils et semi-volatils des échantillons de gaz d'échappement prélevés. Les composés volatils/semi-volatils sont connus pour causer des variations dans les mesures par des phénomènes de condensation et de sursaturation. Dans le Thermodenuder, ces composés non désirés sont vaporisés en chauffant le prélèvement avec un réchauffeur d'aérosol à 250 °C. Puisque les particules dans l'échantillon ont des vitesses de diffusion beaucoup plus lentes ($< 1/100$ pour les particules de 10 nm) que les composés vaporisés, les fractions volatiles vaporisées sont rassemblées efficacement dans un volume annulaire du Thermodenuder en charbon actif adsorbant, tandis que les particules d'aérosol témoin suivent les lignes de flux inchangées des gaz. De l'eau ou de l'air pressurisé circulant au travers du Thermodenuder permet le refroidissement de l'aérosol témoin dans l'adsorbant.

Les pertes de particules sont réduites au minimum par optimisation de l'écoulement et de la protection thermique. La commande de réchauffeur maintient stabilisée la température de chauffage, ce qui permet d'empêcher des transformations inattendues d'échantillon. Le Thermodenuder se combine avec l'utilisation d'instruments très sensibles de mesure de particules ultrafines comme – voir paragraphes suivants – le SMPS (analyse de mobilité électrique) et l'ELPI (impac-teur basse pression).

Le Thermodenuder est censé surmonter les erreurs de mesure provoquées par l'existence de particules de nucléation. Dans certains cas, ceci peut s'avérer exagérément optimiste parce que :

- l'efficacité pour le piégeage des particules volatiles n'est pas de 100 % ;
- des pertes, dépendantes de la taille des particules non volatiles, se produisent.

L'efficacité de traitement des particules par cet appareil dépend de leur taille et est également liée à la température du lit de carbone du Thermodenuder. L'usage de celui-ci en combinaison avec du matériel permettant le comptage total des particules, quelle que soit leur taille, n'est donc pas approprié.

L'efficacité à écarter les particules volatiles et le traitement des particules solides selon leur taille dépendent de nombreux paramètres tels que le débit, la température du lit de carbone, la composition des aérosols, le temps de résidence dans le réchauffeur et dans la section d'adsorption, la capacité d'absorption du lit de carbone, le design, etc.

Il est donc en principe nécessaire d'effectuer une validation de la performance du Thermodenuder, à la fois avant et après chaque essai, puisqu'il n'existe pas de méthode évidente pour déterminer quand le charbon du lit d'adsorption est saturé. De ce fait, l'utilisation de ce matériel, destiné à augmenter la précision de mesure, n'est pas envisageable pour l'heure dans le cadre de mesures réglementaires.

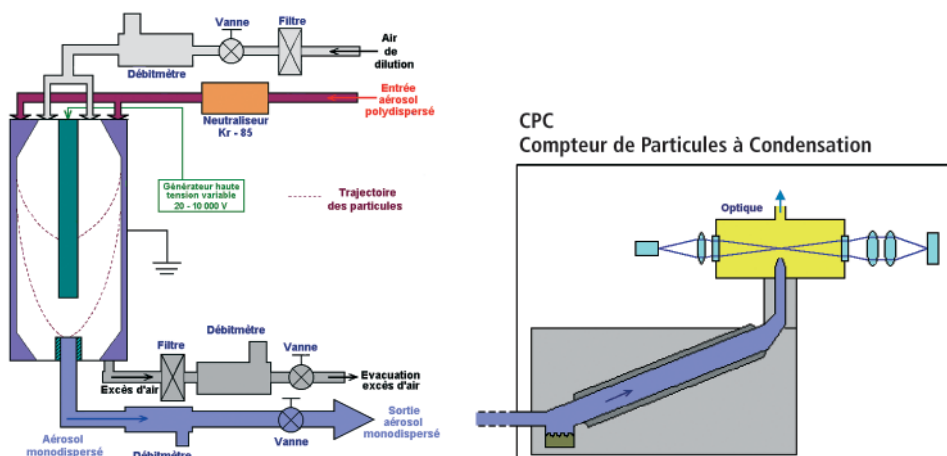
Analyse granulométrique

Méthode

Afin de permettre l'évaluation des particules présentes dans les gaz d'échappement, en taille et en nombre, la technique du SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) peut être utilisée. Cette technique repose sur les propriétés électrostatiques des aérosols. Pour chaque classe de taille comprise entre 8 nm et 1 µm, l'appareil permet l'évaluation de la concentration des particules dans un gaz.

Ainsi, par un balayage successif des différentes classes de tailles accessibles, il est possible de reconstituer une distribution granulométrique des particules en présence.

Il est également possible d'effectuer, pour une classe de taille donnée, une acquisition continue de mesures sur un cycle de conduite sélectionné.



SPMS : classificateur électrostatique + compteur de particules à condensation.

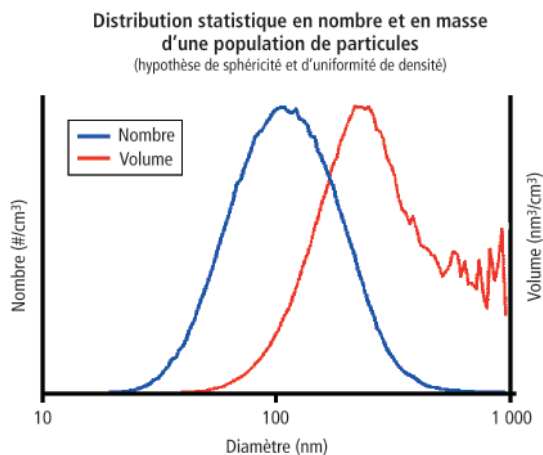
Source IFP pour ADEME - août 2000

Résultats

- Visualisation des particules Diesel (sans filtration)

Pour un moteur Diesel de type injection directe première génération (1,9 l TDI), on constate que la répartition en nombre suit une loi log-normale typique centrée à 100 nm.

Il n'y a pas de particules en deçà de 30 nm ; on en trouve au-delà de 500 nm. En volume, le pic est décalé de 100 nm à 250 nm, et à partir de 400 nm les particules plus grosses occupent un volume constant jusqu'à 1 µm.



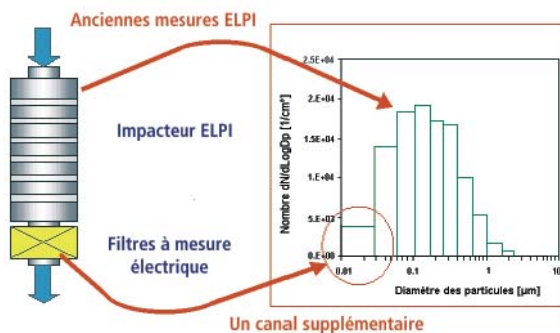
Allure typique de la distribution statistique de tailles de particules à l'échappement d'un moteur Diesel (ici 1,9 Tdi).
Source IFP pour ADEME - 96

- Une illustration de la distribution de particules pour motorisation essence (à allumage commandé) figure dans le paragraphe consacré aux influences des technologies moteur sur les rejets particulaires.

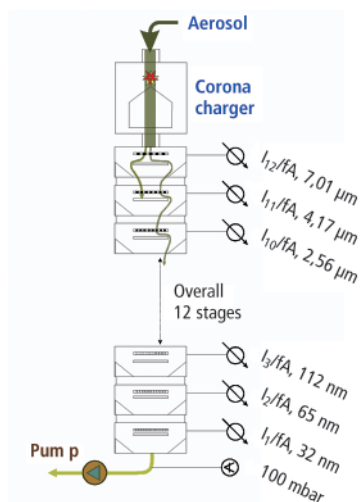
Analyse de la composition chimique

Méthode

Pour pouvoir connaître la nature de la suie rejetée, il est nécessaire d'utiliser une métrologie différente, qui permette le recueil des suies. La technique actuellement la plus utilisée pour les émissions particulaires automobiles est l'impacteur ELPI (Electrical Low Pressure Impactor).

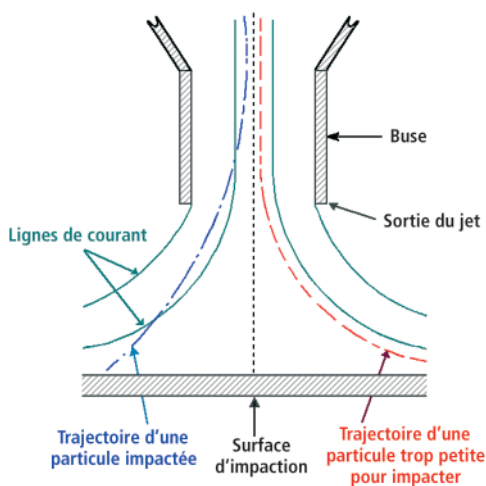


Source TSI Inc.



Méthode d'impaction inertielle.

Source ACEA "2nd Programme on the emissions of fine particles from passenger cars" - juillet 2002



Description du principe de collecte sur un étage.

Source IFP pour ADEME - août 2000

Cet impacteur comprend 13 étages (12 + 1 plateaux), qui permettent la collecte de particules comprises entre 0,030 μm à 10 μm .

Des extensions de l'appareillage, apparues récemment, permettent de caractériser les particules au-dessous de 30 nm, jusqu'à 10 nm, au moyen d'un étage de filtration électrique.

Plusieurs techniques analytiques peuvent être utilisées pour accéder à la composition des particules recueillies : chromatographie en phase gazeuse, en phase liquide, spectrométrie de masse, fluorescence X (XRF ou PIXE – Particle X-Ray Emission) pour la détection des métaux.

Rappelons que la particule est composée d'une partie insoluble (fraction sèche ou IOF) et d'une partie soluble (SOF) : la masse de la particule est égale à la somme de ces deux composantes.

La détermination de la part SOF/IOF se fait par extraction de la masse de particules déposée sur le filtre et par pesées différentielles. La fraction extraite est ensuite analysée par chromatographie pour déterminer la fraction et la composition en HAP.

La fraction massique de sulfates est obtenue par analyse chromatographique ionique du SO_3 . À cette fin, le filtre est préalablement traité à l'ammoniaque, pour former du sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, extrait par un mélange eau-isopropanol. Une résine échangeuse d'ions permet ensuite la séparation des anions et le dosage de l'acide sulfurique formé.

La fraction métallique est déterminée par une méthode d'analyse PIXE : un bombardement du filtre de collecte par un faisceau de protons à haute énergie (accélérateur électrostatique) conduit, par interaction avec les composés ciblés, à l'émission d'un rayon X. L'analyse du spectre d'émissions, pour lequel chaque pic d'émissions X correspond à un élément, permet de quantifier les éléments présents.

Enfin, l'examen visuel de la morphologie des particules peut être effectué par microscopie électronique à balayage, avec des grossissements importants (x 50 000).

Il doit être souligné que, pour mener à bien ces analyses, de nombreux échantillons distincts sont nécessaires, ce qui induit un nombre et des durées de prélèvements multiples : les données obtenues dans les différents programmes de recherche sont donc précieuses... et onéreuses.

L'analyse de ces traces est difficile et nécessite un appareillage complexe. Les analyses qualitatives⁽¹⁾ et quantitatives sont réalisées en couplant la chromatographie en phase gazeuse sur colonne capillaire à haute résolution (HRGC) à la spectrométrie de masse à haute résolution.

Les émissions seraient de 174 pg/km (TEQ) pour les poids lourds et de 1,5 pg/km (TEQ) pour les véhicules essence. Ces facteurs d'émissions sont en fait des facteurs pondérés de la toxicité des espèces TEQ (Toxicity Equivalency Facteurs). Le TEQ représente la concentration ou la masse de TCDD/TCDF (2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxine/2,3,7,8-tetrachlorodibenzofurane) qui aurait la même toxicité que le mélange réel. Les données analysées par l'EPA variaient de « non détectable » à plus de 600 pg TEQ/km, limitant le degré de validité des 174 pg/km. Une étude plus récente, réalisée sur six poids lourds a proposé des facteurs d'émissions variant de 8 à 164 pg TEQ/km, avec une moyenne de 47 pg TEQ/km.

Résultats sur moteur Diesel

Les travaux menés dans le cadre de PRIMEQUAL/PREDIT, notamment par l'IFP et l'INERIS, ont permis, dans un premier temps, de fournir des éléments sur la composition des particules par tranches granulométriques en sortie moteur, puis, dans un deuxième temps, d'étudier l'incidence des effets des paramètres carburant/réglages moteur/post-traitement sur cette composition, en parallèle à l'effet sur leur nombre et leur taille.

Teneur en sulfates

La teneur en sulfates des particules est bien évidemment dépendante de la teneur en soufre du carburant (voir paragraphe « Effet des carburants »). Les valeurs par tranche granulométrique obtenues avec un carburant d'essai Euro 96 à 490 ppm de soufre se situent entre 2 500 et 12 600 ppm (fraction massique = ratio entre sulfates contenus et totalité de la suie de la tranche granulométrique examinée).

Pour les particules de petites tailles (< 1 µm), la teneur en sulfate est très faible (< 0,4 %). Elle est plus grande pour les particules de taille supérieure (plus de 1,2 %) ce qui dénote un mode de dépôt en surface du soufre sur la suie dans l'échappement, qui est favorisé par le catalyseur (particule plus grande = plus de surface disponible).

1. Il existe un grand nombre d'isomères et tous les isomères ne possèdent pas la même toxicité, il faut donc séparer tous les isomères toxiques de ceux qui ne sont pas considérés comme toxiques, avant d'arriver à un niveau exprimé en équivalent de toxicité (TEQ).

L'ensemble des sulfates recueillis sur les 13 plateaux représente près de 3 % de la masse de la SOF totale.

Répartition SOF/IOF

L'analyse par tranche de taille des rejets particuliers d'un moteur Diesel révèle que la teneur en SOF (fraction soluble) augmente avec la taille des particules :

- pour les plus petites, < 30 nm, la SOF ne représente qu'environ 10 % ;
- pour les plus importantes, > 7 µm, la SOF représente plus de 85 %.

Cette présence accrue selon la taille des particules montre l'importance de la surface spécifique de la particule pour l'adsorption de la fraction soluble.

Teneur et spéciation en HAP

Il a été procédé au dosage des HAP dans les SOF extraites pour ce moteur Diesel. Si onze molécules ont été détectées dans des concentrations non négligeables, la teneur totale en HAP reste faible : de l'ordre de 0,2 % en masse.

Parmi les molécules détectées, le pyrène et le fluoranthène sont présents dans des quantités nettement plus importantes que les autres.

Nom	Abréviation	Teneur mesurée en ppm
Pyrène	PYR	897,5
Fluoranthène	FLRT	713,5
Chrysène	CHRY	144,8
Benzo(a)anthracène	B(a)A	120,5
Anthracène	ANTH	112,9
Benzo(b)fluoranthène	B(b)F	37,1
Benzo(a)pyrène	B(a)P	36,4
Benzo(ghi)pérylène	B(ghi)P	28,4
Benzo(j)fluoranthène	B(k)F	11,9
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	INDENO	5,4
Dibenzo(ah)anthracène	DB(ah)A	0,5

Le classement des teneurs des différents HAP reflète le mode de formation lors de la combustion (intermédiaires réactionnels). Leur présence est quasiment liée à leur masse moléculaire : les

espèces les plus légères sont les plus présentes, ce qui confirme le mode de formation des HAP de proche en proche par addition d'acétylène ou d'espèces légères aux noyaux d'aromatiques.

La teneur en HAP est par ailleurs quasi indépendante de la taille des particules.

La composition globale de la SOF est donc constituée de 0,2 % d'HAP, de 3 % de sulfates et de plus de 96 % d'imbrûlés.

À retenir

Les HAP se déposent sur les particules durant la combustion, et non, à la différence des imbrûlés et des sulfates, lors de la phase de refroidissement. Ils sont donc présents sur les particules élémentaires et non sur la surface de l'agglomérat.

Dosage de la fraction métallique

Les métaux à l'échappement peuvent provenir de la combustion (carburant, lubrifiant) ou de l'usure du moteur.

Douze métaux ont été détectés en quantités non négligeables par la méthode PIXE, précédemment décrite : S - Soufre, Cl - Chlore, K - Potassium, Ca - Calcium, Cr - Chrome, Mn - Manganèse, Fe - Fer, Ni - Nickel, Cu - Cuivre, Zn - Zinc, Sb - Antimoine, Ag - Argent.

Les métaux sont présents en proportion importante dans les particules de grande taille et en faible proportion dans les particules de petite taille :

- Les métaux comme le chrome ou l'argent se retrouvent exclusivement sur les derniers plateaux 12 et 13 de l'impacteur (diamètre > 6,8 μm) ce qui confirme qu'ils ne sont pas issus de la combustion, mais proviennent de l'usure du moteur. De même, le fer, présent en quantité importante (3 200 ppm) sur le plateau 13 et en faible quantité sur les autres plateaux (200 ppm en moyenne) relève de l'usure du moteur.
- À l'inverse un composé comme l'antimoine provient de la combustion (origine carburant et lubrifiant).
- Enfin, certains composés comme le zinc, le manganèse, le calcium ou le cuivre se retrouvent à la fois en forte teneur dans les particules de grande taille (présence dans les pièces d'usure), mais aussi dans les classes de taille inférieure (présence comme additifs dans le lubrifiant ou le carburant).

Résultats sur moteur à essence

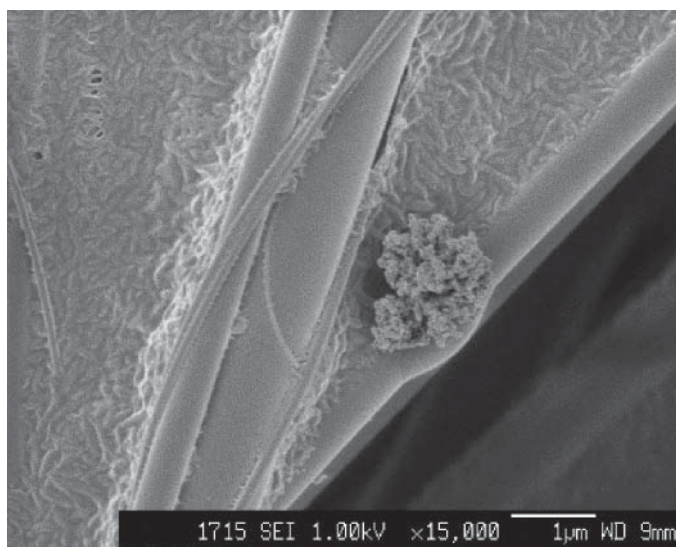
Il s'avère plus délicat de renseigner ce point, en raison de la quantité nettement plus faible de particules émises : les délais de collecte, le glissement des suies collectées d'un plateau à l'autre, les incertitudes de mesures, ne permettent pas pour l'heure une analyse aussi fine de la composition des particules par tranche granulométrique.

La plupart des études concernant la caractérisation des particules émises par les véhicules se sont focalisées sur les particules Diesel. Ceci est lié au mode de prélèvement des particules pour les

aspects normatifs : la masse de PM. En effet, les véhicules à allumage commandé, dans ces conditions, n'émettent quasiment pas de particules en comparaison des véhicules Diesel (environ 1 % des émissions d'un Diesel). Plus récemment, l'intérêt pour le nombre de particules a fait que les véhicules à allumage commandé ont suscité un regain d'intérêt, notamment en raison du développement des technologies d'injection directe d'essence (et du mode de combustion associé).

Composition

Les particules « essence » semblent être composées de cendres (calcium, magnésium, cuivre, fer, sodium, ...), de lubrifiant et d'autres composés volatils. Contrairement au Diesel, leur contenu en carbone est faible.



Visualisation au microscope électronique d'une particule essence - Moteur F4P (IFP - Jeuland 2000).

Granulométrie

Pour les motorisations conventionnelles à injection indirecte d'essence

Les particules émises sont plus petites que les particules Diesel. Ce sont presque exclusivement des nano particules de diamètre inférieur à 50 nm. Quelques études présentent également des répartitions de particules avec un pic centré sur 50 à 60 nm, mais aussi des particules de taille supérieure à 100 nm. Leur nombre est, de deux ordres de grandeur, inférieur à celui des particules Diesel, lorsqu'on les mesure à bas régime ou sur les cycles normalisés. Leur nombre peut augmenter fortement en fonction de la richesse, notamment à forte vitesse sur autoroute. Sous certaines conditions, les moteurs à allumage commandé peuvent émettre autant de particules que les moteurs Diesel.

Lorsque l'on étudie au cours du temps la distribution en taille des particules émises par les moteurs à allumage commandé, on observe l'apparition de très forts pics de concentration, alors que

cette distribution n'évolue pas dans le temps pour les moteurs Diesel. Ceci tend à prouver que leur mode de formation ainsi que leur composition sont différentes. À noter également que, pour les moteurs à allumage commandé, la distribution des particules s'éloigne parfois fortement de la distribution log-normale. La définition du diamètre médian perd alors son sens car, dans ce cas, il n'est plus représentatif du diamètre pour lequel les particules sont les plus nombreuses dans l'aérosol.

Si l'on compare les différentes données de la littérature, on trouve que les véhicules Diesel émettent en moyenne entre $2,4 \times 10^{14}$ et 8×10^{13} particules/km, alors que les véhicules à allumage commandé se situeraient entre $1,2 \times 10^{14}$ et 3×10^{10} particules/km.

Pour les motorisations conventionnelles à injection directe d'essence

Les nouveaux moteurs à injection directe essence émettent environ 1×10^5 particules/cm³ à faible charge et 1×10^7 particules/cm³ à forte charge. En effet, les moteurs à injection directe envisagés actuellement développent deux stratégies d'injection : à faible charge, on injecte pendant la phase de compression entraînant une combustion très stratifiée. À plus forte charge, on injecte pendant l'admission, la combustion est donc plus homogène. À faible charge, les moteurs à injection directe se comportent comme des moteurs Diesel et les émissions de particules peuvent atteindre des valeurs identiques à celles enregistrées sur des véhicules Diesel $2,8 \times 10^8$ particules/cm³. De plus, leur composition se rapproche de la composition des particules Diesel. Leur répartition en taille est centrée sur 100 nm. On pense que ces particules contiennent une part non négligeable de carbone.

EFFET DES CARBURANTS

Effet des propriétés physico-chimiques du carburant gazole

Influence de la densité

Dans la littérature, la densité est présentée comme étant un paramètre qui influence fortement les émissions de particules. Les émissions de particules augmentent avec la densité.

Influence de l'indice de cétane

L'indice de cétane est un des paramètres connus pour agir sur la qualité de la combustion. Au début des années 1990, il était admis qu'une augmentation de l'indice de cétane entraînait une augmentation des émissions de particules. Avec le développement des technologies à injection directe haute pression, la relation n'est plus aussi évidente. Certaines études présentent une

diminution des particules alors que l'indice de cétane augmente, d'autres l'effet inverse, d'autres ne voient aucun effet.

Influence de la teneur en aromatiques

L'effet de la teneur globale en aromatiques sur les particules provient essentiellement des variations de composés polyaromatiques : une réduction des composés polyaromatiques diminue plus fortement les émissions de particules qu'une baisse des teneurs en mono aromatiques. La SOF et les HAP sont beaucoup plus influencés par les composés di- et tri-aromatiques que par les monos aromatiques.

Influence de la teneur en composés naphténiques

De nombreuses études ont montré que l'augmentation des composés naphténiques augmentait les émissions de particules et des HAP. L'IFP (Xavier Montagne) a proposé en 1990 un critère pour prédire les émissions de particules, mais aussi de SOF et d'HC à partir des teneurs en aromatiques et en composés naphténiques. Les ingénieurs de l'IFP ont montré que les composés condensés et hautement insaturés augmentaient les émissions de particules et ils ont proposé de les qualifier en utilisant un indice d'insaturation.

Influence des composés oxygénés

L'introduction de composés oxygénés à hauteur de 5 à 10 % en volume dans le gazole permet de diminuer la formation des particules. De nombreuses études mettent en avant la teneur en oxygène du carburant comme étant le paramètre essentiel pour expliquer le phénomène. Plus précisément, l'effet d'une additivation sur la formation de particules est plus ou moins marqué selon la famille de composés oxygénés. Ainsi on a observé, pour une additivation à 5 % avec des composés tels les éthers, acétals, polyacétals et carbonates, les comportements suivants en termes d'émissions de particules :

- peu ou pas d'effet avec les éthers,
- diminution de 2 à 14 % pour les acétals,
- diminution de 4 à 15 % pour les polyacétals,
- effet marqué, de 6 à 17 % pour les carbonates.

Influence de la compressibilité

Bien que rarement mesurée, la compressibilité des gazoles peut s'avérer importante pour les émissions de particules. La diminution de compressibilité entraîne semble-t-il une diminution de la formation de particules. Ceci pourrait être dû à une meilleure pulvérisation du spray dans la chambre de combustion.

Influence de la viscosité

Plus la viscosité augmente et plus les émissions de particules sont importantes.

Effet de la reformulation et de l'additivation du gazole

Peu connues au lancement de PRIMEQUAL/PREDIT en 1995/96, les relations entre formulation des carburants et caractéristiques des particules sont désormais mieux documentées, du moins pour le cas de la motorisation Diesel. Le travail de l'IFP constitue un apport important : études menées sur un moteur Diesel d'automobile, à injection directe, suralimenté et muni d'un dispositif de recirculation des gaz brûlés (EGR - Exhaust Gas Recirculation) ; le moteur a été alimenté par plusieurs types de carburants : un gazole standard EURO 96, seul ou enrichi d'une coupe naphténique lourde, un gazole de type City Fuel (gazole à très basse teneur en soufre), un gazole fortement hydro traité, 2 esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV : colza, tournesol), 4 mélanges élaborés à partir des gazoles précédents et de 30 % d'EMHV.

Effet sur la granulométrie

La granulométrie des particules peut subir des variations de 20 à 30 % en fonction des carburants utilisés. En effet, les carburants se répartissent en 3 sous-ensembles :

- **Les bases gazoles seules**

Le diamètre médian des particules évolue dans la gamme granulométrique la plus élevée, c'est-à-dire entre 100 et 130 nm, en fonction des conditions de régime et de charge du moteur. Il existe aussi un deuxième mode principal vers 10 nm. L'hydrotraitement du gazole, permettant de réduire le taux de soufre et la quantité d'aromatiques, conduit à une réduction forte des particules de 10 nm (division entre 10 et 100) et une réduction moindre des particules centrées sur 100 nm. Cette conclusion est valable aussi bien sur des moteurs Euro2 que sur des moteurs Euro3 (source CONCAWE report N° 01/51).

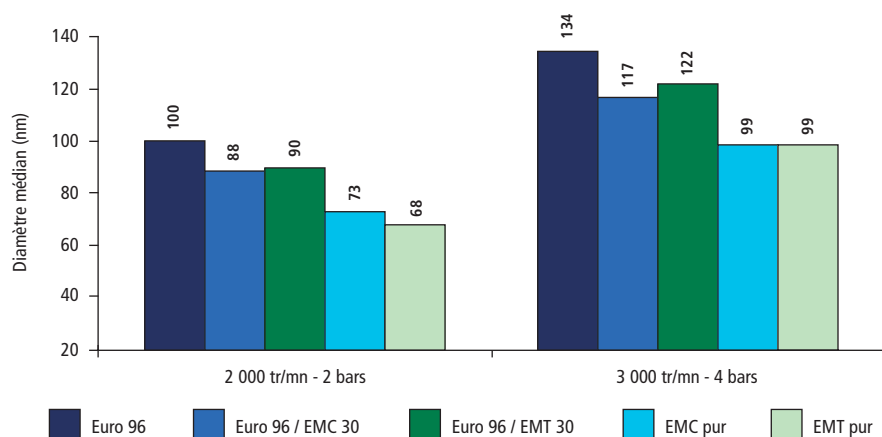
- **Les esters d'huiles végétales purs**

Ces produits fournissent les émissions de particules de la plus petite taille : de 70 à 100 nm en fonction des conditions de régime et de charge du moteur. C'est donc une réduction de 30 % du diamètre moyen que l'on enregistre avec ces produits.

- **Les mélanges EMHV30**

Ces carburants émettent des particules dont les diamètres moyens sont compris entre 80 et 120 nm en fonction des conditions de régime et de charge du moteur.

Il faut noter que l'incorporation en mélange d'EMHV dans le gazole permet un abaissement de la teneur en soufre, proportionnel au taux d'introduction (dans ce cas – 30 %). Cet abaissement du taux de soufre participe à la réduction du diamètre médian observé, ainsi qu'à la diminution de la quantité des sulfates.



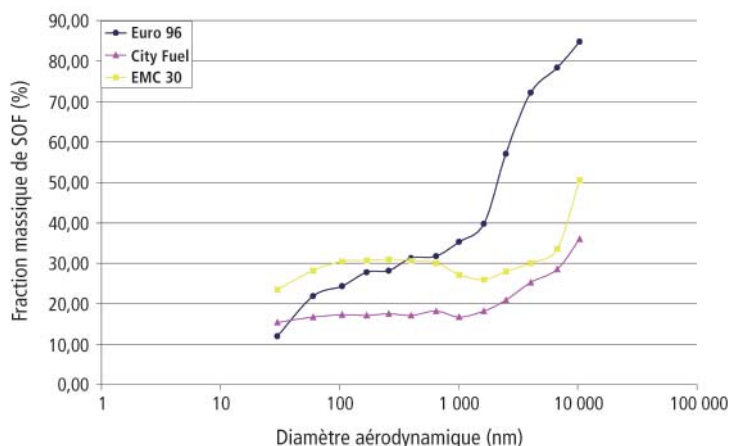
Influence de la nature du carburant sur le diamètre médian des particules (émissions brutes du moteur).
Source IFP pour ADEME

Effet sur la composition

Les teneurs en sulfates sont directement liées au taux de soufre du carburant.

La répartition SOF/IOF dépend fortement de la composition du carburant : les particules formées lors de l'utilisation du City Fuel sont beaucoup moins riches en SOF (< 20 % masse sur les 10 premiers plateaux de l'impacteur) que celles formées avec le carburant standard.

Le carburant oxygéné présente, quant à lui, une teneur en SOF supérieure à celle de référence sur les plateaux de faible diamètre (1 à 6), puis inférieure sur les plateaux de grand diamètre. Ces différences sont le reflet de structures différentes des agrégats. Les faibles variations de la teneur en SOF pour l'EMC 30 et le City Fuel montrent que la surface spécifique des particules, formées à partir de ces carburants, reste faible. Ceci pourrait être dû à un diamètre des particules élémentaires plus faible.



Comparaison des fractions massiques de SOF, selon le type de carburants (IFP - Jeuland 2000).

La grande différence entre les carburants, au niveau des teneurs en SOF des particules de grande taille, confirme l'hypothèse de la présence d'un brouillard de carburant se déposant sur les particules de grande taille (pression de prélèvement plus élevée). En effet, l'ajout d'ester méthylique de colza dans le carburant entraîne une forte baisse des teneurs en SOF sur les plateaux élevés (oxydation facilitée par la présence d'un composé oxygéné, même si la courbe de distillation est plutôt décalée vers les fractions lourdes). De même, l'utilisation d'un carburant plus léger, ne contenant que peu de fractions lourdes (City Fuel) entraîne la quasi disparition des fortes teneurs (teneur en SOF du plateau 13 : 37 %).

De plus, pour les particules de faibles tailles, on peut remarquer une augmentation des teneurs en imbrûlés lors de l'utilisation d'EMC, peut-être due à la présence d'un phénomène de polymérisation des esters au sein de la SOF (dimères et trimères).

La teneur en aromatiques a une forte influence sur les teneurs HAP légers, notamment au niveau du rapport pyrène/fluoranthène (les deux HAP les plus présents – cf. paragraphe précédent « Teneur et spéciation en HAP ») et sur les teneurs en HAP lourds. À ce sujet, il est utile de citer un exemple, découvert dans la littérature, qui porte sur le gazole de synthèse « Fischer Tropsch ». Pour ce type de gazoles, qui ne contient pas d'aromatiques et qui présente un indice de cétane élevé, on constate un abaissement de 30 % de la masse de particules émises.

Ces tendances ont aussi été mises en évidence dans le cadre du programme EPEFE où l'évolution des particules a été modélisée comme suit (sur moteur PL) :

$$PM = (0,06959 - 0,00006.Densité + 0,00065.Polyaromatique - 0,00001.Cétane). \\ (1-0,0086.(450 - soufre)/100)$$

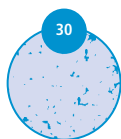
Effet des émulsions eau-gazole

Les effets de l'utilisation de différentes émulsions eau-gazole (Total Aquazole®, Gecam, BP Aspira) sur la granulométrie des particules ont également été étudiés. En effet l'utilisation de ce carburant, qui permet d'abaisser les NO_x, entraîne une diminution des rejets de fumées (opacimétrie), mais ne conduit pas un abaissement proportionnel de la masse de particules émises (g/km) : il s'est avéré intéressant de comprendre les phénomènes physiques intervenant sur la nature des particules.

L'analyse granulométrique et physico-chimique des particules émises, pour un moteur Diesel fonctionnant à l'Aquazole®, permet de conclure que l'abaissement de richesse locale apportée par l'évaporation de l'eau (fragmentation des gouttelettes) entraîne à la fois une réduction des émissions des HAP et la modification de la granulométrie des particules, dans le sens d'une réduction du nombre de particules de taille importante (> 200 nm) et d'une augmentation sensible (~ x 10) de la formation de fines particules (~ 30 nm).

Cette analyse explique l'origine de la réduction d'opacité des fumées avec conservation de la masse des particules (spectre décalé vers les particules plus petites, moins opaques).

On considère que le fait d'injecter de l'eau en même temps que le gazole accroît la quantité de mouvements effectués par les jets de carburant dans la chambre de combustion. Pour une masse

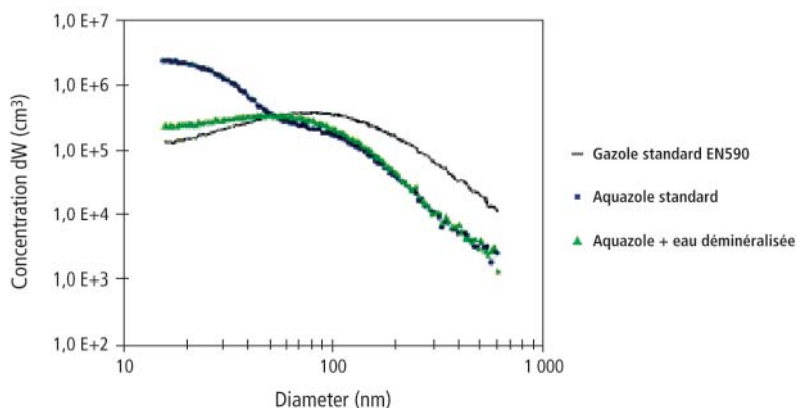


non modifiée de carburant injecté (pour obtenir la même énergie), la quantité de mouvements observée dans la chambre de combustion est de 100 pour le gazole seul et de 100 + pourcentage d'eau pour l'émulsion. Cette augmentation de la quantité de mouvements effectués par les jets de carburant accroît la vitesse de mélange avec l'air, ce qui a pour conséquence :

- d'améliorer légèrement le rendement ;
- d'augmenter la vitesse de post-oxydation des suies ;
- de favoriser les contacts aux parois à faible régime conduisant à des augmentations d'HC et CO.

La présence de l'eau, qui se vaporise dans la chambre, réduit la formation de suies par polymérisation, notamment dans les zones riches, en réduisant la concentration en espèces à liaisons carbone ouvertes.

Une analyse complémentaire sur la nature de l'eau utilisée (teneur en minéraux) pour la préparation de l'émulsion a mis en évidence la participation de ces minéraux dans la quantité de fines particules. En effet, l'utilisation d'Aquazole® formulé avec de l'eau déminéralisée permet d'obtenir un spectre similaire au gazole pour les fines particules (pas d'augmentation) et de conserver le gain sur les grosses particules par rapport au gazole.



Source TOTALFINAELF/TTM - Congrès nanoparticules Zürich - août 2000

Effet de la formulation des essences

Pour les motorisations à allumage commandé, s'il n'y a pas eu, pour l'heure, d'étude paramétrique sur l'effet du carburant et la typologie des particules dans le cadre du programme PRIME-QUAL/PREDIT, on peut toutefois retenir que la diminution de la teneur en aromatiques permet de limiter la production d'HAP précurseurs de la formation des particules : c'est d'ailleurs en ce sens qu'évolue la réglementation européenne sur la spécification du carburant essence.

EFFET DE LA TECHNOLOGIE MOTEUR

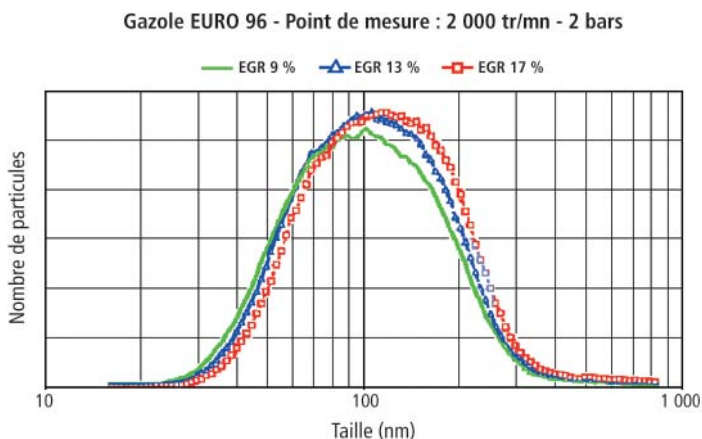
L'influence entre paramètres de réglages moteur et granulométrie des particules était également peu renseignée. Là encore, l'étude IFP apporte des résultats nouveaux.

Moteur Diesel

La difficulté, dans la maîtrise des émissions de particules des motorisations Diesel, repose sur le lien étroit entre ces émissions et celles des oxydes d'azote, dont il faut également maîtriser le niveau, car la formation de ces deux polluants dépend de la qualité de la combustion. Diminuer les émissions de particules en brûlant mieux le carburant se traduit par une augmentation des oxydes d'azote. En d'autres termes, réduire les oxydes d'azote suppose une dégradation de la qualité de la combustion, qui s'accompagnera alors de la formation de particules en plus grande quantité. Plusieurs paramètres technologiques sont susceptibles de modifier le degré de cette dépendance, comme la formulation du carburant, l'architecture du moteur, la pression d'injection, la recirculation d'une partie des gaz d'échappement, le tout devant être assorti d'un contrôle fin des paramètres de fonctionnement du moteur notamment de l'injection.

Effet de l'EGR

On constate que l'augmentation du taux de gaz d'échappement recyclés (EGR) se traduit par un léger accroissement du diamètre moyen des particules (10 % d'augmentation d'EGR induisent une augmentation de 5 à 15 % du diamètre moyen des particules).



Influence du taux d'EGR sur la taille des particules (émissions brutes du moteur).
Source IFP pour ADEME

En termes de composition, une augmentation sensible de la SOF, en raison d'une oxydation plus difficile, ainsi qu'une augmentation de la teneur en HAP sont à noter.

Effet de l'avance à l'injection

La diminution de l'avance à l'injection, conduisant à une réduction des phénomènes de postcombustion, engendre :

- une augmentation de la concentration et des diamètres des particules ;
- une augmentation de la teneur en SOF ;
- une diminution des HAP légers, mais une forte hausse des HAP lourds.

Effet de la pression d'injection

La technologie d'injection et le paramètre « pression d'injection » semblent avoir, au travers de la première évaluation ADEME « Émissions des nouvelles motorisations Diesel Injection Directe 2001 », un impact sur les quantités d'HAP émises à l'échappement.

En effet, les émissions de six HAP en phase gazeuse (Naphtalène, Acénaphène, Fluorène, Phénanthrène, Anthracène, Fluoranthène) issues de moteur à injection directe « Common Rail » (pression d'injection de l'ordre de 1 300 bars) sont supérieures à celles issues de moteur à injection directe à pompe distributrice (pression d'injection de l'ordre de 800 bars).

Il est légitime, de ce fait, de penser que la teneur en HAP dans les particules va également être en augmentation. Une étude européenne, sur la caractérisation des signatures des particules à l'échappement et dans l'air ambiant, fournit des informations de teneurs en HAP en µg/g allant dans ce sens.

	NAPH	ACY	ACE	FLUO	PHEN	ANTH	FLRT	PYR	B(a)A	CHRY	B(b)F	B(k)F	B(a)P	INDENO	B(ghi)P	DB(ah)A
IDI	—	—	—	2,1	18,5	0	2,8	1,8	0,3	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	0,13	0
DI	—	—	—	3,8	108,8	0	22,9	13,7	0,4	2,6	5,4	0,7	0,8	0,3	0,7	0

Source Larsen & al. 2000 d'après thèse F. Collin ADEME/PSA - déc. 2000

Moteur à essence

Jusqu'alors peu renseignée, la connaissance des émissions particulières des motorisations automobiles essence (« allumage commandé ») a progressé au travers d'études, initiées dans le cadre du programme de recherche PRIMEQUAL/PREDIT par plusieurs laboratoires, comme le CRMT ou l'IFP.

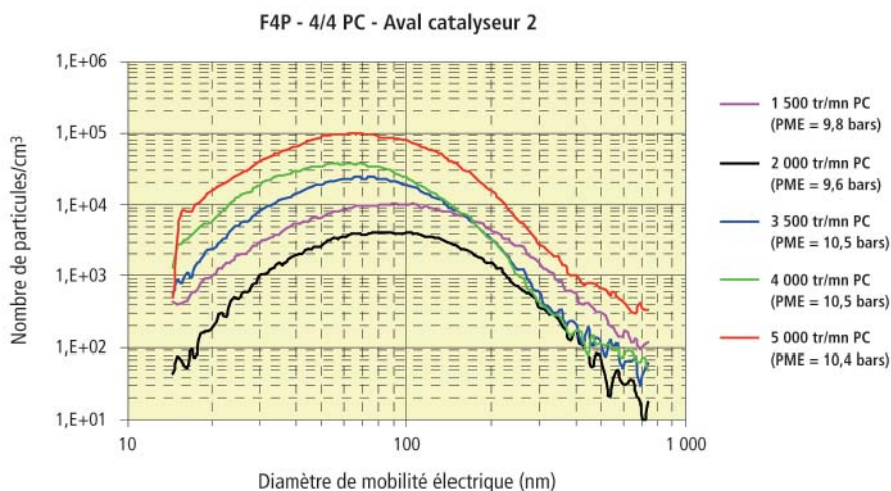
Comme montré précédemment, les émissions de particules étaient initialement quantifiées en masse totale, ce qui n'a pas conduit à la mise en place de travaux sur les rejets particuliers des motorisations essence. Les nouvelles techniques de mesures (caractérisation granulométrique) et l'émergence de nouvelles technologies essence (injection directe) ont relancé l'intérêt des mesures des particules émises par ces moteurs.

Les particules émises par les motorisations essence conventionnelles (réglage stœchiométrique et catalyse 3 voies) sont de tailles majoritairement inférieures à celles émises par les Diesel et même si la masse reste faible, leur nombre peut être parfois plus important que dans le cas du Diesel.

Pour les motorisations à injection directe d'essence, les modes de combustion à fortes hétérogénéités de richesse du mélange carburé (charge stratifiée) sont propices à une genèse de particules en quantité et en masse non négligeables.

Effet du régime

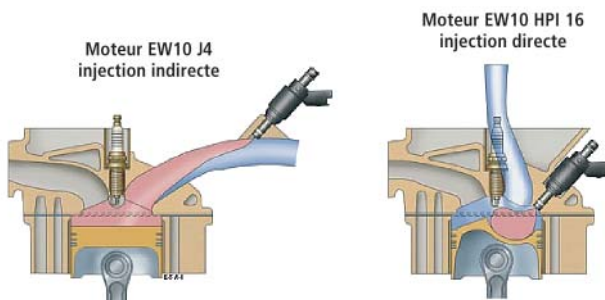
On assiste globalement à un décalage du diamètre médian vers les plus fines tailles, à mesure que le régime augmente, comme peut le montrer la figure ci-dessous.



Distribution des particules sur moteur à essence F4P, évolution du diamètre médian avec le régime (Di Pancrazio 2003).

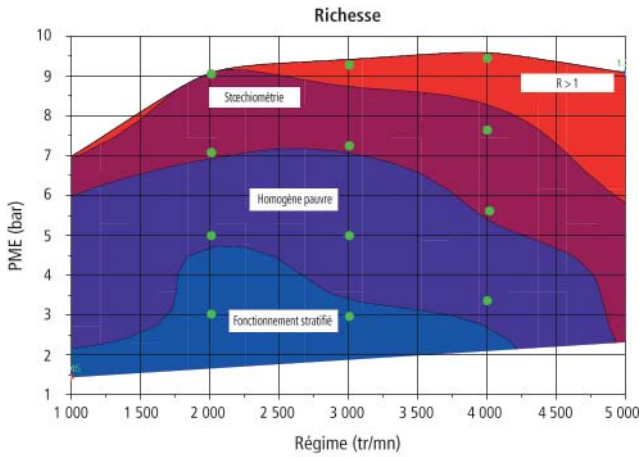
Présentation des technologies actuelles des moteurs à allumage commandé

En général, ces moteurs emploient un mélange air-carburant préparé en amont des soupapes d'admission ; ils sont dits à « injection indirecte ». Le mélange peut être alors stœchiométrique, pauvre ou riche.



Source PSA Peugeot Citroën

De nouveaux processus de combustion et des systèmes d'injection associés ont été développés. Mitsubishi (GDi) était le premier fabricant de voiture à concevoir un moteur à injection directe d'essence, avec un rapport air/carburant variable selon le régime et la charge du moteur.



Modes de fonctionnement du moteur Mitsubishi GDi.
Source IFP

Sur ce moteur, l'essence est injectée directement dans la chambre de combustion. Les principaux avantages sont la vaporisation de carburant dans la chambre, qui permet d'accroître le rapport de compression et d'employer un mélange stratifié (c'est-à-dire riche autour de la bougie, et pauvre à très pauvre dans le reste de la chambre, avec une richesse globale autour de 0,5). PSA Peugeot Citroën (moteur HPi), Volkswagen (moteur FSi) et Fiat Alfa Roméo (moteur JTS) ont développé le même principe de combustion. Renault, par contre, a développé un moteur à injection directe fonctionnant uniquement sur le mode homogène stœchiométrique (moteur IDE). Des émissions de particules ont été mesurées sur le moteur à essence en commençant par le cas du mélange stratifié parce qu'on a supposé que cette hétérogénéité, comme dans le moteur Diesel, était à l'origine de la création des particules, puis en examinant également des motorisations essences conventionnelles (injection indirecte) et à injection directe stœchiométrique.

Résultats en matière d'émissions de particules

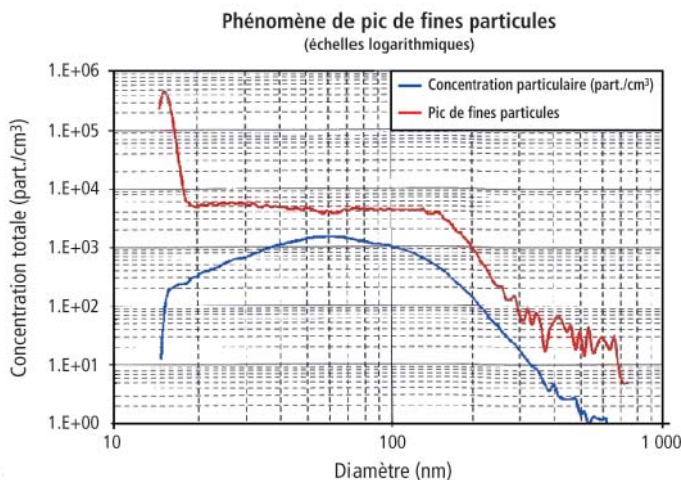
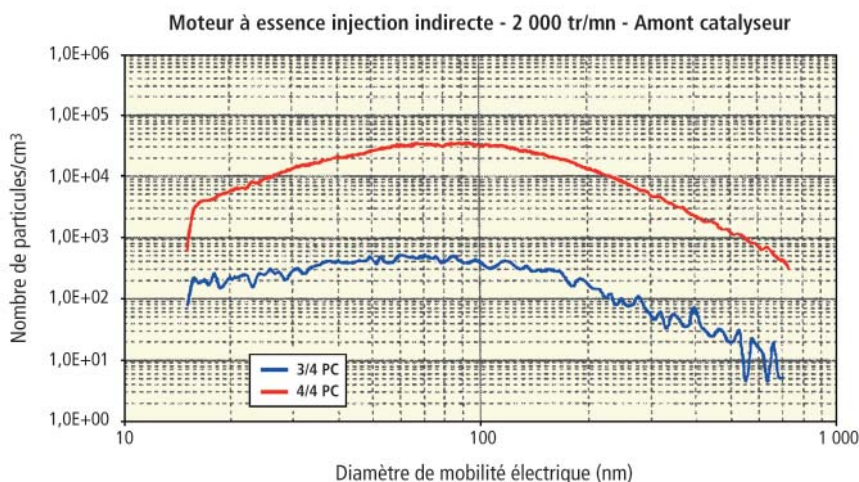
Les émissions de particules ont été évaluées à la fois en termes de mesure massique normalisée (g/km), d'analyse granulométrique et de composition chimique.

Le moteur à injection indirecte (stœchiométrique)

L'émission de petites particules (~ 10 nm) est constatée, mais le diamètre moyen est de 50 nm. Ces particules sont créées en mode de nucléation et sont constituées seulement d'hydrocarbures en phase gazeuse sans noyau carboné. Les paramètres influençant les émissions de particules sont le rapport air/carburant et la pression d'échappement.

Plus particulièrement dans les fonctionnements à forte charge, on retrouve une distribution d'émissions de particules selon une loi log-normale similaire au profil Diesel avec un niveau de concentration totale toutefois beaucoup plus faible.

Une illustration des niveaux atteints en fonctionnement en pleine charge et trois quarts de charge sur un moteur essence à injection indirecte stoechiométrique est donnée ci-après, ainsi qu'une illustration lors de la réitération d'essais de l'apparition possible (non systématique) de pics de nucléation (fines particules).



Injection Indirecte Essence (exemple de répétition d'essais).

Source IFP pour ADEME - avril 2000

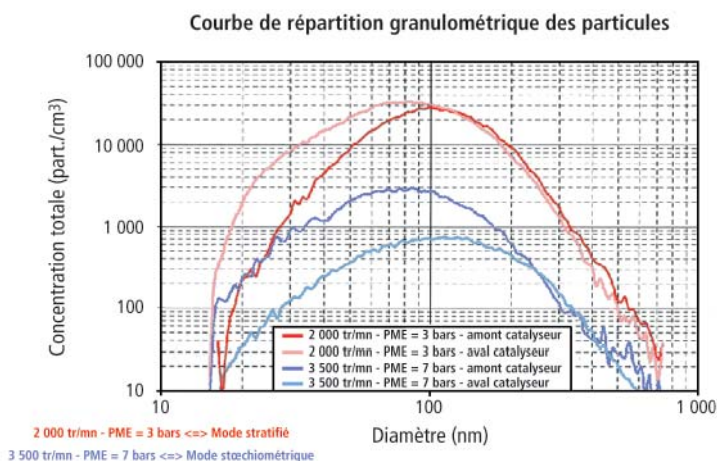
Le moteur à injection directe

Motorisation à injection directe en mode stoechiométrique

On observe pour ce type de motorisations une distribution granulométrique de type loi log-normale centrée sur des tailles de 60 à 80 nm avec selon les moteurs testés, des niveaux d'émissions proches ou plus élevés que ceux constatés dans le cas des motorisations à injection indirecte.

Motorisation à injection directe en mode stratifié

Dans cette configuration, on obtient également un profil granulométrique log normal centré autour d'un diamètre plus élevé, 100 nm, assez analogue au profil type des motorisations Diesel. Pour le cas d'un moteur capable de fonctionner dans les modes stratifiés pauvre et stoechiométrique, on a vérifié que les rejets de particules étaient 10 fois plus importants que pour le mode injection directe stoechiométrique.

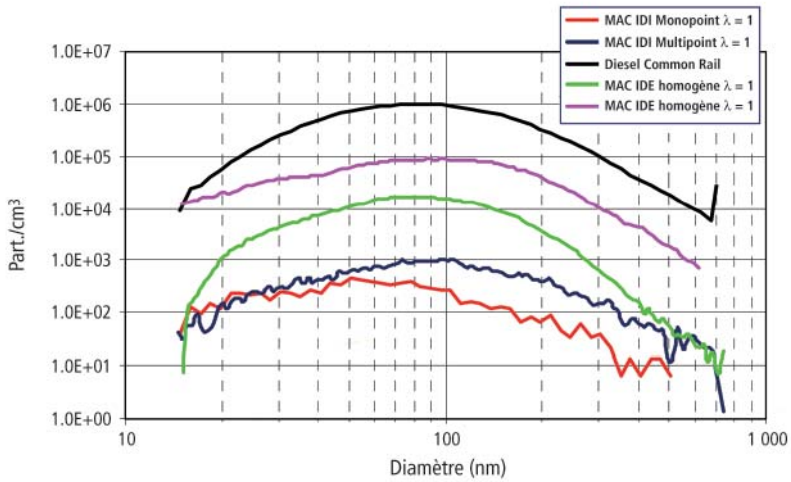


Injection Directe Essence (avant et après catalyseur).

Source IFP pour ADEME - avril 2000

Ces travaux sur les différentes motorisations confirment l'influence forte des technologies moteur essence sur les émissions de particules qui, dans certains cas, se rapprochent des rejets des motorisations Diesel non filtrées. Une comparaison des profils d'émissions pour différentes technologies moteur est illustrée dans le graphique page suivante.

Comparaison à 2 000 tr/mn - 80 %
Particules - Granulométrie

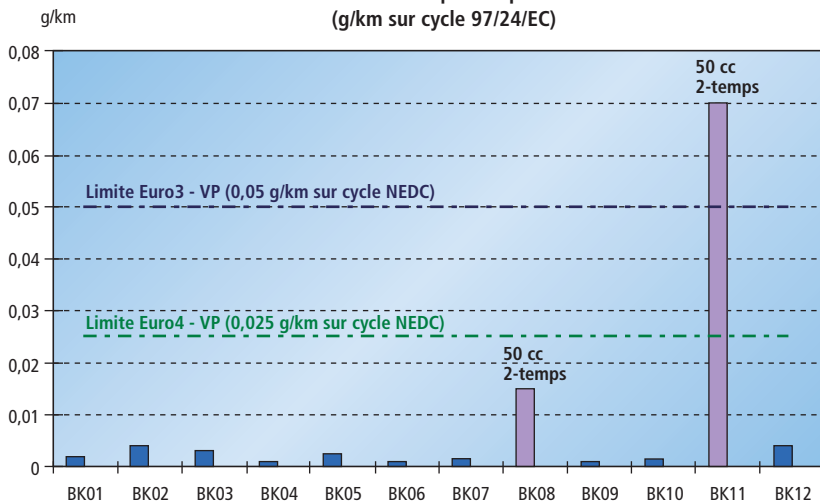


Cas des motorisations des deux-roues

Les rejets particuliers des véhicules à deux-roues fonctionnant avec un cycle à quatre-temps s'apparentent naturellement à ceux des motorisations automobiles essence (motorisation à allumage commandé). Pour les deux-roues possédant un fonctionnement sur cycle à deux-temps, les émissions s'avèrent plus importantes.

Les niveaux d'émissions en masse des particules sont très bas – à l'exception notable des cyclo-moteurs à fonctionnement deux-temps – avec des niveaux pour les quatre-temps de 0,002 g/km à 0,006 g/km largement inférieurs à la valeur limite Euro4, prévue en 2005 pour les véhicules particuliers sur leur cycle d'homologation NEDC, fixée à 0,025 g/km et de ce fait comparables aux

Émissions massiques de particules
(g/km sur cycle 97/24/EC)



rejets des véhicules à motorisations essence conventionnelles (généralement $< 0,001$ g/km) ou Diesel équipés en filtres à particules ($\sim 0,004$ g/km). Pour les deux motorisations deux-temps testées dans ce programme, les valeurs atteintes sont nettement plus élevées avec respectivement 0,015 et 0,07 g/km.

Pour ce qui est du nombre total de particules émises au km, il s'apparente à celui des véhicules particuliers, avec de l'ordre de $0,8 \times 10^{12}$ à $1,3 \times 10^{13}$ unités⁽¹⁾.

Le profil granulométrique s'avère délicat à déterminer pour les motorisations 4-temps avec la métrologie utilisée et les faibles quantités de particules recueillies (une analyse SMPS aurait sans doute permis d'en savoir plus). Pour les deux cas de motorisations 2-temps, où la quantité émise est plus élevée, on retrouve en revanche un profil de spectre (masse/taille) typique des motorisations à combustion interne, avec une loi log-normale mono-modale centrée sur une médiane correspondant au plateau 320-560 nm.

Des éléments sur le profil granulométrique (nombre/taille) par SPMS figurent dans d'autres études, notamment les études de l'école d'ingénieur de Bienne en Suisse (HTI-BFH : Hochschule für Technik und Informatik - Berner Fachhochschule) sur les rejets particuliers des deux roues :

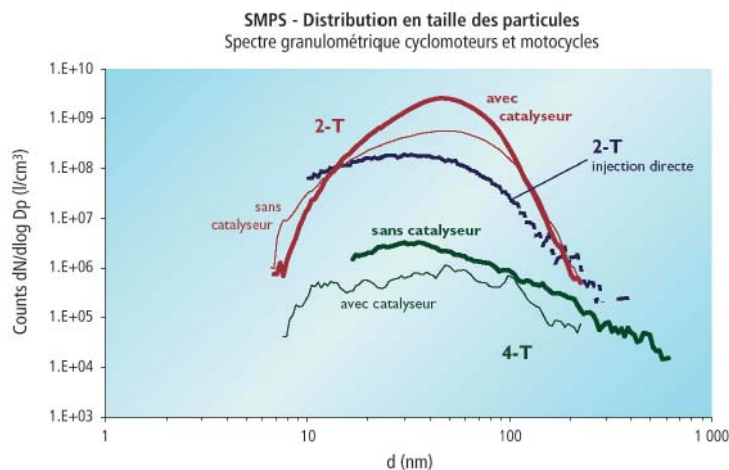
- étude d'un petit 2-temps 50 cm³ et d'un petit 4-temps 125 cm³ ;
- étude des motorisations nouvelles de type 2-temps à injection directe (Peugeot TSDI, Aprilia Ditech) ;
- étude des nanoparticules de deux motocycles 4-temps de fortes cylindrées.

Elles fournissent les informations principales suivantes :

- les particules fines de diamètre 45 nm sont dix fois plus nombreuses que celles de diamètre 95 nm ;
- effet favorable du catalyseur en masse : réduction de 50 à 90 % de la quantité de particules émises ;
- effet variable du catalyseur sur le nombre : réduction pour le 4-temps, augmentation pour le 2-temps (vraisemblablement du fait du réglage du ratio air/carburant) d'où l'intérêt d'approfondir le processus de formation des particules dans le cas des deux-roues ;
- émission moindre de particules pour le moteur 2-temps IDE avec niveau comparable au 4-temps, mais au détriment d'un accroissement des NO_x.

Les profils de distributions granulométriques en nombre/taille par analyse de mobilité électrique (SMPS), présentés page suivante, confirment la similitude avec les profils classiques des émissions particulières des motorisations thermiques automobiles.

1. Les résultats du projet européen PARTICULATES (SAE 2004-01-1985) fournissent une indication sur les quantités de particules émises au kilomètre dans le cas des véhicules particuliers : sans FAP, le nombre de particules sur cycle réglementaire NEDC des véhicules légers Diesel se situe dans une plage allant de $0,6$ à 2×10^{14} . Des niveaux moindres, mais proches, sont obtenus pour les véhicules essence à injection directe ($0,3$ à 5×10^{13}) et des niveaux plus faibles pour les véhicules essence conventionnels (4×10^{11} à 7×10^{12}) et bien entendu pour les Diesel équipés en FAP ($1,5 \times 10^{10}$ à 4×10^{12}).



Émissions de particules pour différentes motorisations 2-temps, 4-temps, avec/sans catalyse, moteur chaud, vitesse constante : 30 km/h.
Source : BUWAL/École d'Ingénieurs de Bienne - déc. 2002

EFFET DES DISPOSITIFS DE DÉPOLLUTION

Aux actions permettant la réduction de la formation des particules lors de la combustion, s'ajoute la possibilité de traiter les gaz d'échappement à l'aide de dispositifs spécifiques.

Catalyseur 3-voies (motorisation essence)

Action sur les particules carbonées

- Une réduction des fractions solubles, entraînant une diminution du diamètre médian de la distribution, sans pour autant modifier significativement la concentration totale des particules.
- Un phénomène d'agglomération provoquant une réduction du nombre total de particules, avec une augmentation du diamètre médian.
- Un phénomène de fractionnement, provoquant un accroissement du nombre total de particules, accompagné d'une diminution du diamètre médian de la distribution.

Il est important de remarquer que ces deux derniers phénomènes conduisent à des effets inverses.

Action sur les particules volatiles

- Une disparition des HC, provoquant un effondrement du nombre total de particules et une augmentation du diamètre médian de la distribution.

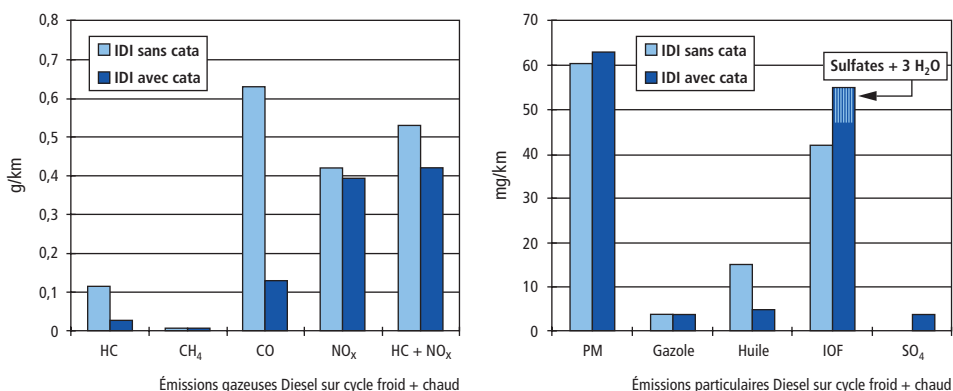
- Une conversion des sulfites (SO_2) en sulfates (SO_3) par le catalyseur, ce qui a pour effet d'augmenter le nombre de fines particules provoquant une augmentation de la concentration totale et une diminution du diamètre médian de la distribution.

Note : pour l'heure il n'est pas mis en place de système de traitement des particules émises par les MAC. De tels systèmes pourraient voir le jour, si une réglementation apparaissait avec des seuils plus sévères en masse ou des seuils en nombre/taille/concentration : rappelons que, pour l'étape Euro5 en 2010 pour les VL, seule une limite massique est envisagée pour les moteurs à injection directe d'essence en mélange pauvre. Dans ce cas de figure, les voies filtres ouverts et/ou filtres catalytiques seraient certainement retenues. Des travaux anglais sont actuellement menés sur un FAP imprégné, associé à un effet électrostatique, pour des applications aux motorisations essence (Projet Foresight - Gaspert).

Catalyseur d'oxydation (motorisation Diesel)

La mise en œuvre d'un catalyseur d'oxydation permet un abaissement sensible des rejets de composés CO et HC, mais affecte dans une moindre mesure les émissions massiques de particules. Généralement, on observe plutôt une légère augmentation (dans certains cas jusqu'à plus 30 %) de la masse des particules mesurées en sortie du catalyseur. Malgré une baisse de la fraction organique soluble (SOF) et une fraction carbonée (IOF) stable, la formation de sulfates et la combinaison de molécules d'eau avec H_2SO_4 au sein du catalyseur expliquent cette augmentation. En effet, lorsqu'il y a un catalyseur, l'énergie d'activation requise pour convertir SO_2 en SO_3 est considérablement réduite et environ 30 à 40 % du SO_2 peuvent être convertis en SO_3 conduisant à la production de H_2SO_4 .

L'action du catalyseur permet par ailleurs (cf. la diminution de la fraction SOF) de diminuer les rejets d'HAP et nitro-HAP.

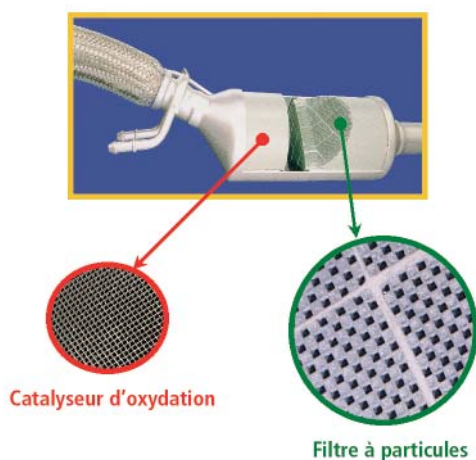


Effet d'un catalyseur d'oxydation sur les émissions gazeuses et particulaires d'une motorisation Diesel (Moteur Injection Indirecte).

Source PRIMEQUAL-ADEME RENAULT/PSA

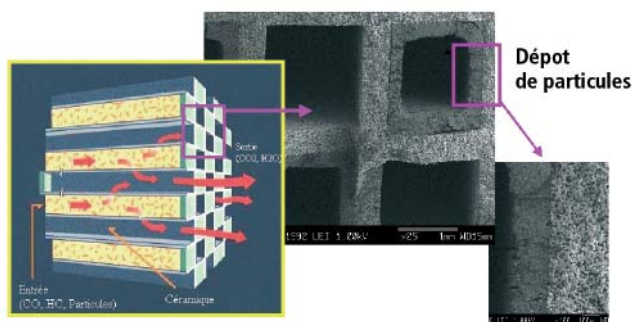
Filtres à particules couplés avec un catalyseur d'oxydation (motorisation Diesel)

Une stratégie de traitement consiste à oxyder au maximum les phases vapeur et les fractions solubles à l'aide d'un pot catalytique d'oxydation, puis à piéger les particules restantes au moyen d'un filtre et enfin à régénérer périodiquement le filtre par brûlage des suies qui y ont été piégées. Ce dernier point suppose que la présence, dans les suies, de sulfate incombustible soit limitée et nécessite donc l'utilisation d'un gazole à basse teneur en soufre.



Traitement des phases vapeurs et solubles et particules solides par l'association catalyseur d'oxydation + filtre à particules.

Source ADEME



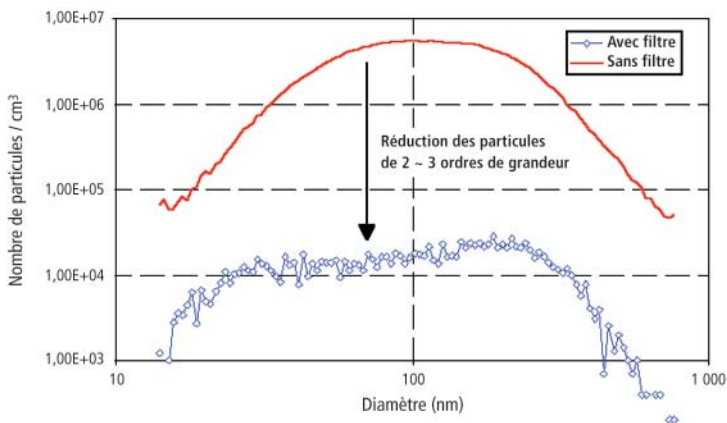
Principe de piégeage des particules sur céramique poreuse.

Source IFP pour ADEME

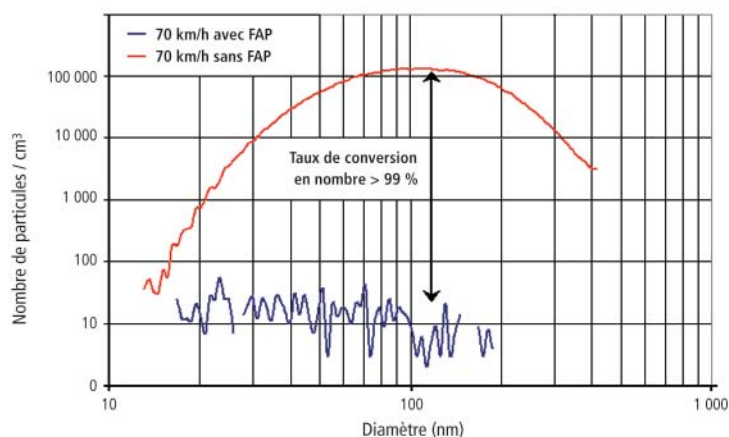
Le filtre à particules, qui a fait l'objet de très nombreuses recherches, représente une réponse efficace au problème posé par les émissions de particules Diesel. La véritable difficulté concerne la régénération périodique du filtre, qui doit permettre de limiter les niveaux de contre-pression atteints, sans entraîner de dégradation du matériau filtrant. Une solution pour la maîtrise de la régénération, explorée depuis fort longtemps, consiste à utiliser un additif au carburant, basé sur un métal ou une terre rare par exemple, et qui, mêlé intimement aux particules déposées dans le filtre, permet d'abaisser la température d'initiation de leur combustion.

Les études d'évaluation du fonctionnement de l'ensemble de ces dispositifs de traitement en aval du moteur et de leur efficacité, notamment en ce qui concerne leur influence sur la masse et la granulométrie des particules, conduites par l'IFP dans le cadre du programme PRIMEQUAL/PREDIT, donnent les résultats suivants :

- La présence d'un pot catalytique d'oxydation, directement en aval du moteur, influe peu sur la quantité de particules pour une température donnée du pot. En agissant sur la fraction soluble, il permet cependant une réduction de la masse des particules. Par ailleurs, pour des températures élevées de fonctionnement, on constate une diminution du nombre de particules, qui s'accompagne d'un léger décalage du spectre granulométrique vers des tailles un peu plus importantes ; les particules les plus fines ont été brûlées par le dispositif.
- Les additifs, en l'absence de filtre, ont une influence marginale sur la distribution en taille des particules et n'entraînent qu'une légère diminution de leur nombre total, malgré une réduction parfois sensible de la fraction sèche et surtout des fumées.
- Plusieurs types de filtres ont été testés. Dans le cas des filtres à parois poreuses dits « wall-flow » (Corning, HJS), la distribution granulométrique est décalée vers les gros diamètres (~ 250 nm / 300 nm) à faible charge moteur, et la réduction du nombre de particules est importante. Les figures suivantes illustrent l'efficacité drastique des systèmes de filtration sur le nombre des particules.



Influence du filtre Corning sur la distribution en taille des particules émises par le moteur VW 1,9 l TDI.



Influence du filtre Carbone de Silicium PSA sur la distribution en taille des particules émises par le moteur 2,2 l HDI.

- Outre la très grande efficacité d'élimination des fines particules, les filtres éliminent quasiment totalement les fractions HAP.
- Lors de la régénération, les filtres rejettent ou recréent des particules. L'étude a montré que ce relargage se faisait selon une distribution en taille identique à celle mesurée en amont, et que la quantité de particules rejetées est de l'ordre de 10 fois supérieure au niveau aval du filtre en fonctionnement normal, mais reste très inférieure au niveau amont du filtre. La régénération étant un phénomène temporaire, la ré-émission de particules est statistiquement négligeable et l'efficacité globale de ces systèmes reste élevée.

Filtres à particules catalytiques (motorisation Diesel)

Pour permettre une régénération à basse température sans recourir à un additif, il est également possible d'utiliser la solution d'une imprégnation catalytique de la céramique poreuse. On peut citer à titre d'exemple les filtres à particules proposés par Engelhard pour des applications sur véhicules lourds (voir partie « Évaluation » du document), ou encore les filtres catalytiques retenus par les constructeurs Audi, VW, BMW, GM Opel... pour les véhicules légers.

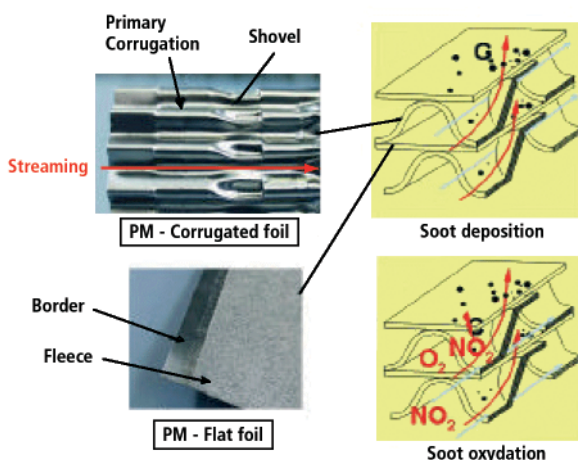
Les performances en filtration de ce type de filtres sont logiquement similaires à celles des filtres à particules précédemment cités, à la réserve près qu'un fonctionnement en carburant à faible teneur en soufre (50 ppm et moins) est vivement conseillé (une teneur en soufre plus importante, bien que possible, entraîne une diminution de l'efficacité par augmentation de la présence de sulfates dans les particules obtenues en aval du FAP).

Filtres à particules ouverts

Les technologies présentées précédemment possèdent une haute efficacité de filtration, qui se paye d'ailleurs par une légère contre-pression, et une gestion obligatoire de l'encrassement et des phases de régénérations (complexité, surconsommation). À l'inverse se développent des procédés visant une efficacité de réduction moindre, mais avec un fonctionnement simplifié.

Pour cela, on utilise un post-traitement de type « filtre ouvert », où les gaz d'échappement ne traversent pas de parois en céramique, mais circulent dans des canaux (à l'instar des pots catalytiques). On les qualifie de « Flow Through », par opposition au « Wall-Through » des FAP précédents. Ils possèdent, par conception, une efficacité moindre, avec une forte sensibilité au débit des gaz et opèrent par un mode d'action d'oxydation des suies, sensible à la température.

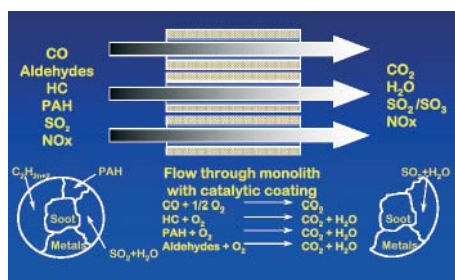
Un exemple de réalisation est le filtre à particules PMFC, proposé par la société Emitec. Il s'agit d'un filtre à support métallique (feuillards plissés), recouvert d'un matériau fibreux, la forme du filtre constituant un ensemble de canaux munis d'encoches pour générer des perturbations de l'écoulement et engendrer la déposition des suies à oxyder. Le schéma ci-contre illustre ce principe.



D'autres fournisseurs développent également de tels filtres. On peut citer CleanAir Sys Inc (CleanAir FTF™), Johnson Matthey (PFT®).

À ce jour, l'évaluation de l'efficacité de ces systèmes et la caractérisation granulométrique des particules en aval n'a pas encore été menée dans le cadre du programme de recherche ADEME PREDIT. Les résultats connus sont ceux présentés par les fournisseurs. Il conviendra de les valider lors de la poursuite du programme ADEME sur les particules.

L'action des filtres à particules ouverts avec imprégnation catalytique permet en fait de traiter la SOF – à la manière de la catalyse d'oxydation citée plus haut – à savoir la fraction hydrocarbonée adsorbée sur la suie et les HAP, mais ils n'agissent pas ou peu sur la IOF (noyaux carbonés, métaux, sulfates).



BILAN DU PROGRAMME DE RECHERCHE

Les différentes phases du programme de recherche ont permis de :

- mettre en évidence les processus de formation des particules et leurs différents modes d'apparition ;
- quantifier l'influence des paramètres moteurs, post-traitements et carburants (cet aspect devra être traité plus particulièrement pour les nouvelles technologies essence injection directe stratifiée, Diesel à haute pression injection, ...) ; le développement des systèmes de post-traitement a permis de réduire d'un facteur 100 à 1 000 (en nombre) les émissions de particules sur l'ensemble du spectre granulométrique ;
- valider les moyens de métrologie mis en œuvre pour l'analyse de la taille et de la composition chimique.

Les actions techniques, initiées en réponse à la mise en place des réglementations européennes en faveur de la diminution des émissions, montrent que, dans le domaine des émissions de particules où la question importante de leur taille n'était pas abordée par la réglementation, leur efficacité en termes de réduction massive ne s'accompagne pas d'une mutation significative de la distribution granulométrique. Cette conclusion n'est pas évidente à émettre, puisqu'elle pose le problème de la pertinence de l'approche adoptée par la réglementation.

Par ailleurs, il s'avère essentiel de coupler l'évaluation granulométrique des particules avec des analyses chimiques (métaux, HAP...) pour les différentes classes de taille. L'évaluation des transformations tant physiques que chimiques que subissent les particules une fois émises, constitue un champ d'investigation complémentaire important.

Les conclusions de ce programme de recherche, conduit dans le cadre de PRIMEQUAL/PREDIT, sont cohérentes et complémentaires avec les résultats des études étrangères : on peut citer en particulier les travaux menés dans le cadre du programme VERT (Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau) visant la limitation des émissions des motorisations à combustion interne dans les tunnels routiers, notamment par l'utilisation de filtres à particules ; les actions présentées aux sessions « ETH conference on Nanoparticle measurement » ; les études menées par le consultant Ricardo pour le compte du consortium pétrolier CONCAWE, de l'industrie automobile anglaise et du ministère anglais de l'environnement ; le rapport sur les émissions de fines particules sous l'égide du ministère des transports suédois ainsi que le programme de l'ACEA sur les particules.

Pour consolider les résultats de ce programme de recherche, il conviendra :

- d'une part d'actualiser les connaissances des impacts des technologies sur les rejets particuliers, notamment pour les nouveaux modes de combustion (combustion homogène HCCI et CAI réputée très faiblement émettrice de particules) et les nouveaux systèmes de post-traitement, comme les filtres à particules ouverts (partiels) ;
- d'autre part d'améliorer la compréhension des phénomènes de formation, puis de transformation dans l'atmosphère des particules automobiles.



DEUXIÈME PARTIE

LES RÉSULTATS DES PROGRAMMES D'ÉVALUATION

L'objectif des évaluations est de quantifier, en situation réelle, les performances environnementales et économiques d'une technologie, et ceci avec une notion de durabilité, mais aussi de pouvoir comparer les technologies entre elles en utilisant une méthodologie rigoureuse.

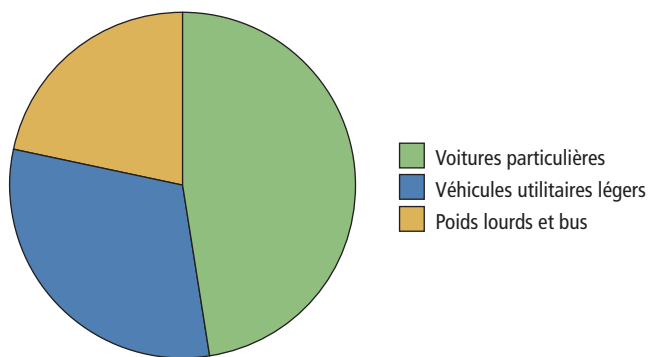
La réduction des émissions de particules ne peut être abordée de la même façon pour les véhicules particuliers et utilitaires, et les véhicules lourds. Compte tenu de leur durée de vie et de leur coût d'investissement, les véhicules lourds disposent de deux voies pour réduire leurs émissions :

- les actions à mettre en œuvre pour dépolluer le parc existant : on peut agir sur les carburants et/ou sur les systèmes de traitement des gaz d'échappement pour en éliminer les composés polluants ;
- les choix à effectuer lors du renouvellement des flottes : il convient dans ce cas d'opter pour des véhicules dont les émissions sont plus faibles que celles des véhicules Diesel de norme équivalente.

Pour réduire les émissions de particules, plusieurs voies sont particulièrement étudiées :

- les filtres à particules sur les véhicules légers et lourds en première monte et en rétrofit (seconde monte) sur les véhicules lourds ;
- les carburants : les émulsions eau-gazole, notamment sur les véhicules lourds.

Le graphique page suivante présente la répartition des différentes sources de particules issues du transport routier en 2000.



Sources des particules issues du transport routier.
Source CITEPA

Ceci se traduit par des programmes d'études distincts, d'un coté des études sur les bus, les bennes à ordures, les poids lourds de transport de marchandises, et de l'autre, des études sur les véhicules légers. La dépollution des transports ferroviaire et fluvial, des engins de travaux publics et de travaux agricoles reste à mener.

Le secteur professionnel chargé d'assurer les transports urbains a montré son intérêt pour ces systèmes de réduction des émissions de particules. En effet, les mesures liées à la réduction des pollutions atmosphériques et sonores revêtent une importance particulière en ville. Elles illustrent dans bien des cas l'image environnementale que la municipalité veut se donner et contribuent à renforcer l'attractivité des transports en commun.

Un programme « bus propres » est donc lancé en 1999. Il montre que les performances des filtres à particules ont progressé et que ces technologies sont fiables et applicables sur la majorité de ces véhicules. Compte tenu des résultats, l'ADEME propose une aide à l'achat de FAP faisant partie des filtres testés.

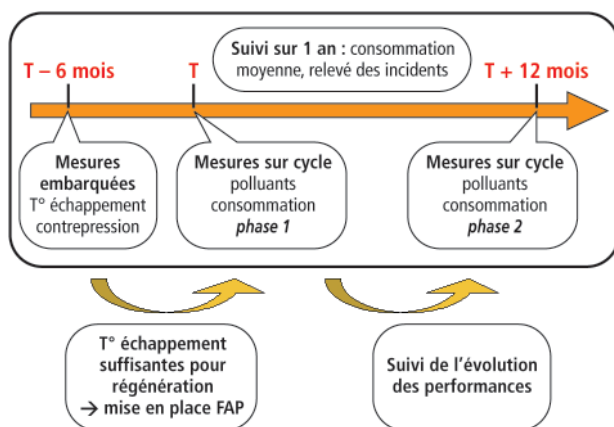
La collecte des déchets en milieu urbain est aussi problématique pour les collectivités en raison des pollutions générées par cette activité (notamment les émissions de particules et le bruit). L'ADEME évalue depuis 2000 les différentes technologies de FAP disponibles sur le marché dans cette application très particulière (programme BOM).

L'application aux poids lourds a été évaluée en 2000 et 2001 avec, d'abord, un seul type de FAP et les résultats ont confirmé le bon fonctionnement du système. Une aide à l'achat a donc été mise en œuvre début 2005 et de nouveaux FAP sont en cours de test.

Concernant les véhicules légers, dès la sortie en 2000 du premier véhicule équipé en série d'un filtre à particules, l'ADEME a souhaité quantifier précisément les gains environnementaux liés à cet équipement et vérifier la tenue dans le temps de ses performances dans le cas d'une utilisation soutenue du véhicule, c'est-à-dire en configuration taxi parisien. La plupart des constructeurs proposent désormais cette technologie sur certains véhicules Diesel en France ou en Europe, et des essais sont prévus pour les évaluer.

LA MÉTHODOLOGIE UTILISÉE POUR LES ÉVALUATIONS

Pour toutes les évaluations portant sur des équipements, la méthodologie utilisée est identique et se schématise de la façon suivante :



Source ADEME

Pour les véhicules légers, la vérification de la température à l'échappement n'a pas été nécessaire, le FAP étant placé « en série » par le constructeur.

LES TECHNOLOGIES ÉVALUÉES

Les constructeurs de véhicules lourds et légers réduisent les émissions de particules en travaillant sur un grand nombre de paramètres, détaillés dans la première partie de l'ouvrage (chambre de combustion, pilotage de l'injection, recirculation des gaz d'échappement, ...). Ces technologies permettent de répondre aux normes d'émissions actuelles.

Pour réduire encore les émissions de particules afin de promouvoir les transports en commun, la collecte des ordures ménagères et les poids lourds en général, en leur donnant une image respectueuse de l'environnement, les autorités organisatrices et les exploitants doivent mener une réflexion à deux niveaux :

- le retrofit (ou seconde monte) pour dépolluer le parc existant (valable pour les véhicules lourds) ;
- la mise en œuvre de nouvelles technologies par le renouvellement du parc (valable pour les véhicules lourds et légers).

Les résultats présentés dans ce document concernent les solutions technologiques suivantes :

- les filtres à particules (adaptables sur les véhicules lourds et légers) ;
- les carburants : les émulsions eau-gazole notamment (utilisables uniquement pour les véhicules lourds).

Il faut rappeler que les véhicules fonctionnant au GNV utilisent un moteur à allumage commandé et émettent en conséquence de très faibles quantités de particules. D'autre part, des systèmes permettant de réduire les NO_x sont actuellement à l'étude et peuvent être couplés aux FAP.

Les filtres à particules

Un document complet réalisé par l'ADEME est disponible sur le site :

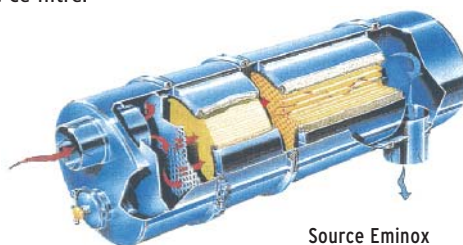
<http://www.ademe.fr/htdocs/publications/publipdf/fap.pdf>

Si, depuis de nombreuses années, la mise au point de filtres à particules s'est heurtée à un problème de tenue mécanique lors des régénérations, des solutions techniquement satisfaisantes ont vu le jour récemment et sont exploitées actuellement à plus ou moins grande échelle sur plusieurs types de véhicules.

Sur les véhicules lourds, différentes technologies de filtres ont été testées par l'ADEME :

Le CRT (Continuous Regenerating Trap)

C'est un ensemble formé d'un catalyseur d'oxydation et d'un filtre à particules. Le principe de régénération est la formation, en amont du filtre grâce au catalyseur, de dioxyde d'azote (NO_2) qui facilite l'oxydation des suies. Deux sociétés commercialisent ce type de produits : HJS et Eminox. Le support est en cordiélite. Un gazole à très basse teneur en soufre (TBTS) est obligatoire pour le fonctionnement de ce filtre.



Source Eminox

Nota : HJS propose également un filtre en métal, dont les performances attendues sont :

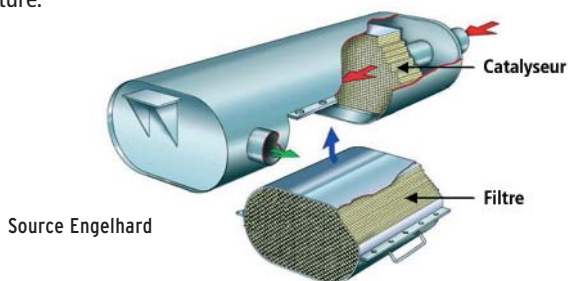
- une réduction de la perte de charge ;
- une plus grande tenue aux contraintes thermiques.



Source Eurolum

Le filtre Engelhard

Le filtre Engelhard utilise un support filtrant en céramique, qui est lui même imprégné de substance catalytique (utilisant des métaux de transition) remplissant la fonction de catalyseur, ce qui permet de baisser la température de régénération aux alentours de 400 °C. Pour ce filtre, compte tenu de la formulation de l'imprégnation catalytique, l'utilisation d'un carburant à très basse teneur en soufre est vivement conseillée, mais non impérative. À noter que la régénération se déroule lentement sur une paroi dotée de revêtement catalytique, ce qui présente des avantages sur le plan de la transformation des substances, mais implique une présence plus longue, dans le filtre, des gaz à haute température.



Le filtre Airmeex

Le filtre Airmeex utilise un additif (fer et strontium) dosé dans le carburant pour la régénération du support. Ce système est compatible avec le gazole aux standards actuels. Si possible, l'ADEME préconise de doser l'additif dans la cuve d'approvisionnement ou de surveiller particulièrement le bon fonctionnement de la pompe de dosage embarquée. Une première version, utilisant un support à base de fibres tressées (fabrication 3M), a été remplacée par un filtre en carbure de silicium (SiC).



Filtre à particules	
Marque	Ibiden
Support	carbure de silicium
Dimensions	L = 10" - D = 9"
Volume	10,4 litres
	200 cell./sq. inch

200 cell./sq. inch signifie 200 cellules par inch² soit 31 canaux par cm².

Source IFP

Nota : les additifs utilisés ne présentent pas de danger pour les utilisateurs (innocuité) ; ils font l'objet de contrôles et ont été déclarés auprès des autorités (fiche de données de sécurité).

Le filtre Comela

Comme le CRT, il utilise un catalyseur suivi d'un filtre. Ce filtre est complété par un ou deux dispositifs :

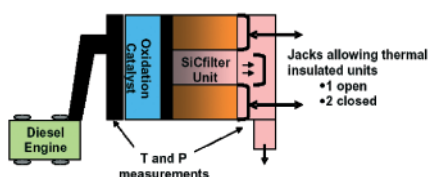
- Le système d'injection de gazole à l'échappement est piloté via un calculateur indépendant, qui contrôle les températures et les contre-pressions d'échappement. Pour améliorer la régénération,

la température d'échappement est augmentée par combustion de ce supplément de gazole. Cette solution augmente bien évidemment la consommation de carburant.

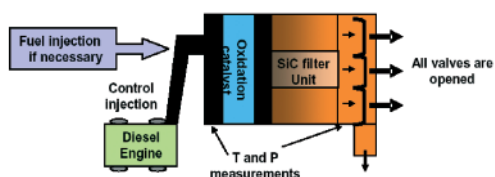
- Le système de clapet permet, dans les phases de ralenti (fonctionnement avec de faibles débits de gaz), la fermeture d'une partie du filtre pour conserver l'autre partie à une température suffisante en y faisant passer l'ensemble du débit des gaz d'échappement.



Source CREED



Position au ralenti.



Position pleine charge.

Source SAE 2004-01-1937

Le filtre Recycl'air

Avec ce dispositif, les suies ne sont pas brûlées lors d'une régénération, mais collectées grâce à des plateaux électrostatiques. Les suies sont ensuite rassemblées dans une partie du filtre pour permettre un fonctionnement sans perte de charge. La maintenance du filtre nécessite l'aspiration des suies recueillies et leur traitement en tant que « déchet spécial ».



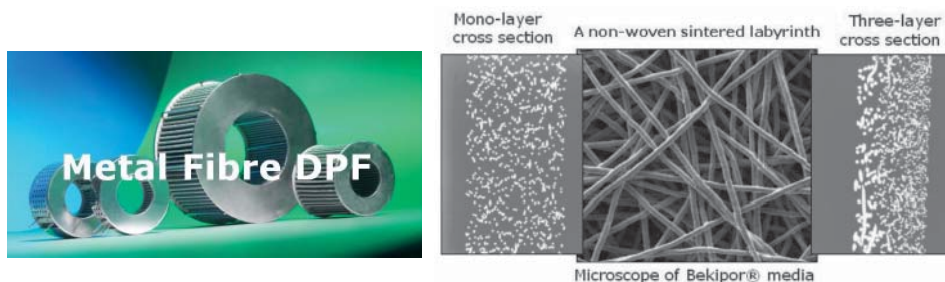
Source CREED

Ces technologies ont été testées par l'ADEME, en partenariat avec des exploitants de flottes de bus, de BOM et de poids lourds. Elles se différencient par la stratégie de régénération et par la nature du support utilisé.

Récemment, d'autres systèmes sont également proposés à l'ADEME et sont à évaluer :

Le filtre Bekaert

Bekaert propose un filtre métallique réalisé en fritté, avec une porosité variable apportée par des fils de diamètres différents (three-layer cross section).



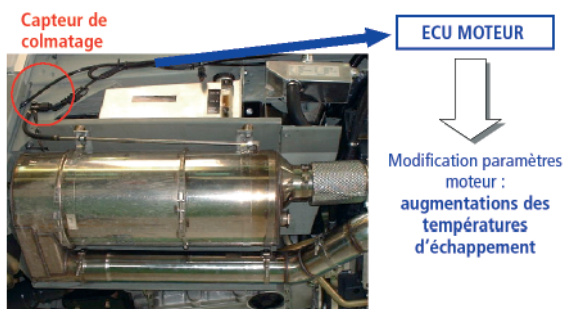
Source Bekaert

Le filtre Lubrizol

Filtre SiC avec catalyseur en amont et également des systèmes à régénération électrique.

Les systèmes de suivi du colmatage des filtres (pour les véhicules lourds)

Ces FAP sont utilisés en retrofit, sachant que les constructeurs de bus, BOM et PL proposent, sur certains véhicules, des FAP en option, lors de l'achat d'un véhicule neuf. Si la technologie de filtration est identique, par contre, la régénération est différente. En effet, l'intégration d'un FAP, lors de la conception du moteur, permet d'améliorer les régénérations en utilisant les paramètres du contrôle moteur, notamment l'avance à l'injection, le taux d'EGR, en mesurant en continu la perte de charge du filtre (capteur de colmatage, voir ci-dessous).

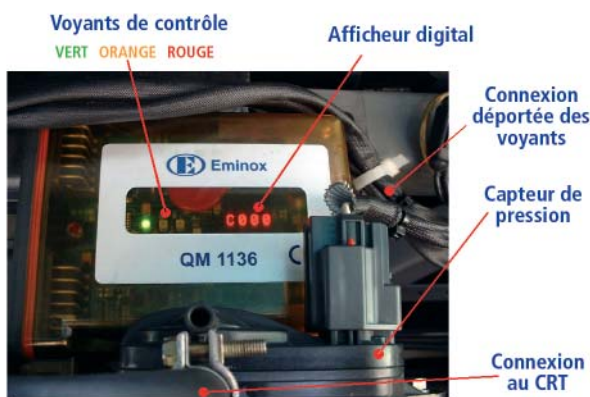


Source Eminox

Certains fournisseurs de FAP proposent également :

- des machines pour effectuer la maintenance des filtres. Cette maintenance doit s'effectuer une à deux fois par an selon les applications ;
- des systèmes de suivi et d'alerte des pressions et températures à l'échappement. Ces systèmes permettent de faire un diagnostic préalable, avant la mise en place des filtres, et de suivre l'évolution des performances.

Voir par exemple, le système proposé par EminoX : <http://www.eminox.com/cserv/esi.pdf>



CRT : Continuous Regenerating Trap (filtre à régénération continue).
Source EminoX

La maintenance des FAP (pour les véhicules lourds)

Pour effectuer les opérations de nettoyage des filtres, deux options sont possibles selon le nombre de filtres à traiter :

- la sous-traitance au fournisseur de l'opération de maintenance ; le fournisseur va alors utiliser ses machines et effectuer les contrôles de conformité ;
- l'achat d'une ou plusieurs machines.

La RATP a décidé, compte tenu du nombre de filtres à particules en circulation (à terme environ 3 500 bus équipés, soit la plus grande flotte de véhicules lourds), d'acheter et d'évaluer, avec l'aide de l'ADEME, deux machines disponibles sur le marché : EminoX et Comela. Les systèmes sont en utilisation sur son site des Ateliers de Championnet (Paris, 18^e arr.), afin d'assurer les opérations de maintenance. Cette évaluation est réalisée sous deux angles :

- quantification des émissions et consommations énergétiques des machines lors du nettoyage. Ces valeurs sont à ramener au kilomètre parcouru et à ajouter aux émissions d'un bus pour faire des bilans complets, du puits à la roue ;
- quantification des performances du filtre après nettoyage.

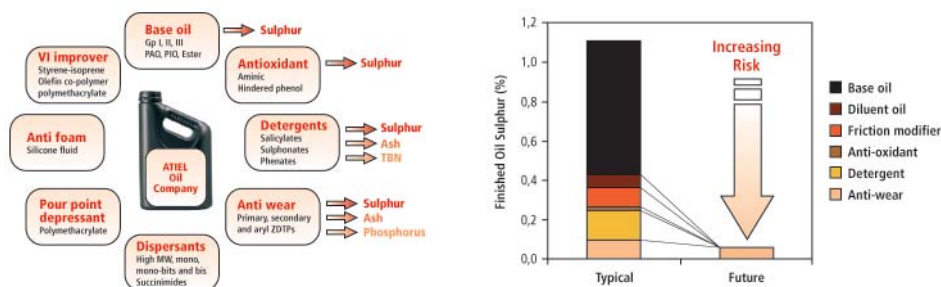
Dans un premier temps, les industriels fournisseurs de filtres ont mis au point des procédés de nettoyage des filtres, basés sur le principe du soufflage à une extrémité du filtre et d'aspiration à l'autre extrémité ; le filtre étant ensuite remonté dans le sens inverse de son utilisation initiale. L'ensemble du parc actuel (plusieurs milliers de filtres en exploitation) utilise ce procédé. La RATP a mis en œuvre ce procédé au moyen de deux machines qu'elle avait fait construire dans ses ateliers. La mise en œuvre du procédé sur les bus de la RATP a permis de constater que se produisaient des rejets de bouffées de cendres et de suies lors de la remise en exploitation. Cette situation a été considérée comme inacceptable, les dépôts de bus se trouvant en zone urbaine dense. Ce procédé ne permettait donc pas d'obtenir un nettoyage complet du filtre, ce qui se traduisait, sur le terrain, par des rejets de cendres au cours des vingt premiers kilomètres d'exploitation et d'une remontée rapide des contre-pressions.

Les nombreux travaux réalisés à la RATP ont permis de mettre en évidence qu'il existe deux sous-produits dans le filtre à régénérer.

Les cendres

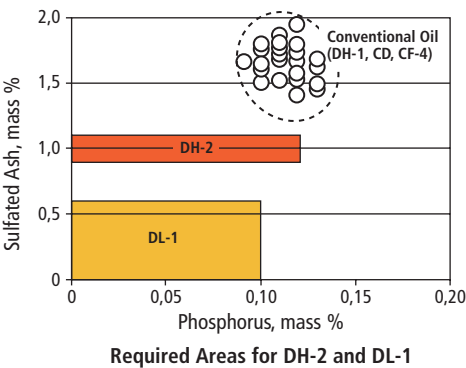
Ce sont des résidus d'une combustion complète (fonctionnement optimal du filtre) provenant essentiellement du lubrifiant. La consommation d'huile du moteur doit être la plus faible possible pour limiter la quantité d'huile captée par le filtre. Une consommation de 1 à 2 litres / 1 000 km semble être le maximum autorisé.

D'autre part, les pétroliers développent des lubrifiants dits low SAPS (Sulphated Ash, Phosphorus and Sulfur). En effet, la réduction de la teneur en soufre du gazole (qui va tendre vers 10 ppm en 2009) doit s'accompagner d'une réduction du soufre dans le lubrifiant (consommation d'huile 1 000 fois plus faible que la consommation de gazole, mais teneur en soufre 1 000 fois plus forte avec une huile à 1 % de soufre) pour permettre l'utilisation de catalyseur et de système DeNOx. De plus, les cendres doivent être réduites pour limiter le colmatage des filtres à particules. Enfin, le phosphore est un poison pour le catalyseur, qui réduit l'activité de celui-ci.



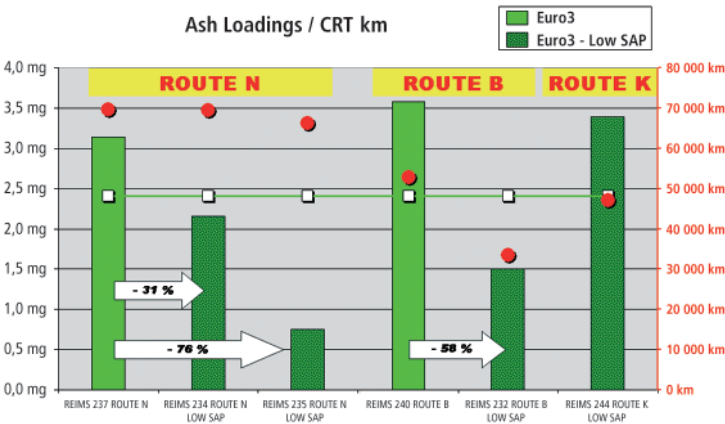
Source ATIEL

Par exemple, les spécifications des futures huiles au Japon présentent les niveaux maxima de cendres sulfatées et de phosphore suivants :

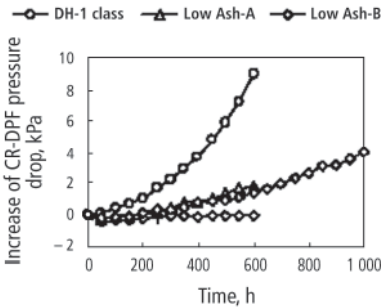


Source SAE 2004-01-1955

L'évolution de la contre-pression ou de la quantité de cendres collectées en fonction de la teneur en cendres sulfatées montre bien l'intérêt de réduire son taux. Les performances du lubrifiant doivent cependant être conservées.



Source Eminox



Source SAE 2004-01-1887

Les composants principaux accumulés à la surface du FAP sont le CaSO_4 provenant des sulfonates de calcium (additifs détergents dispersants), puis le $\text{Zn}(\text{PO}_3)_2$ provenant du dithiophosphate de zinc (additifs anti-usure, anti-oxydant et extrême pression).

(mass %)

Test n°	1	2	3
Test oil	DH-1 class	Low Ash-A	Low Ash-B
CaSO_4	75 ± 6	66 ± 6	65 ± 14
CaCO_3	(2 ± 1)	(3 ± 1)	(3 ± 3)
$\text{Zn}(\text{PO}_3)_2$	15 ± 3	21 ± 6	24 ± 9
ZnSO_4	(2 ± 1)	(5 ± 3)	(< 1)
ZnO	(5 ± 2)	(5 ± 3)	(9 ± 3)

Source SAE 2004-01-1887

Les suies imbrûlées

Ce sont des résidus d’une combustion incomplète (liée à une température trop basse induite par des conditions urbaines d’exploitation).

Le bon fonctionnement du filtre repose sur une combustion complète de tout le carbone ou des résidus carbonés contenus dans le filtre, suivi d’une opération de soufflage des cendres.

Deux installations permettent de réaliser la régénération des cartouches filtrantes.

Installation Comela

L’air chaud généré par un brûleur gazole est insufflé à la sortie du filtre, la température et le débit d’air étant contrôlés. La montée en température s’effectue par paliers ; le brûleur fournit toujours la même température, la variation de celle-ci se faisant par le contrôle de l’arrivée d’air. Un post-traitement, utilisant un filtre secondaire, permet de traiter les gaz de combustion.



Installation Comela vue de face avec le filtre à régénérer.
Source RATP

L'installation est pilotée par un ordinateur. Un suivi de la température et de la pression est possible pour chaque filtre régénéré. Les sondes sont indiquées sur le schéma de fonctionnement de l'installation.

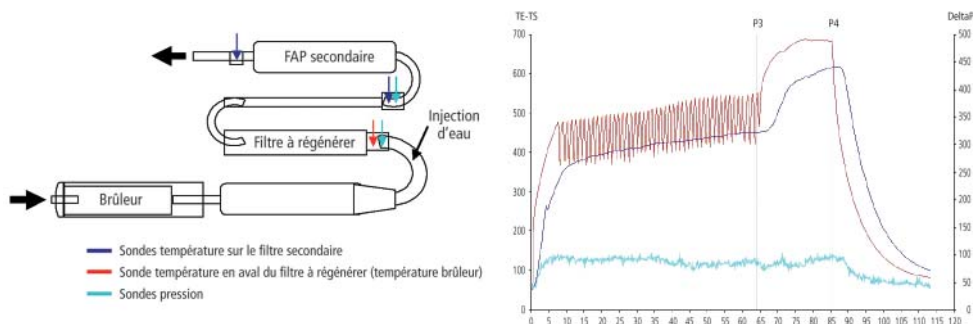


Schéma de fonctionnement de l'installation Comela :
implantation des sondes (températures, pressions) et suivi du cycle.
Source RATP

Installation Eminox

Dans cette installation, la combustion et le soufflage sont réalisés dans deux machines séparées. Les résidus contenus dans les filtres sont brûlés. Le cycle comprend une montée graduelle en température (préchauffage), puis un palier de plus de quatre heures à 610 °C.

Le soufflage des cendres fait suite à l'étape de combustion, réalisée sur l'installation Comela ou sur le four électrique Eminox. Après cette étape, une vérification de la régénération est réalisée.

Pour information, Faurecia utilise pour les FAP de PSA la procédure suivante, proche de celle suivie par la RATP, avec notamment un contrôle des suies et cendres présentes par endoscopie après nettoyage et un contrôle par mesures de perte de charge des fissures.



Installation Eminox : four Carbolite.
Source RATP

Source Faurecia, 2003

Ce contrôle par endoscopie devrait être utilisé pour les véhicules lourds.



Ainsi, au vu des résultats des mesures d'émissions en sortie de machine obtenus (essentiellement grâce aux résultats sur les émissions gazeuses) et compte tenu du fait que l'activité de régénération des filtres à particules reste interne à la RATP, les installations de la RATP ne sont pas, à ce jour, classées sous la rubrique 167 de la nomenclature des installations pour la protection de l'environnement.

Les cendres, échantillonnées lors d'une semaine de production, ont été prises en charge par la société Chimirec (avec laquelle la RATP possède un contrat de marché pour l'élimination des déchets industriels spéciaux). D'une façon générale, les cendres peuvent suivre différentes filières comme :

- la valorisation ;
- le traitement ou la dépollution (traitements physico-chimiques) ;
- le stockage en « décharge contrôlée ».

En raison de leur nature et de la faible quantité annuelle⁽¹⁾ de cendres à traiter, la valorisation et le traitement physico-chimique ne semblent pas être possibles. L'enfouissement sera donc nécessaire. Au vu des quantités estimées, ces cendres devront être regroupées avec d'autres déchets.

En résumé, les installations évaluées présentent les avantages et inconvénients suivants :

Installation/constructeur	Comela	Eminox
Volume traité par jour	3 filtres maximum	6 filtres minimum (12 filtres avec un cycle de nuit et un cycle de jour)
Fabrication	Prototype	Fabrication industrielle
Difficulté d'utilisation	Élevée Compréhension et interprétation au cours de la régénération du cycle de suivi. Cette compréhension permet de pouvoir agir sur le cycle en cas de dysfonctionnement (arrêt du cycle en cas de problème sur la cartouche)	Faible
Avantages	- Suivi du cycle en temps réel - Possibilité de traitement des filtres non démontables - Traçabilité des filtres régénérés effectuée par défaut grâce aux graphes de suivi de régénération	- Volume traité par jour - Possibilité d'un fonctionnement de nuit
Inconvénients	- Volume traité par jour faible au regard des quantités traitées par un four électrique	- Traitement des filtres démontables uniquement - Traçabilité devant être effectuée par l'opérateur - Aucun suivi de l'état de la cartouche au cours du cycle

1. Les quantités annuelles ont été estimées à partir des quantités récupérées lors de la semaine de production et avec l'hypothèse selon laquelle 45 filtres seraient traités par semaine, on estime à 7 kg par semaine la cendre récupérée, ce qui correspond à moins de 400 kg par an de cendres à éliminer.

Pour en savoir plus

- Engelhard : www.hpturbo.fr/entreprise.htm
- Eminox : www.eminox.com
- Airmeex : www.airmeex.com
- Comela : www.piroux.com/societes/comela.htm
- HJS : www.hjs.com
- Johnson Matthey : www.jmcsd.com
- Lubrizol : www.lubrizol.com
- Bekaert : www.bekaert.com
- Arvin Meritor : www.arvinmeritor.com
- Lubrifiant low SAPS pour FAP : www.infineum.com
http://ies.jrc.cec.eu.int/Units/eh/events/EURO5/PROCEEDINGS/Session%20III%20Presentations/atiel_ec_final_2-Brett.pdf
- Liste des filtres homologués en suisse en 2004 : www.umwelt-schweiz.ch/imperia/md/content/luft/fachgebiet/ff/industrie/filterliste_01_03_04_f.pdf
- Programme européen : (Particules) <http://vergina.eng.auth.gr/mech/lat/particulates>

Les émulsions (utilisables uniquement pour les véhicules lourds)

Un document complet réalisé par l'ADEME est disponible sur le site :

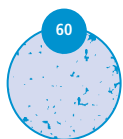
http://www.ademe.fr/htdocs/publications/publipdf/emul_eau_gaz.pdf

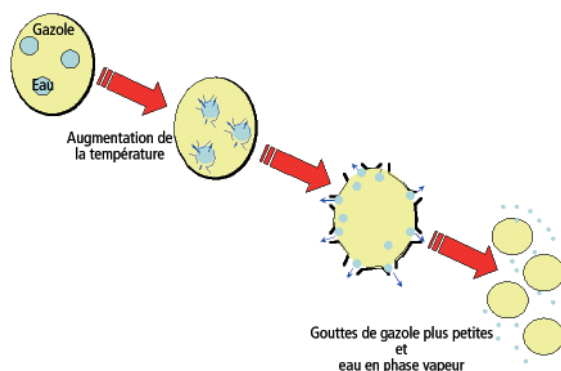
Ce carburant EEG se compose d'une émulsion d'eau dans le gazole, émulsion conforme aux spécifications définies par l'arrêté du 4 septembre 2000, publié au Journal Officiel en date du 4 octobre 2000. La base gazole entrant dans la composition de l'EEG répond en tous points à la norme européenne EN 590 actuellement en vigueur, qui définit les caractéristiques du gazole commercial distribué dans l'Union européenne.

Il est cependant possible d'avoir une émulsion avec un gazole à 50 ou 10 ppm de soufre et une émulsion type « grand froid ». La quantité d'eau est de l'ordre de 9,5 à 15 % selon les fournisseurs et les pays. Pour ce produit, il n'existe pas de spécification européenne, les spécifications sont définies par pays. Pour la France, la spécification est la suivante : NF M 15-021.

Compte tenu des caractéristiques physico-chimiques du produit, décrites ci-dessous, les avantages principaux en termes d'émissions sont :

- la réduction des émissions de particules par réduction de la taille des gouttes de carburant dans la chambre de combustion ;
- la réduction des émissions de NO_x consécutive à la réduction de la température dans la chambre, apportée par la vaporisation de l'eau (chaleur latente).





Évolution de l'émulsion après introduction dans la chambre.

Les conséquences en termes d'exploitation sont :

- une surconsommation liée à la présence d'eau ;
- la nécessité d'installer une cuve spécifique pour les véhicules utilisant une EEG ou d'utiliser le produit pour toute la flotte ;
- la nécessité d'un échange avec le constructeur, pour obtenir son accord compte tenu des spécificités du moteur utilisé ;
- la nécessité de remettre en état (ou au moins de contrôler l'état) les moteurs anciens (avant Euro0 jusqu'à Euro1), notamment au niveau des injecteurs et des systèmes d'injection et plus généralement d'utiliser le produit sur des moteurs en bon état.

L'utilisation d'une émulsion eau-gazole est limitée par la loi :

- dans les moteurs Diesel des véhicules dont la masse en charge techniquement admissible est supérieure à 3,5 tonnes et faisant partie d'une flotte professionnelle disposant d'une logistique d'approvisionnement spécifique ;
- dans les moteurs Diesel des engins ferroviaires ou sur des groupes électrogènes et autres matériels non routiers.

LES VÉHICULES LÉGERS

L'utilisation des motorisations Diesel s'est très fortement développée pour les véhicules particuliers au cours de ces dernières années. Celles-ci représentent à ce jour près de 70 % des ventes et 45 % du parc roulant des VP en France. Ce succès est lié au caractère économique de l'usage de ces motorisations et aux progrès technologiques dont elles ont bénéficié au cours des dernières années. Les récentes solutions mises en place (injection directe haute pression, turbo à géométrie variable) ont en effet permis d'augmenter les performances de ces moteurs, tout en réduisant leur consommation intrinsèque de carburant, les émissions de polluants, ainsi que leurs émissions sonores.

D'un point de vue environnemental, le moteur Diesel est cependant pénalisé par les émissions de particules qu'il occasionne. Ces composés solides, visibles à l'échappement et fortement critiqués quant à leur impact sur la qualité de l'air, ont fait l'objet de nombreux travaux de caractérisation et de développement de systèmes permettant de les éliminer.

La société PSA Peugeot Citroën a commercialisé à partir de 2000 des modèles 607 équipés de filtre à particules (voir le site www.psa.fr pour la description complète du système). Depuis, elle équipe l'ensemble de sa gamme de véhicules Diesel, dont la puissance moteur est supérieure à 110 ch, de filtre à particules (FAP). Ce dispositif présentant un intérêt environnemental, la société de taxis G7 à Paris a décidé de faire l'acquisition, dans une phase expérimentale, de 6 véhicules 607 équipés de FAP. Un protocole d'accord, relatif au suivi des performances, a été signé entre l'ADEME, les taxis G7, Peugeot Parc Alliance et l'Institut Français du Pétrole (IFP). Cet institut développe, depuis de nombreuses années, des compétences dans le domaine de la filtration Diesel et dans celui de la mesure fine des particules, notamment en ce qui concerne leur répartition granulométrique, caractéristique déterminante de leur toxicité suspectée.

Le programme d'étude

Afin de constituer des référents techniques et économiques et de valoriser les résultats, une campagne de suivi, portant sur l'estimation des consommations et une analyse détaillée des émissions polluantes réglementées et non réglementées, a été réalisée sur une période minimale de 24 mois. Il s'agit de suivre, durant cette période, l'évolution des performances des voitures dans des conditions d'usage « taxi », en milieu urbain.

Le programme porte sur :

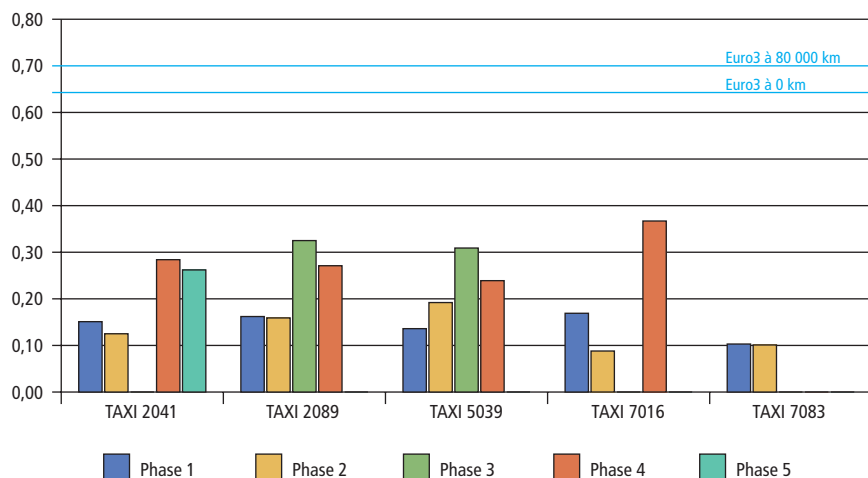
- le suivi d'une flotte de taxis composée de 5 véhicules Peugeot 607 FAP (moteur 2,2 HDi), mis en service et normalement affectés au sein de la flotte des taxis G7, ainsi qu'une 607 FAP de remplacement ;
- l'évaluation des émissions polluantes réglementées et non réglementées de ces véhicules sur le cycle MVEG. Ces mesures, effectuées sur les cinq véhicules durant la totalité du suivi, se sont déroulées en cinq phases de 2 000 à 120 000 km ;
- la mesure des émissions de polluants et de la consommation lors des phases de régénération ;
- le suivi de la consommation réelle des taxis 607 ;
- les analyses détaillées de la taille, du nombre et de la composition des particules (suivi des émissions instantanées de particules de trois classes de tailles données) ;
- une étude de la composition des cendres, retenues dans le filtre à particules, au moment de son nettoyage (soit, après 80 000 km) ;
- une analyse de la température des gaz d'échappement.

Les résultats obtenus

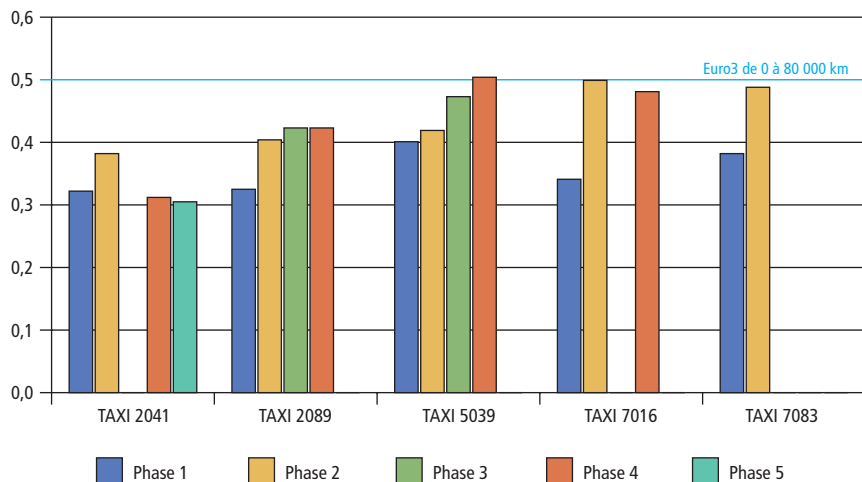
Essais sur cycles MVEG

Les valeurs moyennes d'émissions de polluants réglementés constatées pendant les cinq phases d'essais de ce programme figurent sur les tableaux et graphiques ci-dessous. Toutes les valeurs sont exprimées en g/km pour les émissions de polluants et en l / 100 km pour la consommation. Sont mises en regard les valeurs d'émissions autorisées dans le cadre de la norme européenne Euro3, à la mise en service du véhicule (à 0 km) et après qu'il ait parcouru 80 000 km.

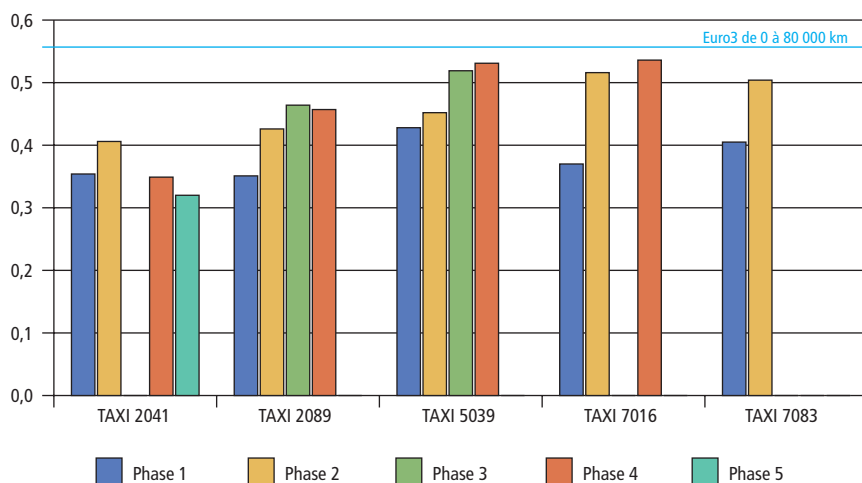
CO en g/km



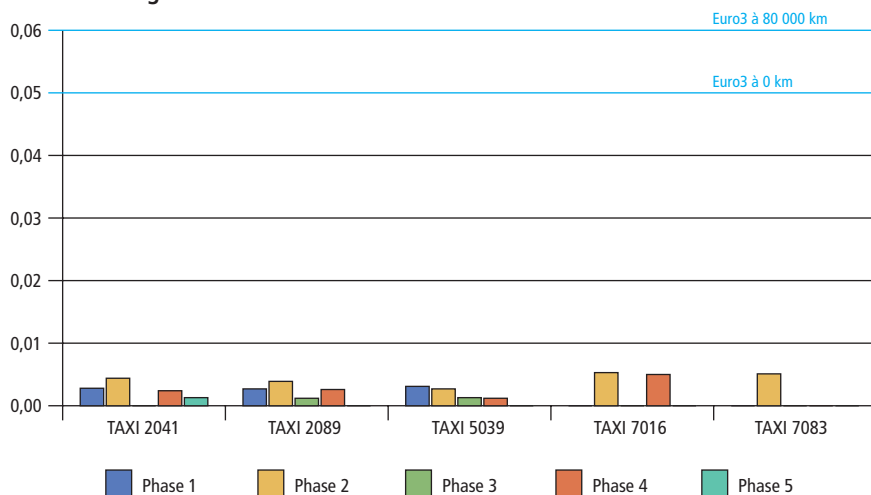
NO_x en g/km



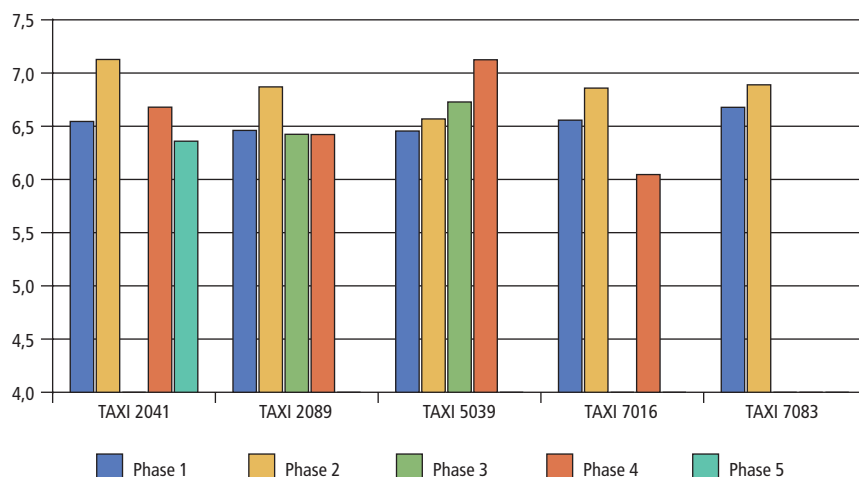
HC + NO_x en g/km



Particules en g/km



Consommation en l / 100 km



	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
Taxi n° 2041	2 100 km	9 900 km		78 204 km	118 600 km
Taxi n° 2089	7 500 km	26 900 km	73 400 km	91 200 km	
Taxi n° 5039	4 500 km	12 700 km	30 560 km	80 000 km	
Taxi n° 7016	7 700 km	23 200 km		76 959 km	
Taxi n° 7083	8 100 km	17 300 km	Véhicule	accidenté	

Les valeurs ci-dessus sont les moyennes de deux ou de trois mesures (si les résultats des deux premières sont dispersés). Les mesures effectuées durant les phases de régénération du filtre ne sont pas prises en compte, mais sont présentées dans le paragraphe suivant.

Un comportement très semblable a été observé sur trois des véhicules testés (2041, 2089, 5039). Sur un même véhicule, les différences d'émissions de polluants entre deux cycles d'essais consécutifs sont inférieures à 10 % pour le CO, 30 % pour les HC et 5 % pour les NO_x. Ces résultats sont très bons compte tenu de la faiblesse des niveaux moyens observés (très inférieurs à la réglementation). Pour les particules, compte tenu des niveaux faibles d'émissions mesurés en aval du FAP, les écarts ne peuvent pas être considérés comme significatifs.

Les émissions de CO et HC globalement très faibles sont principalement produites durant la première phase du cycle MVEG (c'est-à-dire à froid). La totalité des émissions de CO est produite durant les 3 premières minutes du cycle, ainsi que 50 % des HC (la durée totale de parcours du cycle est de 20 minutes).

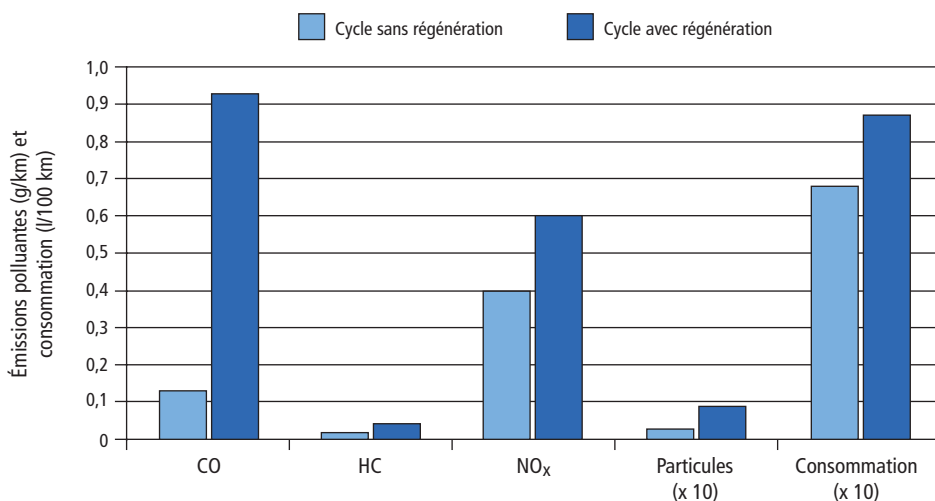
Les émissions de particules sont très faibles ; leur évaluation précise a nécessité la mise en place d'une méthode spécifique de nettoyage des organes de prélèvement, réduisant au maximum les émissions parasites.

Les émissions de NO_x sont relativement proches du niveau requis par la réglementation. Une légère dérive est constatée dans le temps pour la plupart des véhicules. Pour le taxi 5039 qui présentait en phase 4 des émissions d'oxydes d'azote légèrement supérieures à la norme, un examen approfondi du véhicule a permis de déceler une défaillance du turbo qui a entraîné l'encrassement de l'ensemble des organes liés à l'EGR (vanne, échangeur...).

Les essais réalisés en phase 5, à 120 000 km, sur le taxi 2041 équipé d'un FAP nettoyé à 80 000 km selon les préconisations du constructeur, ne présentent aucune dégradation des émissions de polluants.

Émissions constatées durant les phases de régénération

La régénération du filtre est obtenue par la combustion des suies. Ce phénomène implique une modification des réglages du moteur. Les émissions sont donc susceptibles d'être dégradées. Le graphique ci-dessous montre les résultats obtenus pour un véhicule sur un cycle MVEG.



Émissions réglementées : effet de la régénération du FAP.

La phase de régénération est caractérisée par une augmentation significative des émissions polluantes réglementées (CO, HC et NO_x) qui peut s'expliquer ainsi :

- la combustion des suies à l'intérieur du média filtrant s'effectue en aval du catalyseur d'oxydation, les émissions HC et CO occasionnées par cette combustion ne sont pas traitées ;
- le processus de régénération implique, notamment, une injection supplémentaire retardée de carburant et des réglages moteur différents, ce qui conduit à une augmentation des NO_x .

En ce qui concerne la consommation, il faut préciser que celle-ci est déterminée à partir du bilan carbone : l'augmentation de 25 % est donc une mesure de la surémission de CO₂, CO et HC. Cette dernière est due :

- au recours à la stratégie mise en œuvre pour effectuer la régénération (surconsommation réelle) ;
- à la combustion des suies retenues dans le FAP.

La surconsommation réelle est donc inférieure à la valeur mesurée ci-dessus. On estime la part carbone filtré brûlé à environ 15 % de la surconsommation mesurée (soit 3 % des surémissions de CO₂, CO et HC). La surconsommation réelle pendant la régénération est donc de 22 %. Par ailleurs, il est important de souligner que la régénération est un événement qui dure en moyenne 6 minutes tous les 700 km en fonctionnement usuel. La surconsommation moyennée est donc de l'ordre de 2 %.

Suivi des véhicules

Consommations de carburant

(relevés effectués par G7 sur ses véhicules)

Pendant les quatre premiers mois d'exploitation des taxis 607, soit environ 110 000 km cumulés pour les cinq véhicules, la consommation moyenne de gazole était proche de 9 litres / 100 km avec une dispersion inférieure à 1 litre / 100 km d'un véhicule à l'autre. Cette valeur est très voisine de celle mesurée lors de l'homologation du véhicule sur le cycle urbain ECE qui est de 8,9 l / 100 km.

Aucune dérive de cette consommation n'a été constatée au cours de cette période.

Températures à l'échappement

Afin d'évaluer l'adéquation du FAP avec les différents modes de fonctionnement des véhicules, et notamment en zone urbaine où les températures à l'échappement peuvent être faibles, un suivi de la température en amont du FAP (entre le catalyseur et le FAP) a été effectué sur deux véhicules pendant deux mois.

Ces mesures ont permis de montrer que la température moyenne en amont du filtre à particules est de l'ordre de 230 °C. Lors des phases de ralenti (véhicule en station), cette température est de l'ordre de 140 °C. Les post-injections nécessaires aux phases de régénération du FAP entraînent des températures en amont de celui-ci pouvant atteindre 600 °C. Lors des phases de roulage sur autoroute, cette température est de l'ordre de 300 °C.

En moyenne les régénérations du FAP se sont effectuées tous les 730 km, dans les conditions d'usage taxi parisien. Dans certains cas, sur autoroute par exemple, la température des gaz d'échappement en sortie du catalyseur est suffisamment élevée pour provoquer une régénération du FAP sans avoir besoin de procéder à une forte post-injection ; la surconsommation due à la régénération est alors très limitée (voir le paragraphe précédent sur les mesures effectuées lors des régénérations).

Incidents

PSA a procédé à un rappel sur deux véhicules en raison de défaillances de la chaîne de distribution, sans intervention au niveau des FAP. Une défaillance du turbo a par ailleurs été observée sur l'un des taxis. Les autres incidents constatés restent mineurs et concernent principalement les équipements électriques et/ou électroniques (témoins d'alerte, climatisation, commande à distance).

Aucun problème concernant le dispositif FAP n'a en particulier été signalé.

Résultats concernant les polluants non réglementés

Essais effectués

Les essais effectués concernent :

- l'analyse détaillée des hydrocarbures légers (C1 à C12), ainsi que des aldéhydes et cétones, sur cycle MVEG ;
- une analyse des proportions de sulfates et de nitrates contenues dans les particules sur cycle ECE et EUDC ;
- une analyse des métaux contenus dans les particules. Afin d'effectuer ces mesures, des filtres spéciaux, en poly-carbonate, ont été utilisés.

Résultats obtenus

Les émissions non réglementées des deux véhicules testés sont sensiblement équivalentes. La répartition unitaire de chaque espèce est qualitativement semblable à celle observée sur des véhicules Diesel de technologie récente : les émissions d'hydrocarbures sont principalement constituées d'éthane (1/4 du total environ), d'éthylène (1/3 du total) et d'hydrocarbures légers en C3 ou C4. En ce qui concerne les émissions d'aldéhydes, on retrouve la prédominance du formaldéhyde (50 %), de l'acétaldéhyde (25 %) et de l'acétone (12 %). À l'instar des émissions HC totales, ces composés sont rejetés principalement en conditions de démarrage à froid.

La matière retenue sur les filtres est caractérisée par la très forte teneur en sulfate (plus de 80 %) sur la partie extra urbaine du cycle (c'est-à-dire pour des températures d'échappement élevées), liée à la présence de soufre dans le gazole.

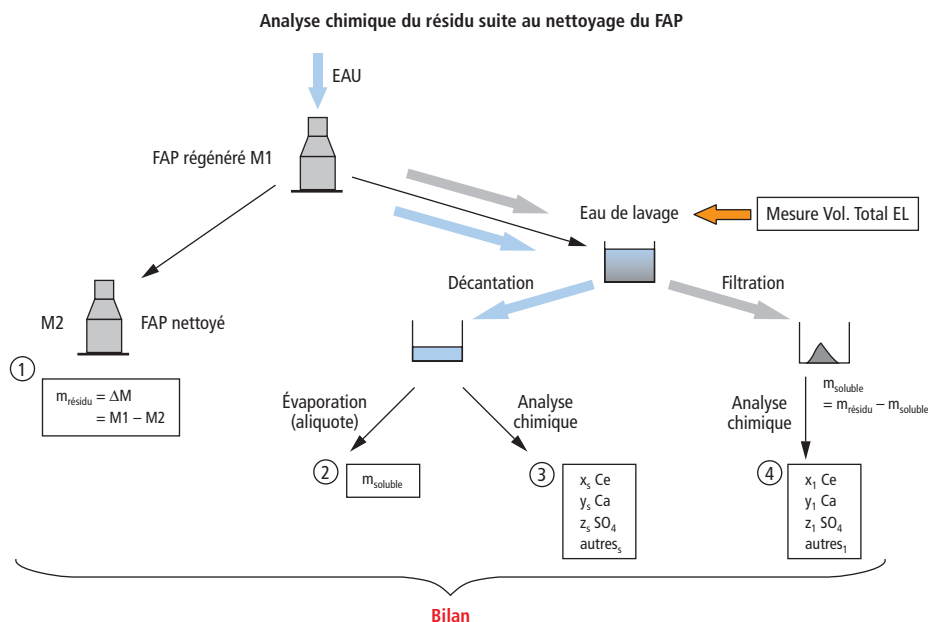
Bien que les quantités mesurées soient très faibles, une analyse des métaux retenus sur filtres montre également une très forte prédominance du soufre (de 2 à 7 nanogrammes selon les véhicules), les autres métaux sont en teneur très faibles : 0,2 ng pour le potassium et le calcium, fer et nickel sont sous forme de traces.

À noter que durant une phase de régénération, ces concentrations ne sont pas significativement modifiées à l'exception du soufre, dont la concentration a fortement augmenté (100 ng).

Bilan cérium

Le filtre à particules installé sur les Peugeot 607 nécessite l'utilisation d'un additif à base de cérium, fourni par Rhodia. Ce produit est automatiquement ajouté au carburant à chaque remplissage et brûle avec le carburant.

Afin d'évaluer la quantité d'additif piégé dans le FAP, une analyse fine des cendres récupérées dans le filtre lors de son opération de nettoyage à 80 000 km a été effectuée sur un des véhicules, suivant le protocole décrit ci-dessous.



Protocole d'analyse des cendres contenues dans le FAP.
Source PSA

La masse totale de cérium récupérée dans les cendres est de 125 g. En considérant que l'efficacité du nettoyage est de 95 %, la masse de cérium stockée dans le FAP est de l'ordre de 130 g. Par ailleurs, la quantité de cérium consommée sur 80 000 km est estimée, en fonction de la consommation de carburant, à 135 g. Ainsi, ces mesures montrent que 95 % du cérium sont stockés dans le FAP.

Des mesures très précises, réalisées par PIXE (Particle Induced X ray Emission), ont montré l'absence de cérium dans les gaz d'échappement, même pendant les phases de régénération, ce qui est en accord avec l'analyse des cendres contenues dans le FAP.

Résultats concernant les particules

Les mesures effectuées ont principalement pour but de caractériser la taille et le nombre de particules émises.

Suivi de trois tailles de particules

Les essais sont menés dans les conditions réglementaires du cycle MVEG, avec un suivi des émissions instantanées de trois classes de tailles de particules (20, 70 et 120 nanomètres).

Les niveaux d'émissions de particules se sont révélés quasi nuls, pour les trois classes de tailles, sur l'ensemble du cycle, à l'exception des phases de la fin du cycle MVEG (« pointe » à 120 km/h et décélération finale) pour lesquelles des pics ont été constatés :

- à l'accélération pour les particules de 70 nm et 120 nm ;
- à l'accélération et à la décélération pour les particules de 20 nm.

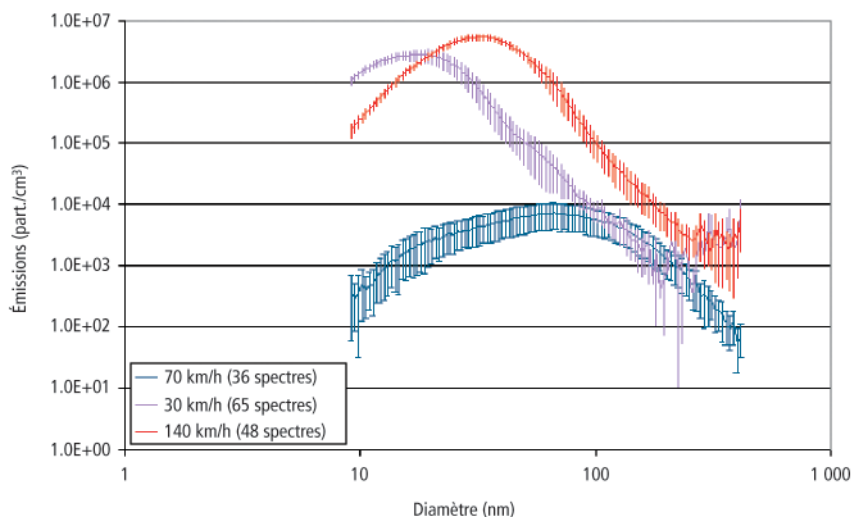
Concentration des particules

Les concentrations mesurées sur le cycle MVEG avec un FAP (de 1 000 à 4 000 particules/cm³) sont à comparer :

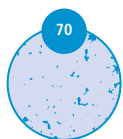
- aux concentrations habituelles des gaz d'échappement des voitures Diesel (1 000 000 à 10 000 000 particules/cm³) ;
- aux concentrations de l'air ambiant en ville (1 000 à 10 000 particules/cm³) ;
- aux concentrations de l'air filtré d'essais (de 200 à 500 particules/cm³).

Granulométrie

Une analyse granulométrique des particules a été réalisée pour trois points de fonctionnement représentant des conditions sévères de roulage : 30 km/h en 1^{re}, 70 km/h en 5^e et 140 km/h en 5^e. Les spectres granulométriques obtenus pour ces trois charges moteur sont présentés sur la figure ci-dessous.



Spectres granulométriques avec FAP.



La moyenne ainsi que l'intervalle de confiance, calculés sur l'ensemble des mesures effectuées sur les cinq véhicules durant l'intégralité de l'étude sont représentés sur ce graphique. La récursivité des essais reste assez bonne et l'évolution de la granulométrie des particules est faible sur un long kilométrage (les résultats du véhicule testé à 120 000 km sont inclus dans cette figure).

Des mesures effectuées sur une Peugeot 607 non équipée d'un FAP ont permis de constater l'efficacité du système sur l'ensemble des tailles de particules (ce véhicule a été spécialement préparé par les équipes techniques de PSA, car ce modèle n'est pas commercialisé).

Conclusions

Les conclusions de cette étude, concernant les performances du filtre à particules équipant les Peugeot 607 en usage taxi, qui s'est déroulée sur deux années et cinq véhicules, peuvent être formulées ainsi :

- aucun incident de fonctionnement du FAP n'a été constaté sur les véhicules ayant atteint 80 000 km et celui ayant parcouru près de 120 000 km ;
- les mesures de particules sur le cycle MVEG sont constantes, tout au long de cette étude, pour l'ensemble des véhicules et nettement en dessous de la limite Euro3 de 0,05 g/km. Le FAP réduit de 90 % la masse de particules émises à l'échappement ;
- à 120 000 km, avec un filtre à particules nettoyé à 80 000 km, le niveau d'émissions de particules n'est pas dégradé ;
- la granulométrie des particules, mesurée sur cycle MVEG, confirme ce résultat, avec des quantités 10 000 fois inférieures aux valeurs constatées avec un moteur Diesel sans FAP, et du même ordre de grandeur qu'avec un moteur essence. La répartition en taille se rapproche aussi de celle d'un moteur essence. Compte tenu de la teneur en sulfates des émissions, la diminution de la teneur en soufre du carburant devrait permettre de réduire encore la quantité de particules rejetées ;
- le FAP diminue de près de 95 % le nombre de particules émises à l'échappement, quelle que soit leur taille ;
- il n'y a pas d'émissions mesurables à l'échappement du cérium qui est utilisé comme additif au gazole pour faciliter la régénération du FAP.

Le contexte

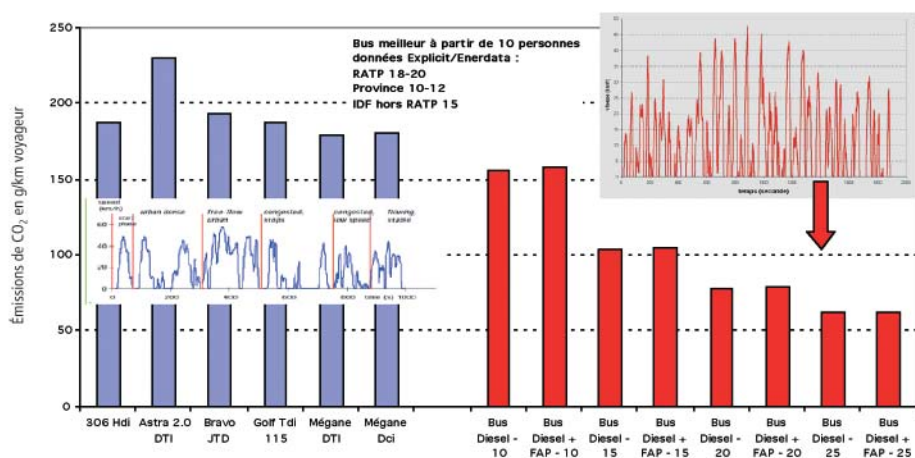
L'utilisation des transports en commun réduit les émissions de polluants par passager transporté. Sur les graphiques ci-dessous, sont présentées les émissions de gaz à effet de serre des deux modes (bus et véhicules légers) et les émissions de polluants réglementés. Pour les véhicules légers (Diesel Euro3), les mesures sont faites sur le cycle Artémis urbain froid, représentatif d'un usage urbain avec démarrage à froid. Pour les bus (Diesel Euro3), le cycle utilisé est celui de la RATP ligne 21, urbain lui aussi.

Le nombre moyen de passagers par voiture est de 1,25. Pour le bus, différents résultats sont présentés avec 10, 15, 20 ou 25 personnes transportées.

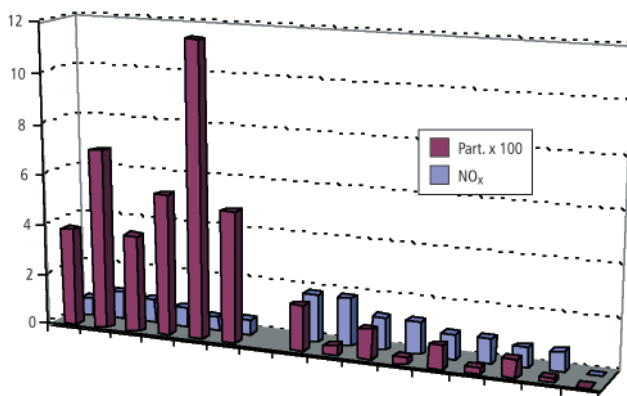
En ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre, il apparaît, dans l'ensemble des réseaux nationaux, que le transport en commun est plus efficace dès un remplissage moyen de dix personnes.

En ce qui concerne les émissions de polluants, des différences apparaissent selon les polluants :

- pour le CO, les émissions d'un bus Diesel dès 10 personnes transportées sont du même ordre que celles d'une voiture ; la présence d'un FAP (filtre à particules) permet de donner l'avantage au bus par la présence du catalyseur ;
- pour les HC, les émissions d'un bus sont également du même ordre que celles d'une voiture. Avec un FAP, le bus se place mieux que la voiture ;
- pour les particules, le bus est mieux placé même sans FAP, la présence de celui-ci accroissant encore l'avantage.



Comparaison des émissions de CO₂ VP sur ECE (1,25 personne), Bus sur RATP.



Pour être compétitif :

- bus Diesel meilleur que VP Diesel sans FAP sur part.
- égal VP Diesel FAP avec FAP
- DeNO_x nécessaire pour = Diesel (calcul avec réduction 70 %)

Le remplissage a peu d'effets compte tenu des réductions apportées par FAP et DeNO_x.

Comparaison des émissions de NO_x et particules VP sur ECE (1,25 personne), Bus sur RATP.
Source ADEME

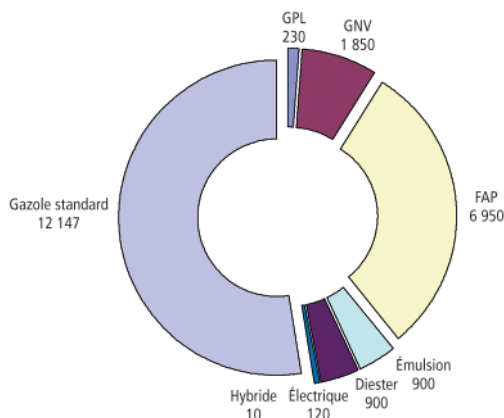
22 000 bus circulent en France, qui parcourent entre 30 000 et 35 000 km par an. La durée de vie de ces véhicules est de l'ordre de 15 ans, avec un renouvellement d'environ 5 000 bus par an.

Un parc de 8 000 autobus, dont 4 000 pour la RATP, assure ainsi les transports routiers urbains en Ile-de-France tandis que 14 000 véhicules assurent les transports urbains dans les villes de province.

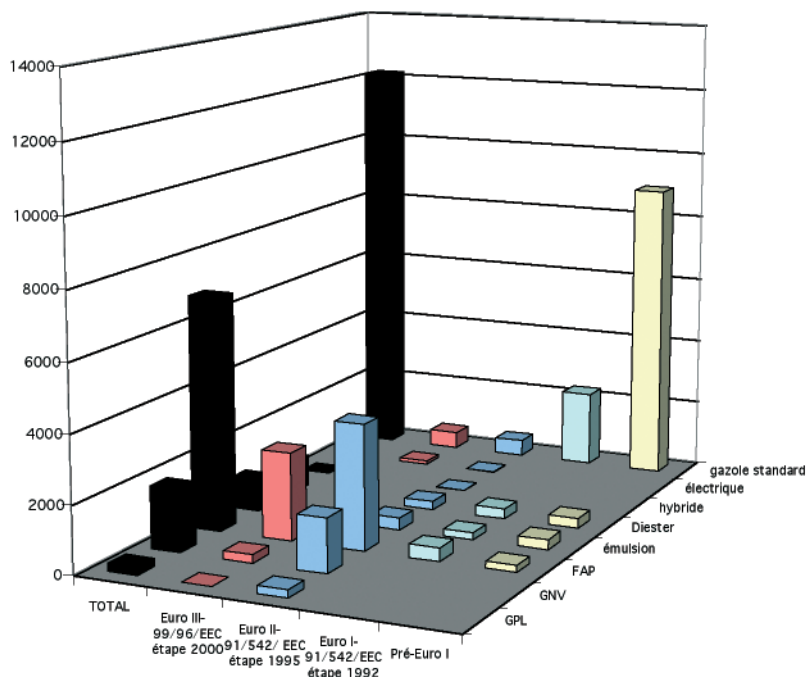
En 2000, les transports collectifs routiers (autobus et autocars confondus) ont réalisé un trafic de 45,3 milliards de voyageurs.km pour une consommation énergétique estimée à près de 790 ktep, soit une efficacité énergétique globale de 57,3 voy.km/kep (kilo équivalent pétrole), dont 42 voy.km/kep pour les bus en région IDF et 33 voy.km/kep pour les bus de province. La performance énergétique du transport collectif routier est par conséquent deux fois plus efficace que celle de la voiture particulière.

Répartition des filières

Une estimation des différentes filières est présentée ci-contre, en global pour la France, puis selon les normes d'émissions des moteurs. La part de bus propres est de l'ordre de 45 %. Les données utilisées proviennent de l'UTP, de la RATP, des fournisseurs de carburant et de filtres à particules.



La figure ci-dessous permet de voir précisément la répartition des véhicules propres, selon leur âge. Plus le véhicule est récent, moins il pollue (effet des normes d'émissions Euro) et plus lui sont associés des carburants ou des systèmes performants, améliorant encore ses émissions. Le parc de bus pré-Euro1 est très majoritairement au gazole, car les solutions proposées (carburants et post-traitements) s'appliquent mal sur ces véhicules anciens.



Ces véhicules sont caractérisés par une durée de vie longue (environ 15 ans) et par un prix d'achat élevé de l'ordre de 160 000 € par unité.

Les technologies évaluées

Les filtres à particules

Les cinq technologies connues ont été évaluées sur bus, sachant qu'il y a près de 7 000 bus équipés de filtres à particules aujourd'hui en circulation.

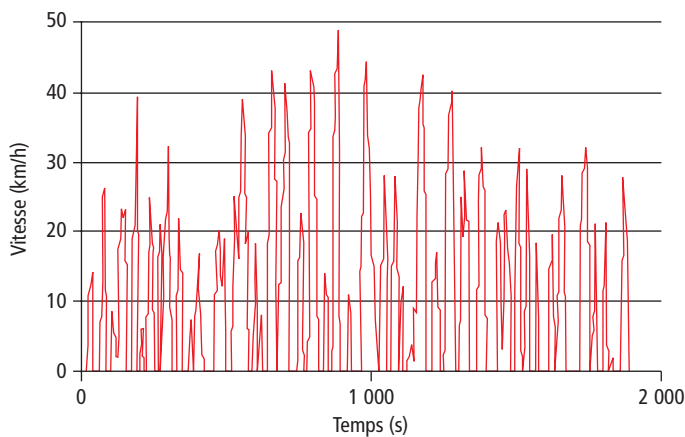
Ainsi, chaque nouvelle technologie fait l'objet d'une évaluation, menée conjointement par un exploitant et par l'ADEME, l'initiative pouvant venir de l'un ou de l'autre. Selon le parc (nombre de véhicules, normes des moteurs ou profils d'usage), on décide du nombre de bus qui seront équipés de filtres, des lignes sur lesquelles ils vont être exploités (de préférence les plus sévères, c'est-à-dire les moins rapides) et du nombre de bus témoins. Le tableau page suivante présente les expérimentations menées.

Ville	Saint-Étienne	Arles	Bourg-en-Bresse	Paris	Reims	Laval	Brest	Le Havre	Brétigny-sur-Orge
Système testé	Eminox HJS	Recycl'air	Comela	Engelhard Eminox	Eminox	Airmeex 3M	CRT HJS	Engelhard	Engelhard
Nombre de véhicules équipés	12	5	5	1 800	2	24	6	6	2
Nombre de véhicules testés	12 + 6 témoins	5 + 5 témoins	5 + 5 témoins	16 2 : émulsion + FAP Diester + FAP	2 + 2 témoins	24 + 9 témoins	5 + 3 témoins	6 + 4 témoins	2

En parallèle du suivi détaillé, des mesures d'émissions polluantes et de performances sont effectuées selon la méthodologie présentée ci-après.

Le cycle utilisé

Le cycle ADEME/RATP a été défini avec la RATP, il est considéré par l'ensemble des exploitants de bus comme suffisamment représentatif d'une utilisation réelle d'un autobus urbain.

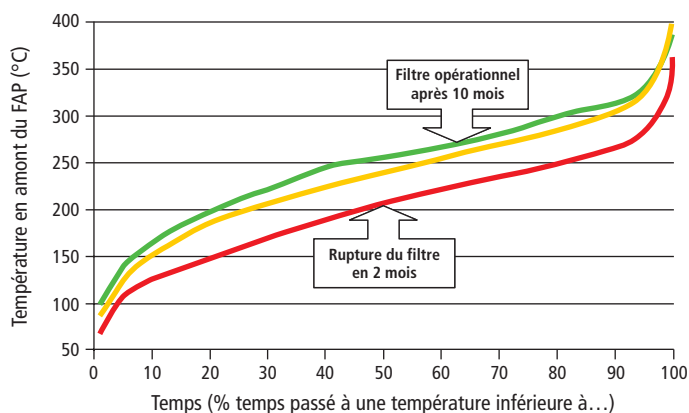


Source ADEME/RATP

Les températures d'échappement mesurées en utilisation réelle

Le graphique page suivante représente en abscisse le temps passé à une certaine température. Plus le temps passé à une température élevée est grand, plus les opportunités de régénération sont grandes et, donc, la tenue du FAP est garantie. Par exemple, sur la courbe inférieure, 50 % du temps sont passés à une température inférieure à 200 °C, ce qui entraîne la rupture du filtre.

Il est remarquable qu'un écart d'environ 50 °C sur la température d'échappement moyenne conduise à la réussite ou à l'échec de la tenue du système (courbes inférieure et supérieure).



Source Eurolum/ADEME

Deux principaux types de fonctionnement des filtres existent :

- le bon fonctionnement du filtre est caractérisé par l'absence de fumées, l'absence de traces de suies à l'échappement, une contre-pression basse (100 mb à 150 mb maximum) et restant globalement constante ;
- le dysfonctionnement du filtre intervient lorsque la combustion des suies est incomplète. Ce colmatage peut également être accompagné de fuites au niveau de l'enveloppe. Ce phénomène, lorsqu'il s'accroît, peut conduire à la rupture du filtre, qui laisse passer une partie des gaz sans les traiter : les fumées sont alors visibles, ainsi que les traces de suies à l'échappement.

La présence d'une contre-pression pourra se traduire par :

La consommation de carburant

L'effet le plus directement mesurable de l'augmentation de la contre-pression peut être une surconsommation du véhicule (via une baisse du rendement thermodynamique du cycle), qu'il convient de mesurer : la comparaison s'effectue sur les consommations moyennes des véhicules entre les valeurs mesurées avant et après la pose du filtre.

L'analyse et la consommation d'huile

La contre-pression générée par le filtre peut occasionner une augmentation des contraintes appliquées au moteur : une manifestation possible de cet effet peut être une surconsommation d'huile et une modification de la composition de celle-ci. Certains filtres nécessitent, pour la régénération, des additifs carburant, dont on peut retrouver des traces dans le lubrifiant. Les analyses d'huiles sont effectuées à chaque vidange des véhicules équipés ainsi que des véhicules témoins.

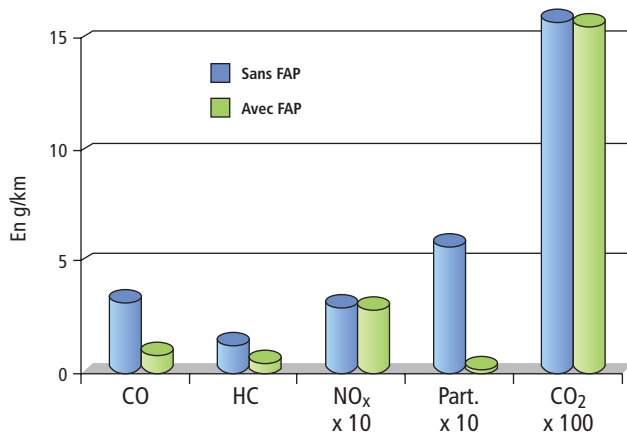
Un suivi des incidents

Enfin, un suivi des incidents survenus sur les véhicules équipés ainsi que sur les véhicules témoins est effectué ou, à défaut, une analyse comparative des résultats est faite, par rapport à l'historique des véhicules avant l'implantation des systèmes.

Les résultats

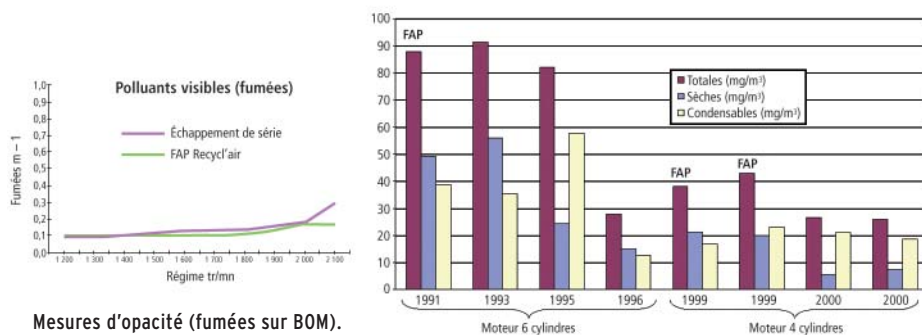
À ce jour, de ces expérimentations, il ressort que :

- Les systèmes CRT, Engelhard, HJS, Comela et Airmeex SC réduisent fortement les émissions CO, HC ainsi que les particules (de 80 à plus de 90 %).



Source ADEME

- Le FAP Recycl'air ne donne pas de résultats satisfaisants avec des réductions d'émissions de particules mesurées sur BOM inférieures à 50 % sur banc à rouleaux, des réductions de fumées inexistantes (voir ci-dessous). Ces résultats ont été confirmés par des mesures Autonat sur bus.



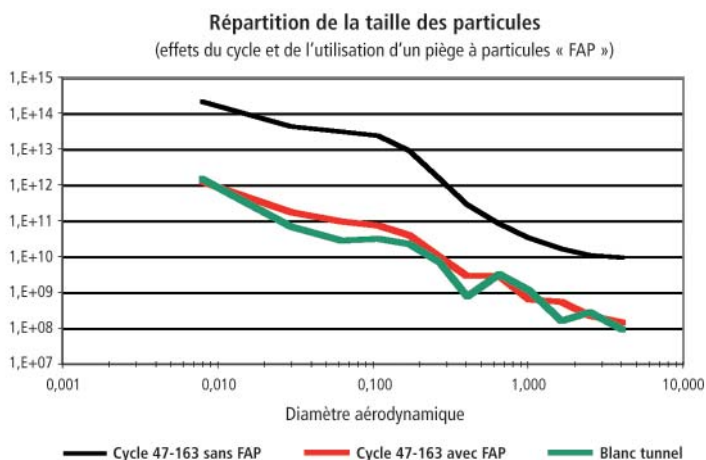
Mesures d'opacité (fumées sur BOM).

Source ADEME

Mesures Autonat sur bus.

- Les PNR sont également réduits fortement de l'ordre de 80 à 90 %.
- Les émissions de NO_x ne sont pas modifiées, mais le FAP, par oxydation, produit plus de NO₂ (impact sanitaire – effet qui reste à préciser) et de N₂O (effet de serre – mais faible impact global).

- Les mesures granulométriques, mesurées dans le cadre d'un programme d'évaluation mis en œuvre en collaboration avec la RATP et l'INRETS, confirment la réduction d'un facteur 1 000 sur l'ensemble du spectre. Ce point est important, compte tenu de l'impact sanitaire des particules de faibles diamètres.



- La surconsommation a été mesurée en moyenne sur les flottes de bus entre 1 et 4 %.
- La durabilité de ce type de systèmes, lorsqu'il est implanté sur un autobus, peut se révéler problématique si les conditions de régénération des particules (combustion continue des suies au sein même du média filtrant pendant le roulage normal du bus) ne sont pas respectées. La présence de ces régénérations est conditionnée par :
 - la température d'échappement qui doit présenter un profil suffisamment « haut » (occurrence suffisante de températures élevées, en exploitation) pour permettre l'auto inflammation des suies en continu. Dans le cadre de cette étude, un bon fonctionnement des systèmes a été observé, lorsque la température d'échappement se révèle supérieure à 300 °C durant 20 % du temps. La vitesse d'exploitation et la longueur des lignes sont les paramètres principaux qui permettent d'obtenir ces conditions de fonctionnement. La pose des filtres ne peut se faire que sur des lignes d'exploitation sur lesquelles les conditions de températures d'échappement sont connues et sont compatibles avec le fonctionnement des dispositifs : en l'état actuel des connaissances, il faut effectuer, avant toute acquisition de filtre, des mesures de températures en exploitation (ces mesures peuvent se faire à l'aide d'un dispositif embarqué), puis caractériser l'ensemble des lignes que l'on désire équiper (ou à défaut les plus représentatives), afin de vérifier la faisabilité de la pose. Ce diagnostic commence à être proposé par les fabricants de filtres, et s'il ne l'était pas, nous recommandons de l'exiger ;
 - l'utilisation d'un gazole à très basse teneur en soufre (50 ppm), indispensable pour les systèmes CRT (Comela, Eminox, Engelhard, HJS), permet d'améliorer les conditions de régénération ;
 - la teneur en cendres, en phosphore et en soufre de l'huile est un paramètre important en ce qui concerne l'empoisonnement du FAP et son colmatage par les cendres.

- Les dispositifs de suivi des FAP (mesures embarquées de pressions et de températures) progressent rapidement, facilitent les évaluations et sont donc à utiliser.
- Afin de favoriser le fonctionnement des filtres, il est préférable de ne pas équiper les véhicules trop anciens (antérieurs à Euro1) et de remettre en état, avant la pose des filtres, les véhicules présentant un défaut moteur (consommation d'huile limitée à 1,5 litre/1 000 km, opacité maximale sans FAP de l'ordre de 2 m⁻¹).
- Afin de diagnostiquer une éventuelle dérive du filtre (colmatage), il convient de faire, en atelier (à l'aide d'un manomètre et en effectuant des accélérations à vide), ou à l'aide d'un système embarqué, des mesures régulières (1 à 2 fois par mois) de contre-pression. Ce diagnostic permet de prévenir une rupture du filtre.
- La période de maintenance du filtre est d'environ une année ; si le véhicule dispose d'un dispositif de suivi des contre-pressions embarqué, le nettoyage peut être fait selon le colmatage réel du filtre.
- La mise en place à grande échelle de ces dispositifs reste à ce jour conditionnée par l'existence d'une procédure de maintenance techniquement viable et compatible avec le programme d'entretien des véhicules. Si une acquisition en nombre de filtres est prévue, la fourniture d'une procédure prévisionnelle de maintenance est à demander au fabricant.
- Le couplage :
 - avec le Diester, d'une part, pour réduire l'impact gaz à effet de serre, est intéressant et les premiers résultats en termes de régénération et d'émissions polluantes sont positifs ;
 - avec l'émulsion, d'autre part, pour réduire le chargement en particules et améliorer les régénérations. Là aussi les premiers résultats sont encourageants.

Les émulsions

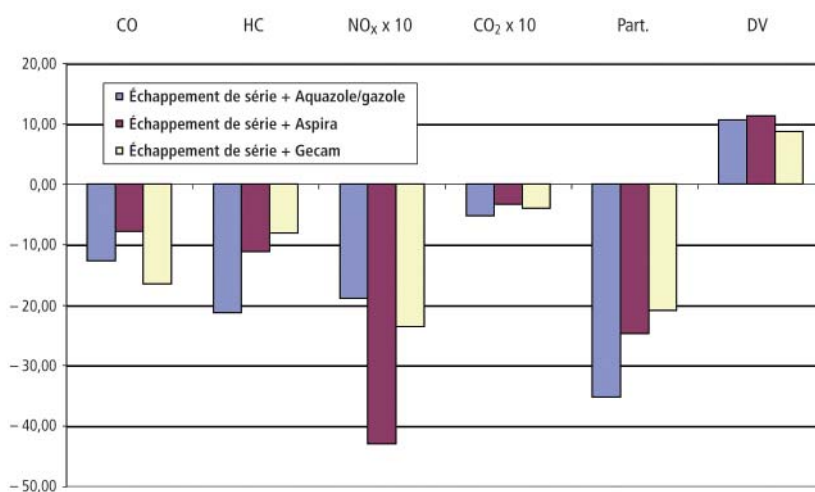
Résumé des évaluations sur les émulsions :

	Aquazole		Gecam	Aspira
	Formule 1	Formule 2		
UTAC	fait	fait	fait	fait
Autonat	fait	en cours	fait	à faire
Banc moteur Granulométrie	fait	fait	fait	fait
Suivi de flotte	fait	en cours	en cours	à faire

Les résultats des essais réalisés à l'UTAC sur le banc à rouleaux

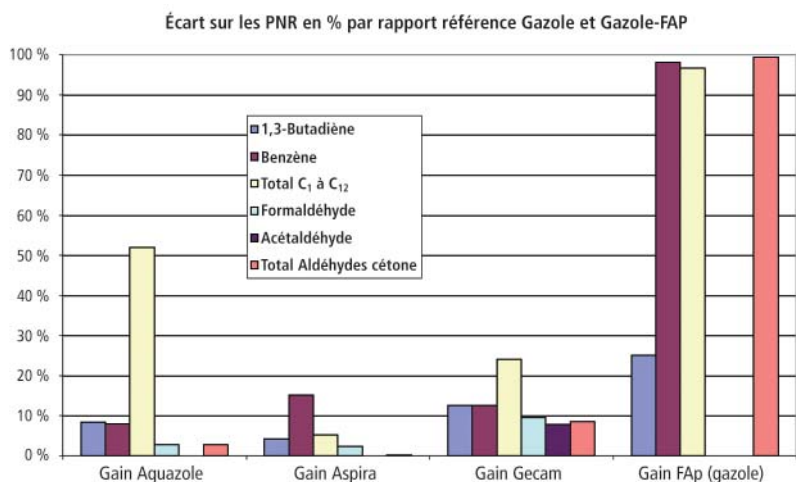
Une analyse des résultats des trois émulsions, dont l'Aquazole avec sa deuxième formulation, conduit aux conclusions suivantes sur moteur Iveco Euro3 :

- des réductions de CO et HC proches, de l'ordre de 10 à 20 % ;
- des réductions de NO_x différentes entre 20 et 40 %. La teneur en eau et, dans une moindre mesure le gazole de base, explique en partie cet écart. Avec Aspira, cette teneur en eau est supérieure, ce qui est confirmé par une surconsommation plus forte ;
- des réductions de particules comprises entre 20 et 35 % pour l'Aquazole. La teneur en eau, la qualité du gazole de base et la qualité de l'émulsion (taille des gouttes d'eau) sont les paramètres qui influencent ce résultat. Les résultats sont meilleurs que ceux obtenus sur moteurs Euro0 ou Euro1, grâce au système d'injection haute pression des moteurs Euro3, qui améliore la pulvérisation du carburant ;
- la consommation, liée essentiellement à la teneur en eau, est supérieure de 8 à 12 % ;
- dans tous les cas, les émulsions réduisent les émissions de CO₂ de 5 % maximum, en améliorant légèrement le rendement de combustion.



Les mesures de polluants non réglementés (PNR)

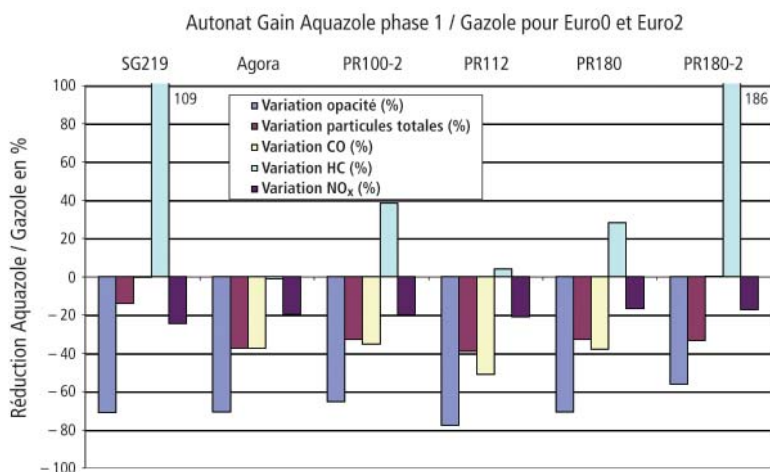
Sur un moteur Euro3, les émulsions réduisent également les émissions de polluants non réglementés, dans des proportions relativement variables selon les émulsions et les espèces. Le FAP masque l'effet du carburant. Sur moteur Euro3, les gains sont en moyenne de 10 à 20 %. À noter la réduction du total C₁ à C₁₂ pour l'Aquazole, qui confirme la réduction obtenue sur les HC et particules.



Les résultats des mesures réalisées par un système Autonat sur site

Les essais permettent d'évaluer les dispersions de performances des véhicules de la flotte. Les résultats ne sont pas représentatifs des conditions de roulage réelles des véhicules, car les essais sont faits sans charge. Les résultats pour la phase 1 en comparaison au gazole sont présentés ci-dessous :

- l'opacité est réduite de 60 à 80 % pour tous les véhicules ;
- la masse des particules est réduite de 20 à 40 % selon les bus et il n'y a pas de lien entre masse et opacité ;
- les NO_x sont réduits de 20 % ;
- les émissions de CO et HC sont variables selon les bus.

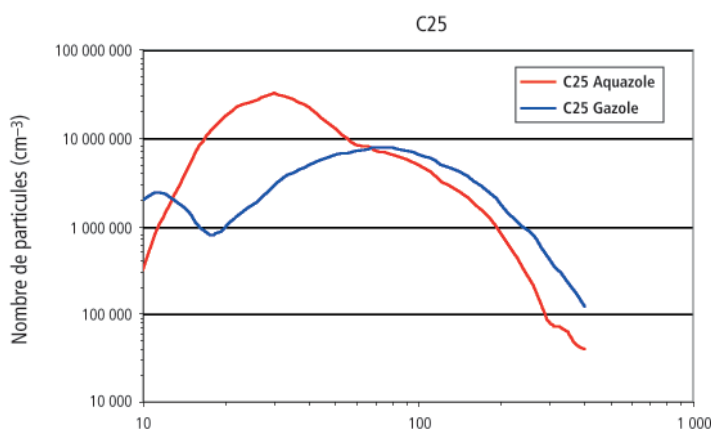


L'évolution des résultats obtenus par le CRMT entre les phases 1 et 2 conduit aux constats suivants : aucune dérive significative n'apparaît sur les émissions de particules (sauf sur le véhicule ancien dégradé pour lequel on constate, en revanche, une réduction de l'opacité) et de CO. Une tendance à l'augmentation des HC apparaît pour tous les véhicules. Les gains en NO_x sont stables, sauf pour un bus ancien.

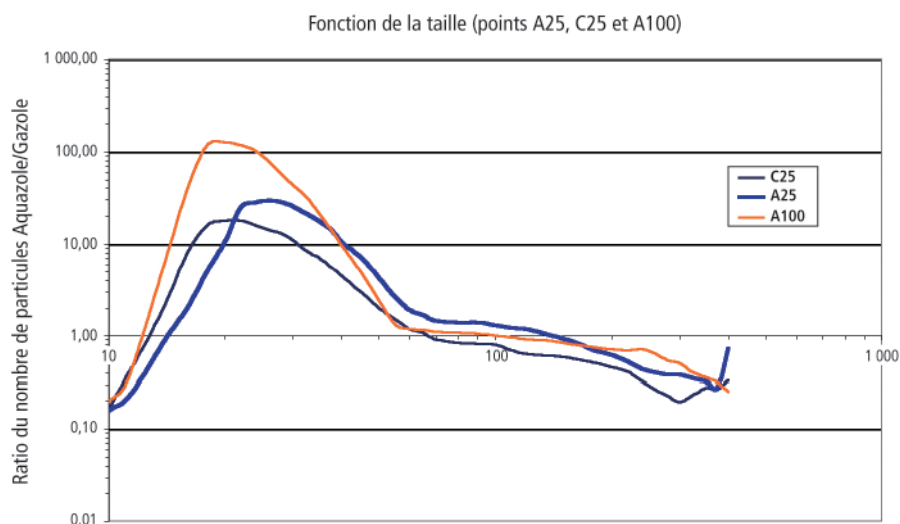
Mesures granulométriques des émissions de particules

La méthode utilisée ici permet d'obtenir, dans des conditions stabilisées de charge et de régime, une répartition des particules en nombre, en fonction de leur taille. Les deux courbes ci-dessous montrent la distribution (en nombre) des particules par classes de taille pour un point de fonctionnement (C25), ainsi que, pour trois points, la comparaison de ces distributions entre le gazole et l'Aquazole.

Pour l'ensemble des points, on constate les phénomènes suivants : la répartition granulométrique des particules Diesel s'avère, pour l'ensemble des points testés, centrée autour d'une taille moyenne comprise entre 70 nm et 90 nm. Il existe aussi un pic secondaire d'émissions de particules de tailles beaucoup plus faibles (entre 10 nm et 20 nm). Il est à noter que ce type de distributions est sensiblement différent de celui constaté sur VP Diesel (dont la répartition présente un seul pic autour d'une taille moyenne de 100 nm). Aucune explication rationnelle n'est apportée à la présence de ce pic. Dans le cas de l'Aquazole, la distribution laisse apparaître une prédominance forte des particules de tailles comprises entre 20 nm et 50 nm. Le pic correspondant aux tailles 10 nm - 20 nm n'apparaît pas.



Effet de l'Aquazole sur la granulométrie des particules.



La comparaison des répartitions entre gazole et Aquazole fait apparaître que :

- l'Aquazole permet de réduire les émissions de particules de forte taille (typiquement supérieures à 100 nm) : cet effet peut constituer une explication plausible à la forte baisse constatée sur l'opacité des fumées. Ce fait peut s'expliquer par un effet de l'Aquazole sur la dernière étape de formation des particules (la coagulation durant laquelle les particules fusionnent) partiellement inhibée par la présence d'eau ;
- le nombre de particules émises dont le diamètre de mobilité électrique est compris entre 20 nm et 50 nm est augmenté de manière significative par le passage à l'Aquazole. Ces deux effets ont été confirmés par des essais réalisés par TTM pour ELF sur un moteur PL Euro0, qui montrent que les minéraux contenus dans l'eau, ainsi que dans l'additif, auraient un effet sur la formation de ces particules fines : les essais réalisés avec de l'Aquazole formulé à base d'eau déminéralisée ne montrent pas cet effet ;
- enfin un effet significatif de réduction des particules de très petite taille (inférieures à 20 nm) apparaît lors de ces essais.

Récemment, un programme d'essais a été réalisé sur un moteur MIDR 60226 common-rail, satisfaisant Euro3, avec cinq émulsions à 10 % (trois d'entre elles étant préparées avec de l'eau déminéralisée), en comparaison avec le gazole de référence. Le moteur fonctionne à iso-cartographie. Les points sont réalisés à iso-PME, afin d'être représentatifs de l'utilisation d'un véhicule.

Les principaux enseignements de l'étude sont les suivants :

- la présence de l'eau dans le gazole ne conduit pas à une modification notable du rendement ;
- on constate une diminution des émissions d'oxyde d'azote d'environ 10 % pour les points à bas et mi-régime. Pour les points réglés bas NO_x , grâce à l'utilisation d'un taux important d'EGR, on ne constate pas de réduction ;
- les émissions d'hydrocarbures imbrûlés sont en légère augmentation sur tous les points. Les émissions de CO le sont également, pour les points de faible charge ;

- on remarque une forte baisse des émissions de fumées, sauf pour le point de pleine charge / bas régime ;
- l'analyse des émissions de particules mesurées par micro tunnel montre un résultat variable, suivant le point de fonctionnement et le carburant testé. Globalement les écarts sont faibles par rapport au GO de référence, sauf pour le point de faible charge/haut régime, où l'on constate une réduction de l'ordre de 35 % des particules ;
- la granulométrie SMPS montre que l'utilisation d'une émulsion réalisée avec une eau non déminéralisée conduit systématiquement à une augmentation importante du nombre de très fines particules (autour de 20 nm). Les résultats obtenus avec les carburants contenant une eau déminéralisée sont variables.

Bilan émulsions

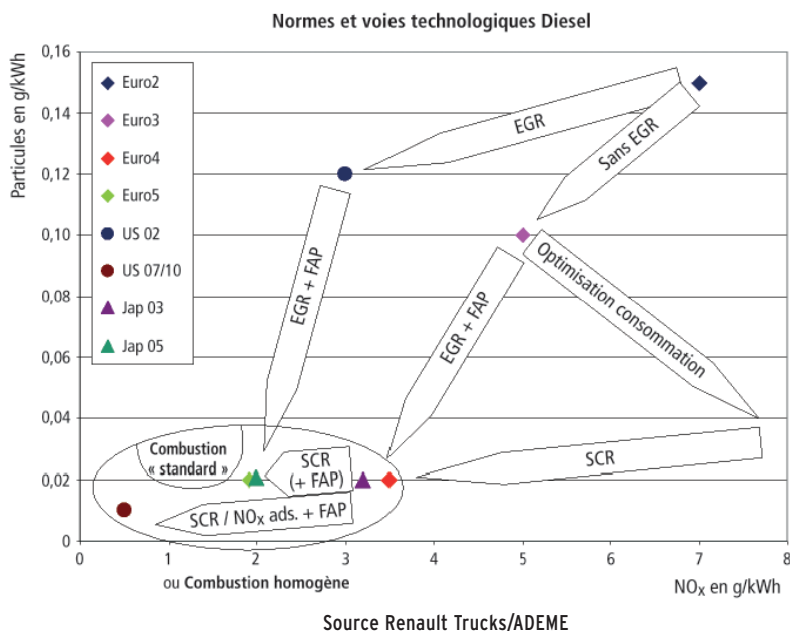
À l'issue de cette expérimentation, qui s'est déroulée sur trois années, des conclusions peuvent être formulées concernant les émulsions :

- cette solution permet une dépollution rapide et peu onéreuse de l'ensemble d'un parc ;
- par rapport au gazole, leur utilisation conduit à une baisse des NO_x d'environ 10 % ainsi que de l'opacité des fumées visibles entre 40 et 50 %. Les émissions de particules sont également réduites en masse, jusqu'à 30 % selon l'émulsion et la norme du moteur. Il apparaît en effet que les moteurs récents conduisent à de meilleurs résultats, grâce à la qualité du système d'injection de carburant, qui fait l'objet d'améliorations pour respecter les normes d'émissions. Le couplage avec un FAP peut être envisagé ;
- la granulométrie des particules émises est sensible à la teneur en minéraux de l'eau. Les fournisseurs proposent des émulsions avec de l'eau déminéralisée ;
- pour les véhicules récents, les émissions HC, CO et NO_x ne sont pas affectées ;
- l'utilisation d'une émulsion ne peut s'appliquer qu'à des véhicules qui sont dans un état correct de fonctionnement et d'entretien (conformité des réglages, taux de compression normaux) ; les moteurs dégradés seront à reconditionner ;
- la consommation de carburant en exploitation est entre 5 à 9 % supérieure à celle du gazole pur, selon l'émulsion, sa teneur en eau et le comportement de conduite des chauffeurs avec ce nouveau carburant ;
- lorsque les recommandations d'utilisation du fournisseur sont respectées, aucun problème technique majeur n'intervient lors de l'utilisation de ce produit ;
- le constructeur doit être contacté avant la mise en œuvre de ce carburant, notamment pour les moteurs fonctionnant avec des systèmes d'injection common-rail.

L'ensemble de ces résultats est présenté dans le Cédérom OPTIBUS (réf. ADEME n° 5549) et est résumé sur une plaquette (www.ademe.fr, publications à télécharger). Ces deux supports contiennent les résultats des évaluations menées sur les filtres à particules et sur d'autres filières, comme les carburants GNV, GPL, émulsions, et les motorisations hybrides.

Les évaluations à venir sur les bus

La réduction des émissions de NO_x va nécessiter l'utilisation de nouveaux systèmes et l'impact sur les émissions de particules reste à quantifier précisément. En effet, à court terme, deux voies majeures se dessinent pour réduire les NO_x , sachant que les émissions de particules sont réduites en optimisant la combustion et les catalyseurs, et si besoin est, par un filtre à particules. Le graphique ci-dessous présente les normes européennes, américaines et japonaises et les voies technologiques pour les atteindre.



- La voie SCR⁽²⁾, privilégiée en Europe, permet de découpler l'optimisation de la combustion et la réduction des NO_x . En effet, une combustion optimisée (haut rendement et faible consommation) crée des NO_x par des températures de combustion élevées. Mais ces polluants peuvent être traités de façon efficace par l'urée⁽³⁾, qui se transforme à l'échappement en ammoniac, réducteur de NO_x . Cette voie permet donc de réduire fortement la consommation, mais nécessite un réseau de distribution d'urée en Europe et des stratégies de contrôle et de mise en œuvre de mesures répressives pour s'assurer d'une utilisation systématique d'urée. Par ailleurs, cette solution permet de positionner le compromis NO_x /particules⁽⁴⁾ vers de faibles émissions de particules, les émissions de NO_x étant traitées par l'urée.

2. SCR : Réduction Catalytique Sélective des oxydes d'azote. Assure aussi l'oxydation des hydrocarbures imbrûlés et de 30 % environ des particules.
3. L'urée ($\text{NH}_2\text{-CO-NH}_2$), obtenue à partir d'ammoniaque (NH_3), va se décomposer à l'échappement en NH_3 pour réduire les NO_x .
4. Il existe un lien entre émissions de NO_x et de particules, toutes choses égales par ailleurs. Si on procède à une réduction des émissions de particules en modifiant l'avance à l'injection, les émissions de NO_x augmentent, et inversement.

À retenir sur les bus

- L'efficacité des FAP testés est supérieure à 90 % en ce qui concerne la suppression des particules sur tout le spectre.
- La tenue des systèmes **est garantie dans la majorité des cas**. Une phase probatoire de 6 mois est donc à réaliser avant l'équipement de l'ensemble d'une flotte, en mesurant, sur deux bus équipés, les températures et l'évolution des contre-pressions à l'échappement.
- La maintenance des systèmes, notamment le nettoyage du FAP est à effectuer au moins **une fois par an**.
- Les évaluations à venir visent à élargir encore la plage d'utilisation des FAP en termes de température d'échappement, à coupler les avantages du FAP avec des biocarburants, des émulsions eau-gazole et des systèmes DeNOx.
- L'utilisation de l'émulsion permet une réduction des émissions de particules jusqu'à 30 %, confirmée par une réduction de l'opacité, et dans une moindre mesure des NO_x.
- L'augmentation des consommations due à l'utilisation de l'émulsion, évaluée sur une année, est variable selon les usages et les véhicules (entre 5 et 9 %). Elle est associée à une perte de puissance de l'ordre de 5 %.
- Le constructeur doit être contacté avant la mise en œuvre d'une émulsion, notamment pour les moteurs fonctionnant avec des systèmes d'injection common-rail.

LES CARS INTERURBAINS

Le contexte

Les autocars se distinguent des autobus par des cycles d'usage très différents se rapprochant des poids lourds. Les technologies permettant de réduire les émissions sont identiques à celles évaluées sur les bus, avec des températures d'échappement supérieures, donc des régénérations de filtres à particules, a priori, améliorées.

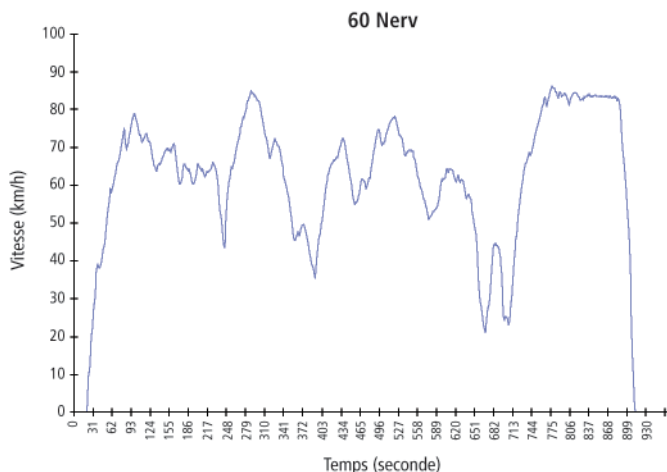
Les technologies évaluées

Un programme d'évaluation de plusieurs technologies est en cours de réalisation avec un bilan final prévu en 2006. Les trois paramètres suivants sont quantifiés, en performances et fiabilité :

- **Le catalyseur**
La technologie évaluée est classique avec un catalyseur d'oxydation.
- **Le filtre à particules**
La technologie évaluée est celle du FAP Comela décrite dans le chapitre consacré au bus.
- **L'émulsion**
L'émulsion évaluée est celle de Gecam présenté dans le chapitre consacré au bus.

Le cycle utilisé

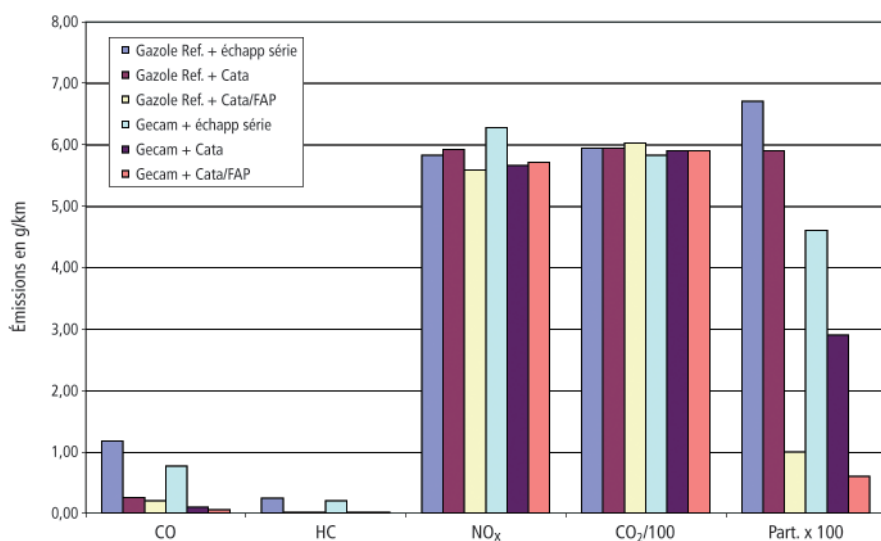
Sur le graphique ci-dessous, le cycle utilisé pour mesurer les émissions de polluants et la consommation est présenté : il s'agit d'un cycle appelé « 60 Nerv » mis au point par l'INRETS.



Les résultats sur banc à rouleaux

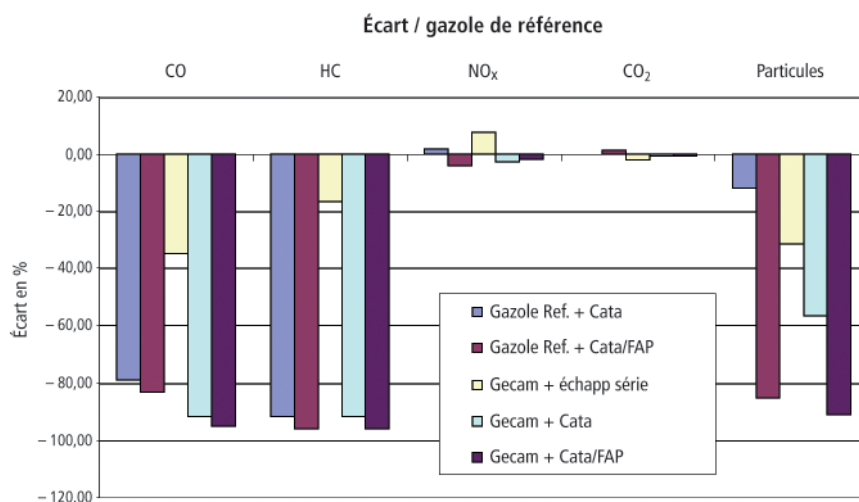
Les premiers résultats obtenus sur un autocar Euro3 sont présentés ci-dessous en valeurs absolues et en relatif par rapport à la version Diesel, échappement de série :

Les émissions d'un autocar sur le cycle 60 Nerv présentent des émissions polluantes et une consommation nettement plus faible qu'un autobus, de l'ordre de 22 l/100 km.



En termes de réduction, les trois technologies testées présentent les performances suivantes :

- le catalyseur permet une réduction des HC et CO de l'ordre de 80 à 90 % avec du gazole ou l'émulsion Gecam. Les émissions de NO_x ne sont pas modifiées par le catalyseur. Les émissions de particules sont réduites de 10 % par le catalyseur avec du gazole, alors que le couplage catalyseur/Gecam conduit à une réduction de près de 60 % ;
- le filtre à particules (qui comporte également un catalyseur en amont) confirme la réduction des HC et CO, et réduit les particules de plus de 80 %. Le couplage FAP/Gecam augmente légèrement la réduction d'émissions et devrait conduire à des régénérations de FAP moins fréquentes, donc une durée de vie supérieure du FAP ;
- le carburant Gecam apporte de légers gains sur les émissions de CO et HC (20 à 30 %) et une réduction de 30 % des particules. Les émissions de NO_x sont augmentées alors qu'une émulsion permet, en théorie, de les réduire.



Ce programme d'évaluation prévoit d'évaluer une nouvelle fois ces émissions après une année d'utilisation, et d'obtenir des bilans de fiabilité et de coûts en usage réel.

LES BENNES À ORDURES MÉNAGÈRES (BOM)

Le contexte

Le parc de BOM actuellement en service, estimé à 10 000 unités, consomme moins de 1 % du total de l'énergie utilisée pour les transports en ville, et sa participation concernant les émissions polluantes est très faible. Cependant, ces véhicules participent à l'image de la commune en matière d'environnement.

Ces véhicules sont caractérisés par une durée de vie longue (environ 15 ans) et par un prix d'achat élevé de l'ordre de 110 000 € par unité.

Le parc actuel est composé de véhicules répondant à des normes d'émissions très différentes, de Euro1 (1992) à Euro3 (2000/01).

Comme pour les bus, les collectivités locales et les exploitants ont deux types de solutions pour réduire les émissions du parc :

- les actions à mettre en œuvre pour dépolluer le parc existant : on peut agir sur les carburants et/ou sur les systèmes de traitement des gaz d'échappement, pour en éliminer les composés polluants ;
- les choix à effectuer lors du renouvellement des flottes : il convient dans ce cas d'opter pour des véhicules dont les émissions sont plus faibles que celles des BOM Diesel de norme équivalente.

Les filtres à particules sont des solutions technologiques à mettre en œuvre sur le parc existant qui présentent la caractéristique de pouvoir être appliquées rapidement et ceci sur un grand nombre de véhicules. Elles offrent donc, par voie de conséquence, un impact immédiat sur les émissions du parc.

Ces dispositifs permettent d'achever la combustion après la chambre et de réduire ainsi les émissions de produits imbrûlés (CO, HC et particules). D'autre part, des systèmes permettant de réduire les NO_x sont actuellement à l'étude.

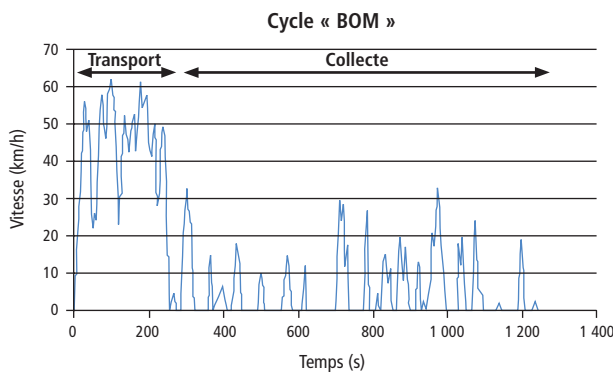
Les technologies évaluées

Les filtres à particules

Les cinq technologies connues présentées précédemment dans le chapitre bus ont été évaluées sur les BOM.

Le cycle utilisé

Le cycle a été défini avec un ensemble d'exploitants et est représentatif d'une utilisation réelle d'une BOM en milieu urbain.

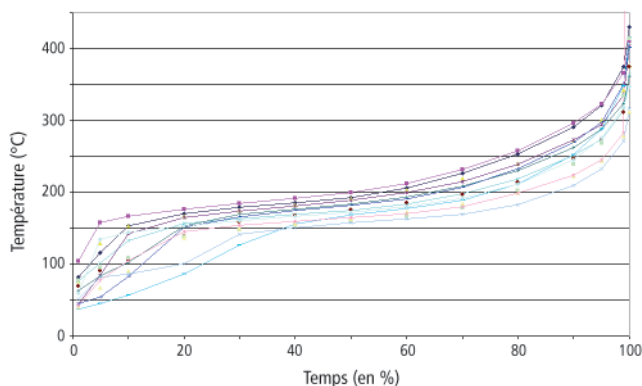


Source ADEME

Les températures d'échappement mesurées en utilisation réelle

Le graphique ci-dessous représente le temps passé à une certaine température. Plus le temps passé à une température élevée est grand, plus les opportunités de régénération sont grandes et, donc, la tenue du FAP est garantie.

Sur ces véhicules, la moitié du temps est passé avec des températures d'échappement moyennes inférieures à 200 °C. La régénération n'est donc, avec les technologies actuelles, pas assurée sur ces véhicules.

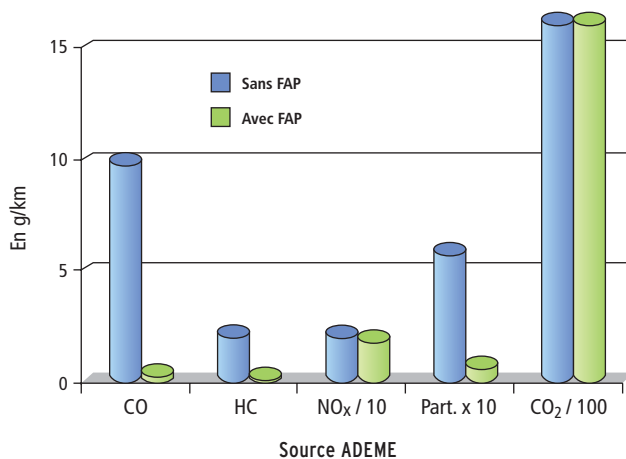


Source ADEME/CREED

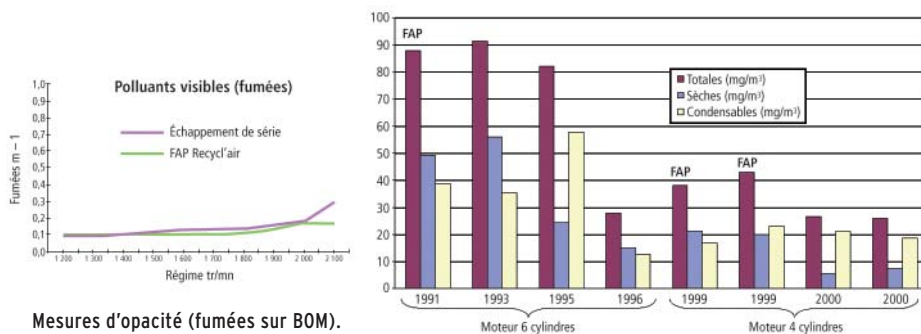
Les résultats des évaluations

À ce jour, de ces expérimentations, il ressort que :

- Les systèmes Comela, CRT, Engelhard et Airmeex SC réduisent fortement les émissions CO, HC ainsi que les particules (de 80 à plus de 90 %).



- Le FAP Recycl'air ne donne pas de résultats satisfaisants, avec des réductions d'émissions de particules mesurées sur BOM inférieures à 50 % sur banc à rouleaux, des réductions de fumées inexistantes (voir ci-dessous). Ces résultats ont été confirmés par des mesures Autonat sur bus.



Source ADEME

Mesures Autonat sur bus.

- La durabilité de ces systèmes n'est pas assurée pour tous les FAP et des ruptures des filtres sont apparues. La température d'échappement est, à ce titre, un paramètre clé de fonctionnement de ces dispositifs. Pour la plupart des systèmes testés, les régénérations ne sont pas satisfaisantes. Seul le FAP Comela donne de bons résultats (à confirmer par le suivi). Ce filtre est proposé en première monte sur les véhicules Renault Trucks, mais également en rétrofit.



Source Comela

Résultats de suivi des BOM équipées de FAP Comela

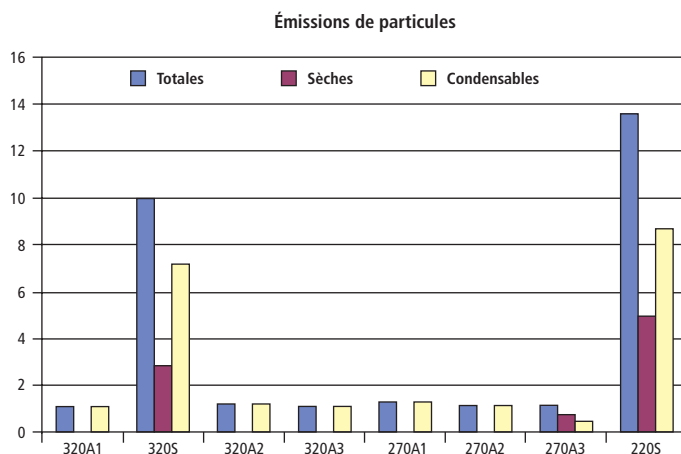
Il s'agit de huit bennes à ordures ménagères avec motorisation Renault Trucks Euro3 :

- six sont équipés de filtres à particules ;
- deux n'ont pas de filtre à particules.

Les filtres des véhicules 320 DCI ont été montés en usine, ceux des 270 DCI en rétrofit (500 km de roulage sans filtre environ).

Type de moteurs	Particules Totales (mg/m ³)	Particules Sèches (mg/m ³)	Particules Condensables (mg/m ³)
320 DCI avec FAP	1,11	0	1,11
320 DCI avec	1,19	0	1,19
320 DCI avec	1,09	0	1,09
320 DCI sans FAP	9,99	2,82	7,17
270 DCI avec	1,29	0	1,29
270 DCI avec	1,12	0	1,12
270 DCI avec	1,15	0,72	0,43
220 DCI sans FAP	13	4,99	8,01

Les résultats des mesures d'émissions en mg/mm³ sont les suivants :



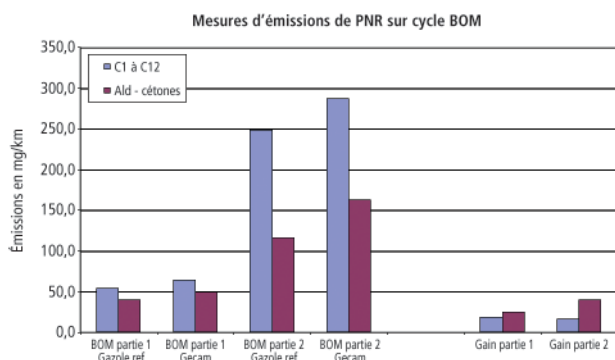
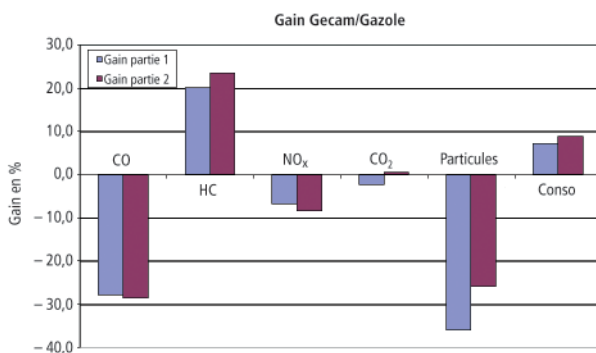
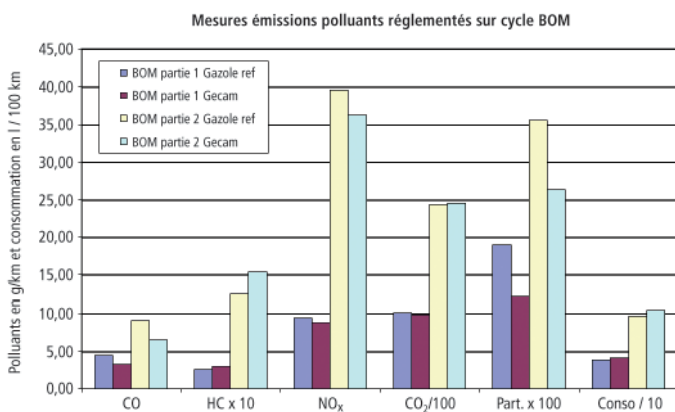
Les deux véhicules (320S et 220S) sans FAP présentent les plus fortes émissions de particules. Le FAP réduit donc bien les émissions de particules à la fois sèches et condensables.

Les émulsions

L'émulsion Gecam est en cours d'évaluation sur des BOM Euro2 et 3. Les mesures d'émissions sur cycle BOM montrent les résultats suivants, confirmant ceux obtenus sur bus :

- Réduction des émissions de particules de 25 % pour la phase collecte (partie 2) à 35 % pour la phase transport (partie 1). Par ailleurs, le véhicule en phase collecte émet quasiment deux fois moins de particules que durant la phase transport, le moteur fonctionnant soit au ralenti, soit en pleine charge lors des accélérations. Ces résultats sont confirmés par les mesures Autonat avec des réductions d'opacité de 20 à 60 % et d'émissions de suies de 16 à 40 %.

- Faible réduction des NO_x (5 à 8 %) et des émissions de CO en réduction de près de 30 %, alors que les HC augmentent de 20 % (a priori en raison d'un contact accru aux parois de la chambre de combustion des jets de carburant). Ceci se retrouve également sur les PNR en augmentation de 20 à 40 %.
- La consommation augmente de près de 10 %. Des gains de rendement faibles apparaissent sur la phase 1 (2,5 %).



- Par ailleurs, l'évaluation en cours permettra de fournir des éléments sur la tenue dans le temps des moteurs avec ce carburant, dans un usage BOM.
- Le constructeur doit être contacté avant la mise en œuvre de ce carburant, notamment pour les moteurs fonctionnant avec des systèmes d'injection common-rail.

Les évaluations à venir

L'ADEME souhaite poursuivre ces évaluations sur des nouveaux systèmes de FAP, notamment à régénération active, des systèmes DeNOx et des couplages avec des biocarburants.

À retenir sur les BOM

- L'efficacité des FAP testés est supérieure à 90 % concernant la suppression des particules sur tout le spectre.
- La tenue des systèmes **n'est pas garantie à ce jour avec tous les filtres actuels**, seul le FAP Comela donne de bons résultats en première monte et en rétrofit.
- Les évaluations à venir pourraient permettre de valider la tenue de nouveaux systèmes.
- L'utilisation de l'émulsion permet une réduction des émissions de particules de l'ordre de 25 à 35 %, confirmée par une réduction de l'opacité de 20 à 60 % et dans une moindre mesure des NO_x.
- Le constructeur doit être contacté avant la mise en œuvre d'une émulsion, notamment pour les moteurs fonctionnant avec des systèmes d'injection common-rail.

LES POIDS LOURDS

Le contexte

Les préoccupations environnementales se sont amplifiées récemment pour devenir un enjeu majeur pour les différentes autorités politiques et les exploitants de flottes de véhicules. Le transport routier de marchandises qui représente plus de 40 % de la consommation d'énergie des transports a vu sa contribution doubler en 20 ans. On peut, en particulier noter une croissance importante des véhicules de livraison de marchandises en ville, liée à la politique des flux tendus des entreprises et au développement de l'e-business.

Deux types de véhicules sont actuellement utilisés :

- les véhicules utilitaires légers,
- les poids lourds : porteurs ou tracteurs.

La technologie de ces derniers est largement dominée par l'utilisation d'un seul carburant : le gazole. Généralement, l'usage de ces véhicules se caractérise par :

- un très fort kilométrage annuel associé à un approvisionnement en gazole très diversifié ;

- un renouvellement relativement rapide des véhicules avec des objectifs de réduction des coûts kilométriques.

Ces caractéristiques peuvent constituer une barrière à la mise en place à grande échelle de solutions de dépollution nécessitant un carburant et/ou des moyens d'approvisionnement spécifiques, tels que les carburants gazeux ou les gazoles reformulés non compatibles avec le gazole traditionnel.

L'un des aspects sensibles de la pollution générée par les véhicules Diesel est la quantité importante de particules solides émises à l'échappement causant l'apparition de fumées noires. Pour diminuer ces émissions, il existe actuellement sur le marché différents filtres à particules (FAP) développés pour des applications de retrofit, et désormais certains constructeurs proposent ces filtres à particules, en option, à l'achat du véhicule.

Les technologies évaluées

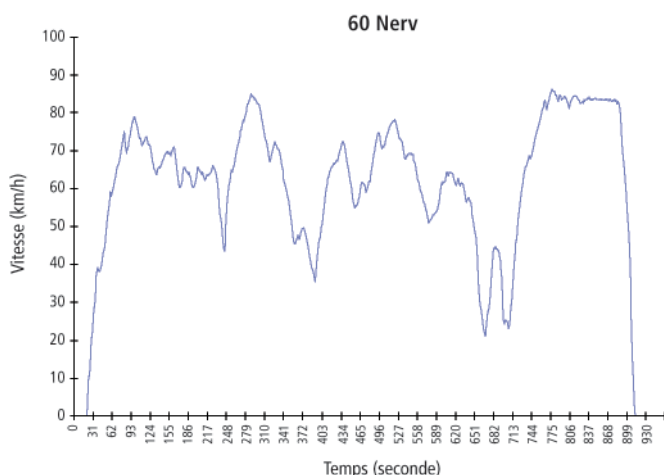
Les filtres à particules

Le filtre à particules Carmex de la société Airmeex, qui utilise un additif (fer, strontium) dosé dans le carburant pour la régénération du support. Cet additif de marque Octel (dont la propriété est d'abaisser la température de régénération vers 250 °C) est injecté dans le carburant à l'aide d'un système embarqué de dosage. Il peut également être dilué directement dans la cuve. Une première version, utilisant un support à base de fibres tressées (fabrication 3M), a été remplacée par un filtre en carbure de silicium (SiC). Ce système est compatible avec le gazole aux standards actuels. Ce FAP a été évalué à l'UTAC et, pendant une année, avec un transporteur, sur des poids lourds de 40 tonnes en utilisation réelle.

Le FAP Comela a également été testé sur un poids lourd de 19 tonnes, uniquement au banc à rouleaux de l'UTAC.

Le cycle utilisé

Sur le graphique ci-contre est présenté le cycle utilisé pour mesurer les émissions de polluants et la consommation : il s'agit d'un cycle appelé « 60 Nerv » destiné aux poids lourds, mis au point par l'INRETS.

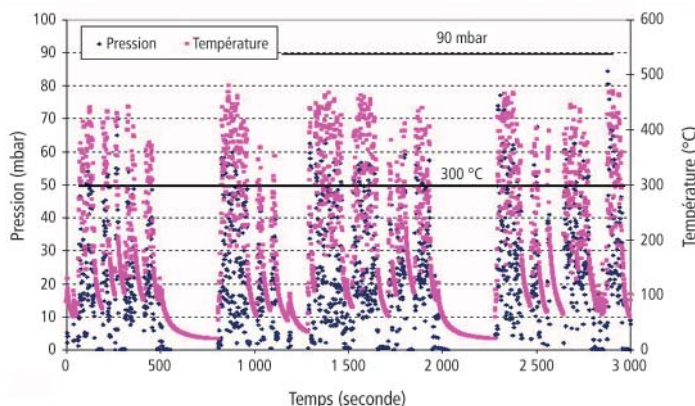


Les températures d'échappement mesurées en utilisation réelle

Ce graphique présente les mesures de température d'échappement et de contre-pression pendant 3 000 secondes. Ces mesures sont cependant représentatives de l'ensemble du fonctionnement du véhicule.

La tenue du système semble garantie, puisque :

- la température dépasse régulièrement 300 °C, ce qui permet des régénérations fréquentes ;
- la contre-pression reste constante (pour un débit de gaz donné) et inférieure à 90 mbar.

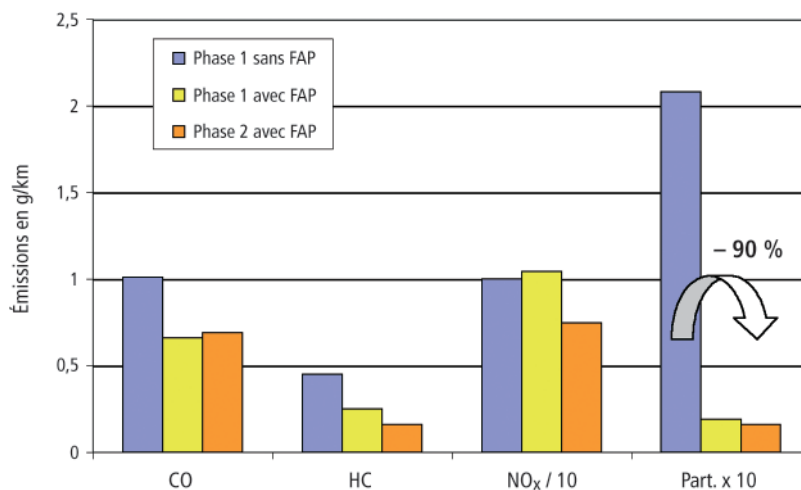


Source SILVE/ADEME

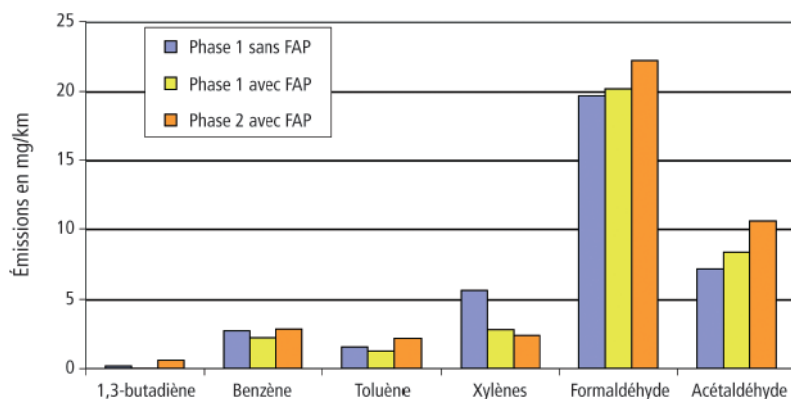
Les résultats des évaluations

Il ressort à ce jour de ces expérimentations, que :

- Le système Carmex SC réduit fortement les émissions CO, HC, ainsi que les particules (de 80 à plus de 90 %), en conservant ces performances sur une année.

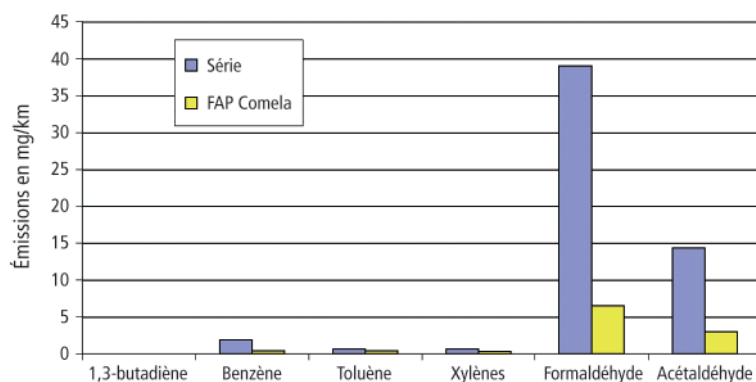
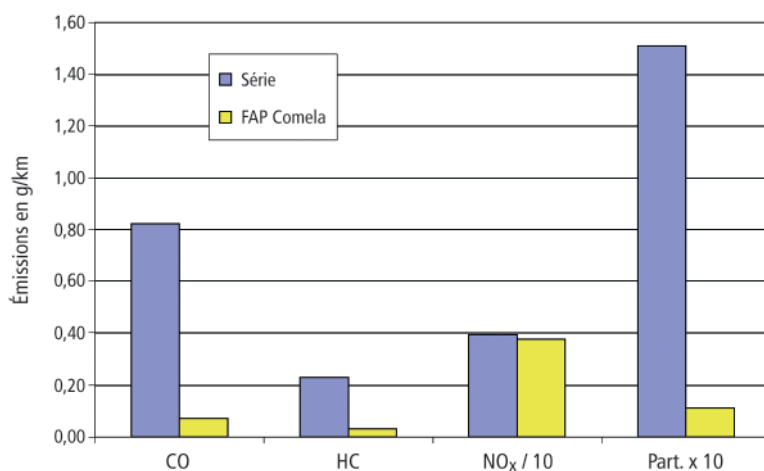


- Les émissions de polluants non réglementés sont peu modifiées par le FAP Carmex.



Source ADEME

- Le FAP Comela apporte de bons résultats, à la fois sur les polluants réglementés et sur les polluants non réglementés.



- L'utilisation de filtre à particules sur un poids lourd donne d'excellents résultats en termes de réduction d'émissions de particules et de fumées.
- La tenue des filtres est assurée, si les préconisations d'utilisation de l'additif et l'entretien courant des véhicules sont respectés, c'est-à-dire :
 - si le FAP nécessite l'utilisation d'additif, il est préférable de l'utiliser par dilution dans la cuve ;
 - l'entretien du filtre tous les 40 000 km est préconisé pour limiter le colmatage par les cendres et les particules non oxydées.
- En respectant les préconisations, l'augmentation des consommations évaluées sur une année est en moyenne de 4 %.

Ces résultats sont présentés dans une plaquette ADEME (réf. ADEME n° 4557) qui détaille l'expérimentation avec le FAP Carmex.

Les émulsions

Les essais réalisés

Afin de constituer des références techniques et économiques et de valoriser les résultats, une campagne de suivi, portant sur l'estimation des consommations et une analyse détaillée des émissions polluantes, réglementées et non réglementées, a été réalisée sur une période minimale de douze mois. Il s'agit de suivre, durant cette période, l'évolution des performances des véhicules dans des conditions d'usage réel. Cette campagne porte sur les points suivants :

- Le suivi d'une flotte composée de vingt véhicules (DAF, Scania, Renault – Euro2 et 3 – injecteur pompe et pompe distributrice), soumis à des usages différents :
 - Benne TP,
 - Citernes fixes et basculantes.
- Ce suivi s'est déroulé sur une durée de douze mois et porte sur la consommation de carburant, les incidents éventuels, les analyses d'huile. Il faut noter que le suivi concerne des véhicules de constructeurs différents, soumis à des usages dissemblables.
- Un programme d'évaluation des émissions polluantes réglementées et non réglementées d'un véhicule Scania (avec émulsion et gazole), sur un cycle représentatif des conditions réelles de circulation. Ces mesures se sont déroulées en deux phases, effectuées à une année d'intervalle, à l'UTAC.
- Des mesures, réalisées par le Comptoir des Technologies selon la méthode Autonat sur neuf véhicules, qui concernaient la dispersion des polluants, l'opacité des fumées et les performances réalisées. Ces tests ont également été menés en début de programme sur les dix véhicules du parc témoin.
- Des mesures embarquées avec un système innovant et des validations lors des mesures sur banc à rouleaux ont également été réalisées.

Les résultats obtenus

Les consommations de carburant

Les véhicules alimentés avec l'émulsion ont parcouru entre 33 000 et 48 000 km, soit 380 000 km au total. Les moyennes des consommations des véhicules sont de 36,2 litres/100 km pour le gazole et 38 litres/100 km pour l'émulsion, soit une augmentation de 4 %. Cette surconsommation est variable selon l'usage entre 3 % pour les bennes TP et 10 % pour les citernes fixes, et selon les constructeurs entre 3 % pour DAF, 5 % pour Scania et 7 % pour Renault. Le kilométrage relativement faible réalisé par les véhicules sur 12 mois s'explique par le fait que leur exploitation s'est faite en zone courte, de manière à ce qu'ils puissent rester à proximité de la cuve dédiée à l'émulsion eau-gazole de Gecam et donc utiliser cette émulsion comme carburant à 100 %. Il a par ailleurs été porté une attention toute particulière à maintenir des conditions d'exploitation les plus comparables possibles en termes de nombre de tours, kilomètres par tour, tonnes par tour et taux de kilomètres en charge, entre le parc en test avec l'émulsion et le parc témoin utilisant du gazole classique.

Les analyses d'huile

Trente-huit analyses d'huile ont été réalisées sur la période, soit une moyenne de 3,8 analyses par véhicule en test à l'émulsion eau-gazole de Gecam. Cela correspond à une analyse tous les 15 000 km, hors analyse de situation initiale.

Ont été suivis en particulier :

- les teneurs en métaux, traduisant l'usure des pièces des moteurs ;
- la viscosité, donnant des indications sur le fonctionnement des moteurs ;
- la dilution de l'huile, permettant de détecter un dysfonctionnement du système d'injection ;
- les matières charbonneuses, caractérisant la qualité de la combustion.

Sur toute la durée du test, une stabilité remarquable des paramètres suivis a été constatée.

Les incidents

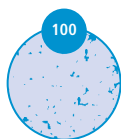
Le test conduit sur douze mois n'a pas laissé apparaître d'incident de quelle nature que ce soit. Néanmoins, une certaine difficulté à desserrer le couvercle du filtre à gazole a été constatée sur les véhicules DAF alimentés avec l'émulsion eau-gazole. Une procédure a donc été définie pour pallier cette difficulté. Il s'agit en l'occurrence de faire chuter préalablement la pression en desserrant l'écrou du flexible d'alimentation. Ceci fait, l'ouverture du couvercle s'opère normalement. Cette procédure est entrée en vigueur sur le parc de véhicules en test et a donné toute satisfaction.

Le comportement de l'émulsion en exploitation

La perte de puissance relative observée sur banc UTAC ne s'est pas traduite par une remise en cause du profil de puissance des tracteurs, utilisés pour le transport de pondéreux en camions complets.

Les retours d'expérience des conducteurs sont par ailleurs positifs :

- sensation de conduite plus souple,
- niveau sonore réduit.

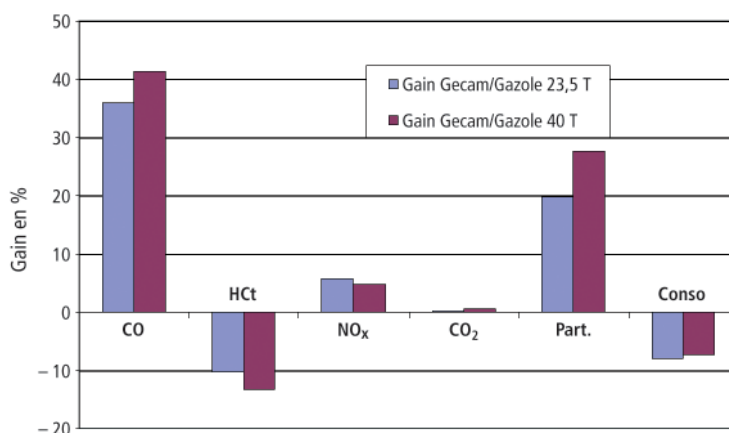


Les résultats des mesures à l'UTAC

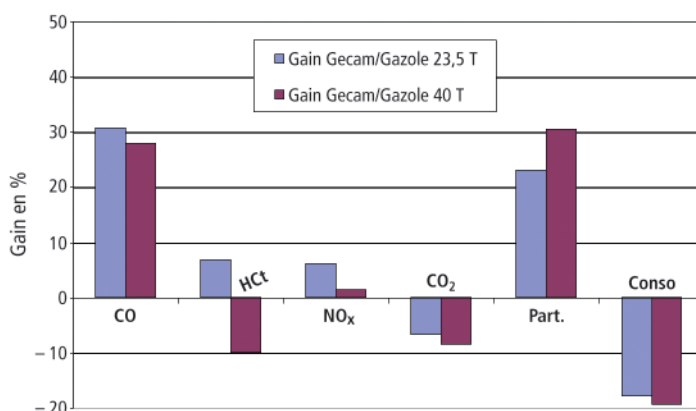
Le cycle, dit 60 Nerv, utilisé avec une vitesse moyenne de 60 km/h pour mesurer les émissions de polluants et la consommation, est présenté sur le graphique ci-dessous. Le véhicule alimenté au gazole et avec l'émulsion a été caractérisé suivant ce cycle sur le banc à rouleaux, avec deux charges (23,5 et 40 tonnes). Ces mesures ont été effectuées au début du programme, puis renouvelées un an après.

Les émissions de polluants réglementés présentent les résultats suivants.

- Au début de l'expérimentation :
 - des gains (indiqués en %) de NO_x (– 5 %) peu influencés par la charge ;
 - des gains sur les émissions de particules (– 20 à – 27 %) et de CO (– 40 %), d'autant plus importants que la charge est élevée ;
 - des surconsommations proches de la teneur en eau, confirmées par des émissions de CO_2 identiques ;
 - des surémissions de HC de 10 %.

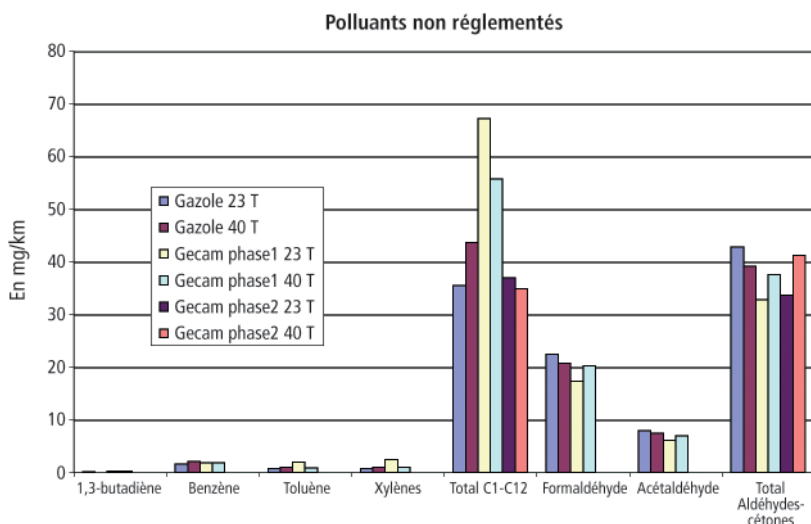


- Une année après, l'évolution des émissions réalisées avec l'émulsion est présentée ci-dessous :
 - les émissions de particules sont encore réduites de près de 5 % ;
 - mais les émissions de CO_2 et la consommation présentent des augmentations de près de 10 %.
 Cette dérive vient du basculement entre deux cartographies performance/économique, lors des essais, basculement confirmé par les mesures Autonat.



Sur le plan des émissions de polluants non réglementés (PNR), on peut noter :

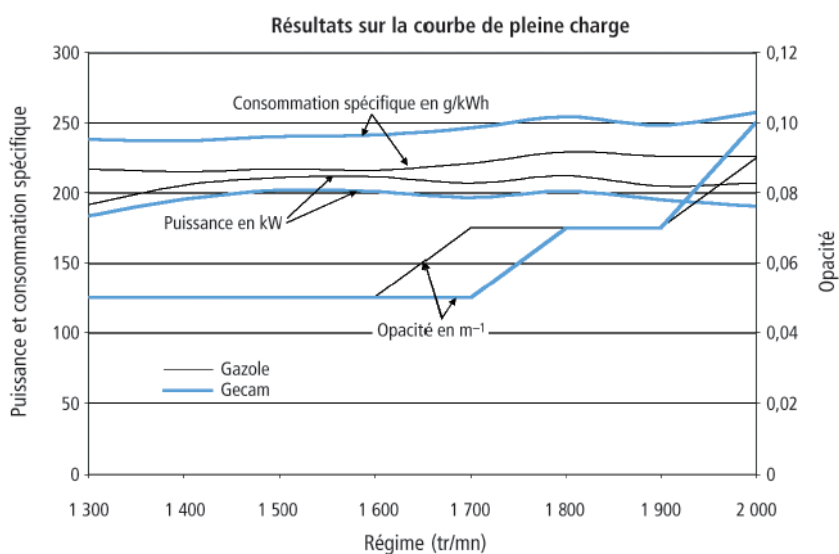
Les écarts entre les deux carburants, gazole et Gecam, sont faibles au niveau des principaux PNR. De même, la charge du véhicule n'a pas d'impact sur les émissions.



Les performances et l'opacité en pleine charge.

En pleine charge, les paramètres suivants sont mesurés : puissance (en kW), consommation spécifique (en g/kWh) et opacité (en m^{-1}). L'utilisation de l'émulsion entraîne :

- une diminution de la puissance d'environ 5 % ;
- une augmentation de la consommation spécifique de 10 % ;
- une diminution de l'opacité à mi-régime.

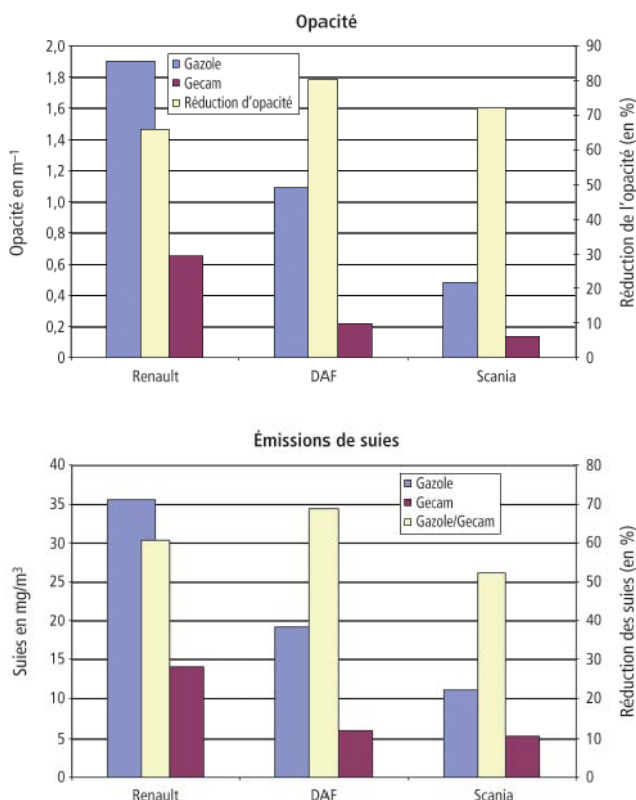


Les résultats de dispersions des mesures sur le parc de véhicules

La procédure employée est la méthode Autonat. Elle est basée sur l'utilisation d'un cycle, constitué d'une série d'accélération à vide pour estimer les émissions polluantes. Le cycle est généré de manière automatique par un actionneur pneumatique, qui enfonce la pédale d'accélérateur à intervalles réguliers. Les polluants réglementés CO, NO_x et particules sont analysés, ainsi que les performances (puissance, couple) par l'analyse dynamique de la phase d'accélération. Il faut noter que les mesures effectuées par cette méthode sont moins précises que celles réalisées à l'UTAC, mais permettent de caractériser une flotte en termes de dispersions des performances. Les résultats obtenus sont les suivants :

Les émissions de suies et l'opacité

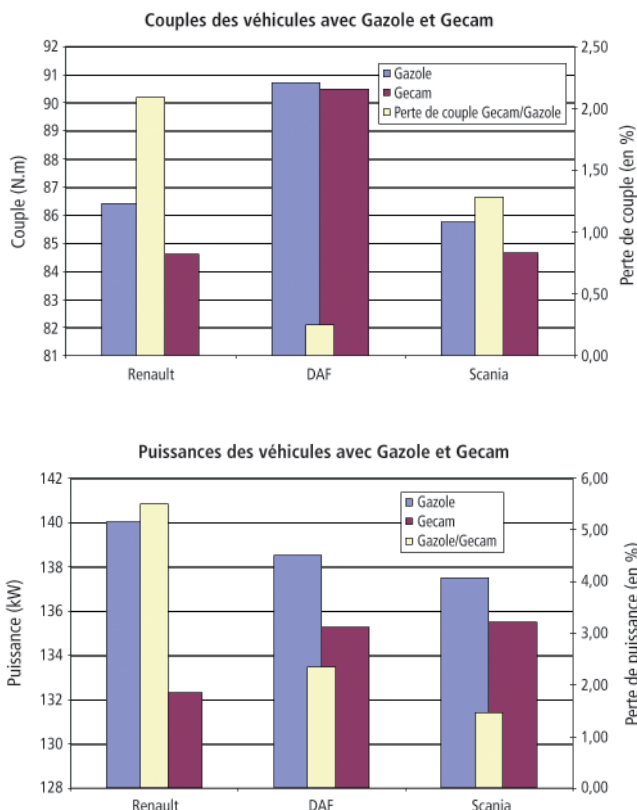
Les mesures d'opacité et de suies présentent de fortes similitudes. L'utilisation de l'émulsion permet de réduire entre 50 et 70 % les émissions de suies en masse, et entre 65 et 80 % l'opacité des fumées. La réduction porte donc essentiellement sur les particules de taille importante.



Les performances

Les véhicules affichent des résultats différents selon la marque. L'utilisation de l'émulsion entraîne des pertes de couple variant de 0,2 % pour DAF à plus de 2 % pour Renault, correspondant

à des pertes de puissances de 1,5 à 5 %. Les systèmes d'injection (injecteur pompe, pompe distributrice) et l'état des moteurs peuvent être à l'origine de ces écarts. Ces différences se retrouvent sur les mesures de consommation en usage réel, où les véhicules DAF présentent la plus faible surconsommation.



Conclusions

Cette étude, qui s'est déroulée sur vingt poids lourds durant une année, a permis d'acquérir les données et références suivantes :

- l'utilisation de l'émulsion permet une réduction des émissions de particules de l'ordre de 20 à 30 %, confirmée par une réduction de l'opacité ;
- les NO_x sont également réduits dans une moindre mesure (5 %), alors que les autres polluants ont des évolutions variables : augmentation des HC, augmentation ou réduction du CO ;
- l'augmentation des consommations évaluées sur une année est en moyenne de 4 %, variable selon les usages et les véhicules (entre 3 et 10 %). Elle est associée à une perte de puissance de l'ordre de 5 % ;
- Il n'y a pas eu d'incident notable, et les analyses d'huile confirment l'absence d'usure anormale. Lorsque les recommandations d'utilisation du fournisseur sont respectées, aucun problème technique majeur n'intervient lors de l'utilisation de ce produit ;

- le constructeur doit être contacté avant la mise en œuvre de ce carburant, notamment pour les moteurs fonctionnant avec des systèmes d'injection common-rail ;
- d'un point de vue économique, le régime dérogatoire fiscal compense globalement la surconsommation et le surcoût de réalisation d'une émulsion.

Ce carburant présente donc un bilan environnemental positif. Son usage doit donc se développer sur les véhicules lourds captifs. Par ailleurs, l'émulsion est également miscible avec du gazole, autorisant un remplissage occasionnel si nécessaire, et peut être utilisée en complément d'un filtre à particules.

Ces résultats sont repris dans une plaquette ADEME qui détaille l'expérimentation avec l'émulsion Gecam (http://www.ademe.fr/htdocs/publications/publipdf/emulsion_eau_gazole.pdf).

Les évaluations à venir

L'ADEME souhaite poursuivre ces évaluations sur des nouveaux systèmes de FAP ou de nouveaux véhicules.

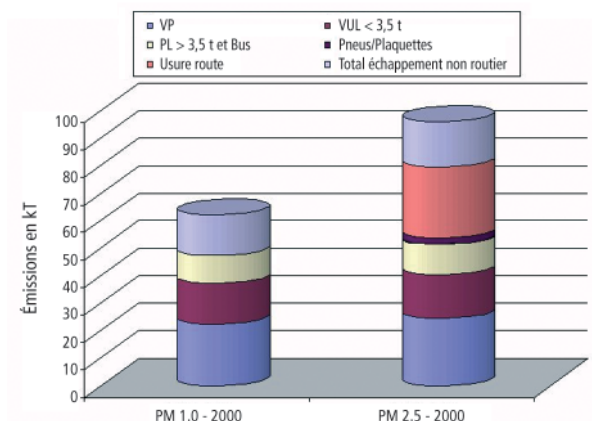
Des évaluations sur les autocars interurbains sont en cours avec des filtres à particules, catalyseurs et émulsions. Les profils d'usage de ces véhicules sont proches de ceux des poids lourds.

À retenir sur les poids lourds

- L'efficacité des FAP testés est supérieure à 90 % en ce qui concerne la suppression des particules sur tout le spectre.
- **La tenue des systèmes est garantie dans la majorité des cas.** Une phase probatoire de 6 mois est donc à réaliser avant l'équipement de l'ensemble d'une flotte, en mesurant, sur deux poids lourds équipés, les températures et l'évolution des contre-pressions à l'échappement.
- La maintenance des systèmes, notamment le nettoyage du FAP est à effectuer au moins **deux fois par an**.
- Les évaluations à venir visent à tester d'autres FAP, ainsi que les systèmes proposés par les constructeurs en option.
- L'utilisation de l'émulsion permet une réduction des émissions de particules de l'ordre de 20 à 30 %, confirmée par une réduction de l'opacité, et dans une moindre mesure des NO_x.
- L'augmentation des consommations évaluées sur une année est en moyenne de 4 %, variable selon les usages et les véhicules (entre 3 et 10 %). Elle est associée à une perte de puissance de l'ordre de 5 %.
- Le constructeur doit être contacté avant la mise en œuvre de ce carburant, notamment pour les moteurs fonctionnant avec des systèmes d'injection common-rail.

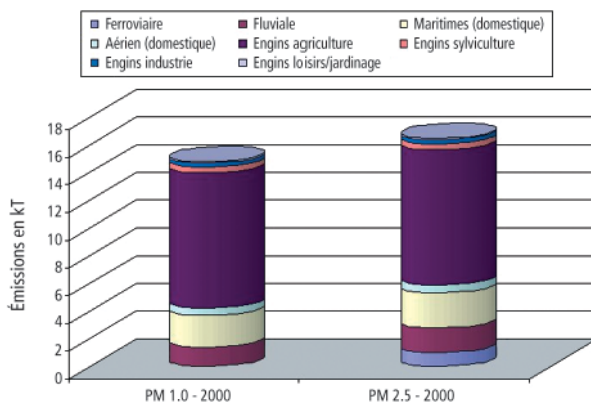
ET LES ENGINs NON ROUTIERS ?

Les engins non routiers utilisent en majorité des moteurs Diesel. Ils pourraient donc être équipés de FAP. Ces derniers participent aux émissions de PM 1.0 et PM 2.5 (les plus dangereuses pour la santé) dans les mêmes proportions que les poids lourds de plus de 3,5 tonnes. Le graphique ci-dessous montre les émissions des véhicules routiers et non routiers (en kilotonnes).



Source CITEPA

La décomposition de cette contribution en matière d'émissions de particules PM 1.0 et PM 2.5 pour ces véhicules non routiers est la suivante (en kilotonnes) :



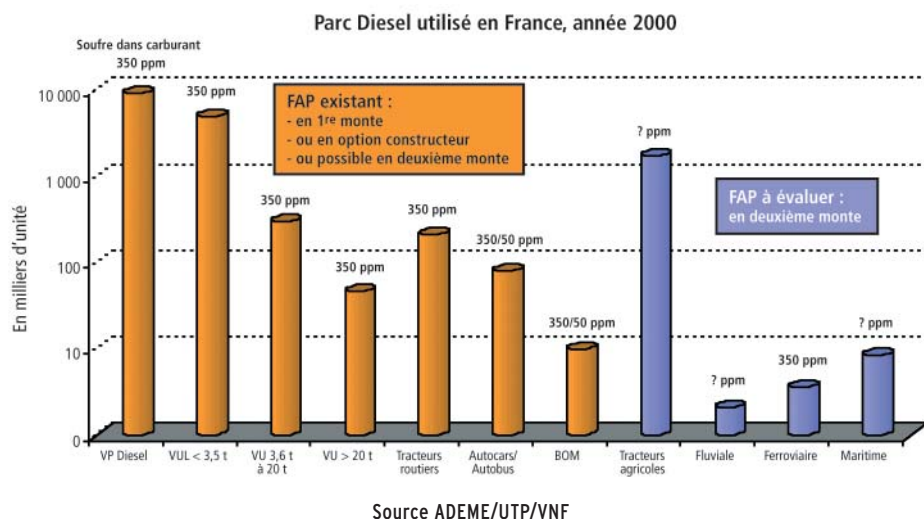
Source CITEPA

Il apparaît clairement l'influence des engins agricoles, suivis des engins fluviaux et maritimes, puis des engins ferroviaires.

Le parc actuel français (battant pavillon français pour les bateaux) des engins et véhicules fonctionnant avec des moteurs Diesel est présenté dans le tableau. L'équipement de ce parc en filtres à particules pourrait être effectué en considérant les différents groupes suivants :

Véhicule/ engin	Évaluation ADEME		Quantité de soufre carburant (en ppm)		Mise en place : 1 ^{re} monte ou option constructeur 2 ^e monte (rétrofit)	Actions pour évaluation
	État	Résultat	2000	2005		
VP	Faite	positif	350	50	1 ^{re} monte	Suivre l'évolution des technologies
VU/VUL	positif par analogie*		350	50	1 ^{re} monte	
PL	Faite	positif	350	50	Option 1 ^{re} monte ou 2 ^e monte	
Bus	Faite	positif	350/50	50/10	Option 1 ^{re} monte ou 2 ^e monte	
BOM	Faite	Positif à valider	350/50	50/10	Option 1 ^{re} monte ou 2 ^e monte	Évaluer autre technologie
Engins agricoles	2006		??		2 ^e monte	Maîtriser la teneur en soufre des carburants, puis évaluer les technologies
Engins fluviaux	À faire		??		2 ^e monte	
Engins maritimes	À faire		??		2 ^e monte	
Engins ferroviaires	À faire		350	50	2 ^e monte	Évaluer les technologies

* Les motorisations des VUL sont directement dérivées de celles des véhicules particuliers.



Il convient donc pour les engins agricoles, maritimes et fluviaux de maîtriser le taux de soufre dans le carburant, pour évaluer correctement les technologies de FAP et pouvoir, par la suite, généraliser leur utilisation en garantissant leur tenue.

Une étude bibliographique réalisée sur les engins non routiers (bateaux, trains et engins de travaux publics) permet d'identifier les solutions technologiques disponibles et de proposer aux exploitants de ces engins une base de réflexion et de choix.

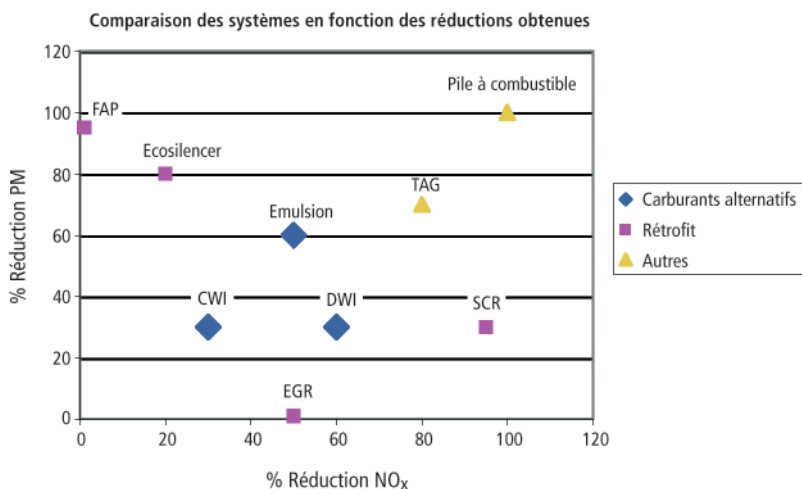
Les bateaux

Il existe très peu de données concernant l'étude de filtres à particules utilisés sur de gros navires. En effet, les moteurs installés, de grosses cylindrées, ont des températures d'échappement assez faibles ce qui ne facilite pas la régénération du FAP. En plus, la régénération par catalyseur est rendue difficile par l'utilisation d'un carburant à forte teneur en soufre, ce qui endommage prématurément le catalyseur. Néanmoins, cette teneur en soufre va diminuer dans les années à venir, permettant ainsi l'utilisation de ce système.

U.S. Environmental Protection Agency a étudié la combinaison d'un FAP avec un EGR (l'EGR est un système qui réinjecte une partie des gaz d'échappement) pour nettoyer les gaz d'échappement avec un FAP avant de les réintroduire et limiter l'encrassement du moteur.

Ce système commercialisé par Johnson Matthey, nommé EGRT pour Exhaust Gas Recirculation Trap a été testé sur un navire de 1 362 CV. Le coût a été évalué à 45 000 \$ soit 27 €/hp. Lors des tests, ce moteur fut alimenté en ULSD, et les réductions des émissions obtenues sont de 40 % en NO_x et 95 % de PM 2.5.

Il existe également d'autres systèmes pour réduire les émissions de particules sur des bateaux.



Les deux études ont montré que le système CWI (injection d'eau à l'admission) est très intéressant pour répondre aux exigences actuelles. En effet, comme on le voit avec les graphiques, la CWI semble être le système le plus économique pour réduire par de faibles marges les émissions de NO_x et de PM. De plus, la CWI est une méthode relativement simple à mettre en application,

puisque'il suffit d'injecter de la vapeur d'eau dans l'air chaud comprimé avant le turbocompresseur. Elle serait donc particulièrement à propos pour obtenir des réductions faibles de NO_x afin de satisfaire aux exigences minimales de l'Organisation maritime internationale (OMI).

Le DWI (injection directe d'eau dans la chambre) est un système fonctionnant sur le même principe, il est plus efficace au niveau des réductions. Mais il s'agit d'un système plus complexe qui est donc plus coûteux et surtout il est difficile à mettre en application en seconde monte.

Les émulsions sont aussi une solution à retenir, puisqu'elles permettent de réduire jusqu'à 50 % les NO_x et jusqu'à 60 % les PM, sans modification des moteurs. De plus, cette solution est déjà commercialisée sous différentes formes et intéresse les industriels, ce qui permettra de réduire les coûts au fur et à mesure de l'augmentation de leur utilisation.

L'Ecosilencer est un système intéressant pour les applications maritimes mais il a été développé pour réduire les émissions de SO_2 . Or la disponibilité des carburants à basse teneur en soufre sera de plus en plus grande, les réglementations l'imposant, ce qui permettra des réductions aussi importantes de SO_2 , sans aucune modification du moteur. Ce système permet aussi une forte réduction des PM, mais les FAP sont plus performants pour des coûts moindres.

La SCR a un coût unitaire parmi les plus élevés, mais elle permet d'éliminer presque totalement les NO_x . C'est donc la technologie qui convient le mieux aux navires exploités dans des régions qui appliquent des programmes très rigoureux de protection de l'environnement et qui peuvent bénéficier d'incitatifs financiers.

L'EGR est une méthode difficilement applicable dans le secteur maritime. Elle ne constitue pas actuellement une solution viable.

Enfin, les autres solutions comme les turbines à gaz (TAG), les PAC, le solaire... ont des efficacités de réduction des émissions très fortes, mais sont beaucoup trop coûteuses pour se développer à grande échelle.

Les trains

Le filtre à particules semble être le système de dépollution qui intéresse le plus les entreprises de chemins de fer, à l'heure actuelle. Les coûts d'installations sont assez réduits et il est surtout très facile de le mettre en place sur des machines d'anciennes générations.

Néanmoins, plusieurs problèmes se posent à l'utilisation des filtres à particules pour une application ferroviaire. Tout d'abord, dans ce type d'application, la place est extrêmement limitée (la taille du silencieux). Or du fait du degré de suralimentation élevé, les puissants moteurs ferroviaires (> 560 kW) requièrent une contre-pression des gaz d'échappement plus faible que les autres moteurs Diesel. Le plus faible niveau de contre-pression doit donc être compensé par de gros volumes de FAP. Mais, comme la place est limitée, cela induit des problèmes d'agencement des systèmes. Ensuite, les températures d'échappement sont relativement faibles, ce qui empêche une régénération classique de se produire. En effet, les gaz d'échappement ont une température comprise entre 100 et 150 °C au ralenti, ce qui représente environ 60 % du temps de marche. Or

la régénération « naturelle » nécessite des températures de l'ordre de 550-600 °C. Enfin, un engorgement des filtres apparaît sur les moteurs de grande puissance (> 560 kW). Sur ces moteurs, la consommation d'huile est sensiblement plus importante que sur des moteurs rapides de petites tailles. Cette surconsommation d'huile augmente des émissions de particules, ce qui obture les filtres à particules classiques.

Différentes techniques ont été développées pour faire face à ces difficultés, comme nous l'avons vu dans la partie précédente.

Un exemple de solution au problème des faibles températures à la sortie est l'utilisation d'un filtre à particules avec régénération par brûleur (« full flow »). Deutz commercialise depuis 1994 de tels systèmes pour des applications Diesel : bus, engins industriels, trains. Ce filtre se régénère entièrement automatiquement, il remplace le pot d'échappement et peut être installé aussi bien comme équipement d'origine ou lors d'une modification d'un véhicule ancien. Un brûleur est intégré dans le flux des gaz d'échappement et la régénération s'effectue dans n'importe quel état de fonctionnement du moteur, sans perte de puissance.

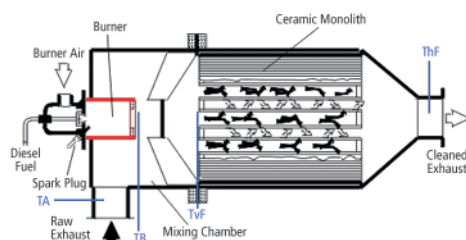


Schéma du filtre DPFS de Deutz.

Les gaz d'échappement passent classiquement dans un filtre en céramique monolithe. Quand certains paramètres, tels que les pressions en amont et en aval ou le temps de filtration écoulé, atteignent des valeurs critiques, la régénération est automatiquement activée. Le système électronique de contrôle permet donc de déclencher la procédure de régénération sans aucune intervention d'un opérateur. Le système active les brûleurs et fait en sorte de maintenir une température optimale pour détruire les particules. Cette température ne doit pas être trop élevée pour ne pas endommager le filtre monolithe. Le système régule la température pour obtenir des contraintes thermiques acceptables par le système. L'emploi de ce type de systèmes nécessite l'utilisation d'un carburant à faible teneur en soufre.

On voit, ici, que le système est contrôlé par la prise de quatre températures par thermocouples. TA : entrée des gaz d'échappement, TB température du brûleur, TvF : température à l'entrée du filtre et ThF : température des gaz propres à la sortie. Ces quatre mesures permettent de réguler entièrement le système.

Plusieurs études ont été lancées et même, quelques installations pour un usage commercial ont déjà vu le jour.

En **Suisse**, les compagnies ferroviaires (CFF) ont équipé 15 autotracteurs Diesel de filtres à particules Full Flow. Des défaillances dans le système d'asservissement avaient été détectées. Ces problèmes ont été résolus depuis.

Au **Japon**, JR Central et Sumitomo Electric ont étudié des filtres à particules équipés d'une résistance électrique chauffante sur des motrices Diesel de série Kiha 85.

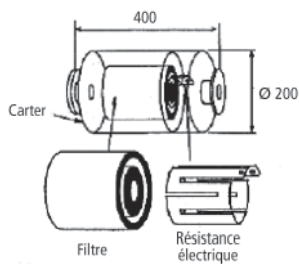


Schéma du filtre et de la résistance
(Rolling Stock & Machinery,
janvier 2000).

Le système prototype comprenait 6 filtres :

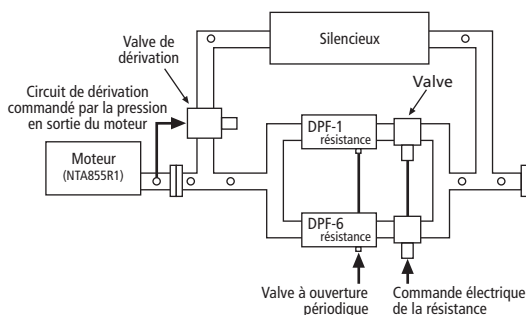
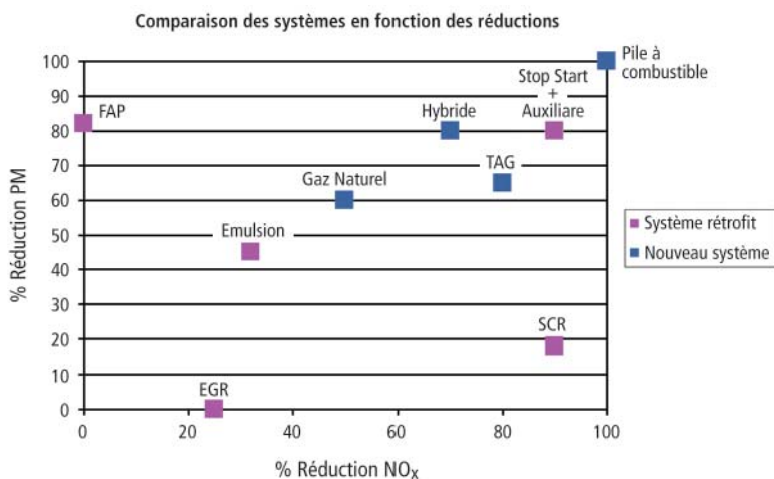


Schéma du système prototype (Rolling Stock & Machinery, janvier 2000).

La régénération se fait par une résistance électrique. Lorsque la quantité maximale de suies a été captée, la résistance se met en chauffe pendant 15 minutes, puis la chaleur résiduelle est utilisée durant le reste de la période d'incinération dont la durée totale est de 30 minutes. L'étude a conclu que le système permettait une réduction de plus de 70 % de la quantité de suies émise.

En France, la SNCF est en train de mettre en place une étude qui porterait sur la mise en place de FAP sur des automoteurs et locomotives mis en service dans les années 1960-1970. EminoX équipe 18 autorails en Suède, leur coût d'exploitation a été calculé à 10 €/1 000 km.

<http://www.railwayforum.com/getfile.php?id=156>



Le filtre à particules est un système peu coûteux et qui demande peu de modifications du système d'évacuation des gaz, puisqu'il prend généralement la place du silencieux. De plus, son efficacité et son utilisation ont déjà été testées sur des applications routières (bus, poids lourds) et ces dispositifs se sont révélés satisfaisants. Son application dans le domaine ferroviaire est donc fortement envisageable.

Les émulsions permettent d'obtenir des réductions moyennes d'émissions de particules avec un coût d'investissement très faible. Mais si cette solution n'a pas fait l'objet de beaucoup de tests, elle demeure une méthode pertinente de contrôle des émissions. Les mêmes commentaires sont vrais pour l'utilisation du Gaz Naturel. Mais, l'utilisation du gaz naturel nécessite, en revanche, des investissements importants (station de compression, ...).

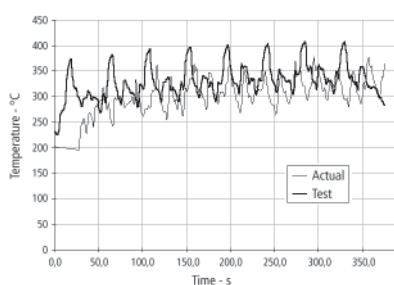
Malgré un prix élevé, les moteurs hybrides se révèlent être une solution d'avenir, comme le montre le cas Canadien de la Green Goat. Cette méthode peut donc être conseillée dans le cas d'un renouvellement de matériel compte tenu de son coût élevé. De même, l'EGR est pour le moment plus souvent recommandé dans le cas d'un changement de moteur, plutôt que dans le cas, où l'on envisage un investissement en seconde monte. Des constructeurs comme Man proposent déjà cette solution avec leurs moteurs.

Les applications solaires ne sont pas présentées ici, car elles ne sont pas utilisées pour la propulsion des trains. Néanmoins, leur adoption est intéressante pour produire l'énergie nécessaire à l'éclairage et à la ventilation.

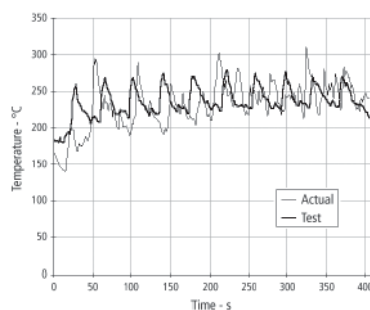
Les systèmes d'arrêt et de démarrage automatiques sont plus utilisés dans les pays froids, puisqu'ils sont souvent combinés à un système de puissance auxiliaire pour maintenir le moteur à température de fonctionnement. Les données utilisées sont celles de fournisseurs, il serait donc intéressant de réaliser des mesures embarquées sur une locomotive circulant dans des zones tempérées.

Les engins de travaux publics

Les mesures réalisées au Canada et aux USA ont montré que la température moyenne d'échappement de ces engins est assez faible comme le démontrent ces graphiques extraits de l'étude 2 :



Évolution de la température des gaz d'échappement d'une chargeuse.
 $T_{\text{moy}} \approx 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Évolution de la température des gaz d'échappement d'une retrocaveuse.
 $T_{\text{moy}} \approx 230 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Remarque : La courbe test correspond aux mesures embarquées et l'autre aux mesures par rapport à un cycle théorique sur banc.

Ces faibles températures entraînent des problèmes au niveau de la régénération du filtre à particules, comme il avait déjà été signalé pour les locomotives.

En tenant compte de ce problème de régénération, l'entreprise Johnson Matthey a développé trois systèmes dédiés au marché des engins de construction :

1. DPF- CRT : FAP avec catalyseur

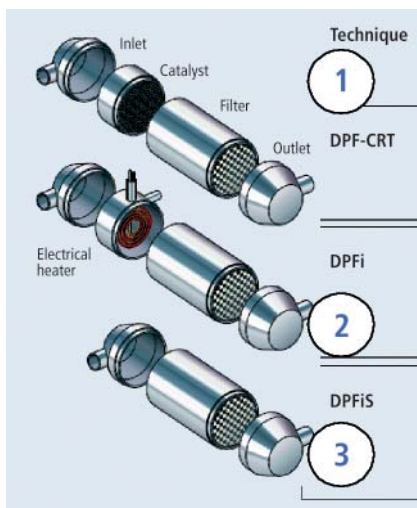
Ce système combine un filtre à particules avec un catalyseur à oxydation Diesel. Le catalyseur est placé en amont du FAP. Le principe est que le catalyseur génère du dioxyde d'azote, qui élimine les particules piégées dans le filtre. Ce type de systèmes nécessite l'utilisation d'un carburant à très faible teneur en soufre.

2. DPFi

Ce type de systèmes a déjà été vu pour les locomotives, puisque, ici, une résistance électrique est utilisée pour augmenter la température dans le filtre, afin de brûler les particules. Ce système fonctionne avec un carburant à plus haute teneur en soufre et pour des moteurs à faibles vitesses et charge, donnant des températures d'échappement basses.

3. DPFis

Ce dispositif fonctionne avec l'emploi d'un additif dans le carburant qui va oxyder les particules piégées dans le filtre. Il ne nécessite pas l'utilisation d'un carburant à très faible teneur en soufre, mais requiert par contre des températures d'échappement assez élevées.



Comme la plupart des filtres à particules destinés à ce secteur d'activité, ces systèmes sont emboîtés dans des enveloppes en acier inox pour les protéger des différentes contraintes (mécanique, climatique, ...).

Deux types de filtres à particules ont été retenus lors de l'étude New-Yorkaise (n° 1) : un FAP avec catalyseur et un FAP, dit actif, qui se régénère par augmentation de la température (soit résistance électrique, soit brûleur). Les résultats des mesures sont fournis dans le tableau suivant :

	Réduction	Inconvénients	Coût
FAP avec catalyseur	- réduction des PM de 60 à 90 % - réduction importante des CO et des HC	- contre-pression qui risque d'endommager le moteur et le turbo compresseur - utilisation de ULSD	15 à 25 €/hp
FAP actif	- réduction des PM de 60 à 90 % - réduction importante des CO et des HC	- même risque de contre-pression - légère augmentation de la consommation (brûleur) - système relativement complexe	30 à 50 €/hp

L'étude canadienne a conduit à des observations similaires avec un FAP actif, installé sur une rétrocaveuse. Une réduction de 81 % des émissions de particules a été mesurée.

Ces études montrent l'efficacité d'un filtre à particules à réduire les PM. Il est donc intéressant de coupler ce système à un système de réduction d'autres polluants. C'est sur cette idée que fonctionne le « Longview » développé par l'entreprise californienne Cleaire. Ce système intègre un filtre à particules qui se régénère par catalyse avec un catalyseur de NO_x (NRC : NO_x Reducing Catalyst) qui va provoquer une réaction entre les hydrocarbures venant du carburant injecté à l'échappement et les NO_x plutôt qu'avec le O₂, et qui forme du N₂, du CO₂ et de l'eau. Le Longview est destiné à la modification des anciens moteurs et prend la place du silencieux.

<http://www.cleaire.com/site/products/Longview%20D-1%20Screen.pdf>



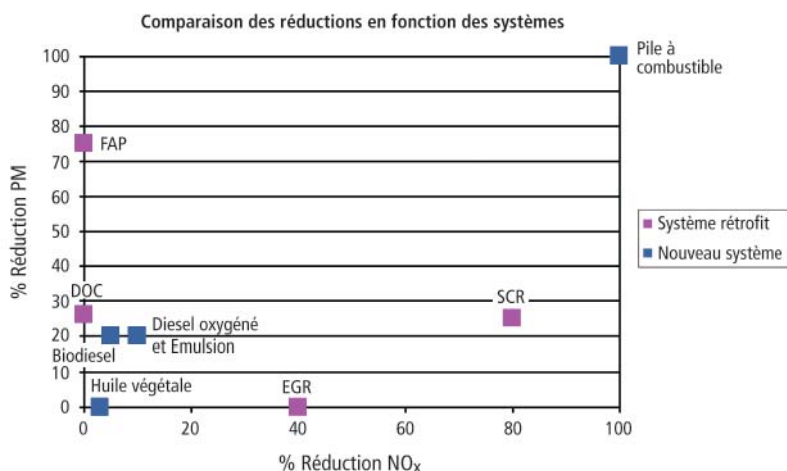
Système Cleaire (FAP + catalyseur NO_x).

Cleaire annonce une réduction de 85 % des PM et de 25 % des NO_x. Les HC et CO sont également très fortement réduits.

Même avec des systèmes utilisant un catalyseur, ou des résistances chauffantes..., les gaz d'échappement doivent atteindre une certaine température pour obtenir une bonne régénération du filtre. L'étude intitulée « Investigation into the feasibility of PM filters for Non road Mobile Machinery » menée par Euromot et l'association des fabricants de moteurs a réalisé une estimation des températures des gaz d'échappement de différents engins de chantier. Ces résultats s'appuient sur l'utilisation du cycle de mesure EPA non routier. À partir de ces données, ils ont déduit quels types de régénérations étaient possibles.

	Température moyenne d'échappement °C	Méthode de régénération		
		CRT	Catalyseur	Additifs dans carburant
Cycle tracteur agricole	381,3	Oui	Oui	Oui
Cycle Chargeuse pelleteuse	241,4	Non	Non	Non
Cycle tracteur à chaîne	313,7	Oui	Non	Non
Cycle excavateur	404,7	Oui	Oui	Oui
Cycle chargeur compact	343,1	Oui	?	Non
Cycle chargeur compact haute vitesse	369,0	Oui	Oui	Non
Cycle chargeur compact fort couple	346,8	Oui	Non	Non
Chargeuse à roue	247,9	Non	Non	Non
Chargeuse à roue haute vitesse	272,1	Non	Non	Non
Chargeuse à roue fort couple	280,8	Non	Non	Non

On remarque les importantes différences de températures selon les appareils, ce qui confirme la difficulté du choix du système de réduction des particules.



Ces résultats montrent que les systèmes de dépollution utilisés pour les engins de travaux publics sont très proches de ceux employés pour des applications routières. Le filtre à particules est un dispositif facile à mettre en place, peu coûteux, capable de réduire très fortement les émissions de particules. De plus, son succès pour les poids lourds a permis de développer de nombreuses techniques de régénérations, capables d'être adaptées aux engins de TP. De plus, beaucoup de

systèmes voient le jour pour combiner les avantages du FAP avec un système DeNOx comme le SCR. Une possibilité est aussi d'utiliser un FAP en alimentant le moteur avec un carburant alternatif comme le Biodiesel.

Le système DOC est en cours de développement, il est surtout destiné à réduire les CO et les HC, c'est pourquoi le graphique précédent ne le met pas en valeur.

Les huiles végétales sont déjà utilisées pour des applications agricoles en Allemagne. Les premiers résultats de mesures ont montré une légère réduction des NO_x, mais d'autres mesures, plus poussées, devront être réalisées pour déterminer leur influence sur l'ensemble des polluants.

La filière électrique n'est pas représentée dans cette analyse. Cette solution est utilisée essentiellement dans des niches d'équipements de manutention, fonctionnant en intérieur ; elle représente donc un intérêt certain pour des applications bien précises.

BILAN DU PROGRAMME D'ÉVALUATION

La méthodologie mise en œuvre permet bien :

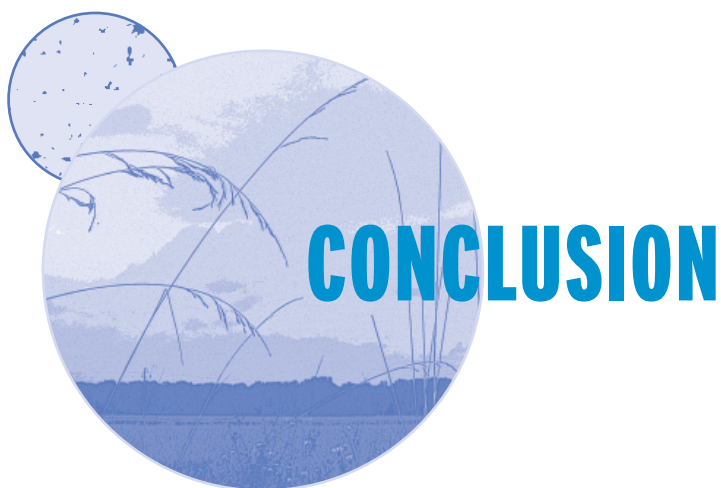
- de quantifier les performances d'une technologie en termes de bilan des émissions, des consommations, des incidents et des coûts, avec des notions de tenue dans le temps ;
- de comparer les technologies entre elles, que ce soit celles des carburants ou celles des systèmes de post-traitement.

Les résultats montrent que :

- la prise en compte de cycles d'utilisation réelle est importante pour valider la tenue dans le temps des dispositifs de réduction des émissions de particules, comme le montre l'exemple des BOM qui ont des usages très spécifiques ;
- l'utilisation d'un carburant à basse teneur en soufre (50 ppm) est désormais possible pour tous les véhicules ;
- la mise en place d'un FAP en retrofit nécessite, dans la majorité des cas, la mesure des températures d'échappement avant la pose du FAP pour vérifier qu'elles sont suffisamment élevées, puis une fois le FAP monté, des mesures de températures et de la contre-pression. Une fois cette précaution prise, la généralisation de l'équipement d'une flotte en filtres à particules peut être effectuée avec de très bons résultats obtenus en termes de réduction des émissions de particules. Cette opération est aidée sur des bus mis en service entre le 1^{er} janvier 1991 et 31 décembre 2004 ;
- en première monte, le seul système existant, développé par PSA, présente aussi d'excellents résultats en termes de réduction des émissions de particules et conserve ses performances dans le temps, même dans les conditions d'exploitation les plus sévères, celles des taxis parisiens.

En tenant compte de l'aspect financier, le filtre à particules en première monte est à promouvoir auprès des particuliers pour les véhicules légers, et des professionnels pour les VUL. En effet, le surcoût du système est intégré au prix d'achat du véhicule, seuls les coûts de maintenance en cours de vie du véhicule sont à considérer. Sur les nouveaux véhicules PSA, le FAP est dit « sans entretien » et le réservoir d'additif est rempli « à vie » (3^e génération de FAP à géométrie octogonale « octosquare »).

Pour la mise en œuvre de FAP en seconde monte, le surcoût est de l'ordre de 5 000 à 7 000 € sur des véhicules lourds. Le FAP présente donc un bon rapport coût/efficacité, en particulier sur des véhicules Euro1 et 2, qui présentent des émissions élevées et des durées de vie encore importantes. Cet intérêt économique est à prendre en compte pour développer rapidement cette solution et l'étendre éventuellement aux engins non routiers.



CONCLUSION

Les principaux enseignements de ce programme peuvent se résumer de la manière suivante :

- > Les particules se composent d'un noyau carboné, sur lequel sont adsorbées différentes espèces chimiques : sulfates, hydrocarbures imbrûlés, ...
- > La toxicité des particules est liée à leur taille, c'est-à-dire à leur capacité à pénétrer au plus profond des alvéoles pulmonaires. On prête en conséquence une attention particulière aux particules ultrafines (l'appellation de fine est délicate, les ultrafines possédant un diamètre inférieur à 100 nm). La toxicité est par ailleurs également liée aux espèces chimiques adsorbées.
- > La relation entre la spéciation chimique et les effets sur la santé de l'homme n'est pas établie dans tous les cas. À l'inverse certains composés de toxicité reconnue (cancérogène pour l'homme, Classe 1 IARC) présents à l'échappement ne sont pas réglementés. Des HAP, espèces mutagènes avérées ou soupçonnées, classiquement présents dans les hydrocarbures imbrûlés gazeux ont également été identifiés dans les particules analysées.
 - Si l'effet néfaste des particules automobiles est désormais acquis, tant sur le court terme que sur le long terme (asthme, cancer, mécanismes allergiques...), les efforts sur la caractérisation des fonctions dose-réponses doivent être poursuivis dans l'esprit des travaux menés par l'AFSSET (Impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine : estimation de l'impact lié à l'exposition chronique aux particules fines sur l'espérance de vie - juin 2005). Ce type de travaux pourrait utilement déboucher sur des recommandations pour l'établissement des futures normes d'émissions en utilisant des indicateurs ad hoc (par exemple un indice de risque cancérogène de type OEHHA).

- > Les émissions de particules diminuent en masse, grâce aux progrès techniques des motorisations et à l'évolution des formulations de carburant en relation avec la sévérisation des normes. Cette diminution va se poursuivre par diffusion de ces technologies dans le parc au fur et à mesure de l'arrivée des nouveaux véhicules équipés et l'équipement des véhicules lourds existants (rétrofit). Cependant, les nouvelles technologies d'injection semblent conduire à des émissions de particules de nature différente.
 - Il importe de documenter les rejets particuliers dans le cas de l'utilisation de nouvelles technologies moteurs (combustion avancée à très fort taux d'EGR, combustion homogène, motorisation des deux roues à injection directe) et post-traitement (filtres à particules ouverts, systèmes couplés FAP et réduction des oxydes d'azote). Parallèlement, il convient de faire progresser les techniques de mesures, à la fois pour les caractérisations et pour les homologations.
- > Les systèmes de filtration des particules donnent d'excellents résultats sur différentes applications (VL, PL, Bus) en réduisant le nombre de particules émises d'un facteur 100 à 1 000 (voire 10 000), sur l'ensemble du spectre granulométrique. Le niveau d'émissions des VL Diesel testés se situe à un niveau proche, voire inférieur à celui de leur équivalent essence.
 - Par ailleurs, de nombreuses solutions de régénération ont été développées : additifs, catalyseur placé en amont du filtre, filtre à imprégnation catalytique, implantation d'une résistance électrique, post-injection... On doit s'attacher désormais à considérer l'ensemble des composants (filtre, technique de régénération, de suivi et de pilotage) et non plus le seul filtre. Ainsi cette technologie peut être appliquée à toutes les sources de particules issues de moteurs Diesel. L'étude préalable des températures à l'échappement est conseillée pour le retrofit et s'avère même indispensable pour retenir le système adapté dans le cas des engins non routiers.
 - Les catalyseurs présents dans certains systèmes pouvant engendrer des surémissions de NO₂, l'effet sanitaire de ce dernier devra être quantifié au regard des gains apportés par la réduction des particules. À court terme, le couplage de solution de DeNOx avec la filtration des particules apportera un progrès sur ces deux plans.
- > L'aspect économique est aussi un avantage pour cette technologie, qui présente un surcoût en deuxième monte (retrofit) de l'ordre de 5 000 à 7 000 euros, ce qui ne représente qu'environ 3 % du prix d'achat d'un véhicule lourd neuf (Bus, PL). L'impact sur la consommation est relativement limité, de l'ordre de 2 à 5 %.
- > La lourdeur et les précautions nécessaires à la mise en œuvre des méthodes et moyens de métrologie soulignent la difficulté de l'introduction d'une caractérisation physique (taille et nombre) des émissions à l'homologation. Cependant, cette évolution de la mesure en masse vers une réglementation en nombre et taille est nécessaire pour répondre aux préoccupations de santé publique, et bien évidemment les travaux réglementaires en cours au niveau international et européen (méthode de mesure à travers le programme PMP et valeurs limites associées) vont heureusement dans ce sens.

La pollution automobile et ses effets sur la santé - États des connaissances - Interrogations et propositions, Rapport ADEME / INRETS, février 1995.

La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique - Bilan de 15 ans de recherche internationale, SFSP, mai 1996.

J.-B. Dementhon, O. Pajot, B. Martin, *Influence des systèmes de dépollution des gaz d'échappement sur la granulométrie des particules Diesel*, Convention ADEME/IFP - PRIMEQUAL-PREDIT, octobre 1997.

Le moteur HDI - CD-Rom de présentation, PSA Peugeot Citroën, février 1998.

V. Tatry, E. Leoz, *Caractérisation chimique de la matière organique gazeuse et particulaire due aux moteurs Diesel, à l'émission et dans l'air ambiant*, Convention ADEME/INERIS - PRIMEQUAL-PREDIT, décembre 1998.

PSA Peugeot Citroën crée le 5^e Temps du moteur Diesel - CD-Rom de présentation du filtre à particules, PSA Peugeot Citroën, avril 1999.

Coûts des effets de la pollution atmosphérique sur la santé de la population française, ADEME / Austrian Federal Ministry of Environment, Youth and Family Affairs / UmweltBundesAmt Austria / Département Fédéral Suisse Environnement, Transport Énergie et Communication, Conférence OMS Londres, juin 1999.

Dr S. Tissot, *Toxicité des particules émises par la circulation automobile*, INERIS, décembre 1999.

M. Auphan de Tesson, *Influence de la formulation du gazole sur les rejets solides des moteurs Diesel : étude des schémas de formation des particules*, Thèse ADEME - CNRS-LCSR/IFP, décembre 1999.

A. Philippet, X. Montagne, *Influence de la nature du carburant sur la taille et la composition des particules Diesel*, Convention ADEME/IFP - PRIMEQUAL-PREDIT, décembre 1999.

F. Dionnet, F. Novel-Cattin, *Comparaison expérimentale de trois filtres à particules et de cinq additifs de régénération (Na/Sr, Mn, Ce, Fe Fe/Sr)*, Convention ADEME/CERTAM/Renault SA - PRIMEQUAL-PREDIT, décembre 1999.

T. Delorme, A. Geffroy, D. Mandineau, *Comparaison des émissions moteurs Diesel et moteurs méthane limite pauvre dans les transports urbains*, Convention ADEME/ESIM, décembre 1999.

N. Jeuland, L. Forti, *Émissions de particules des moteurs à allumage commandé - Granulométrie et composition*, Convention ADEME/IFP, avril 2000.

S. Raux, X. Montagne, *Impact de l'Aquazole sur les émissions de polluants et la granulométrie des particules d'un moteur de poids lourd Euro2*, Convention ADEME/IFP, juillet 2000.

N. Jeuland, X. Montagne, *Examen de la composition des particules à l'échappement en fonction de la granulométrie pour un moteur Diesel*, Convention ADEME/IFP - PRIMEQUAL-PREDIT, août 2000.

F. Collin, *Détermination des signatures granulométriques et chimiques de particules prélevées à l'échappement de moteurs Diesel et en atmosphère urbaine*, Thèse ADEME - CNRS-LMR / PSA Peugeot Citroën, décembre 2000.

Summer Cold Start and Nanoparticulates of Small Scooters, HTI-BFH, SAE 2002-01-1096, décembre 2000.

Emissions of Ultrafine Particles from Different Types of Light Duty Vehicles, Rapport ROTOTEST/ Senco/ Swedish National Road Administration, janvier 2001.

DETR/SMMT/CONCAWE Particulate Research Programme, Ricardo, mai 2001.

Summer Cold Start, Limited Emissions and Nanoparticulates of 4 Stroke-Motorcycles, HTI-BFH, Contrat BUWAL VLR.01.23, décembre 2001.

N. Jeuland, J.-B. Dementhon, *Suivi de véhicules Peugeot 607 équipés de filtres à particules*, Rapport intermédiaire, Convention ADEME / IFP, juin 2002.

Particle Instruments, Products Particle Sizers, Documentation sur le site internet du groupe TSI Inc. - www.tsi.com (<http://www.tsi.com/particle/products/partsizes/3935.htm>)

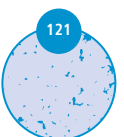
J.-D. Andersson, *UK Particulate Measurement Programme - Heavy Duty Methodology Development*, Ricardo, juillet 2002.

Programme on Emissions of Fine Particles from Passenger Cars, ACEA Report, juillet 2002.

Zissis Samaras, *Characterisation of Exhaust Particulate Emissions from Road Vehicles*, EU DG TREN « Particulates Project », LAT, octobre 2002.

Office of Environmental Health Hazard Assessment. *Air Toxics Hot Spots Program Risk Assessment Guidelines. Part II*. Technical Support Document for Describing Available Cancer Potency Factors, December 2002. (http://www.oehha.ca.gov/air/hot_spots/pdf/TSDNov2002.pdf)

Summer Cold Start & Emissions of Different 2-Wheelers, HTI-BFH, Contrat BUWAL VLR.02.05, décembre 2002.



Note sur l'impact sanitaire des particules Diesel, AFSSET, 13 octobre 2003.
(http://www.afsse.fr/documents/impact_sanitaire_particules_diesel.pdf)

Impact des technologies en Diesel et en essence sur la formation et la nature des particules issues de la combustion, Contrat ADEME/Renault/PSA n°9966009, juin 2003.

Emission Factors and Influences on Particle Emissions of Modern 2-Stroke Scooters, HTI-BFH, Contrat BUWAL VLR.03.05, décembre 2003.

Influence des technologies moteur sur la granulométrie des particules, Contrat ADEME/IFP Primequal-Predit 1996-2000 n°9866001, L. Forti, juin 2004.

An Electrostatic Trap for Control of Ultrafine Particle Emissions from Gasoline-Engined Vehicles, L. Rubino (Johnson Matthey), R.-I. Crane, J.-S. Shrimpton (Imperial College), C. Arcoumanis (London City University), septembre 2004.

Low Emission Diesel Particulate after Treatment System Development for Trucks in Japanese City Driving, T. Morozumi, S. Yamamori (Tokuddaiji Institute) K. Komatsu, Y. Unno (Emitec Japan), Int. Forum Abgas und Partikelemissionen, septembre 2004.

Impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine : estimation de l'impact lié à l'exposition chronique aux particules fines sur l'espérance de vie, juin 2005.
(http://www.afsse.fr/documents/impact_sanitaire_pollution_atmospherique_urbaine.pdf)

AECC light-duty test programme - PMP measurement
(<http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grpe/pmp15.html>)

Publications ADEME

- *Les performances d'une émulsion eau-gazole sur une flotte de poids lourds*, G. Plassat
- *Premiers résultats de système DeNOx SCR par injection d'urée sur bus Euro5*, G. Plassat
- *Les technologies des moteurs de véhicules lourds et leurs carburants*, Tome 1, G. Plassat, réf. 5218, gratuit sur www.ademe.fr
- *Bus Propres : quels carburants ? quels moteurs ? Les évaluations de l'ADEME*, Tome 2, G. Plassat, réf. 5255
- CD : OPTIBUS, comprenant les deux tomes, réf. 5549
- *Motocycles, cyclomoteurs - Énergie et environnement*
- CD : OPTICAMION, à paraître en février 2006

Consulter le site Internet www.ademe.fr pour connaître les publications du département « Technologies des Transports » de l'ADEME (publications en vente ou téléchargeables).

Glossaire des sigles et abréviations

ACEA : Association des Constructeurs Européens d'Automobiles

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

AFLM : Association Française de Lutte contre la Mucoviscidose

AFSSET : Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

BOM : Bennes à Ordures Ménagères

Carmex : Système de filtre à particules utilisant un additif d'aide à la régénération proposé par l'entreprise française Airmeex

CatOx. : Catalyse d'oxydation

CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique

CPC : Compteur de particules à Condensation (Condensation Particle Counter)

CR : Common Rail ou Rampe commune (technologie pour l'injection directe haute pression Diesel)

CRMT : Centre de Recherche en Machines Thermiques

CRT : Type de filtres à particules à régénération continue breveté par Johnson Matthey et distribué par les sociétés HJS et Eminox (Continuously Regenerating Trap)

DeNOx : Système de post-traitement des gaz d'échappement visant particulièrement la réduction des oxydes d'azote (NO_x) en cours de développement.

DI : Injection Directe

Diester : ou Biodiesel, désigne le mélange gazole, ester méthylique d'huile végétale

EGR : Recirculation des gaz d'échappement (Exhaust Gas Recirculation)

ELPI : Méthode de collecte des particules par impaction inertielle (Electrical Low Pressure Impactor)

EMC : Ester Méthylique de Colza

EMHV : Ester Méthylique d'Huile Végétale

Eminox : Entreprise anglaise productrice de catalyseurs et de filtres à particules de type CRT

EMT : Ester Méthylique de Tournesol

Engelhard : Entreprise allemande produisant des catalyseurs et un filtre à particules à imprégnation catalytique

EPA ou US EPA : Environmental Protection Agency (agence pour l'environnement américaine)

ESC : Cycle d'essai normalisé pour motorisation de poids-lourds : enchaînement de points stabilisés dit aussi « 13 modes » (ESC : pour European Steady-state Cycle)

ESIM : École Supérieure d'Ingénieur de Marseille

FAP : Filtre à Particules

FSi : Moteur essence à injection directe (sigle propre au groupe VAG Volkswagen Audi)

GDi : Moteur essence à injection directe (sigle propre au constructeur Mitsubishi)

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

HDI : Diesel à injection directe haute pression (sigle propre au groupe PSA Peugeot Citroën)

HEI : Health Effects Institute

HJS : Entreprise allemande productrice de catalyseurs et de filtres à particules de type CRT (Hermann J. Schulte)

HPi : Moteur essence à injection directe (sigle propre au groupe PSA Peugeot Citroën)

IARC : International Agency for Research on Cancer

IDE : Moteur essence à injection directe (sigle propre au constructeur Renault SA)

IDI : Injection Indirecte

IFP : Institut Français du Pétrole

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

INRETS : Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité

IOF : Fraction sèche Insoluble (Insoluble Organic Fraction)

JTS : Moteur essence à injection directe (sigle propre au groupe Fiat / Alfa Roméo)

MVEG : Cycle d'essai normalisé européen pour véhicules légers (MVEG pour Motor Vehicle Emission Group)

OEHHA : Office of Environmental Health and Hazard Assessment

PallFlex : Filtre de collecte pour la mesure massique réglementée des rejets de particules automobiles

PIXE : Procédé de détection de composés chimiques par bombardement de protons à haute énergie (Particle X-Ray Emission)

PL : Poids Lourds

PM 1.0 : Particules de 1 μm ou moins de diamètre.

PM 10 : Particules de 10 μm ou moins de diamètre.

PM 2.5 : Particules de 2,5 μm ou moins de diamètre.

PMP : Particulate Measurement Programm (sous l'égide des Nations unies via la Commission économique pour l'Europe UN/ECE)

PREDIT : Programme National de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres

PRIMEQUAL : Programme de Recherche Interorganisme pour une meilleure Qualité de l'Air à l'échelle Locale

RATP : Régie Autonome des Transports Parisiens

SFSP : Société Française de Santé Publique

SiC : Carbure de Silicium - céramique utilisée comme média poreux pour le piégeage des suies dans certains filtres à particules.

SILVE : Filiale environnement du Groupe des Mousquetaires - Intermarché

SMPS : classificateur électrostatique de taille des particules (Scanning Mobility Particle Sizer)

SOF : Soluble Organique Fraction

TAP : Toxic Air Pollutants

TBTS : Carburant gazole pour moteur Diesel à très basse teneur en soufre

TDI : Moteur Diesel à injection directe suralimenté (sigle utilisé par le groupe VAG Volkswagen Audi)

VP : Véhicules Particuliers

VU : Véhicules Utilitaires

VUL : Véhicules Utilitaires Légers

XRF : Procédé de détection de composés chimiques par Fluorescence X (X-Ray Fluorescence)

LES IMPLANTATIONS DE L'ADEME

Centre d'Angers (siège social) :

2, square Lafayette, BP 90406
49004 Angers Cedex
Tél. : 02 41 20 41 20
Fax : 02 41 87 23 50

Centre de Paris-Vanves :

27, rue Louis-Vicat
75737 Paris Cedex 15
Tél. : 01 47 65 20 00
Fax : 01 46 45 52 36

Centre de Valbonne :

500, route des lucioles
06560 Valbonne
Tél. : 04 93 95 79 00
Fax : 04 93 65 31 96

Bureau de Bruxelles :

53, avenue des arts
1040 Bruxelles
Tél. : 322 514 45 56
Fax : 322 513 91 90

Délégations régionales

ALSACE :

8, rue Adolphe-Seyboth
67000 Strasbourg
Tél. : 03 88 15 46 46
Fax : 03 88 15 46 47

BASSE-NORMANDIE :

Le Pentacle, avenue de Tsukuba
14209 Hérouville-Saint-Clair Cedex
Tél. : 02 31 46 81 00
Fax : 02 31 46 81 01

AQUITAINE :

6, quai de Paludate
33080 Bordeaux Cedex
Tél. : 05 56 33 80 00
Fax : 05 56 33 80 01

BOURGOGNE :

Le Mazarin - 10, avenue Foch - BP 51562
21015 Dijon Cedex
Tél. : 03 80 76 89 76
Fax : 03 80 76 89 70

AUVERGNE :

63, boulevard Berthelot
63000 Clermont-Ferrand
Tél. : 04 73 31 52 80
Fax : 04 73 31 52 85

BRETAGNE :

33, boulevard Solférino - CS 41 217
35012 Rennes Cedex
Tél. : 02 99 85 87 00
Fax : 02 99 31 44 06

CENTRE :

22, rue d'Alsace-Lorraine
45058 Orléans Cedex 1
Tél. : 02 38 24 00 00
Fax : 02 38 53 74 76

CHAMPAGNE-ARDENNE :

116, avenue de Paris
51038 Châlons-en-Champagne Cedex
Tél. : 03 26 69 20 96
Fax : 03 26 65 07 63

CORSE :

Parc Sainte-Lucie - Le Laetitia
BP 159 - 20178 Ajaccio Cedex 1
Tél. : 04 95 10 58 58
Fax : 04 95 22 03 91

FRANCHE-COMTÉ :

25, rue Gambetta - BP 26367
25018 Besançon Cedex 6
Tél. : 03 81 25 50 00
Fax : 03 81 81 87 90

HAUTE-NORMANDIE :

Les Galées du roi
30, rue Gadeau-de-Kerville
76100 Rouen
Tél. : 02 35 62 24 42
Fax : 02 32 81 93 13

ÎLE-DE-FRANCE :

6-8, rue Jean-Jaurès
92807 Puteaux Cedex
Tél. : 01 49 01 45 47
Fax : 01 49 00 06 84

LANGUEDOC-ROUSSILLON :

Résidence Antalya
119, rue Jacques Cartier
34965 Montpellier Cedex 2
Tél. : 04 67 99 89 79
Fax : 04 67 64 30 89

LIMOUSIN :

38 ter, avenue de la Libération
87007 Limoges Cedex 1
Tél. : 05 55 79 39 34
Fax : 05 55 77 13 62

LORRAINE :

34, avenue André-Malraux
57000 Metz
Tél. : 03 87 20 02 90
Fax : 03 87 50 26 48

MIDI-PYRÉNÉES :

Technoparc Bât.9 - rue Jean Bart - BP 672
31319 Labège Cedex
Tél. : 05 62 24 35 36
Fax : 05 62 24 34 61

NORD-PAS-DE-CALAIS :

Centre tertiaire de l'Arsenal
20, rue du prieuré - 59500 Douai
Tél. : 03 27 95 89 70
Fax : 03 27 95 89 71

PAYS DE LA LOIRE :

5, boulevard Vincent-Gâche - BP 90302
44203 Nantes Cedex 2
Tél. : 02 40 35 68 00
Fax : 02 40 35 27 21

PICARDIE :

67, avenue d'Italie - immeuble Apotika
80094 Amiens Cedex 03
Tél. : 03 22 45 18 90
Fax : 03 22 45 19 47

POITOU-CHARENTES :

6, rue de l'Ancienne-Comédie - BP 452
86011 Poitiers Cedex
Tél. : 05 49 50 12 12
Fax : 05 49 41 61 11

P A C A :

2, boulevard de Gabès
13008 Marseille
Tél. : 04 91 32 84 44
Fax : 04 91 32 84 66

RHÔNE-ALPES :

10, rue des émeraudes
69006 Lyon
Tél. : 04 72 83 46 00
Fax : 04 72 83 46 26

GUADELOUPE :

Café Center - rue Ferdinand-Forest
97122 Baie-Mahault
Tél. : 05 90 26 78 05
Fax : 05 90 26 87 15

GUYANE :

28, avenue Léopold-Heder
97300 Cayenne
Tél. : 05 94 29 73 60
Fax : 05 94 30 76 69

MARTINIQUE :

42, rue Garnier-Pagès
97200 Fort-de-France
Tél. : 05 96 63 51 42
Fax : 05 96 70 60 76

RÉUNION :

Parc 2000 - 3, avenue Théodore-Drouhet
BP 380 - 97829 Le Port Cedex
Tél. : 02 62 71 11 30
Fax : 02 62 71 11 31

Représentations territoriales

NOUVELLE-CALÉDONIE :

56, rue Bataille - BP C5
98844 Nouméa Cedex
Tél. : 00 (687) 24 35 18
Fax : 00 (687) 24 35 15

SAINT-PIERRE-ET-MIQUELON :

DAF - 3, rue Aristide-Briand - BP 4244
97500 Saint-Pierre-et-Miquelon
Tél. : 00 (508) 41 19 80
Fax : 00 (508) 41 19 85

POLYNÉSIE FRANÇAISE :

DAT - BP 115
rue Dumont d'Urville - 98713 Papeete
Tél. : 00 (689) 46 84 55
Fax : 00 (689) 46 84 49

Site internet : www.ademe.fr

Les particules de combustion automobile et leurs dispositifs d'élimination

Un important problème de santé publique et un défi technologique

L'intérêt croissant porté au moteur Diesel, tant pour les véhicules de transport de marchandises que pour les voitures particulières, et les impacts en matière de santé mis en évidence, posent un certain nombre de questions importantes sur la pertinence des réglementations en matière d'émissions mises en œuvre vis-à-vis du Diesel.

Eu égard au fait que ce sont les particules les plus fines qui pénètrent profondément dans les voies respiratoires et que leur nocivité dépend également de leur composition chimique, les deux questions auxquelles il convient d'apporter des réponses sont les suivantes :

- Les dispositifs techniques envisagés pour faire face au durcissement des normes d'émissions ne vont-ils pas avoir une action plus efficace sur les grosses particules, plus lourdes, que sur les plus fines, obérant ainsi la pertinence de la réglementation actuelle en masse de particules émises ?
- Quelle est la composition chimique des particules émises ? Les composés dangereux sont-ils correctement éliminés par les dispositifs techniques ?

Les actions de l'ADEME

L'ADEME structure un grand programme de caractérisation, articulé autour de deux axes majeurs, dont les résultats principaux sont présentés dans cet ouvrage :

- Un programme de recherche, centré sur la caractérisation physico-chimique des particules d'origine automobile. Les objectifs de ce programme, lancé en 1995 dans le cadre du programme PRIMEQUAL/PREDIT, visent d'une part à renseigner les mécanismes de formations de ces particules et d'autre part à identifier les caractéristiques des suies responsables de leurs effets sur la santé.
- Un programme d'évaluation des performances, en utilisation sur flottes, des premiers systèmes disponibles. Les évaluations ont concerné l'ensemble des véhicules routiers, bus, bennes à ordures ménagères, poids lourds et véhicules légers. Pour chaque type de véhicule concerné, l'ensemble des systèmes pertinents est évalué à la fois en utilisation réelle (tenu dans le temps et efficacité) et en laboratoire, pour obtenir des données précises et comparables.

Les besoins en travaux complémentaires ainsi que plusieurs pistes de progrès sont identifiés, tant au niveau méthodologique que réglementaire.

