

POLLUTION DE L'AIR : MOTEURS DIESEL ET CHEMINÉES OUVERTES EN ACCUSATION

Par M. Jacques FONTAN*

Introduction

Les moteurs Diesel sont largement mis en cause en raison de leurs émissions de particules fines (principalement) et d'oxydes d'azote. La mairie de Paris, le ministère de l'écologie veulent restreindre la circulation de ce type de véhicules dans les prochaines années. De nombreux médias insistent sur le danger des particules fines. Le chiffre de 42 000 morts / an en France est mis en avant, soit environ 7 % du nombre total de décès. On parle parfois de décès prématurés avec l'indication de 6 mois de vie perdue. On peut comparer ce chiffre aux 70 000 décès dus au tabagisme. Le chiffre de 42 000 morts est largement repris par les médias, par des responsables politiques. À titre d'exemple, la chaîne « France V » a diffusé le mardi 4 janvier 2014 un documentaire intitulé « Diesel, le scandale français ». Le moteur Diesel serait en France un scandale comparable à celui de l'amiante, du sang contaminé. Le documentaire a été suivi d'un débat avec l'animatrice Carole Gaessler, un médecin cardiologue, le docteur Pierre Souvet, président de l'association *Santé, Environnement France* (Asef) qui milite contre la pollution des voitures Diesel, le Professeur Michel Aubier, pneumologue, chef de service à l'hôpital Bichat, qui a réfuté un certain nombre d'arguments présentés dans le documentaire. Le professeur Aubier s'intéresse à la pollution atmosphérique depuis de nombreuses années, sans en dramatiser les effets. L'OMS a classé récemment les particules venant des moteurs Diesel comme cancérogènes certains. Elles étaient

* Communication présentée à l'Académie des Sciences, Inscriptions et Belles-Lettres de Toulouse à la séance du 9 avril 2015.

cancérogènes probables. On sait toutefois depuis longtemps qu'elles contiennent des composés cancérogènes comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Il n'est pas dans mes intentions de nier le caractère nocif des particules émises par les moteurs Diesel et les combustions, mais de pondérer les affirmations que l'on peut lire ou entendre.

Plus récemment ce sont les cheminées ouvertes qui sont mises en cause en Ile de France avec interdiction par un arrêté de la Préfecture de Paris à la suite de la recommandation du PPA (plan de protection de l'atmosphère) puis annulation de cette autorisation à la suite d'une intervention de la Ministre de l'écologie. Nous allons voir que la combustion du bois est une source de pollution de l'air mais elle est aussi encouragée par des avantages fiscaux dans le cadre de la filière bois-énergie.

Avant de rentrer dans une présentation plus scientifique je voudrais signaler quelques incohérences dans la politique de lutte contre la pollution de l'air. Lors du Grenelle de l'environnement ce sont essentiellement les rejets de CO₂ qui ont été pris en compte afin de restreindre les rejets de gaz à effet de serre. Le système de bonus-malus, mis en place à cet effet, avantage les moteurs Diesel plus économes en carburant et rejetant donc moins de CO₂. Les émissions d'autres polluants pouvant avoir des effets sur la santé, dont les particules fines, n'ont pas été prises en compte. Le bonus-malus, favorisant les moteurs Diesel, continue à être appliqué, mais le prix du gazole est augmenté pour dissuader l'achat de voitures Diesel. La loi récente favorisant les déplacements par bus des personnes va à l'encontre d'une politique de diminution des émissions de polluants. Elles vont s'ajouter à ceux rejetés par les poids lourds transportant les marchandises. Ce type de transport n'est pas mis en cause dans les mesures de restriction des émissions en période d'épisode de pollution.

Moteurs Diesel, moteurs à essence

Le moteur Diesel est un moteur à auto-allumage. Le carburant est pulvérisé dans le cylindre. L'air est chauffé (700 à 900 °C) par la compression. Le gazole s'enflamme spontanément sans recourir à un

allumage commandé par des bougies. La combustion complète produirait essentiellement du gaz carbonique. Le mélange n'est toutefois pas homogène et la combustion n'est pas complète dans l'ensemble du cylindre. Les gouttelettes n'ont pas le temps de s'évaporer et elles ne sont que partiellement brûlées. Il y a formation de particules fines d'imbrûlés, des composés organiques (acétaldéhyde, acroléine, benzène, formaldéhyde, etc.), des HAP (Hydrocarbure Aromatiques Polycycliques), du carbone, des oxydes d'azote, du gaz carbonique, etc. L'injection à des pressions très élevées, pour mieux pulvériser le carburant, a permis d'améliorer la combustion et de diminuer les émissions de particules. Les filtres à particules au niveau de l'échappement sont aujourd'hui obligatoires.

Dans les moteurs à essence l'explosion est amorcée par une étincelle électrique produite par une bougie (moteurs à allumage commandé). La combustion est plus homogène que dans le moteur Diesel mais il y a aussi des imbrûlés et émission de particules mais beaucoup plus fines que dans les moteurs Diesel. On parle de particules ultrafines ou de nanoparticules. Même si elles sont nombreuses, la masse est faible. De nouveaux moteurs à essence sont à injection directe, à pression élevée (100 bars) de l'essence dans les cylindres (moteurs FSI chez Volkswagen et Audi, THP chez Peugeot, TCe chez Renault, T-Jet chez Fiat, etc.). Ce type d'injection permet des gains de consommation mais comme dans le cas de l'injection de gazole il y a formation de particules dont la composition ne doit pas être très différente de celle des moteurs Diesel (mais plus fines) et émission d'oxydes d'azote. Dans les moteurs classiques ils sont arrêtés par un pot catalytique. On retrouve dans ces nouveaux moteurs des problèmes de pollution comparables à ceux du Diesel. Les filtres à particule ne sont pas encore obligatoires mais le respect des normes Euro va les rendre indispensables. Un des avantages du moteur Diesel est sa meilleure efficacité énergétique est à puissance égale il consomme moins de carburant et rejette donc moins de gaz carbonique que les moteurs à essence. Le pouvoir calorifique du gazole est d'environ 37 MJ/l, comparé à 33,7 MJ/l pour l'essence.

Les normes d'émission, pour les moteurs Diesel des voitures particulières et pour les voitures avec moteur à allumage commandé,

sont définis à l'échelle de l'Europe par des normes appelées Euro qui sont régulièrement révisées pour être rendues plus sévères. Les nouvelles normes Euro 6 s'appliquent depuis le 1^{er} septembre 2014. Elles sont exprimées en mg/km. Pour les véhicules Diesel, la norme est passée de Euro 5 à Euro 6, pour les oxydes d'azote, de 180 à 80 mg/km ; pour les particules de 5 à 4,5 mg/km. Cette dernière valeur ne peut être atteinte sans un filtre. Les oxydes d'azote doivent être éliminés au niveau de l'échappement par une solution d'urée (Adblue) qui réduit les oxydes d'azote. Pour mieux prendre en compte les particules ultrafines à partir d'Euro 5, le nombre de particules ne doit pas dépasser 6.10^{11} /km. Pour les véhicules essence la norme pour les oxydes d'azote est de 60 mg/km pour Euro 5 et Euro 6. Pour les particules elle est identique en masse à celle des moteurs Diesel (elle concerne en particulier les moteurs à essence à injection directe). En nombre, dès septembre 2014 les émissions ne doivent pas excéder 6.10^{12} particules/km, puis 6.10^{11} en 2017. Pour le monoxyde de carbone, elle est plus sévère pour les Diesel que pour les moteurs à essence respectivement 500 et 1 000 mg/km.

Pour limiter les émissions, les moteurs à essence sont équipés d'un pot catalytique qui permet d'oxyder le monoxyde de carbone, les hydrocarbures imbrûlés et de réduire les oxydes d'azote. Toutefois pour être efficace, le moteur doit être chaud, ce qui limite son efficacité pour de courts déplacements. Dans les moteurs Diesel le catalyseur oxyde le monoxyde de carbone et les hydrocarbures. Le mélange air carburant étant pauvre c'est-à-dire riche en air et oxygène, le pot ne permet pas de réduire les oxydes d'azote.

Date d'application	1/7/92	1/1/96	1/1/00	1/1/05	1/1/09	1/9/14
Norme	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
Oxydes d'azote (NOx)			500	250	180	80
Monoxyde de carbone	2720	1000	640	500	500	500
HC+NOx	970	900	560	300	230	170
Particules	140	100	50	25	5	4,5
Particules en nombre/km					6×10^{11}	6×10^{11}

Tableau 1 : Evolution des normes Euro pour les véhicules à moteur Diesel.

Norme	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
Oxydes d'azote (NOx)	-	-	1150	880	60	60
Monoxyde de carbone (CO)	2720	2200	2200	1000	1000	1000
Hydrocarbures (HC)	-	-	200	100	100	100
Hydrocarbures (HCNM)	-	-	-	-	68	68
Particules (PM)	-	-	-	-	$5^{[*1]}$	$4,5^{[*1]}$
Particules en nombre/km	-	-	-	-	-	6×10^{11} (2)
Toutes les valeurs sauf PN sont exprimées en mg/km.						
1. Uniquement pour les voitures à essence à injection directe fonctionnant en mélange pauvre (combustion stratifiée).						
2. Le règlement n° 459/2012 autorise les voitures à essence à injection directe à émettre 6×10^{12} particules jusqu'en 2017 ; au-delà, elles seront limitées à 6×10^{11} comme les véhicules Diesel.						

Tableau 2 : Evolution des normes Euro pour les voitures à essence.

Remarque

Avec Euro 6, les émissions des moteurs Diesel et des moteurs à essence sont comparables et la condamnation des seuls moteurs Diesel ne se justifie plus pour les voitures qui respectent la norme. La pollution aujourd'hui est principalement produite par les véhicules les plus anciens, en particulier Diesel. En Europe, il y a 260 millions de véhicules, soit 1 pour 2 habitants. Environ 7% des véhicules ont moins d'un an et plus de 30 % plus de 10 ans. La distance moyenne parcourue par une automobile est de 14 000 km par an.

Poids lourds

Les poids lourds, qui sont aussi équipés de moteurs Diesel, sont soumis à des normes Euro qui sont exprimées en g/kWh. La dernière Euro 6 est en vigueur depuis janvier 2014. Les émissions de NOx et de particules ont été réduites de 95 % et 97 % depuis 1993 (Euro1). Elle fixe la valeur limite pour l'émission des particules à 10 mg/kWh. Pour la première fois, la norme Euro 6 fixe un nombre maximum de particules. Ces valeurs limites rendent obligatoire le filtre à particules pour les nouveaux camions carburant au diesel.

Dans les différents médias, dans les discours des responsables politiques, c'est essentiellement les voitures particulières Diesel qui sont mises en cause. Il est aujourd'hui largement admis que la pollution particulaire résulte de sources réparties à l'échelle régionale, la pollution locale ne venant qu'aggraver la mauvaise qualité de l'air. La pollution due aux poids lourds se manifeste ainsi à l'échelle locale près des routes et autoroutes mais aussi à l'échelle régionale avec le réseau de routes et autoroutes, contribuant à augmenter la pollution de fond qui vient se superposer à celle que l'on rencontre dans les agglomérations. Les poids lourds ne sont pas mis en cause alors que les transports des marchandises par chemin de fer devraient être la règle. Développer les transports en commun ne peut qu'être encouragé mais le transport des marchandises, en particulier sur de longues distances, devrait se faire par le rail. Lors d'épisodes de pollution la limitation de la circulation des poids lourds devrait être envisagée comme cela est fait pour les voitures particulières.

Quelques définitions à connaître

On entend par particule un état divisé de la matière. On appelle les particules solides ou liquides, dispersées dans l'air (et par extension dans un milieu gazeux) un aérosol. L'aérosol est ainsi un gaz dans lequel de fines particules sont dispersées. Pour que les particules restent en suspension dans le gaz, il faut que leur vitesse de chute soit faible, soit une dimension (le diamètre) approximativement inférieure à 100 μm . Le mot aérosol est souvent improprement utilisé à la place de particule (d'aérosol). Les poussières (*dusts*) sont des particules solides, le plus souvent supérieures à 1 μm , mises en suspension par des procédés mécaniques. Le terme « fumées » (en anglais *smoke* ou *fume*) s'applique à des particules en général plus fines ($< 5\mu\text{m}$) provenant d'une combustion.

Les PM10 (ou matières particulaires), sont des particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10 μm , (diamètre de coupure), ce qui les rend aptes à être inhalées. Le diamètre aérodynamique d'une particule est défini comme le diamètre d'une particule sphérique, dont la densité est de 1 (1 g/cm^3), qui a le même comportement aérodynamique que celui de la particule. Les PM2,5 et PM1 une dimension inférieure à 2,5 μm et 1 μm .

Les fumées noires sont une technique de mesurage des particules, qui en principe privilégie celles issues de combustion. Le noir de carbone (*carbon black* ou CB) défini par l'*Union of Pure and Applied Chemistry* comme composé de sphères et d'agrégats dont la dimension est comprise entre 10^{-2} et 1 μm , générées par la combustion incomplète de carburants comme les charbons, gaz, fiouls, etc.. Les particules contiennent majoritairement du carbone. Le terme suie est aussi utilisé pour désigner des particules de carbone provenant de combustions incomplètes. Des hydrocarbures, en proportion plus importants que dans le cas précédent, sont condensés sur les particules de carbone.

Quelques propriétés physiques des particules

Dans les réseaux de contrôle de la pollution atmosphérique on mesure par leur masse, exprimée en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, les PM10 et les PM2,5. Les PM2,5 sont aussi appelées particules fines. En dessous de $0,1 \mu\text{m}$ on parle de particules ultrafines ou encore de nanoparticules. Les émissions Diesel sont donc formées de particules ultrafines, de particules fines et de grosses particules (entre $2,5$ et $10 \mu\text{m}$). Il faut bien souligner que la mesure de la masse ne permet de caractériser que les grosses particules et une partie des particules fines, donc qu'une fraction des particules émises par les moteurs Diesel. Les particules ultrafines doivent être caractérisées par leur nombre, qui est très important (plusieurs dizaines de milliards par m^3), mais dont la masse est très faible en raison de la faible dimension des particules. Le nombre des PM2,5 et PM10 est en comparaison très faible. En résumé la mesure de la masse, PM10 ou PM2,5, ne permet pas de prendre en compte les plus fines particules. Notons que la concentration en nombre des particules dans l'air est de l'ordre de quelques $10^4/\text{cm}^3$ soit quelques $10^{10}/\text{m}^3$ ($10^{10}=10$ milliards).

Dépôt dans l'appareil respiratoire

Les particules sont considérées par les medias comme d'autant plus dangereuses pour la santé qu'elles sont plus fines, parce qu'elles pénétreraient plus profondément dans l'appareil respiratoire. Le dépôt des particules en fonction de leur dimension a été étudié depuis longtemps et il existe un modèle reconnu de dépôt des particules dans l'appareil respiratoire.

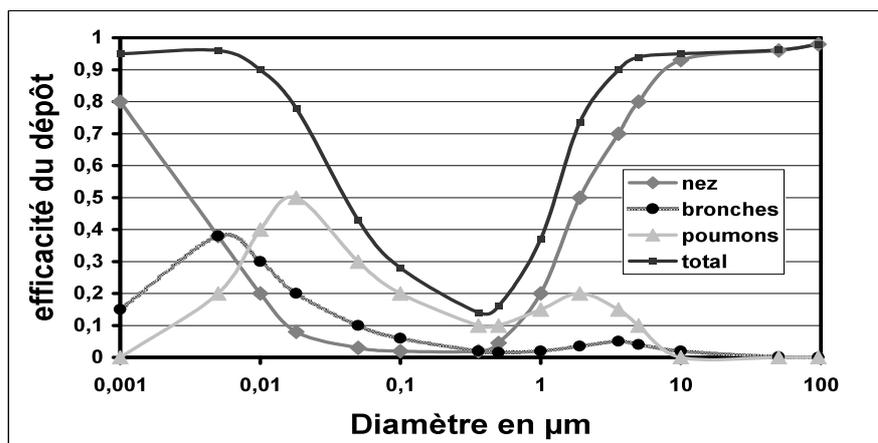


Figure 1 : Les différentes courbes montrent l'efficacité du dépôt des particules en fonction de leur diamètre, pour les différentes parties de l'appareil respiratoire. Les particules les plus grosses sont arrêtées par inertie dans le segment naso-pharyngien, mais les plus petites (*inférieures à 10^{-2} µm*) le sont aussi par diffusion brownienne. On peut remarquer que c'est entre 0,1 et 1 µm que la fraction déposée est la plus faible.

Sources : Task group on lung dynamics. *Health Phys.* 12, 173, 1966. et ICRP. *Human respiratory tract model for radiological protection. Ann. ICRP* 24, 1-3, 1994

Le dépôt résulte essentiellement de deux phénomènes physiques, l'inertie pour les plus grosses et l'agitation brownienne pour les plus fines. Le nez arrête les particules les plus grosses surtout au-dessus de 1 µm par le phénomène d'inertie et les plus fines, principalement en dessous de 10^{-2} µm avec le mouvement brownien. Les particules qui pénètrent le plus profondément dans l'appareil respiratoire sont celles comprises entre 0,1 et 1 µm car elles ont une faible inertie et un faible mouvement brownien. Elles pénètrent profondément car elles ne se déposent pas dans le nez ou les bronches, mais elles sont aussi en partie expirées (de l'ordre de 60 %). Il faut donc pondérer l'affirmation, souvent avancée, que les particules les plus fines sont celles qui pénètrent le plus profondément et sont alors les plus dangereuses.

Mesure de la masse et/ou du nombre

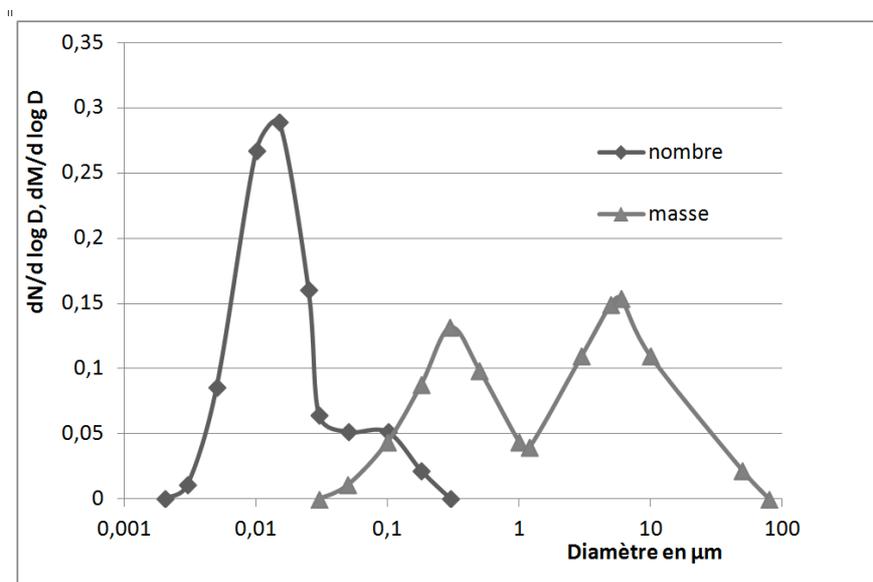


Figure 2 : Représentation schématique de l'aérosol atmosphérique suivant les fonctions de distribution, en masse, et en nombre. On voit clairement que les particules ultrafines ($< 0,1 \mu\text{m}$) ne sont pas prises en compte dans la distribution en masse.

Dans les réseaux de surveillance de la pollution atmosphérique c'est la masse des particules qui est mesurée. Les nanoparticules ne sont pas prises en compte. La figure 2 représente schématiquement les fonctions de distribution, en masse, et en nombre d'un aérosol atmosphérique. On voit clairement que les particules ultrafines ($< 0,1 \mu\text{m}$) ne sont pas prises en compte dans la distribution en masse. La distribution en nombre ne permet pas de prendre en compte les plus grosses, car elles sont peu nombreuses. En effet la masse ou le volume pour une particule sphérique est proportionnelle au cube du rayon ou du diamètre. Une particule de $10^{-1} \mu\text{m}$ a un volume ou une masse un million de fois plus faible qu'une particule de $10 \mu\text{m}$. Il sera donc difficile de mesurer sa masse en présence de particules de $10 \mu\text{m}$.

Réciproquement, le nombre de particules de 10 μm est très faible comparé à celui des particules de 0,1 μm . Les mesures en nombre ne permettent pas en général de les prendre en compte. La mesure seule de la masse d'un aérosol ou celle uniquement du nombre de particules ne permet pas en général, et en particulier en site pollué, de représenter correctement l'ensemble du spectre granulométrique d'un aérosol polydispersé.

Coagulation, dilution

Les particules vont se coaguler entre elles. Les nanoparticules vont se fixer sur des particules plus grosses limitant la durée de vie des plus fines particules ; la coagulation n'affecte pas la concentration en masse, mais les propriétés des particules. A la sortie d'un tuyau d'échappement, d'une cheminée, le mélange gaz particules va se diluer très rapidement, par exemple d'un facteur 1 000 après quelques secondes. Plusieurs organismes ont comparé la dose d'exposition aux polluants d'un piéton, d'un cycliste, d'un automobiliste. La plus forte était celle de l'automobiliste. Ceci n'a rien de surprenant. En effet lors d'un embouteillage, les automobiles viennent se placer sous le tuyau d'échappement de la voiture qui précède, pare-choc contre pare-choc. Les polluants émis par la voiture qui précède pénètrent largement dans l'habitacle. Une distance de quelques mètres permet une dilution des polluants et donc de limiter la pollution dans les voitures. L'installation de filtres efficaces aux fines particules, de l'air qui rentre dans l'habitacle, permettrait d'éliminer une grande partie des particules, d'améliorer la qualité de l'air, et de diminuer les doses d'exposition.

La combustion du bois

En 2014 la combustion du bois est mise en cause, plus particulièrement les cheminées ouvertes, à la suite de l'interdiction de ces dernières, en Île de France, par la Préfecture, à la suite des recommandations du PPA (Plan de Protection de l'Atmosphère). On retrouve en effet dans la combustion du bois un grand nombre de

polluants dont des composés organiques divers, des HAP, des dioxines, des particules, qui correspondent à des combustions incomplètes. Les émissions dépendent de la nature du bois (bois durs et bois tendres), de la teneur en vapeur d'eau (facteur important qui doit être inférieur à 15 %), du type de foyer, de la température de la combustion, qui peut varier de 300 à 700 °C. Le rendement de la combustion, les émissions sont d'autant plus importantes que la température est faible. Les cheminées ouvertes ont un très faible rendement, de l'ordre de 10 % et émettent un grand nombre de particules. Les inserts, les poêles modernes, ont des rendements qui atteignent 70 %. En Île de France, il y aurait 100 000 cheminées à foyer ouvert.

En décembre 2014, la préfecture revient sur le décret d'interdiction à la suite d'une intervention de la ministre de l'écologie Ségolène Royal, qui a qualifié cette mesure d'interdiction de « ridicule ». La filière bois-énergie a manifesté son inquiétude. Elle incite en effet à l'utilisation du bois, en particulier pour le chauffage des habitations. Les écologistes ont par contre protesté contre la suppression de l'interdiction. Pour les représentants de la filière bois, la combustion du bois contribue pour 5 % à la pollution atmosphérique en Île de France, pour la DRIEE (Direction Régionale de l'Industrie, de l'Environnement et de l'Energie), c'est 25 à 30 %. Un feu de cheminée de quelques heures est équivalent pour eux en termes de pollution à celle d'une automobile sur plusieurs milliers de kilomètres.

A titre de comparaison, au Canada, aux USA, des normes ont été définies pour augmenter et régler l'efficacité des foyers de combustion du bois. Aux USA, il y aurait au total 38 millions d'appareils de chauffage au bois. La pollution par ce type de chauffage est ainsi prise en compte. L'EPA (l'agence de l'environnement, équivalent de notre ministère) a défini une certification des foyers qui a été reprise au Canada. En France, les fabricants de poêles, inserts, ont défini des normes présentées sous le sigle de « Flamme Verte », avec des étoiles pour caractériser les performances. Depuis 2015, les plus performants ont 5 étoiles et ce niveau permet d'obtenir des avantages fiscaux de l'administration lors de l'installation. Le label flamme verte 5 étoiles correspond à un

rendement de combustion de 70 %, à des émissions de monoxyde de carbone (CO) inférieure à 0,3 %, de particules inférieurs à 90 mg/Nm³ (30 fois moins qu'une cheminée ouverte). De nouvelles classes sont en perspective avec 6 ou 7 étoiles en janvier 2018 et 7 étoiles en janvier 2020.

Inventaire des émissions

Le CITEPA (centre interprofessionnel d'études de la pollution atmosphérique), organisme financé par le ministère de l'écologie pour faire l'inventaire des émissions de tous les polluants atmosphériques émis en France, a publié en mars 2013 les quantités émises depuis 1990 par secteurs d'activité pour les TSP (particules totales en suspension), les PM₁₀, les PM_{2,5} et les PM₁. La combustion du bois énergie correspond pour les PM_{2,5}, d'après cet inventaire, à environ 45 % des émissions, le transport routier à 18 %, l'agriculture à 9 %.

AIRPARIF (l'organisme chargé de la surveillance de la pollution de l'air en Île de France) effectue des inventaires des émissions pour la région Île de France. En 2012, pour les PM_{2,5} le résidentiel (dont la plus grande partie est attribuée à la combustion du bois) est le premier contributeur devant le trafic routier. Le chauffage au bois correspond à 20 % des émissions régionales de PM₁₀ et à 30 % des émissions de PM_{2,5}. Les émissions de PM₁₀ ont diminué de 48 % entre 2000 et 2012, de 55 % pour le trafic routier et de 49 % pour le secteur résidentiel et tertiaire.

L'origine géographique moyenne de PM_{2,5} mesurées sur le site trafic, boulevard périphérique, porte d'Auteuil a été calculé en hiver et en été. En hiver les émissions du trafic local, c'est-à-dire la circulation sur le boulevard périphérique, contribuent pour 39 % à la concentration de l'air mesurée, les émissions diverses de la région Île de France (l'urbain) pour 19 %. Il y a une contribution de 42 % de PM_{2,5} importées sur la région Île de France. Les valeurs de ces contributions sont respectivement de 10,5 µg/m³, 5,1 µg/m³, et 11,2 µg/m³ pour le local, l'urbain et l'import. Le chauffage au bois contribue pour 25 à 30 % de l'urbain. Si on ramène cette contribution à l'ensemble de PM_{2,5} mesurées sur le site, elle ne représente plus que 5 % du total dans la concentration atmosphérique. On peut

comprendre les différences annoncées par les représentants de la filière bois et la DRIEE.

Les feux de biomasse en Afrique

La pollution de l'atmosphère par la combustion du bois n'est pas spécifique aux pays industrialisés. Ainsi l'atmosphère des régions intertropicales en Afrique est polluée par les feux de végétation qui sont pour la plupart allumés par la main de l'homme en région de savane. Le bois est aussi encore largement utilisé pour la préparation des repas. Les émissions résultant de la combustion de la biomasse sont transportées des régions de savane de l'hémisphère nord et de l'hémisphère sud pendant les saisons sèches respectives, vers la forêt équatoriale où l'on retrouve des composés secondaires comme l'ozone à des niveaux comparables à ceux observés dans les pays industrialisés. Cette pollution vient s'ajouter à celle produite par l'érosion éolienne qui entraîne des concentrations en particules très élevées, quelques centaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$, qui se transportent sur de longues distances. Les effets sur la santé de ces pollutions sont très mal documentés. On peut donner quelques chiffres pour avoir une idée de l'importance des émissions des feux de savane. En 1986, Lamotte (Lamotte et al. 1986) avait fait une estimation des émissions de CO_2 pour les savanes de Côte d'Ivoire, soit 180 000 km². Pour les trois mois de décembre, janvier et février, il obtenait $90 \cdot 10^6$ tonnes à comparer au rejet annuel pour la France en 2012 de $84 \cdot 10^6$ tonnes (estimation du CITEPA). Brustet et al. ont comparé en 1991 les émissions en monoxyde de carbone d'un feu moyen de savane à celles de voitures automobiles. Un feu était équivalent à 3 700 automobiles. Avec les normes actuelles de rejets d'Euro 6 ce serait 74 000 automobiles.

Particules fines et mortalité

Il existe plusieurs études. En Europe le projet APHEA a étudié dans 15 villes l'impact à court terme de la pollution sur la mortalité. Le principe est de comparer les risques quotidiens de décès, en

fonction de la pollution dans les villes mesurée par les réseaux de surveillance. Ce sont essentiellement les PM10 qui sont prises en compte. Les particules plus fines ne sont pas mesurées aussi fréquemment. Les concentrations dans une ville sont très inhomogènes. La composition de l'air en particules et la nature de ces dernières varient en fonction des pays (parc automobile différent, sources naturelles, etc.). Par une extension des résultats sur l'ensemble du territoire français, bien que la nature de la pollution soit différente en zone urbaine, industrielle et rurale, on arrive à 42 000 morts par an. Une difficulté de ce type d'étude est aussi d'éviter les confusions avec d'autres causes qui varient conjointement avec la pollution de l'air. La mortalité touchant en principe des personnes ayant déjà des problèmes de santé, on parle de morts prématurés. Des équipes ont essayé de déterminer le raccourcissement de la durée de vie, mais les résultats, bien que largement repris, sont discutables.

Un des facteurs de confusion est la température et ses variations qui ont des effets sur la mortalité mais s'accompagnent de variations de la pollution. La mortalité due à cet effet est en principe soustraite mais le modèle utilisé ne donne pas les chiffres comparés des différentes causes de mortalité. Il serait intéressant de donner les décès dus à différentes causes et de les comparer. Dans les pays chauds, les personnes résistent mieux à la chaleur que celles qui habitent dans des pays froids et réciproquement. La température qui agit sur le bien-être, et donc vraisemblablement sur la santé, est la température ressentie, mais elle est beaucoup plus difficile à prendre en compte. Il faudrait considérer la vitesse du vent, le degré hygrométrique de l'air, etc. Un des arguments donné par les épidémiologistes pour conforter les chiffres annoncés de mortalité est que des résultats comparables sont obtenus dans différents lieux avec des climats différents.

Particules, Diesel et cancer

Depuis les années 80, de nombreuses études épidémiologiques et expériences sur des animaux ont été réalisées. Les études épidémiologiques ont porté sur des expositions professionnelles et essentiellement sur le cancer du poumon. Il y a deux études principales aux USA, celle appelée des six villes et celle de

l'American Cancer Society (Pope et al). Les résultats de risques relatifs obtenus aux USA sont repris dans des études européennes. Parmi les groupes exposés : Les conducteurs et mécaniciens de locomotive Diesel, les conducteurs de poids lourds et autobus, les chauffeurs de taxi, les mécaniciens d'entretien des moteurs. Les conducteurs de poids lourds et autobus, les chauffeurs de taxi sont en fait soumis à l'ensemble des polluants atmosphériques et non spécifiquement aux particules provenant des moteurs Diesel.

Des méta-analyses montrent pour la majorité des études un risque relatif supérieur à 1 mais relativement faible ou modéré (88 % supérieur à 1 et 50 % supérieur à 1,35). Des facteurs de confusion comme le tabac sont en général pris en compte mais ont fait l'objet de nombreuses discussions. D'après l'EPA la force de l'association est relativement faible mais cela n'exclut pas une relation de causalité. L'existence d'une relation dose effet ne peut être dégagée. C'est plus la durée d'exposition qui est analysée mais le lien n'est pas démontré dans la plupart des études. Les expériences sur animal n'ont pas donné des résultats convaincants, en particulier chez le rat et la souris. Les concentrations utilisées sont très élevées. D'après l'EPA, l'association entre cancer et émanations Diesel est plausible d'un point de vue biologique (substances cancérigènes).

Pollution atmosphérique et santé

De très nombreuses études ont été réalisées. Elles portent sur des séries temporelles ou sur des cohortes. Ce sont très souvent les particules qui sont rendues responsables des effets observés, avec des corrélations avec les variations de concentration. Les effets de synergie ne sont pas pris en compte. Les particules sont d'origines diverses (combustions, usures, matières vivantes, etc...). Des effets sur l'appareil respiratoire sont observés avec des bronchites aiguës ou chroniques, une exacerbation des allergies et de l'asthme. Une aggravation des maladies cardio-vasculaires est aussi mise en évidence. On observe une plus grande sensibilité des enfants et des sujets déjà affaiblis. La nature différente de la pollution atmosphérique entre l'hiver et l'été n'est pas prise en compte, de même la nature

chimique. L'évaluation de l'exposition est faite avec les mesures des réseaux de surveillance mais comme on l'a déjà signalé, les doses d'exposition sont très variables en raison de la variabilité spatiale des concentrations qui est difficile à prendre en compte. On peut en particulier citer la pollution intérieure, celle due à des sources ponctuelles comme des cheminées relâchant les pollutions intérieures. Des tentatives de mesures des expositions individuelles ont été faites mais sans beaucoup de succès.

Conclusions

La pollution par les moteurs Diesel n'est pas comparable à l'amiante et au sang contaminé même s'ils ont été une cause de pollution de l'air par les particules, les oxydes d'azote, etc. avec les anciens moteurs. On peut considérer aujourd'hui avec la norme Euro 6 que la pollution de ces moteurs est limitée. Ils rejettent moins de CO₂ que les moteurs à essence. La motorisation Diesel ne se justifie toutefois pas pour les petits moteurs, en raison du coût de la dépollution. Les moteurs à essence émettent des nanoparticules qui ne sont pas prises en compte dans les réseaux de surveillance et dans les études sur la santé. Le nombre de particules est très important mais la masse est très faible. De très nombreuses imprécisions, voire inexactitudes, sont avancées dans les médias, par les décideurs, sur les propriétés des particules. Les émissions des poids lourds contribuent localement mais aussi à une échelle régionale à la pollution atmosphérique et aux épisodes de pollution. Des mesures de restriction de circulation devraient être envisagées comme pour les voitures particulières. Le transport des marchandises et des personnes avec des poids lourds ou des autobus doit autant que faire se peut être transféré vers le rail, d'autant plus que les charges d'entretien ne sont pas payées au prorata des usures de chaussée qu'ils produisent.

La combustion du bois est effectivement une source de pollution mais le public est mal informé sur ce type de combustion et sur les progrès effectués avec les nouveaux foyers (inserts ou poêles).

Les émissions des combustions, gazole, essence, bois, etc. sont néfastes pour la santé mais les effets aux doses d'exposition rencontrées sont certainement exagérés. Les incertitudes dans les

estimations quantitatives des effets sur la santé sont nombreuses. Leurs discussions devraient accompagner la présentation des dangers occasionnés par les pollutions dues aux particules et autres polluants.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, Se chauffer au bois. www.ecocitoyens.ademe.fr,
www.flamme.verte.com
- AIRPARIF, LSCE, Rapport origine de particules en île de France. Septembre 2011. www.airparif.asso.fr
- AIRPARIF, Rapport évolution de la qualité de l'air à Paris entre 2002 et 2012. Juillet 2013. www.airparif.asso.fr
- Brustet J.M. et al., Characterization of active fires in west African savannas by analysis of satellite data. From Global Biomass Burning. Edited by J.S. Levine, MIT Press London 1991
- CITEPA, Laetitia Serveau et al.. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France ? Avril 2013, www.citepa.org
- EPA, McCrillis. Residential wood combustion technology review. Rapport 600/R-98-174a. Dec 1998.
- Fontan J., Les pollutions de l'air, les connaître pour les combattre. Vuibert Sciences, 2003
- Fontan J., La météorologie à l'origine de tous nos maux ? Vuibert Sciences, 2013
- Katsouyanni K. et al., Apeha Project. Air pollution and health. A European approach. *Epidemiology* vol 17, November 2006.
- Lamotte et al., Variations saisonnières de la fixation et de la libération du CO₂ dans les milieux de savane de Côte d'Ivoire. Action des feux de biomasse. Programme PIREN CO₂, Juillet 1986, ENS Paris.
- Pope C.A. et al., Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of the American Medical Association*, vol 287 n°9, 2002.