



Les risques de la pollution atmosphérique pour la mortalité prématurée. Comparaison avec ceux du tabac et ceux de la radioactivité.

Bernard Durand

Résumé :

Selon l’OMS, la pollution atmosphérique extérieure (outdoor) et intérieure (indoor) aurait été responsable d’environ 1 décès prématuré sur 8 dans le monde en 2012. Et selon la Commission Européenne, la seule pollution extérieure aurait provoqué 420 000 morts prématurées en 2010 dans l’EU 28. Ces nombres impressionnants doivent cependant être relativisés: dans l’EU 28, la perte moyenne d’espérance de vie due à la pollution extérieure serait inférieure à un an, rapportée à l’ensemble de la population. Elle serait toutefois d’un peu plus de dix ans pour les personnes décédées prématurément.

La responsabilité principale en incombe à des particules invisibles, de dimensions micrométriques, voire nanométriques, en suspension dans l’atmosphère. Ce sont les effets des particules dites PM_{10} , et surtout des particules dites $PM_{2,5}$, celles dont la plus grande dimension est inférieure à $2,5 \mu m$, qui sont les mieux connus. Ces particules peuvent pénétrer très profondément dans les poumons, et sans doute aussi entrer dans la circulation sanguine. Ces «particules fines» provoquent ainsi des maladies respiratoires et cardiovasculaires, des allergies handicapantes, et à plus long terme peuvent contribuer au développement de cancers.

Dans l’EU-28, les émissions de particules fines proviennent surtout des combustibles, les trois principaux émetteurs étant, par ordre d’importance quantitative, l’utilisation domestique du bois, l’utilisation du charbon et du lignite par les centrales électriques, et l’utilisation du gazole par les véhicules routiers. La France échappe largement au charbon et au lignite, puisqu’elle a peu de centrales électriques à charbon. Par contre elle a plus de véhicules diesel que la moyenne européenne.

Il faut aussi signaler les particules fines dites «secondaires» émises par le secteur agricole, qui se forment à partir des oxydes d’azote et de l’ammoniac produits par les engrais azotés et les élevages.

L’importance relative du bois est certainement encore plus grande à l’échelle mondiale qu’en Europe, du fait des nombreux pays en voie de développement où le bois est encore la principale source d’énergie. Il y est aussi utilisé avec peu d’efficacité et dans de mauvaises conditions sanitaires.

Les risques entraînés restent bien inférieurs à ceux du tabac pour un fumeur régulier. Cependant, le tabagisme passif entraîne aussi des risques qui s’ajoutent à ceux identifiés à l’intérieur des maisons, lieux clos dans lesquels les polluants peuvent s’accumuler et dépasser les seuils de toxicité. Le risque est d’autant plus élevé que des polluants biologiques s’ajoutent aux polluants physico-chimiques.

Dans les grandes villes françaises, les risques de la pollution atmosphérique sont probablement supérieurs pour leurs habitants à ceux que ferait courir maintenant la radioactivité dans les zones d’exclusion de Fukushima, au vu des relations doses/effets citées dans la littérature.

Introduction

L'atmosphère contient en permanence un cocktail de substances plus ou moins nocives, sous forme de molécules et de particules en suspension. Leurs sources sont très variées, mais elles sont pour l'essentiel anthropiques.

Ces substances réagissent continuellement entre elles, ce qui conduit à l'apparition d'autres substances nocives qui n'étaient pas initialement émises: les polluants secondaires. C'est le cas entre autres de l'ozone dit troposphérique (par opposition à l'ozone présent dans la «couche d'ozone» de la haute atmosphère), ou des particules fines dites secondaires (voir chapitre 1).

Cette pollution atmosphérique entraîne des altérations de la santé qui concernent à des degrés divers toute la population mondiale. Elles consistent en une importante morbidité, maladies respiratoires et circulatoires plus particulièrement, mais aussi allergies handicapantes, et peuvent conduire à une mortalité prématurée, c'est-à-dire avant d'avoir atteint l'espérance de vie de la population considérée.

Nous traitons ici spécifiquement des risques de mortalité prématurée. Ils s'évaluent sur le long terme en probabilités, en fonction des quantités de substances nocives inhalées en un temps donné, c'est-à-dire à l'aide de relations doses/effets établies grâce à des études épidémiologiques.

Après des décennies d'indifférence des médias, ceux-ci commencent enfin à se rendre compte qu'il s'agit d'une des toutes premières causes de mortalité dans le monde.

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, en anglais World Health Organisation, WHO), cette mortalité consiste principalement, par ordre d'importance quantitative, en accidents vasculaires cérébraux, en cardiopathies ischémiques (c'est-à-dire due à une restriction de l'apport sanguin au muscle cardiaque par athérosclérose des artères coronaires), en bronco-pneumopathies chroniques obstructives, en cancers du poumon, et en infections aiguës des voies respiratoires inférieures chez l'enfant.

Pour prendre la mesure du problème, rappelons que l'OMS vient de réévaluer à 3,7 millions dans le monde la mortalité ayant résulté en 2012 de la pollution de l'atmosphère extérieure (outdoor pollution), dont environ 480 000 en Europe au sens large (1). Elle a aussi classé la pollution atmosphérique urbaine parmi les cancérigènes certains.

La dernière évaluation, pour 2008, n'était que de 1,3 million (2).

La différence n'est pas due à une augmentation spectaculaire de la pollution extérieure entre ces deux dates (dans les pays développés elle a même diminué grâce aux patients efforts faits pour la réduire), mais aux progrès considérables faits depuis quelques années dans la prise en compte et la compréhension du phénomène, ainsi qu'à la multiplication des études épidémiologiques, essentiellement dans les pays développés cependant.

S'agissant de l'EU 28, le Commissaire Européen en charge de l'environnement a déclaré début 2013 que les morts prématurées dues à la pollution atmosphérique extérieure avaient été estimées à 420 000 pour 2010 (3).

A cette pollution extérieure s'ajoute la pollution intérieure (indoor pollution) due surtout à l'utilisation domestique de combustibles, principalement du bois, du charbon de bois, du charbon ou du fuel en atmosphère confinée, à la fumée du tabac, mais aussi à une variété de produits chimiques volatils, solvants organiques en particulier, contenus dans des produits d'utilisation courante, sans oublier les polluants biologiques (acariens, allergènes de chat, blattes...)

Cette pollution intérieure serait responsable selon l'OMS d'environ 4 millions de morts prématurées par an dans le monde. Cela concerne beaucoup plus les pays pauvres que les pays riches comme ceux d'Europe Occidentale.

La mortalité prématurée due à l'ensemble de la pollution outdoor et indoor aurait donc représenté, selon l'OMS, environ 1 décès sur 8 dans le monde en 2012.

Ces nombres impressionnants doivent toutefois être relativisés: dans les pays européens par exemple, la perte moyenne d'espérance de vie correspondante est comme on le verra de l'ordre de quelques mois à quelques années selon les populations concernées. Elle est cependant plus importante dans des pays très pollués comme la Chine.

En France, la pollution atmosphérique est suivie en particulier, pour les sources et l'évaluation quantitative des émissions par le Centre interprofessionnel technique d'étude de la pollution atmosphérique (CITEPA), et pour ses conséquences sanitaires par l'Institut national de veille sanitaire (InVS). Les Associations régionales de surveillance de la qualité de l'air (AASSQA) sont aussi des sources majeures d'information, dont Airparif plus spécifiquement pour l'Ile-de-France.

1- Les principaux polluants nocifs de l'atmosphère

- Le monoxyde de carbone (CO): c'est un gaz qui en se combinant à l'hémoglobine du sang diminue la capacité de celui-ci à véhiculer l'oxygène. Il est mortel en une heure à une. Son seuil de toxicité est évalué à 35 parties pour million (ppm) de concentration dans l'air, mais déjà à ces doses il provoque des altérations de la santé et chez les enfants des problèmes de croissance. Il est mortel en une heure à une concentration de 1 pour mille (1000 ppm).

Il est à l'origine de nombreuses intoxications quand il se forme dans un milieu confiné. Il est produit par une combustion de substances organiques en déficit d'oxygène. Les principaux émetteurs sont la combustion des combustibles fossiles, y compris dans les moteurs, diesel en particulier, et celle du bois et plus généralement de la biomasse.

- Les oxydes de soufre: appelés SO_x parce qu'il s'agit d'un mélange de plusieurs oxydes, le principal d'entre eux est le dioxyde de soufre (SO₂). SO₂ est un irritant respiratoire. Il provoque une inflammation des bronches et est particulièrement dangereux pour les asthmatiques. Son seuil de toxicité est très faible, de l'ordre de quelques ppm dans l'atmosphère. Il produit aussi avec l'eau de pluie de l'acide sulfurique qui va, sous forme de pluies acides, acidifier les lacs et en détruire la faune, ou attaquer les pierres calcaires de construction, et cela à des distances des sources de pollutions qui peuvent atteindre plusieurs centaines de kilomètres selon l'intensité et la direction des vents. Il est produit essentiellement par la combustion du soufre contenu dans les charbons, sous forme organique et de sulfures minéraux souvent associés aux charbons comme la pyrite et la blende, et dans les produits pétroliers, particulièrement les gazoles et les fuels, sous forme de composés organiques.

- L'ammoniac (NH₃): c'est un puissant irritant respiratoire et cutané, qui peut provoquer par contact des brûlures graves, et à forte dose des oedèmes pulmonaires. Il est émis essentiellement par le secteur agricole et particulièrement les déjections des animaux d'élevage (97% en France métropolitaine en 2011, d'après le Centre Interprofessionnel d'Etude de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) (<http://www.citepa.org/fr/pollution-et-climat/polluants/aep-item/ammoniac>), et un peu par la combustion des combustibles. Les teneurs qui en résultent dans l'atmosphère sont trop faibles pour avoir des conséquences sanitaires notables, sauf pour les éleveurs eux-mêmes, en particulier ceux de porcs et de volailles, mais comme on le verra plus loin, l'ammoniac peut réagir avec d'autres substances pour produire des particules fines, qui sont, elles, dangereuses à très faible teneur dans l'atmosphère.

- Les oxydes d'azote: souvent appelés NO_x parce qu'il s'agit d'un mélange de différents oxydes, NO et NO₂ principalement. NO est produit essentiellement par combinaison de l'azote et de l'oxygène de l'air au contact de surfaces à haute température. Cette production commence à devenir critique au-dessus de 1000°C. Il peut aussi être produit directement, à plus basse température, par la combustion des combustibles fossiles et de la biomasse.

NO n'est pas toxique, mais il se transforme ensuite en NO₂ par oxydation, y compris dans l'atmosphère loin de sa source.

NO₂ est un toxique irritant pour les fines bronches, qui réduit ainsi l'apport d'oxygène au sang comme le fait le CO (mais celui-ci le fait d'une façon différente, en se combinant à l'hémoglobine du sang). En fait, et ceci est peu connu, il est toxique à dose beaucoup plus faible que le CO: On considère qu'une exposition d'une heure à une atmosphère contenant 70 ppm de NO₂ suffisent pour tuer, et que 40 ppm suffisent pour créer des effets irréversibles dans le même temps.

Les oxydes d'azote contribuent également à la formation des pluies acides et à l'eutrophisation des cours d'eau. Les principales sources en sont les moteurs thermiques de toute sorte, ceux des moteurs diesel en particulier, et les installations de combustion à haute température, centrales électriques à combustibles fossiles ou installations industrielles.

Mais le chauffage (fuel domestique, bois) et l'agriculture (engrais...) sont aussi des sources non négligeables.

- **Les polluants organiques persistants:** Il s'agit de molécules organiques extrêmement stables. Elles ont donc une longue durée de vie dans l'environnement. Lors de la combustion des combustibles fossiles et d'autres substances organiques carbonées, bois, biomasse et déchets ménagers, elles sont produites sans être détruites tant que la température de combustion reste inférieure à environ 1000 °C. Il s'agit de faibles quantités, mais certaines d'entre elles sont réputées cancérigènes à très faible dose. Sont particulièrement surveillés des **dioxines et des furanes (PCDD-F)**, certains **hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP)**, les **polychlorobiphényles (PCB)** et l'**hexachlorobenzène (HCB)**.

- **Les composés organiques volatils non méthane (COVNM):** Ce sont les hydrocarbures ou aldéhydes volatilisés ou synthétisés en chauffant ou brûlant des substances organiques. Le méthane, gaz à effet de serre, non toxique, n'est pas ici pris en compte. Certains sont toxiques comme par exemple l'acroléine, aldéhyde très irritant pour les muqueuses bien connu par exemple des cuisiniers qui laissent trop chauffer l'huile dans une poêle à frire, ou cancérigènes à très faible dose comme le benzène. La combustion de toutes les substances organiques carbonées en produit, mais la principale source dans les pays développés en est l'industrie des solvants (donc la pétrochimie, ce qui nous ramène au pétrole) et l'utilisation de ceux-ci dans énormément de produits courants, ce qui les rend omniprésents, en particulier dans l'habitat.

- **L'ozone «troposphérique» (O₃):** Ce n'est pas un polluant primaire. Il se forme par réactions photochimiques dans l'atmosphère impliquant les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone et les COVNM, en particulier à la périphérie des villes. Cet ozone est dit ozone troposphérique pour le distinguer de l'ozone qui forme à très haute altitude la «couche d'ozone» nous protégeant du rayonnement ultraviolet du soleil. Il a une odeur caractéristique Sa teneur normale dans l'atmosphère au sol est de 0,005 à 0,05 ppm.

L'ozone est susceptible de pénétrer en profondeur dans les voies respiratoires. C'est un gaz oxydant qui, au niveau cellulaire, provoque une réaction inflammatoire bronchique avec libération de médiateurs pouvant entraîner des lésions du tissu pulmonaire. Cette inflammation des voies respiratoires s'accompagne d'une hyper réactivité bronchique. Il s'agit donc d'une molécule très toxique. Il est toxique dès son seuil de détection olfactif, soit 0,01 ppm dans l'atmosphère, et peut entraîner des oedèmes pulmonaires aigus dès 9 ppm.

- **Les goudrons:** Ce sont des produits de pyrolyse, c'est-à-dire de décomposition des combustibles par la température, mais qui se volatilisent avant de pouvoir être brûlés lors de la combustion et se condensent sur les parois froides pour former par exemple les dépôts noirs et visqueux observables dans les conduits de cheminée. Ils sont agressifs pour la peau et cancérigènes.

- **Les suies ou particules (figure 1) :** Ce seraient en fait les substances les plus dangereuses, surtout les particules dites fines, **PM₁₀**, de plus grande dimension inférieure à 10 micromètres (µm), et parmi elles plus encore les **PM_{2,5}**, de plus grande dimension inférieure à 2,5 µm. Ces dernières pourraient en effet pénétrer dans les poumons, entrer dans la circulation sanguine, et provoquer des cardiopathies, des cancers du poumon, des cas d'asthme et des infections des voies respiratoires inférieures. Les particules fines sont

invisibles. Elles peuvent adsorber ou agglomérer d'autres polluants toxiques, HAP, dioxines, COVNM, métaux lourds puis les véhiculer dans les poumons.

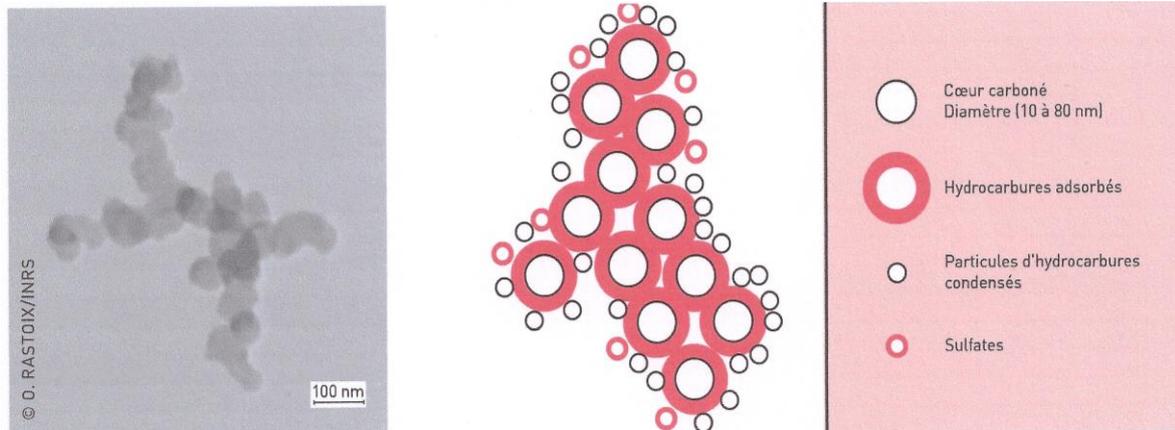


Figure 1: anatomie d'une particule fine émise par un moteur diesel. Image en microscopie électronique et interprétation structurale. Source INRS 2010 : Hygiène et sécurité au travail: émission diesel, performances des filtres à particules pour engins non routiers. ND 2323-218-10

On pourra consulter par exemple le numéro 33 de Décembre 2007 de la revue Extrapol de l'InVs (http://www.invs.sante.fr/publications/extrapol/33/extrapol_33.pdf) pour se faire une idée des problèmes sanitaires posés..

Notons que ces particules peuvent se former secondairement, loin des émetteurs initiaux, sulfates formés à partir des SOx et nitrates formés à partir des NOx mais aussi de l'ammoniac et peuvent aussi parcourir des distances considérables, des centaines de kilomètres, sous forme d'aérosols.

Elles ont des sources multiples: combustion des combustibles fossiles et du bois et plus généralement des substances organiques carbonées, mais les particules secondaires peuvent aussi se former à partir des émissions agricoles d'oxydes d'azote et d'ammoniac. Des particules fines peuvent aussi se former par abrasion de matériaux divers ou être produites par les labours agricoles, par l'industrie du bâtiment et des travaux publics (BTP) et par bien d'autres activités.

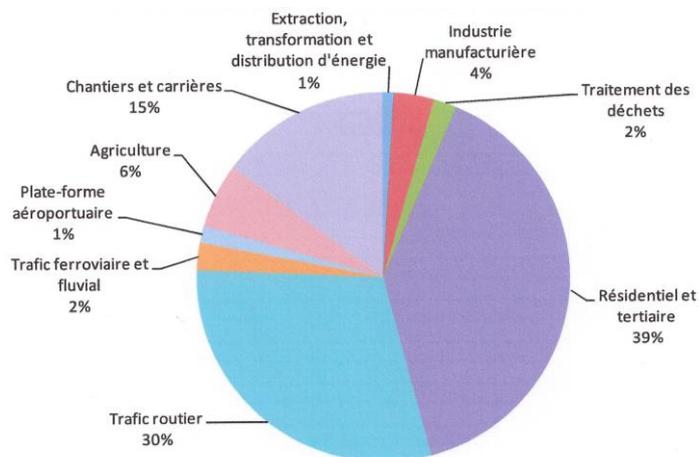


Figure 2: émissions de particules primaires Pm 2,5 par secteur d'activité en Île-de-France en 2010. Source AirParif, <http://www.airparif.asso.fr/pdf/publications/inventaire-emissions-idf-2010-rapport-130731.pdf>

On pourra consulter le rapport 2011 d'Airparif, «L'origine des particules en Ile-de-France » (<http://www.airparif.asso.fr/pdf/publications/rapport-particules-110914.pdf>), pour voir la diversité de composition et d'origine de ces particules.

La figure 2 montre pour l'Île-de-France l'importance relative en 2010 des émissions de particules PM_{2,5} en fonction des secteurs d'activité. Le secteur résidentiel et tertiaire, et le trafic routier se taillent la part du lion. On observe aussi dans le rapport d'Airparif que cette part est d'autant plus grande que les particules émises sont plus fines, donc plus dangereuses.

- Les métaux lourds : les plus préoccupants sont l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le sélénium (Se) et le zinc (Zn). On retrouve là à peu près la liste des éléments dangereux contenus dans les charbons. Mais le nickel est aussi présent dans les coupes lourdes des pétroles, fuel domestique et fuel lourd. Il y a bien d'autres sources de ces éléments: par exemple le cadmium est présent dans les engrais phosphatés. Ils se retrouvent dans l'atmosphère sous forme d'aérosols, ou véhiculés par les particules fines.

L'Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM) et l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) publient sur tous ces polluants des fiches toxicologiques.

2- L'évaluation des dangers de la pollution atmosphérique

La Commission Européenne insiste en particulier sur 2 polluants, les particules fines et l'ozone troposphérique, qui seraient de très loin les principaux responsables de la mortalité due à la pollution atmosphérique extérieure en EU 28, environ 90% pour les particules fines, et environ 6 % pour l'ozone, des 420 000 morts estimés pour 2010. Les particules PM_{2,5} seraient responsables d'environ les 2/3 de la mortalité annoncée.

Cependant on a vu l'importance des COVNM, du CO et des oxydes d'azote dans la formation de l'ozone, et celle des oxydes de soufre et d'azote, ainsi que de l'ammoniac, dans la formation des particules fines secondaires. Il faut par conséquent s'intéresser aussi aux émissions de ces polluants.

La mortalité dépend bien sûr de l'intensité de la pollution locale, comme le montre par exemple la carte ci-dessous (figure 3), établie en 2005 à partir de mesures faites en 2000 pour les particules fines PM_{2,5} par l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) dans le cadre du programme CAFE (Clean Air for Europe) de l'Union Européenne.

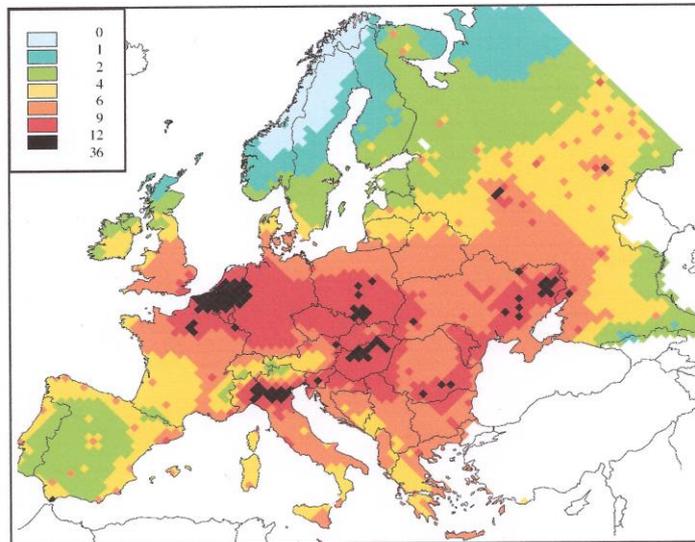


Figure 3: nombre de mois de perte moyenne d'espérance de vie dans l'UE due aux particules fines PM_{2,5} dans l'air extérieur, estimé pour l'année 2000. Les zones densément peuplées et industrialisées sont les plus touchées. Source : International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) dans le cadre du programme Clean Air For Europe (CAFE). Ce type de calcul masque le fait que la perte d'années de vie par personne décédée pour cette cause, d'un peu plus de dix ans, est bien plus considérable que la diminution d'espérance de vie moyenne de l'ensemble de la population.

En 2000, selon le rapport 2005 de ce programme CAFE, la mortalité prématurée estimée pour l'Europe du fait des particules PM_{2,5} était d'environ 350 000 par an, et pour ne citer que les pays où cette mortalité était évaluée à plus de 10 000 par an: environ 75 000 en Allemagne, 51 000 en Italie, 42 000 en France, 40 000 au Royaume-Uni, 33 000 en Pologne, 20 000 en Espagne, 16 000 aux Pays-Bas, 13 000 en Belgique, 13 000 en Hongrie.

La valeur de 42 000 morts prématurées par an pour la France qui circule actuellement dans les médias provient donc de ce rapport, dont les conclusions ont été validées par le Commissariat Général au Développement Durable dans son rapport de 2013 (<http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/LPS175-2.pdf>).

Elle ne concerne que les particules fines PM_{2,5}, qui n'entraînent comme on l'a dit qu'environ les 2/3 de la mortalité totale due à la pollution de l'air extérieur.

Il n'y a pas eu depuis d'équivalent du rapport CAFE, lequel a utilisé des mesures faites il y a maintenant 14 ans. Etant donné les progrès réalisés depuis en Europe pour diminuer la pollution atmosphérique, on peut espérer qu'il y a eu une diminution corrélative de la mortalité. Mais d'un autre côté, les relations doses/effets utilisées pour déterminer ces valeurs ont évolué pendant ce temps avec les progrès des études épidémiologiques, dans le sens d'un très important renforcement des effets pour une même dose. La mortalité a donc peut-être diminué dans les faits, mais les valeurs réelles pourraient être bien plus élevées que celles annoncées par le rapport CAFE.

Une description des méthodes utilisées pour évaluer l'impact sanitaire de la concentration des particules fines, PM₁₀ ou PM_{2,5} dans l'atmosphère se trouve par exemple dans « Évaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine - Concepts et méthodes », publié en 2008 par l'InVS (http://www.invs.sante.fr/publications/2008/eis_pollution_urbaine/).

Deux types d'effets de la pollution atmosphérique sont à considérer: ceux à court terme qui résultent de corrélations temporelles entre les variations moyennes journalières des polluants dans l'atmosphère et les variations des indicateurs sanitaires (mortalité toutes causes, mortalité d'origine cardiaque et respiratoire, hospitalisations...) et ceux à long terme, qui peuvent être établis à partir du suivi de cohortes établissant sur la durée les corrélations de type écologique avec ces mêmes polluants.

Les effets à court terme

Parmi ces effets, les plus connus sont ceux liés aux intoxications à l'oxyde de carbone produit par des combustions de combustibles fossiles en déficit d'oxygène, en particulier dans les périodes de chauffage, du fait d'appareils de chauffage ou de cuisson mal réglés, ou même de braseros, installés dans des pièces confinées ou dont les conduits d'évacuation sont obstrués, mais aussi de l'utilisation de groupes électrogènes directement dans l'habitat: En France, les intoxications sont devenues bien moins nombreuses depuis quelques années grâce à l'action éducative et préventive des services de l'Etat, en particulier de l'Institut de Veille Sanitaire (InVS), mais presque 4 000 hospitalisations pour intoxication et environ 40 morts ont quand même encore été recensées pendant la période de chauffe 2012- 2013 (4).

C'est plus que la mortalité «courante» par explosion due au gaz et au GPL, mais sans les destructions matérielles. L'essentiel en est dû en France à une mauvaise utilisation de combustibles fossiles, fuel domestique et gaz naturel, mais la mauvaise utilisation du bois ou du charbon de bois a aussi une responsabilité. Dans les pays pauvres qui utilisent couramment les combustibles fossiles ou le bois en atmosphère confinée sans précaution particulière, cette mortalité est bien sûr beaucoup plus importante, et le bois et plus généralement la biomasse y ont la plus grande part.

Mais les effets à court terme dus aux autres polluants sont quantitativement beaucoup plus importants. Un exemple célèbre est celui du «Great Smog» de Londres de 1952, qui a duré 5 jours seulement mais aurait provoqué la mort de 12 000 personnes (5) !

En France, sans atteindre ces extrêmes, il y a quand même plusieurs milliers de morts par an liés à des épisodes d'augmentation importante mais temporaire de la pollution atmosphérique les «pics» de pollution, qui sont généralement liés à des conditions météorologiques particulières.

Ce sont ces pics de pollution qui font la une des médias à cause de leur caractère spectaculaire, mais en fait, ce ne sont pas eux qui sont responsables de l'essentiel de la mortalité, mais les effets à long terme de l'exposition quotidienne à la pollution «ordinaire».

Effets à long terme

Il s'agit donc ici d'effets sur la durée de la pollution atmosphérique moyenne, que l'on ne peut mettre en évidence que grâce à des études épidémiologiques sur des «cohortes». Il s'agit d'études délicates, qui se sont affinées au cours du temps.

Un document de l'InVS (6) donne une évaluation quantitative de ces effets en ce qui concerne les particules fines pour 9 grandes villes françaises pour la période 2004-2006.

Retenons pour l'instant de ce document que :

- le taux d'exposition moyen aux particules PM_{2,5} est d'environ 15 à 20 µg/m³ en milieu urbain en France (tableau 1)
- l'estimation de l'impact à long terme est une augmentation du risque de mort prématurée, toutes causes confondues, pour une durée correspondant à l'espérance de vie moyenne, de 6 % pour une concentration moyenne de 10 µg/m³ de particules PM_{2,5} dans l'air respiré pendant cette durée, donc 10 % à Paris où la concentration moyenne serait de 16,4 µg/m³. La population suivie est celle âgée de plus de 30 ans.

Il s'agit donc ici d'une relation dose/effet. Elle est supposée linéaire dans le champ des concentrations observées.

Ville	Minimum	Maximum	Moyenne
Bordeaux	4	88	15,7
Le Havre	3	66	14,5
Lille	4	76	16,6
Lyon	2	97	16,5
Marseille	3	87	19,6
Paris	4	88	16,4
Rouen	4	84	15,3
Strasbourg	1	72	16,6
Toulouse	4	48	14,2

Tableau 1: teneurs journalières en PM_{2,5} (en µg/m³) dans l'atmosphère de 9 grandes villes françaises. Données 2004-2006. D'après Declercq et al.2012, InVS (6)

Mais des études réalisées à partir de données plus récentes et plus complètes donnent des valeurs bien plus pessimistes. C'est ainsi qu'un article de R.Beelen et al. de 2014 dans le journal médical britannique «The Lancet» (7) fait état pour l'Europe d'une augmentation du risque de 14% par 10 µg/m³ de PM_{2,5}, soit 2,3 fois supérieur au précédent !

Une telle augmentation est probablement plus due à l'amélioration des méthodes utilisées dans les études épidémiologiques et au plus grand nombre de cohortes prises en compte qu'aux incertitudes inhérentes à ces études. On peut la rapprocher de l'augmentation récente,

dans des proportions encore plus importantes, des estimations par l'OMS des effets sur la santé de la pollution atmosphérique.

Le graphique de la figure 4 propose une comparaison visuelle approximative du risque que font courir les particules $PM_{2,5}$ avec des risques qui font beaucoup plus fréquemment l'objet de commentaires dans les médias: ceux de la radioactivité et ceux du tabac. Les mécanismes d'altération de la santé sont différents, mais on peut comparer les augmentations des risques courus au cours du temps en fonction des doses reçues.

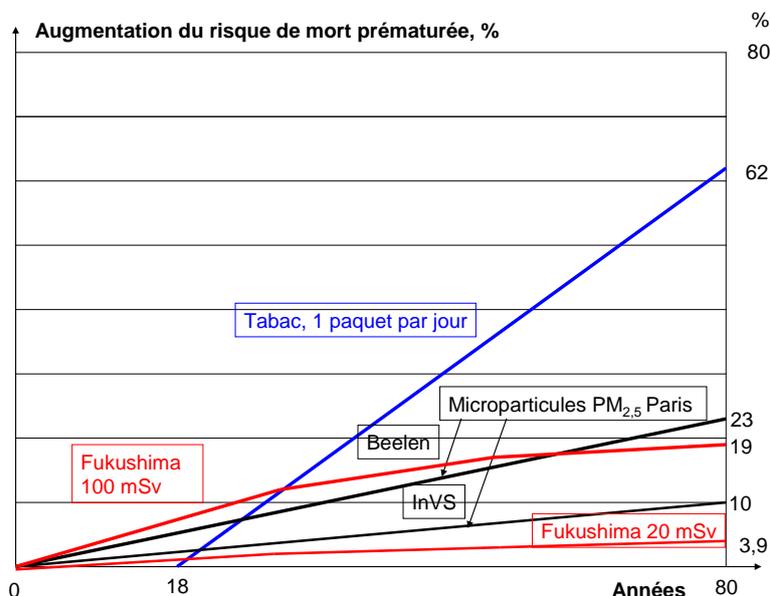


Figure 4: comparaison en % des augmentations de probabilité au cours de la vie, de mort prématurée en fonction de la durée d'exposition, pour une espérance de vie moyenne de 80 ans à la naissance et pour 3 causes: le tabac à raison de 1 paquet par jour, les particules fines $PM_{2,5}$ pour les concentrations moyennes observées actuellement à Paris, et la radioactivité dans les zones d'exclusion de Fukushima.

Pour le tabac, l'augmentation de risque de mortalité prématurée, par cancer ou autre maladie, est estimée à environ 1 % par paquet.an (un paquet par jour pendant un an) (9,10).

Pour les particules $PM_{2,5}$, nous venons de voir deux estimations, celle de l'InVS et celle de Beelen et al.

Dans le cas de la radioactivité, nous avons pris en considération l'augmentation du risque de mortalité prématurée par cancer solide, qui a été estimée pour sa valeur centrale à 5 % par sievert de dose efficace (rappel : le sievert de dose efficace, en abrégé Sv, est une mesure de l'énergie des rayonnements qui est absorbée en un temps donné par un corps humain exposé, et qui est pondérée en fonction de la dangerosité du rayonnement considéré pour un organe donné), après les études faites sur les irradiés d'Hiroshima et Nagasaki (8). Ce coefficient n'a pas depuis été remis en cause, ni par l'étude d'autres cohortes, ni par les progrès médicaux dans le traitement du cancer.

On a donc comparé ici l'augmentation au cours du temps des risques de mortalité prématurée pour une population de fumeurs fumant sans interruption 1 paquet par jour depuis l'âge de 18 ans, à celle des risques correspondant à l'exposition moyenne actuelle aux particules fines

$PM_{2,5}$ à Paris, soit $16,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, d'une population supposée naître à Paris et supposée y rester pendant une durée correspondant à l'espérance de vie moyenne en France, soit 80 ans, et cela dans deux hypothèses, InVS et Beelen et al. En l'absence de données publiées nous avons pris

ici, pour la population âgée de moins de 30 ans, les mêmes coefficients que pour la population âgée de plus de 30 ans.

On a également indiqué l'augmentation des risques de mort prématurée du fait de la radioactivité pour une population supposée naître actuellement dans les zones d'exclusion de Fukushima (*rappelons que ces zones sont celles délimitées par le gouvernement Japonais, où il est pour l'instant interdit de résider en permanence et même d'avoir une activité. Elles sont classées en 3 catégories: celles où la radioactivité est supérieure à la radioactivité naturelle mais ne dépasse pas 20 mSv par an d'exposition potentielle externe pour un résident permanent, celle où l'exposition potentielle externe est comprise entre 20 et 50 mSv, et celles où elle peut dépasser 50 mSv*), et y rester pendant 80 ans pour deux hypothèses: doses efficaces externes initialement reçues de 20 mSv/an et de 100 mSv/an du fait du césium 137, qui est actuellement de loin le principal «contaminant» responsable de cette radioactivité. Ces doses annuelles externes diminuent ensuite au cours du temps, en fonction de la période du césium 137, qui est d'environ 30 ans. Au bout de 80 ans, les doses reçues cumulées potentielles sont donc respectivement d'environ 0,76 Sv et 3,8 Sv pour 20 mSv et 100 mSv de dose annuelle initiale.

Cette comparaison met en lumière l'importance du danger du tabac, mais montre aussi que les particules fines PM_{2,5} présentent à Paris un danger du même ordre que la radioactivité dans les zones d'exclusion de Fukushima. Et il en est aussi de même actuellement pour l'essentiel des zones d'exclusion de Tchernobyl, où l'exposition au césium 137 a considérablement décliné depuis 1986, et est maintenant presque partout largement inférieure à 50 mSv par an dans les zones les plus contaminées (11).

Ces résultats sont cependant à nuancer :

Nous avons pris pour la radioactivité une relation dose/effet linéaire sans seuil, alors qu'il est maintenant admis par la quasi totalité des médecins de médecine nucléaire, que l'on peut recevoir sans danger des doses efficaces inférieures à 100 mSv et même bien plus sur le long terme si le débit de dose annuel ne dépasse pas quelques dizaines de mSv. De plus, la radioactivité dans ces zones déclinera plus vite qu'indiqué, du fait de la dispersion/diffusion au cours du temps du césium 137. Par contre, il faut tenir compte des risques de leucémies, de ceux entraînés par la contamination interne par l'alimentation, ainsi que de possibles effets cardiovasculaires pour des doses efficaces reçues supérieures à 500 mSv.

Mais, l'un dans l'autre, les courbes de la figure 4 maximisent fortement les risques de la radioactivité, et habiter de manière permanente dans la zone d'exclusion à 20 mSv de Fukushima présenterait en fait très peu de danger. C'est d'ailleurs la conclusion tirée par les autorités japonaises, qui viennent d'autoriser les premiers retours dans cette zone.

Par contre, ces courbes minimisent très sensiblement le danger dû à Paris à la pollution atmosphérique, car le risque dû aux particules PM_{2,5} ne représente que les 2/3 environ du risque global de la pollution atmosphérique. D'autre part, il ne s'agit ici que de la pollution par l'air extérieur (outdoor pollution), alors qu'il faudrait également prendre en compte la pollution de l'air intérieur (indoor pollution), dont on a vu qu'elle présente aussi un risque notable.

Le danger global des particules fines est également bien supérieur à celui de la radioactivité parce qu'il concerne des populations de l'ordre d'au moins cent mille fois plus grandes que celles concernées par des niveaux de radioactivité réputés dangereux. En fait à peu près toute la population du globe est concernée car ces particules peuvent parcourir de grandes distances depuis leur zone d'émission. Les émissions des pays très émetteurs, en Europe l'Allemagne, le Benelux, l'Italie du Nord, les pays d'Europe Centrale et de l'Est, et ceux des Balkans

«débordent » donc très largement sur leurs voisins au gré des vents. En Asie du Sud-Est, il existe maintenant une véritable chape de pollution atmosphérique couvrant plusieurs millions de km², l'Asian Brown Cloud (ABC). Mais c'est aussi le cas de la majeure partie de l'Europe, comme le montre la carte de la figure 3, même si le niveau de pollution est ici plus faible. La pollution est plus importante dans les zones d'émissions importantes et est modulée par les phénomènes météorologiques et selon les saisons, mais sur de très grandes surfaces, même en dehors des zones urbaines, un fond minimum de pollution à peu près constant persiste tout au long de l'année. En Europe, pratiquement personne n'est donc à l'abri, y compris hors des villes.

La pollution atmosphérique ne se borne pas à des effets sur la santé humaine. Elle a aussi des effets considérables sur l'environnement. Elle est par exemple responsable d'une eutrophisation des lacs et des cours d'eau, principalement du fait de la production d'aérosols de particules de nitrates, et de leur acidification via les émissions de SO₂, et cela sur de très grandes surfaces en Europe. Elle altère aussi la santé des plantes et diminue donc les rendements agricoles.

Elle a aussi des effets sur le climat: l'ozone est un gaz à effet de serre, et les particules en suspension dans l'atmosphère (aérosols), peuvent par exemple avoir un pouvoir réchauffant si elles absorbent la lumière du soleil, ce qui est le cas des particules carbonées, ou un pouvoir refroidissant si elles la réfléchissent, comme le font les sulfates.

Des efforts considérables ont été déjà faits dans l'Union Européenne pour diminuer la pollution atmosphérique (figure 5). La réduction des teneurs en particules fines entre 2000, date des mesures utilisées par le rapport CAFE, et 2010 est de l'ordre de 15 %. Mais l'ampleur de la mortalité prématurée encore induite montre qu'il y a encore beaucoup à faire pour réduire les risques.

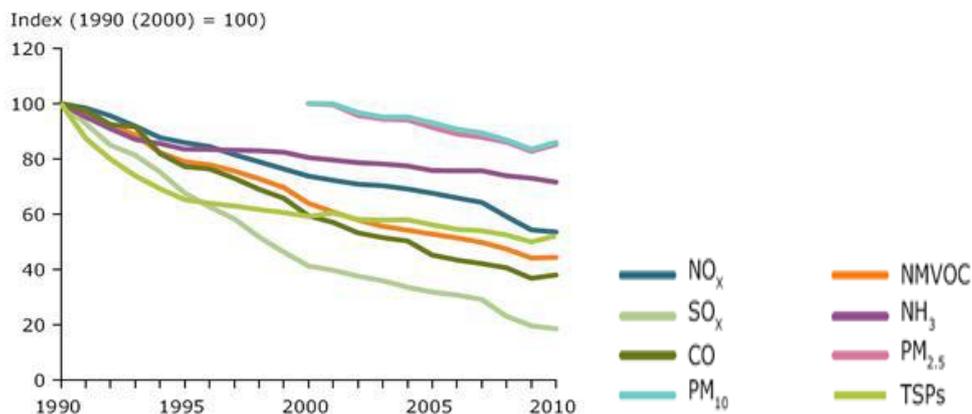


Figure 5: évolution dans l'Union européenne des émissions de polluants atmosphériques les plus préoccupants pour la santé publique de 1990 (base 100) à 2010. Source: Commission Européenne.

NO_x: oxydes d'azote, SO_x: oxydes de soufre, CO: monoxyde de carbone, PM₁₀: particules de taille inférieure à 10µm, NMVOC: carbone organique volatil non méthane, NH₃: ammoniac, PM_{2,5}: particules de taille inférieure à 2,5µm, TSPs: total particules en suspension.

Il faut toutefois relativiser les nombres impressionnants qui ont été cités : le nombre d'années de vie perdues du fait des particules PM_{2,5} dans l'EU 28 était estimé pour 2010 à environ 290 millions sur la durée de l'espérance de vie moyenne, soit 80 ans environ, pour une population de 504 millions d'habitants (13), soit une perte moyenne d'espérance de vie d'environ 6,9 mois (6,9 pour la France également). Cette perte moyenne d'espérance de vie peut cependant

atteindre 2 à 3 ans dans les régions très peuplées et industrialisées (figure 3). Toutefois, si l'on estime la mortalité entraînée par les PM_{2,5} au 2/3 des 420 000 morts prématurées entraînées par la pollution atmosphérique en 2010, soit 280 000, le nombre moyen d'années de vie perdues par ces personnes décédées prématurément serait donc, pour l'espérance de vie moyenne de 80 ans de 290 millions/280 000 x 80, soit environ 13 ans.

3- Quelles sont les sources les plus dangereuses de la pollution atmosphérique ?

L'évaluation du danger relatif des différentes sources de pollution atmosphérique est très délicate à faire à cause des interactions des différents polluants entre eux. Cependant on peut s'en faire une première idée à partir des mesures d'émission des polluants primaires, et en particulier de celles des particules PM_{2,5} primaires.

	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
CMS, sauf lignite	49	33	16	12	9,3	9,3	5,2	5,1	5,3	6,7	4,6	4	3,9	3,3
Lignite	0,1	0,3	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bois	196	189	143	139	122	127	121	113	100	90	91	89	95	74
Déchets industriels solides	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Déchets municipaux organiques	1,1	1,4	1,1	0,9	0,7	0,4	0,2	0,2	0,2	0,1	0	0	0	0
Déchets municipaux fossiles	0,6	0,8	0,7	0,6	0,4	0,3	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0
Coke de pétrole	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2
Fioul lourd	4,7	4,3	3,4	3,2	2,7	2,9	2,8	2,9	2,6	2,3	1,8	1,5	1,3	1
Fioul domestique	24	23	23	24	25	25	23	22	19	17	16	15	13	8,6
Essence/super	7,3	4,3	3,2	2,9	2,9	2,7	2,7	2,5	2,3	2,1	1,9	1,8	1,7	1,6
Gazole	50	62	49	48	45	42	40	34	32	29	27	25	25	25
Carburacteurs	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Huiles et solvants usagés	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Autres produits pétroliers	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1
Liqueurs noires	0,4	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,7	0,8	0,9
Autres combustibles liquides	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0
Gaz naturel	0,8	1,0	1,2	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,4	1,2
GPL et GPLc	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Gaz de cokerie	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Gaz de haut-fourneau	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0,1
Gaz industriels	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0
Gaz de raffinerie	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Biogaz	0	0,001	0	0	0,001	0,001	0	0,001	0,001	0,001	0	0,001	0,001	0,001
Autres combustibles gazeux	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,06	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03
Biocarburant essence	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Biocarburant diesel	0	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,6	1,2	1,8	1,8	2,0	2,0
Autres produits de la biomasse	1,0	1,1	0,9	1,0	1,0	1,0	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5
Total	337	322	244	236	212	214	201	185	167	153	149	142	146	119
% des émissions totales de PM _{2,5}	82	83	79	79	77	78	77	76	74	73	73	73	74	69

Tableau 2: émissions annuelles de PM_{2,5} primaires dues aux combustibles de 1990 à 2013 en France, en milliers de tonnes (kt). Source : CITEPA. CMS = combustibles minéraux solides : charbon et charbon de bois.

Le tableau 2, issu du rapport SECTEN d'Avril 2013 de la CITEPA (12) montre l'évolution des émissions dans l'air extérieur des particules fines PM_{2,5} primaires produites par la combustion des combustibles fossiles et du bois en France de 1990 à 2013, en milliers de tonnes (kt) par an. On observe l'importance de la contribution des combustibles puisqu'elle représente en poids selon les années de 70 % à 80 % environ des émissions totales de PM_{2,5} primaires. On observe aussi la diminution rapide des émissions au cours du temps, ce qui témoigne de l'efficacité des efforts entrepris en France pour réduire cette pollution primaire.

Il y a pour 2011, année la plus récente considérée, deux contributeurs majeurs: l'utilisation domestique du bois, environ 61% des émissions, et les moteurs diesel fonctionnant au gazole et au biocarburant diesel, environ 23 % (21% pour le gazole et 2% pour le biodiesel). Le troisième poste important est le fuel, environ 8 % (7,2 % pour le fuel domestique et 0,8 % pour le fuel lourd). Notons cependant à propos du fuel que rapporté à l'énergie produite, ses émissions deviennent comparables à celles du gazole.

Cela montre la dangerosité du bois énergie et celle du gazole utilisé dans les moteurs diesel, mais aussi, en ce qui concerne ce dernier, que les évaluations de ce danger que font circuler actuellement les médias sont sans doute excessives. Bien sûr le danger du gazole concerne surtout les habitants qui demeurent le long des grands axes de circulation dans les grandes agglomérations, tandis que le danger du bois est plus grand dans les banlieues des villes et dans les zones rurales et semi rurales où l'on pratique beaucoup le chauffage domestique au bois et les feux de jardin.

Dans l'EU 28 et plus généralement dans les pays de l'OCDE, il est probable que l'utilisation domestique du bois est également en tête des sources de pollution aux particules PM_{2,5} primaires. Ces pays ont une part moins importante du gazole dans leur consommation de carburants que la France (un peu moins de 40 % en moyenne contre 70 % (14)) et la pollution par celui-ci y est donc moins importante. Par contre, la pollution par les émissions dues au charbon et au lignite, essentiellement du fait des centrales électriques, y est en moyenne considérablement plus importante et rivalise probablement avec celle due au bois. En Allemagne par exemple, la consommation de charbon et lignite est d'environ, en masse, 17 fois supérieure à celle de la France.

Dans les pays non-OCDE, l'importance relative de l'utilisation du bois (et du charbon de bois) est certainement encore plus grande, du fait des nombreux pays pour lesquels il s'agit d'une très importante source d'énergie, la plus importante dans beaucoup d'entre eux. De plus, son utilisation très fréquente en milieu confiné (pollution indoor) en augmente encore les risques. Les agriculteurs de ces pays pratiquent aussi fréquemment le débroussaillage par brûlage pour préparer les semis et les pâturages.

L'indicateur «PM_{2,5} primaires émises par les combustibles» sous-estime cependant notablement dans un pays donné les risques globaux car :

- Il ne s'agit que des particules primaires alors que des particules secondaires, tout aussi dangereuses, formées par interaction des polluants émis par des sources variées, même loin des émetteurs, échappent à cet inventaire. Ces particules secondaires, ainsi que de l'ozone, peuvent se former à partir du monoxyde de carbone, des oxydes de soufre et d'azote, et des COVNM émis par la combustion des combustibles, mais aussi à partir des émissions d'ammoniac et d'oxydes d'azote de l'agriculture (15)
- des particules peuvent être importées des pays voisins du pays considéré.
- les particules PM_{2,5} n'entraînent qu'environ les deux-tiers de la mortalité totale entraînée par la pollution de l'air extérieur (outdoor pollution).
- la pollution de l'air intérieur (indoor pollution) n'est pas prise en considération.

Conclusion

La pollution atmosphérique réduit l'espérance de vie. Elle la réduit même sensiblement: Selon l'OMS, un décès prématuré sur huit dans le monde en 2012, en additionnant les effets de la pollution extérieure (outdoor pollution) et ceux de la pollution intérieure (indoor pollution).

Elle n'affecte pas seulement la Chine. Elle affecte aussi l'Europe: dans l'EU 28, 420 000 morts prématurés en 2010 rien que pour la pollution extérieure, selon la Commission Européenne !

Le danger de cette pollution extérieure provient pour l'essentiel de particules fines de dimensions micrométriques ou même nanométriques, donc invisibles, en suspension dans l'air à des concentrations de l'ordre de quelques dizaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les deux-tiers environ de la mortalité qui en résulte sont liés aux émissions de particules fines PM_{2,5}, c'est-à-dire celles dont la plus grande dimension est inférieure à 2,5 μm .

Il faut cependant relativiser ces nombres impressionnants: il s'agit de morts prématurées, et la perte moyenne d'espérance de vie attribuée aux particules PM_{2,5}, n'est, en Europe tout du moins, que d'environ 7 mois actuellement. Elle est quand même de l'ordre de 13 ans pour les personnes décédées prématurément de maladies associées à cette cause.

S'agissant des combustibles, qui produisent l'essentiel des particules PM_{2,5} primaires, les trois grands responsables sont le bois, le charbon (dont le lignite, variété particulièrement polluante de charbon), en particulier du fait des centrales électriques, et les moteurs diesel.

Dans ce trio, le bois vient en EU 28 probablement partout en tête, et charbon et lignite rivalisent avec le bois dans tous les pays qui les utilisent beaucoup pour leur production d'électricité, Allemagne, Pologne, Danemark, pays d'Europe Centrale et de l'Est et pays des Balkans. En France, charbon et lignite ne sont pour l'instant plus guère utilisés, espérons-le définitivement. Le diesel vient alors en deuxième position, loin derrière le bois, mais aussi loin devant le fuel domestique, qui vient en troisième position.

En France l'utilisation domestique du bois représente donc un sérieux danger. Cela ne fait pas la une des médias, et l'utilisation du bois pour le chauffage n'a pas pour autant été déconseillée par les mouvements écologiques, bien que ce fait soit connu depuis des années. Elle a été au contraire fortement encouragée.

Ce danger peut être sensiblement réduit :

- en utilisant le bois de préférence dans des chaufferies collectives ou des réseaux de chaleur pour lesquels il est possible d'en mieux contrôler la combustion et d'installer des filtres à fumées.
- en faisant la chasse aux installations de chauffage individuel à faible rendement, cheminées à foyer ouvert ou poêles et chaudières à températures de combustion insuffisantes, ainsi qu'en décourageant la pratique des feux de jardin.
- en encadrant les pratiques de brûlage des résidus agricoles et d'écobuage.

Vient ensuite, mais loin derrière, le gazole utilisé dans les moteurs diesel. La diminution de la proportion des véhicules diesel, y compris les poids lourds, dans le parc français de véhicules (qui serait fortement encouragée par la disparition de l'avantage fiscal accordé au gazole), ainsi que les efforts des constructeurs dans la conception et la généralisation des filtres à particules peuvent notablement réduire cette nuisance.

Le fuel domestique est en troisième position: son élimination progressive comme moyen de chauffage est souhaitable, à condition bien sûr de ne pas le remplacer par le bois.

A ce trio il faut ajouter les émissions de particules fines secondaires qui se forment à partir des émissions d'oxydes d'azote et d'ammoniac de l'agriculture (15). La modération de l'usage des engrais azotés et des précautions accrues dans les élevages sont donc souhaitables.

Il est clair cependant qu'on ne pourra espérer une franche diminution de la pollution atmosphérique et de ses nuisances qu'au prix d'efforts très tenaces et bien ciblés.

La comparaison avec le tabac montre que celui-ci est un bien plus grand danger pour les fumeurs réguliers que la pollution atmosphérique, ce dont on pouvait se douter.

Mais la comparaison avec les risques de la radioactivité montre que la pollution atmosphérique dans les grandes villes françaises, et probablement bien ailleurs en France, est probablement plus dangereuse pour les habitants que ne serait la radioactivité pour ceux qui décideraient d'aller vivre maintenant dans les zones d'exclusion de Fukushima et même de Tchernobyl.

La prise de conscience par l'opinion des dangers de la pollution atmosphérique est très lente à venir en France, faute sans doute de pression médiatique. Ces dangers semblent devoir être pris en considération dans la future loi sur la transition énergétique, peut-être sous la pression des Associations de surveillance de la qualité de l'air (<http://www.atmo-france.org/fr/>) qui ont fait un travail remarquable mais peu connu toutes ces années.

Références

1- Communiqués de presse de l’OMS de mars 2014 :

http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/fr/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=7-millions-de-deces-prematures-sont-lies-a-la-pollution-de-lair-chaque-annee .

2- Burden of disease attributable to outdoor air pollution, World Health Organization, Geneva 2011. (www.who.int/phe/healthtopics/outdoor/databases/burdendisease/en/)

3- Communiqué de presse de la Commission Européenne du 8/1/2013: (http://europa.eu/rapid/press-release_SPEECH-13-4_en.htm).

4 - <http://www.invs.sante.fr/Dossiers-thematiques/Environnement-et-sante/Intoxications-au-monoxyde-de-carbone/Bulletin-de-surveillance-des-intoxications-au-CO/2012-2013/Surveillance-des-intoxications-au-monoxyde-de-carbone.-Synthese-de-la-periode-de-chauffe-2012-2013>

5- A Retrospective Assessment of Mortality from the London Smog Episode of 1952: The Role of Influenza and Pollution (Évaluation rétrospective de la mortalité liée à l'épisode du smog de Londres de 1952 : rôle de la grippe et de la pollution) », *Environ Health Perspect*, vol. 112, n° 1, janvier 2004, p. 6-8 (DOI 10.1289/ehp.6539, [lire en ligne](#) , [archive](#)).

6- Declercq, C., et al. 2012 : Une évaluation de l’impact sanitaire des particules fines pour 9 villes françaises. Résultats du projet Aphekom Institut de veille sanitaire 2012. 33 p.

7- Beelen et al. 2014: Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project.

The Lancet, Volume 383, Issue 9919, Pages 785 - 795, 1 March 2014.

8- Preston et al. 2003. Studies of Mortality of Atomic Bomb Survivors. Report 13: Solid Cancer and Noncancer Disease Mortality: 1950–1997 . Radiation Research 160, 381–407 (2003).

9- Arden Pope III, C. et al. 2009: Cardiovascular Mortality and Exposure to Airborne Fine Particulate Matter and Cigarette Smoke: Shape of the Exposure-Response Relationship. *Circulation*. 2009;120:941-948. <http://circ.ahajournals.org/content/120/11/941>

10- Vineis, P. et al. 2004 : Dose-Response Relationship in Tobacco-related Cancers of Bladder and Lung: a biochemical Interpretation. *Int.J: Cancer*: 108, 2-7, 2004.

11- Chernobyl’s Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts. The Chernobyl Forum : 2003-2005, second revised version.

12- Centre Interprofessionnel Technique d’Etudes de la Pollution Atmosphérique (Citepa) 2013. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France, séries sectorielles et analyses étendues, format SECTEN.

13- Marcus Amann (editor) 2012 TSAP-2012 Baseline: Health and Environmental Impacts. TSAP Report 6 version 1.0. International Institute for Applied Systems Analysis IIASA

November 2012.

14- Rojey, A. 2007 : potentiel de développement des biocarburants. IFP Développement Durable, Pollutec, Novembre 2007. <http://www.afh2.org/uploads/actualite/Biocarburants%20Rojey.pdf>

15- Les émissions agricoles de particules dans l'air : Etat des lieux et leviers d'action 4 Mai 2012, mis à jour le 11 Février 2013. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Les_emissions_agricoles_de_particules_dans_l_air_-_Etat_des_lieux_et_leviers_d_action-2.pdf