



Emissions de particules des véhicules routiers

Enjeux sanitaires de la pollution de l'air par les particules fines

La pollution de l'air par les particules fines est un enjeu sanitaire majeur. Le rapport CAFE¹ de février 2005 sur la qualité de l'air précise que « la santé humaine est sérieusement menacée par l'exposition aux particules fines » avec une réduction de l'espérance de vie de 8,2 mois pour la France attribuable aux particules fines PM_{2,5} d'origine anthropique. D'autre part l'étude² de l'OMS Europe publiée en 2000 montre que la pollution par les particules PM₁₀ est à l'origine de 19 200 à 44 400 morts prématurées³ en France chaque année (6% des décès, en moyenne), dont la moitié est attribuée aux émissions du trafic routier.

Les études scientifiques montrent qu'une exposition de court terme aux particules fines suffit à accroître la morbidité cardio-respiratoire, tandis qu'une exposition chronique favorise l'apparition d'asthme chez l'adulte⁴, de broncho-pneumopathies chroniques obstructives et d'altération du développement de la fonction respiratoire chez l'enfant, de maladies cardiovasculaires et de cancers du poumon.

Le Commissariat Général au Développement Durable (CGDD)⁵ a établi un coût de cette pollution compris entre 20 et 30 Md€, soit 400 à 500 €/habitant pour l'année 2000.

C'est pourquoi les directives européennes de qualité de l'air ont fixé successivement⁶ des niveaux maximum de particules admissibles dans l'air ambiant pour les PM₁₀ depuis 1999 et pour les PM_{2,5} depuis 2008.

PARTICULES (PM ₁₀)		
Objectif de qualité	30 µg/m ³	en moyenne annuelle
Valeurs limites pour la protection de la santé humaine	50 µg/m ³	en moyenne journalière à ne pas dépasser plus de 35 jours par an
	40 µg/m ³	en moyenne annuelle
PARTICULES (PM _{2,5})		
Objectif de qualité	10 µg/m ³	en moyenne annuelle
Valeur cible pour la protection de la santé humaine	20 µg/m ³	en moyenne annuelle
Valeur limite 2011 pour la protection de la santé humaine	28 µg/m ³ (25 µg/m ³ en 2015)	en moyenne annuelle

Seuils réglementaires PM₁₀ et PM_{2,5} dans l'air ambiant directive 2008/50/CE

Dans certaines zones urbaines françaises, et particulièrement à proximité du trafic routier, ces seuils sont régulièrement dépassés. Depuis le 18 mai 2011, la Commission Européenne poursuit notamment la France devant la Cour de Justice de l'Union Européenne pour non-respect des valeurs limites de PM₁₀ dans 15 zones, dont 12 agglomérations de plus de 100 000 habitants.

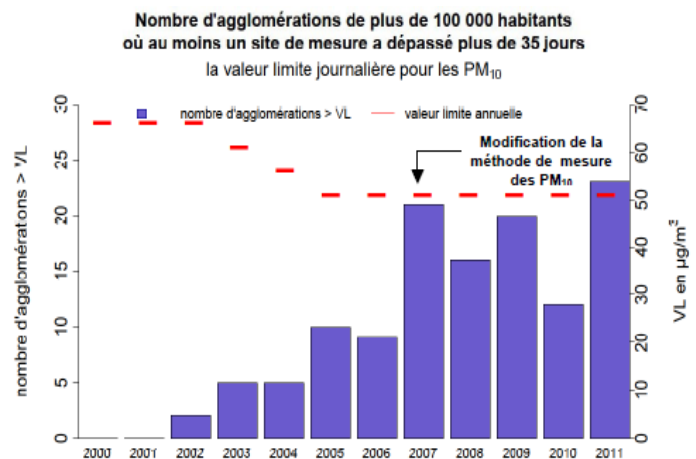


Fig 1 - Source : Bilan Qualité de l'Air 2011 - MEDDE

En 2010⁷, le trafic routier contribue à 14% des émissions de particules primaires (PM_{2,5}) au niveau national. Ces émissions se trouvent bien souvent concentrées dans les zones urbanisées où vit environ 80% de la population.

C'est pourquoi depuis 1993 les normes européennes d'émissions (normes Euro) fixent des seuils maximum

¹ Rapport IIASA 2005 Baseline Scenarios for the Clean Air for Europe (CAFE) Programme

² N Künzli, R Kaiser, S Medina et al. "Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution : a European assessment" Lancet 2000; 356: 795-801.

³ Mort prématurée : baisse d'espérance de vie pour un adulte de plus de 30 ans, hors mort accidentelle ou violente

⁴ étude APHEKOM (2011) piloté par l'INVS pour la Commission Européenne

⁵ Pour la Commission des comptes de l'économie et de l'environnement (CCEE) et la commission des comptes des transports de la nation (CCTN)

⁶ Les niveaux de PM₁₀ et de PM_{2,5} dans l'air ambiant sont respectivement réglementés depuis la directive 1999/30/CE et la directive 2008/50/CE.

⁷ d'après le CITEPA

d'émissions de particules à l'échappement des véhicules routiers.

En juin 2012, l'Organisation Mondiale de la Santé⁸ a classé les gaz d'échappement des moteurs Diesel en « cancérigènes certains » (groupe 1) pour l'homme⁹.

Les particules liées aux véhicules automobiles

Les particules fines¹⁰ PM₁₀ et PM_{2,5} sont définies comme l'ensemble des particules dont la taille est inférieure à 10 et 2,5 micromètres, respectivement. Les PM_{2,5} sont une fraction des PM₁₀. Les émissions de particules fines et leurs concentrations dans l'air ambiant font l'objet de réglementations.

Parmi ces particules fines figurent notamment des particules ultrafines, de taille comprise entre 10 et 500 nanomètres (0,01 et 0,5 micromètres).

La réglementation dans l'air ambiant impose la surveillance des niveaux de particules PM₁₀ et PM_{2,5}. Des techniques de surveillance basées sur la mesure des concentrations massiques sont utilisées sur l'ensemble du territoire. En revanche, les niveaux de particules ultrafines dans l'air ambiant ne font pas à ce jour l'objet de réglementations, les techniques actuelles ne permettent pas la mesure de leurs concentrations massiques en routine. Toutefois, ces particules ultrafines font l'objet d'évaluations dans le cadre de travaux de recherche.

Les particules fines

Les particules fines font l'objet de réglementations dans l'air ambiant. Celles issues du trafic routier sont principalement de trois types.

1. Les particules dites primaires émises à l'échappement des véhicules. Celles-ci comprennent notamment du carbone suie, et sont principalement émises par les moteurs Diesel (cf figure 2 ci-après), qui constituent aujourd'hui 60% du parc français de véhicules légers et 72% des ventes en 2011, contre 50% des ventes en 2000.

Le niveau des émissions est toutefois très dépendant de l'âge et de la technologie du véhicule (présence ou non et type de filtre à particules ; cf ci-après).

On peut souligner par ailleurs certains avantages du moteur Diesel par rapport au moteur à essence : rendement supérieur,

réduction de la consommation de carburant et des émissions de CO₂ de l'ordre de 20%.

2. Outre les émissions à l'échappement, le trafic routier contribue à l'émission de particules fines par la remise en suspension de particules déposées sur la chaussée au passage des véhicules et par l'usure des pneumatiques, des embrayages, des freins, ou de la route.

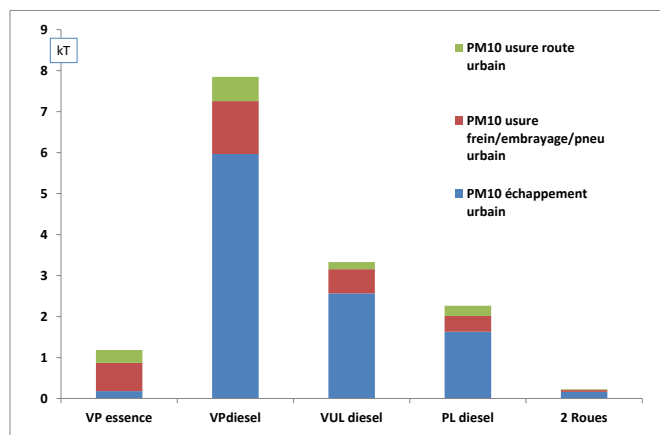


Fig 2 - Emissions primaires de PM₁₀ calculées pour le parc roulant urbain de l'année 2010 (source ADEME/CITEPA)

3. Les particules secondaires, non présentes directement à l'échappement des véhicules. Elles se forment dans l'air ambiant, à partir de gaz précurseurs émis à l'échappement des véhicules Diesel et essence. Les principaux gaz précurseurs de particules secondaires émis par les véhicules routiers sont les oxydes d'azote, qui contribuent à la formation de nitrate d'ammonium particulaire, et les composés organiques volatiles (COV), qui contribuent à la formation de particules secondaires appelées Aérosols Organiques Secondaires (AOS).

Les particules ultra fines (PUF)

Les particules ultrafines, dans l'air ambiant, se caractérisent généralement par une faible concentration massique par rapport à celle des particules fines PM_{2,5} ou PM₁₀. En raison de leur taille, elles pénètrent profondément dans les poumons et sont à l'origine de pathologies diverses. Plusieurs études de référence¹¹ pointent la capacité des PUF, selon leurs propriétés, à franchir les barrières biologiques. Elles sont suspectées de produire des impacts sanitaires plus graves que le reste des particules fines et font l'objet de plus en plus de recherches toxicologiques et épidémiologiques.

Les PUF issues des véhicules routiers sont principalement composées de particules primaires directement issues de la

⁸ Centre International de Recherche sur le Cancer, dépendant de l'OMS

⁹ http://press.iarc.fr/pr213_E.pdf

¹⁰ Dans le domaine de la santé sont considérées comme particules fines uniquement les PM_{2,5}

¹¹ Actes des ateliers scientifiques des particules les 13 et 14 novembre 2012 <http://www.buldair.org/sites/default/files/revue.pdf>

combustion, notamment du carbone suie, et de particules secondaires comme les AOS.

Le carbone suie (ou Black Carbon)

Les particules ultrafines primaires émises par les véhicules Diesel comportent une part non négligeable de carbone suie, ou « Black Carbon » (noté BC). Outre ses effets sanitaires, le carbone suie contribue au réchauffement climatique : il absorbe la lumière visible et restitue directement cette énergie sous forme de chaleur¹².

Aérosols organiques secondaires (AOS)

Les composés organiques volatils (COV) présents dans les gaz d'échappement sont à l'origine de la formation des aérosols organiques secondaires (AOS). Lors de leur formation dans l'air ambiant, ces AOS ont une taille initiale d'environ 10 nm, puis croissent rapidement dans l'atmosphère pour atteindre une taille de 100 nm à 300 nm. Parce qu'ils se forment après l'échappement des véhicules, ils ne sont pas filtrables au niveau du véhicule et posent donc un défi technique. Selon des études récentes¹¹, les véhicules essence peuvent être à l'origine de ce type de particules secondaires, en particulier avec la technologie d'injection directe. A ce jour, il n'existe pas à notre connaissance d'étude de référence sur la quantité d'AOS issues de véhicules Diesel équipés de filtre à particules.

Les filtres à particules

Depuis 1993, les normes Euro¹³ imposent des seuils d'émissions pour les polluants primaires à l'échappement des véhicules neufs. Ces normes, de plus en plus sévères, ont permis une importante diminution des émissions de polluants atmosphériques.

Depuis le 1^{er} janvier 2011, la norme Euro 5 impose un seuil d'émission de particules qui rend obligatoire les filtres à particules (FàP) de dernière génération sur les véhicules Diesel neufs légers.

¹² Les récents travaux du PNUE¹² (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) et de l'EPA (l'agence environnementale américaine) indiquent que la réduction des émissions de BC pourrait ralentir significativement l'augmentation des températures au cours du 21^{ème} siècle, en complément des actions nécessaires sur les autres gaz à effet de serre

¹³ La norme Euro suivie d'un chiffre arabe (ex. Euro 5) concerne les véhicules légers, tandis que celle suivie d'un chiffre romain (ex. Euro V) concerne les véhicules lourds.

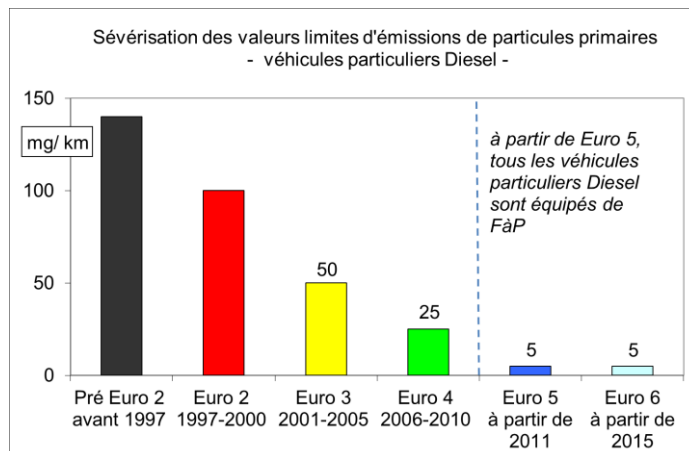


Fig 3 - Normes applicables aux émissions à l'échappement des voitures neuves (classe M1) et utilitaires légers neufs N1 (classe 1) en masse¹⁴.

Aujourd'hui, le nombre de véhicules Diesel équipés en filtres à particules est estimé à 4,5 millions d'unités, soit 23,8% du parc de véhicules Diesel en circulation, grâce à une introduction démarrée dans les années 2000, contre 14,5 millions sans filtre à particules (76,2%). Les véhicules utilitaires lourds, dont la durée de vie est plus longue, restent très peu équipés en filtres à particules, cet équipement n'étant apparu qu'avec la norme Euro IV, applicable depuis 2005.

Filtres à particules fermés

Les filtres « fermés » sont généralisés sur les véhicules neufs depuis janvier 2011. Ils permettent d'éliminer au moins 95 % en masse, et 99,7 % en nombre, des particules de plus de 23 nm (0,023 micromètres donc 100 fois plus petites que le seuil des PM_{2,5}) émises par les moteurs Diesel y compris le carbone suie, ce qui les ramène à un niveau équivalent à celui des moteurs à essence. Pour les particules de moins de 23 nm, l'efficacité des filtres à particules reste mal connue, mais les premiers résultats tendraient à montrer une filtration jusqu'à 7 nm (0,007 micromètres).

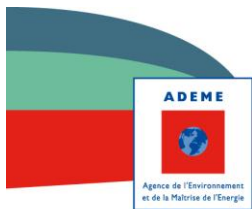
Filtres à particules ouverts

Les filtres à particules dits « ouverts » ne permettent de filtrer que 30% à 50% des émissions de particules. Par conséquent, ils ne permettent pas de respecter la réglementation applicable aux véhicules neufs lourds ou légers (Euro 5 pour les VP).

Emissions de NO₂ des filtres à particules catalysés

Certains filtres à particules fermés, dits « catalysés », sont à l'origine de sur-émissions de dioxyde d'azote (NO₂), un

¹⁴ La norme réglemente également le nombre de particules



polluant qui dépasse régulièrement les seuils autorisés dans les grandes agglomérations. Néanmoins, des progrès ont déjà été réalisés sur ce point. De plus, pour les véhicules légers, la norme Euro 6 imposera dès 2015 l'abaissement des rejets en NOx à 80 mg/km au lieu de 180 mg/km pour Euro 5. Les filtres à particules fermés de type « additivés », moins courants, ne souffrent pas de ce phénomène.

Retrofit

Afin de réduire les émissions de polluants du parc existant, il est envisageable, sous certaines conditions¹⁵, d'installer des filtres à particules fermés sur des véhicules lourds déjà en service. A défaut, des filtres ouverts peuvent être utilisés, mais leur efficacité reste très inférieure. L'installation en retrofit sur des véhicules légers est peu efficace.

Actions de l'ADEME

Dès le début des années 90, l'ADEME a réalisé d'importants travaux sur les impacts des émissions des véhicules Diesel, en particulier dans le cadre des programmes PRIMEQUAL¹⁶ du PREDIT¹⁷.

La synthèse sur « Les particules de combustion automobile et leurs dispositifs d'élimination » (2006), et l'ouvrage : « Pollution de l'air et transport terrestre : 10 ans de recherche PRIMEQUAL PREDIT » (2012), sont issus de ces travaux.

Aujourd'hui, l'ADEME appuie le Ministère de l'écologie dans la réduction des émissions de particules fines (PM_{2,5}) dans l'air ambiant notamment dans le cadre du plan « particules », qui vise une réduction de 30% des émissions de particules fines PM_{2,5} dans l'air ambiant d'ici à 2015.

L'ADEME agit de la manière suivante :

- favoriser le développement de technologies de réduction et de contrôle des émissions (programme de R&D CORTEA) ;
- expérimenter et évaluer des actions notamment dans le cadre de PRIMEQUAL, copiloté avec le Ministère de l'écologie ;
- communiquer sur le site Ademe.fr le niveau des émissions polluantes des véhicules commercialisés ;

¹⁵ - la pose des filtres ne peut se faire que sur des lignes d'exploitation sur lesquelles les conditions de température d'échappement sont connues et sont compatibles avec le fonctionnement (régénération) des dispositifs,

- afin de favoriser le fonctionnement des filtres il est préférable de ne pas équiper les véhicules trop anciens (antérieurs à Euro I)

- la maintenance du filtre doit être effectuée dans les règles et de manière régulière, afin d'éviter un encrassement trop important

¹⁶ Programme de Recherche Interorganismes pour une Meilleure Qualité de l'Air à l'Echelle Locale

¹⁷ Programme de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres

- accompagner les collectivités dans la mise en place d'actions opérationnelles pour améliorer la qualité de l'air sur leur territoire, notamment dans la mise en œuvre des PPA, des PDU, des ZAPA, (nouvel appel à projet « AACT AIR » lancé en décembre 2012 pour répondre à cet objectif) ;
- accompagner les entreprises pour organiser la mobilité et réduire les émissions liées aux transports. La charte « CO2, les transporteurs s'engagent », signée par 720 entreprises au 1^{er} octobre 2012, a permis d'économiser 190 millions de litres de gazole par an sur 3 ans ;
- veiller à anticiper les enjeux de qualité de l'air à plus long terme, par exemple au travers du projet de recherche « Air 2030 », sur la base de nos travaux de prospective énergétique 2030-2050 ;
- en tant qu'opérateur du programme des Investissements d'Avenir, l'ADEME pilote également un budget de 950 millions d'euros dédié aux technologies et organisations innovantes et durables en matière de déplacements. En 2012, l'ADEME a notamment lancé plusieurs appels à manifestation d'intérêt concernant le développement de technologies et de solutions innovantes et durables en matière de déplacements terrestres et maritimes (véhicules routiers faiblement émetteurs de CO2 et solutions de mobilité décarbonée, ferroviaire, maritime et fluvial).

L'Avis de l'ADEME

Pour l'ADEME, la diminution des impacts du secteur des transports passera par l'addition de plusieurs types d'évolutions concernant les besoins de déplacement, les modes de transport (individuels, collectifs et de marchandises), les types de mobilité (actives, ...), de motorisation et de carburants (hydrocarbures, carburants de synthèse, électricité, ...). Les enjeux de qualité de l'air en zone fortement urbanisée nécessitent tout particulièrement le développement de solutions de mobilité adaptées.

L'impact sanitaire des particules est aujourd'hui démontré. Il dépend de leur taille et de leur composition chimique. Ainsi les particules fines issues de la combustion (transport, chauffage, industrie,...) sont potentiellement les plus toxiques car elles ont la faculté de se déposer au plus profond des voies respiratoires. Les particules des véhicules Diesel font partie de cette fraction fine de particules.

Depuis les années 1990, des normes strictes et des technologies performantes ont permis de réduire drastiquement les émissions de particules des véhicules neufs. En particulier, les filtres à particules fermés permettent d'éliminer au moins 95 % en masse, et 99,7 % en nombre, des particules de plus de 23 nm émises par les moteurs Diesel, ramenant les émissions primaires à un niveau comparable à celui des véhicules essence.

Cela dit, au-delà de la norme Euro 6 pour les véhicules particuliers, de nouvelles réductions d'émissions primaires à l'échappement seront de plus en plus difficiles à atteindre. De plus, chaque nouveau dispositif de dépollution est susceptible de générer d'autres types d'émissions primaires ou secondaires. Les particules secondaires liées aux véhicules Diesel et essence sont encore mal quantifiées mais sont soupçonnées de produire des impacts sanitaires graves.

Surtout, le parc de véhicules anciens reste fortement émetteur de particules fines, en particulier les véhicules Diesel non équipés de filtres à particules fermés.

Afin d'améliorer rapidement la qualité de l'air dans les zones urbanisées les plus polluées, l'ADEME recommande donc d'agir prioritairement sur le parc roulant de véhicules anciens, en particulier le parc Diesel non équipé de filtres à particules fermés : véhicules particuliers et véhicules de livraison ainsi que flottes captives (taxis, bus...) circulant dans les agglomérations.

A court terme, l'amélioration de la qualité de l'air nécessite la substitution par d'autres modes de transports moins polluants ou leur renouvellement par des véhicules plus récents et équipés de technologies plus propres. Le graphique ci-dessous montre en effet que le parc actuel est encore faiblement constitué de véhicules soumis à la norme Euro 5.

Dans le cadre de cette démarche, les Zones d'Actions Prioritaires pour l'Air (ZAPA) ou Low Emission Zones¹⁸ ont démontré leur efficacité en Europe comme mesure court terme pour réduire les niveaux de pollution. Elles visent en effet à interdire la circulation des véhicules les plus polluants dans les agglomérations confrontées à des dépassements des seuils réglementaires. Plusieurs grandes agglomérations françaises étudient actuellement comment déployer ce dispositif de façon pérenne et adaptée à leurs contraintes territoriales.

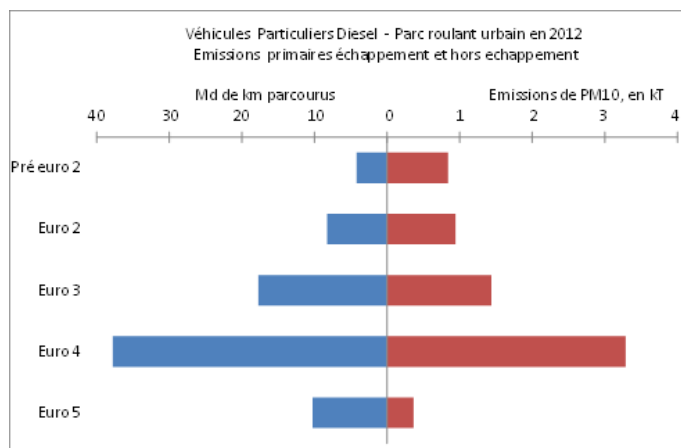


Fig 4 - Emissions primaires de PM₁₀ à l'échappement et hors échappement (usure des freins, pneumatiques et embrayage des véhicules, et usure des routes) selon les kilomètres parcourus du parc roulant urbain en 2012 en fonction des normes Euro (Source ADEME/CITEPA)

Parallèlement aux progrès techniques et réglementaires, la recherche doit permettre d'améliorer les connaissances des polluants et de leurs effets sur la santé, l'environnement et le climat, pour les moteurs Diesel et pour les moteurs essence. Il est en particulier nécessaire d'approfondir la connaissance des liens entre les émissions de particules et de gaz précurseurs, et l'exposition réelle des populations aux particules (notamment ultrafines). Les travaux de recherche dans ce domaine devront notamment permettre :

- de progresser dans la connaissance du rôle des émissions des véhicules dans la formation de particules secondaires, en priorité des aérosols organiques secondaires (AOS), et de mieux quantifier leurs effets sur la santé, l'environnement et le climat ;
- de mieux qualifier la part des émissions et les effets sur la santé des particules liées à la remise en suspension des particules déposées sur la chaussée au passage des véhicules, à l'usure des pneumatiques, embrayages et freins, et à l'usure de la route ;
- d'estimer les émissions des véhicules sur des cycles au plus proche des conditions réelles d'utilisation.

¹⁸http://buldair.org/sites/default/files/MAJ%20benchmark%20LEZ_mai2012_V1.pdf