



Disponible en ligne sur

ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte
www.em-consulte.com



TEXTES OFFICIELS

La pollution atmosphérique et ses effets sur la santé respiratoire en France. Document d'experts du Groupe Pathologies pulmonaires professionnelles environnementales et iatrogéniques (PAPPEI) de la Société de pneumologie de langue française (SPLF)



Outdoor pollution and its effects on lung health in France. Expert document from the Groupe Pathologies pulmonaires professionnelles environnementales et iatrogéniques (PAPPEI) of the Société de pneumologie de langue française (SPLF)

**D. Caillaud^{a,*}, I. Annesi-Maesano^b, A. Bourin^c,
T. Chinnet^d, A. Colette^e, F. De Blay^f, G. Dixsaut^g,
B. Housset^h, J. Kleinpeter^{i,j}, L. Malherbe^e,
I. Roussel^k, J.-C. Dalphin^l, D. Charpin^m, le Groupe
Pathologies pulmonaires professionnelles
environnementales et iatrogéniques (PAPPEI)**

^a Service de pneumologie, CHU Clermont-Ferrand, Inra, université Clermont Auvergne, 63000 Clermont-Ferrand, France

^b Sorbonne universités, UPMC Univ Paris 06, Inserm, Institut Pierre-Louis d'épidémiologie et de santé publique (IPLESP UMR S 1136), épidémiologie des maladies allergiques et respiratoires, faculté de médecine Saint-Antoine, 75012 Paris, France

^c Sciences de l'atmosphère et génie de l'environnement, IMT, Lille, 59650 Douai, France

^d Service de pneumologie et oncologie thoracique, CHU Ambroise-Paré, université de Versailles SQY, 92100 Boulogne-Billancourt, France

^e Unité de modélisation atmosphérique et de cartographie environnementale, INERIS, 60550 Verneuil-en-Halatte, France

Disponible sur Internet le 30 octobre 2019

* Auteur correspondant. Service de pneumologie, hôpital Montpied, 58, boulevard de Montalembert, 63003 Clermont-Ferrand cedex 1, France.

Adresse e-mail : dcaillaud@chu-clermontferrand.fr (D. Caillaud).

<https://doi.org/10.1016/j.rmr.2019.10.004>

0761-8425/© 2019 SPLF. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

^f Pôle de pathologie thoracique, hôpitaux universitaires de Strasbourg, Fédération de médecine translationnelle, université de Strasbourg, 67000 Strasbourg, France

^g Service de physiologie explorations fonctionnelles, hôpital Cochin Hôtel Dieu et Fondation du Souffle contre les maladies respiratoires, 75014 Paris, France

^h Service de pneumologie et pathologie professionnelle, centre hospitalier intercommunal de Créteil, département hospitalo-universitaire A-TVb, unité Inserm 955, Institut santé travail Paris-Est, université Paris-Est, 94000 Créteil, France

ⁱ Association agréée de Surveillance de la qualité de l'Air de la région Grand Est (ATMO Grand Est), 5, rue de Madrid, 67300 Schiltigheim, France

^j Association de surveillance de la pollution atmosphérique en Alsace (ASPA), 5, rue de Madrid, 67300 Schiltigheim, France

^k Faculté de Lille, 59000 Lille, France

^l Service de pneumologie, CHU de Besançon, UMR CNRS 6249 chrono-environnement, université de Franche-Comté, 25000 Besançon, France

^m Unité de pneumologie, groupe hospitalier de la Timone, Aix-Marseille université et Association pour la prévention de la pollution atmosphérique, 13000 Marseille, France

Préambule

Ce document, à l'usage des pneumologues, a pour mission principale de fournir à ceux-ci une base suffisante pour communiquer sur la pollution atmosphérique et ses effets sur la santé respiratoire en France.

Il comprend 11 chapitres écrits ou actualisés par rapport à une première version parue au mois de juin 2016 dans la *Revue* et une courte synthèse.

Nature et origine de la pollution atmosphérique

D'origine naturelle ou anthropique, les substances émises peuvent être de nature physique (radioactivité, énergie...), chimiques (gaz, particules, aérosols...) ou biologiques (pollens, acariens, moisissures...). Cette première partie présente succinctement les sources de la pollution atmosphérique ayant directement ou indirectement un impact sur la santé et en se limitant aux rejets chimiques d'origine anthropique (hors gaz à effet de serre et hors semi-volatils comme les pesticides).

Ces pollutions sont dites primaires lorsqu'elles s'échappent directement des pots d'échappements, des cheminées ou des surfaces agricoles, etc. Elles vont ensuite se disperser, se diluer, se transporter, voire se transformer en d'autres composés dits « secondaires » comme l'ozone ou le nitrate d'ammonium.

Les polluants primaires

Dioxyde de soufre

Le dioxyde de soufre (SO₂), polluant primaire historique, est connu pour les *smogs* acides notamment de Londres dans les années 1950 avec des surmortalités journalières se comptant en milliers. Les rejets en SO₂ sont dus majoritairement à la combustion de combustibles fossiles soufrés (charbon, coke de pétrole, fioul lourd, fioul domestique etc.). Tous les secteurs utilisateurs de ces combustibles sont

concernés (l'industrie, le résidentiel-tertiaire, les transports, l'agriculture, etc.) mais principalement l'industrie et la production d'énergie. En France, les émissions de SO₂ ont été diminuées par 10 passant d'environ 1800 Kt en 1960 à 150 Kt en 2015 [1]. Il reste quelques problématiques épisodiques de pollution de proximité dans certaines grandes zones industrielles.

Oxydes d'azote

Les oxydes d'azote (NO + NO₂, NO_x) issus des activités anthropiques proviennent principalement de la combustion de combustibles fossiles (essence, gazole, fiouls...) ou de biomasse. Ils se forment par combinaison dans l'air de l'azote (N₂) et du dioxygène (O₂) à haute température. Au cours d'une combustion, l'azote de l'air s'oxyde en grande partie en NO puis progressivement en NO₂ à l'air libre. En présence de certains constituants atmosphériques et sous l'effet du rayonnement solaire, les NO_x sont également, en tant que précurseurs, une source importante de pollution photochimique à l'ozone. Certains procédés industriels non liés à la consommation d'énergie (production d'acide nitrique, d'engrais azotés, etc.) émettent des NO_x. Le trafic routier est le secteur le plus émetteur (Fig. 1), notamment à travers les rejets en NO_x issus du diesel difficiles à réduire. Les émissions en oxydes d'azote présentent tout de même une tendance à la baisse en majorité grâce au renouvellement du parc automobile de moins en moins polluant.

Particules atmosphériques primaires

Les particules atmosphériques primaires ont des origines distinctes :

- mécanique : érosion des sols, broyage, concassage, etc. ;
- chimique ou thermique : ces particules se forment par changement d'état de la matière par réactions chimiques, par évaporation à haute température suivie d'une condensation. Le spectre granulométrique de ces particules varie de quelques nanomètres à quelques dixièmes de microns ;
- biologique : pollens, champignons, bactéries.

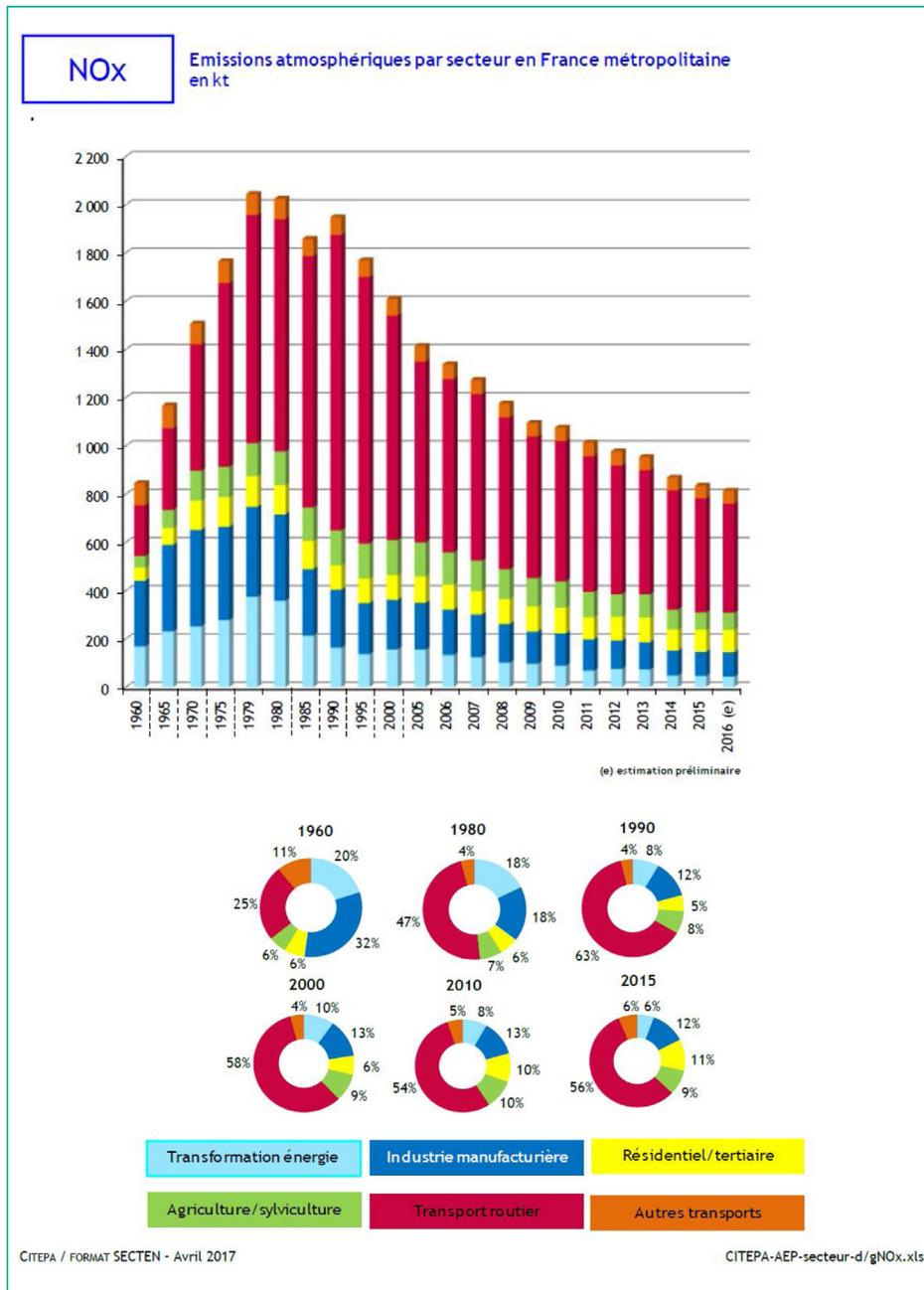


Figure 1. Évolution et répartition sectorielle des émissions françaises en oxydes d’azote (NOx).

Ces particules sont habituellement classées par leur taille du fait de leur pénétration plus ou moins profonde dans le système pulmonaire (Fig. 2). L’Union européenne a retenu comme polluant à surveiller les PM₁₀ particules en suspension d’un diamètre inférieur à 10 microns et les PM_{2,5} d’un diamètre inférieur à 2,5 microns (cf. partie sur les effets sur la santé). Ces particules se trouvent sous forme d’aérosols formant un système particules-air en suspension dans l’atmosphère. Les PM issus de la combustion (diesel, chauffage au bois,..) sont composées d’un noyau de carbone couvert de composés minéraux (sulfate...) et organiques déjà eux-mêmes nocifs. Le noyau minéral carboné est suivi comme carbone-suie sous l’angle *black carbon* (BC).

L’attention se porte de plus en plus vers les particules ultra-fines ou nanoparticules de diamètre inférieur à 0,1 micron (PM_{0,1}).

Les émissions de particules anthropiques PM₁₀ (Fig. 3) mettent au premier plan le résidentiel-tertiaire avec notamment les installations anciennes de chauffage au bois mais aussi l’industrie et pour une part l’agriculture (labours et cultures des terres, élevages, engins agricoles). Une évolution globale à la baisse rend compte des normes de plus en plus exigeantes pour les émissions industrielles (filtres à manches, électrofiltres...) et l’échappement des véhicules (meilleure combustion, filtres à particules...). Les 3 dernières années marquent toutefois un palier.

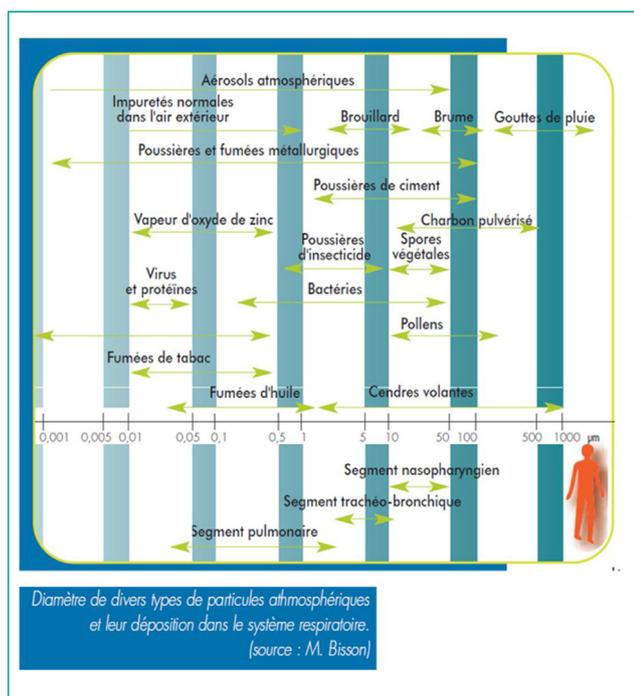


Figure 2. Taille des particules et pénétration dans les voies respiratoires.

Composés organiques volatils

Les émissions anthropiques de composés organiques volatils (COV) non méthaniques (COVNM) sont à base d'hydrocarbures C_xH_y légers parfois associés à du chlore ou autres substances. Ils résultent soit de la combustion, soit de l'évaporation par de multiples sources qui touchent tous les secteurs d'activités. Ils entrent ainsi dans la composition des carburants, mais aussi dans de nombreux produits courants contenant des solvants (peintures, colles...). Les activités émettrices de tels COV sont notamment : la combustion de biomasse par des sources fixes, la combustion et l'évaporation de carburants par le transport routier, le recouvrement des routes par l'asphalte, etc. En complément, les émissions d'origine naturelle de COV proviennent des plantes et notamment des forêts de feuillus et de conifères (ces émissions sont comptabilisées « hors bilan » des inventaires classiques). Les émissions françaises de COVNM sont pour près de 50 % attribuables au secteur résidentiel-tertiaire, en particulier du fait de la combustion du bois-énergie dans les petits équipements domestiques. Les émissions de COVNM ont été globalement divisées par trois depuis 2000.

Métaux lourds

Les métaux lourds restent une préoccupation de surveillance de qualité de l'air.

- historiquement, le plomb (Pb), interdit dans l'essence en janvier 2000, reste présent dans la combustion de combustibles fossiles comme le charbon, les fiouls, les carburants spéciaux pour l'aviation et dans l'incinération de déchets dans les usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM). À noter que le plomb est toujours

présent en faible quantité dans les plaquettes de frein, les pneus et les batteries de véhicules ;

- les émissions anthropiques d'arsenic (As) sont issues notamment de combustibles fossiles tels les fiouls lourds ou le charbon. Certains procédés industriels sont à l'origine d'émissions d'arsenic notamment dans la production de verre et de métaux pour ne citer que les principaux ;
- les émissions de cadmium (Cd) sont induites principalement par le processus de traitement des déchets, le secteur de la métallurgie des métaux et dans une moindre mesure lors de la combustion de charbons, du fioul lourd et de la biomasse ;
- les émissions de nickel (Ni) proviennent principalement de la combustion de fioul lourd. Quelques procédés industriels peuvent également émettre des quantités non négligeables de ce composé (procédés de traitements de surface par exemple) ;
- les émissions anthropiques de mercure (Hg) sont issues de sources multiples : combustion du charbon, brûlage des déchets verts, incinération de déchets, fabrication d'agrégats (fours à ciment notamment). Le mercure est aussi utilisé comme catalyseur dans certains procédés industriels pour produire du chlore et de la soude caustique.

Au cours des 10 à 25 dernières années, ces métaux lourds ont fait l'objet de très fortes réductions (plus de 40 %). D'autres métaux lourds présentent des réductions moins fortes comme le sélénium (Se) ou avec des émissions restées relativement stables comme pour le cuivre (Cu) mais avec des expositions moindres mais qui, pour la plupart, se tassent ces dernières années.

Polluants organiques persistants

Les polluants organiques persistants inventoriés sont principalement les dioxines et furannes (PCDD-F) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) à plusieurs noyaux benzéniques (dont le Benzo(a)pyrène – BaP). Comme beaucoup de HAP, le BaP est émis lorsque la combustion se fait dans de mauvaises conditions, en particulier pour le bois et les combustibles fossiles utilisés par le secteur résidentiel.

Les polluants secondaires

Les particules secondaires sont issues de mécanismes d'oxydation, nucléation, condensation, coagulation transformant dans l'atmosphère des composés gazeux en particules liquides ou solides (Fig. 4). Les aérosols secondaires organiques (contenant du carbone) se forment par exemple à partir de précurseurs émanant de la végétation. Les aérosols inorganiques comme le nitrate d'ammonium contribuent à l'occurrence de pics de particules printaniers. Le nitrate d'ammonium se forme à grande échelle en faisant réagir deux précurseurs : les oxydes d'azote principalement issus du trafic routier (urbain et interurbain) et l'ammoniac (NH_3) émanant notamment des épandages agricoles d'engrais entre autres organiques (lisiers fumiers) se volatilisant plus facilement par températures douces.

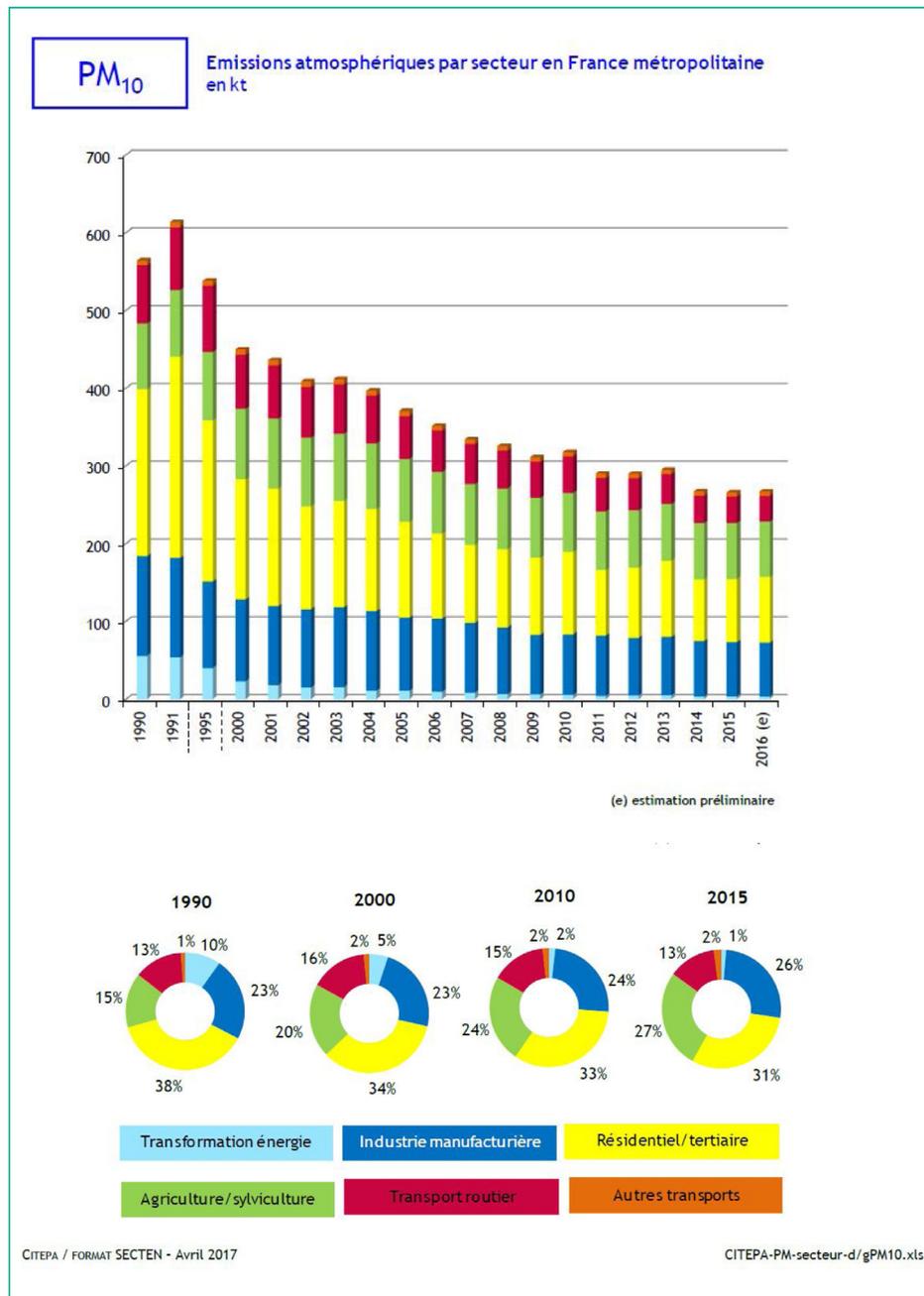


Figure 3. Évolution et répartition sectorielle des émissions françaises de PM10.

L’ozone

L’ozone (O₃) est le polluant emblématique de la famille des photo-oxydants qui résultent de réactions dites photochimiques entre des polluants primaires précurseurs que sont principalement les oxydes d’azote et des COV.

Ces réactions mettent en jeu des mécanismes de photolyse de molécules par rayonnement solaire comme le NO₂ photolysé par le rayonnement solaire en libérant un atome d’oxygène O (Fig. 5) se recombinaut avec le dioxygène de l’air O₂ pour former O₃.

Certains mécanismes à grande échelle géographique ont progressivement chargé la basse atmosphère (troposphère)

d’un fond permanent d’ozone avec toutefois des concentrations bien moins élevées que la couche d’ozone de la haute atmosphère (stratosphère). Les pics d’ozone se produisent alors à l’échelle régionale sous anticyclone estival par fort ensoleillement et forte chaleur en présence des deux familles évoquées de précurseurs (cf. partie suivante).

Des informations plus complètes peuvent être retrouvées au sein de l’Inventaire 2017 des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France [1] et dans le bilan de la qualité de l’air en France en 2014 [2].

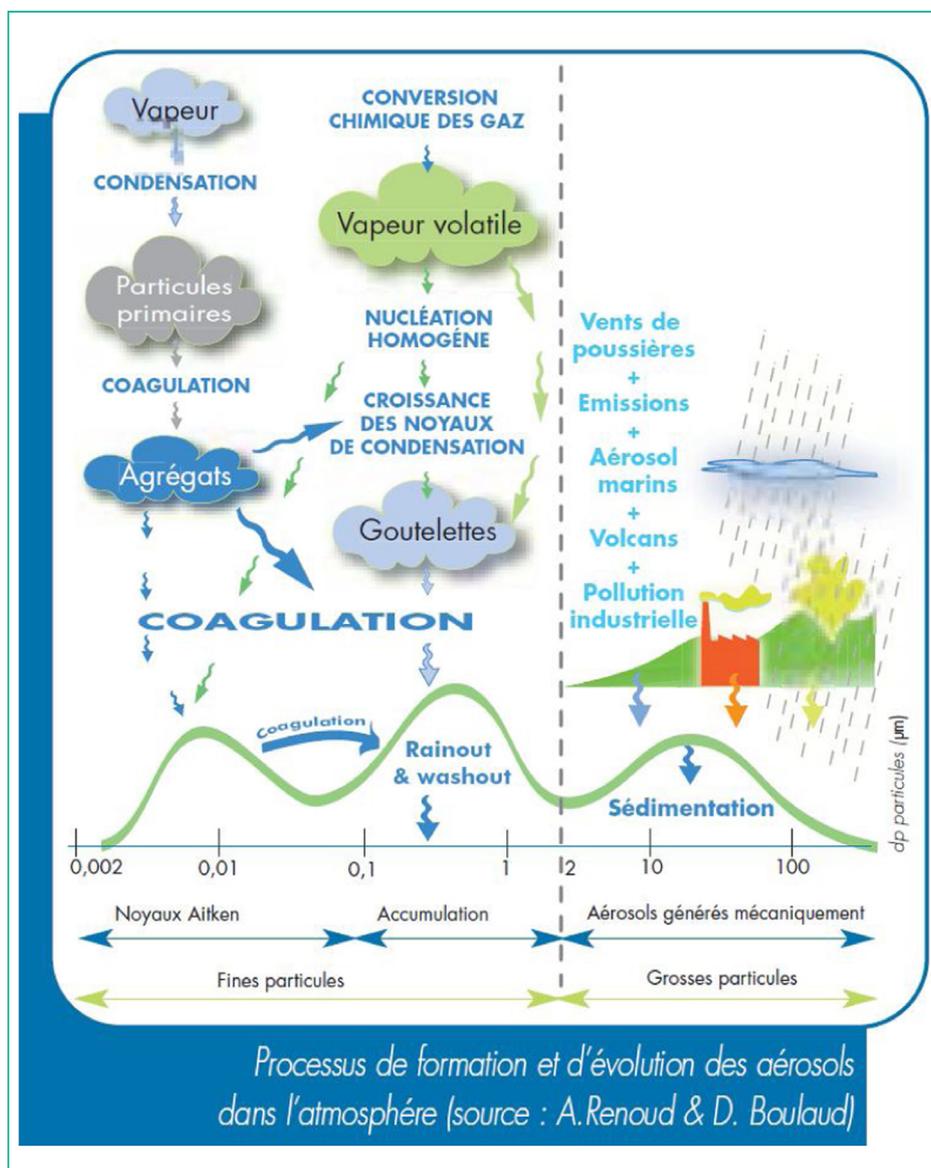


Figure 4. Les particules secondaires sont issues de mécanismes d'oxydation, nucléation, condensation, coagulation transformant dans l'atmosphère des composés gazeux en particules liquides ou solides.

Évolution des concentrations en polluants atmosphériques

Les outils de surveillance de la qualité de l'air que constituent les réseaux de mesure et la modélisation bénéficient aujourd'hui d'une maturité suffisante pour être mobilisés au service de l'évaluation des politiques de réduction d'émission de polluants. En France, en fonction des polluants, certaines mesures sont disponibles depuis le début des années 1990.

Le Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA) est en charge de la collecte des données d'observations produites en région par les Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA), de leur intégration dans la base de données nationale de qualité de l'air, GEOD'AIR, et de l'exploitation de celle-ci,

en appui au ministère en charge de l'Environnement, pour l'élaboration de bilans nationaux et le rapportage réglementaire en application des Directives européennes sur la qualité de l'air. Dans ce contexte, le LCSQA a produit en 2017 une évaluation détaillée des tendances à long terme de qualité de l'air [3].

En fusionnant les observations in situ des AASQA et des modélisations de la qualité de l'air par krigeage géostatistique, il est possible d'estimer des concentrations de polluants représentatives de l'ensemble du territoire métropolitain et d'en étudier l'évolution au cours des années.

Ainsi, sur la période 2000–2010, les concentrations de dioxyde d'azote (NO_2) dans l'air ambiant ont baissé d'environ 17 %, et celles de particules PM_{10} (diamètre inférieur à $10 \mu\text{m}$) de 15 %. Sur la même période, les pics estivaux d'ozone (O_3 , représentés par la 4^e valeur la plus élevée dans l'année des maxima journaliers) ont été réduits de 3,8 %

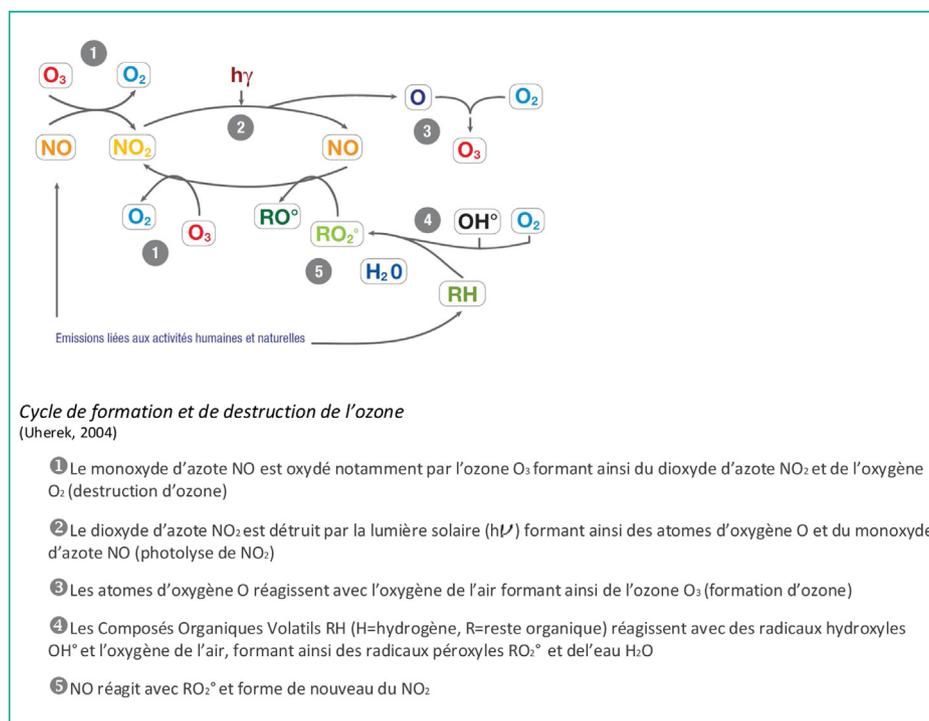


Figure 5. Ces réactions mettent en jeu des mécanismes de photolyse de molécules par rayonnement solaire comme le NO₂ photolysé par le rayonnement solaire en NO en libérant un atome d'oxygène O se recombinant avec le dioxygène de l'air O₂ pour former O₃.

alors que les concentrations de fond (la moyenne annuelle d'ozone) augmentaient de 5,5 % (Fig. 6). Les tendances à la baisse des niveaux de particules et des pics d'ozone se confirment, voire s'accroissent pour les années les plus récentes.

Les concentrations de métaux lourds ont aussi baissé substantiellement, mais les tendances sont moins claires pour les HAP, dont le benzo[a]pyrène. En revanche, les concentrations de composés soufrés ont baissé très largement, et cette baisse a été accompagnée d'un rétablissement du pH des précipitations, mettant fin aux records d'acidité des années 1990. Il convient toutefois de noter que certaines de ces tendances restent influencées par la variabilité des conditions météorologiques d'une année à l'autre, ce qui peut conduire à nuancer certaines conclusions. De plus, des inquiétudes demeurent encore pour les tendances de composés azotés dans les particules fines (nitrates) qui stagnent depuis les années 2000.

Le déploiement de modèles de qualité de l'air sur une longue période temporelle a permis d'effectuer des études de sensibilité qui démontrent que cette amélioration progressive est bien une conséquence des stratégies et plans d'action dédiés à la réduction des émissions issues des différents secteurs d'activité mis en œuvre depuis plusieurs années. Malgré cette évolution favorable, et même s'ils sont moins nombreux que par le passé, des dépassements de seuils réglementaires pour la protection de la santé sont encore constatés aujourd'hui pour le NO₂, les PM₁₀ et l'ozone, et localement pour le benzo[a]pyrène et certains métaux lourds, appelant à poursuivre ces efforts [2].

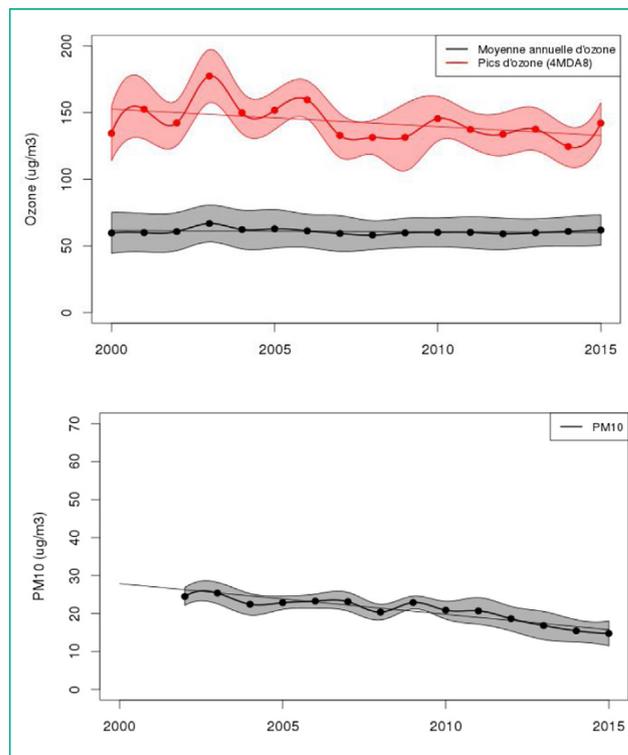


Figure 6. Évolution temporelle moyenne sur la France métropolitaine de l'ozone (en haut : pics estivaux en rouge et moyenne annuelle en noir, µg/m³) et de particules PM₁₀ (en bas, moyenne annuelle, µg/m³), source : [3].

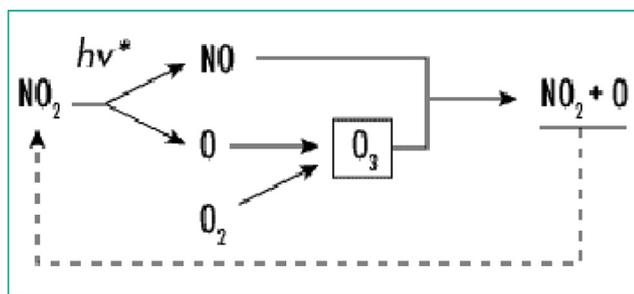


Figure 7. Mécanisme de formation de l'ozone.

Rôle du réchauffement climatique dans l'évolution des polluants atmosphériques

Le rôle du réchauffement climatique dans l'évolution des polluants atmosphériques extérieurs affectant la santé cardiorespiratoire associés concerne essentiellement l'ozone et les particules. Ces 2 polluants sont en effet responsables de la majeure partie des dépassements des valeurs recommandées pour la qualité de l'air, notamment aux États-Unis [4].

Les variations météorologiques régionales affectent la qualité régionale de l'air, notamment urbaine [5] et doivent être gérées à l'échelon de la région affectée [6].

Des études ont montré que le changement climatique a déjà affecté la qualité de l'air. Fang a ainsi montré que de l'ère pré-industrielle (1860) à l'année 2000, la concentration de particules fines (PM 2,5) a augmenté de 5 % et celle de l'ozone de 2 % [7].

Les prévisions concernant l'augmentation de température d'ici la fin du siècle varient suivant les projections d'émission [8] de facteurs responsables de l'effet de serre, comme le dioxyde de carbone et le méthane : de 2 à 3,6 °C en cas de baisse des émissions actuelles ou jusqu'à 4 à 6 °C en cas de poursuite ou d'augmentation des émissions actuelles [9].

L'ozone troposphérique est un polluant atmosphérique secondaire issu de l'action des radiations solaires de longueur d'onde inférieure à 290 nm sur diverses substances chimiques, dites polluants primaires au cours de réactions complexes (Fig. 7).

Ces précurseurs sont principalement des oxydes d'azote (NO et NO_2) et des substances carbonées (monoxyde de carbone CO et COV, comprenant notamment le méthane). Le méthane, avec une durée de vie d'environ 10 ans, contribue à l'augmentation progressive du niveau de fond de l'ozone. Ces polluants primaires proviennent de sources variées, comprenant la combustion des énergies fossiles, notamment les moteurs d'automobile, les usines, les raffineries, ainsi que des sources naturelles, comme la végétation, et des processus biologiques du sol. Les pics de concentration d'ozone ambiants sont observés pendant les mois d'été, quand les conditions météorologiques régionales favorisent la production photochimique, comme les valeurs élevées de la température, les hautes pressions persistantes, la stagnation de l'air et le ciel clair. Au-dessus de 32 °C, une

association forte a été mise en évidence entre la température et des valeurs d'ozone ambiant > 75 ppb [10].

Sans diminution des gaz à effet de serre à leur niveau actuel, l'EPA [11] projette aux États-Unis en 2100 une diminution annuelle moyenne légère de la concentration d'ozone ambiant de 1,3 ppb (Intervalle de confiance $\pm 0,5$), mais avec une augmentation dans les zones polluées et à population dense, comme le Nord-Est, le Midwest et le Sud des États-Unis. En revanche, l'EPA projette une augmentation de la concentration moyenne d'ozone maximale ambiante sur 8 heures, en particulier pendant les mois d'été, de juin à août, de 4,7 ppb (Intervalle de confiance $\pm 0,5$ ppb) et en augmentant la durée de la « saison ozone ». Enfin, des vagues de chaleur de plusieurs jours (appelées épisodes) récentes ont été associées à des niveaux d'ozone, qui dépassent les valeurs limites de la qualité de l'air [12]. C'est pendant la période estivale et en particulier pendant les pics d'ozone que le retentissement sur la morbidité et la mortalité respiratoire est le plus à craindre. Les fronts froids propres terminent ces épisodes en refoulant l'air chaud de la surface du sol.

Les particules fines ($\text{PM} < 2,5 \mu\text{m}$) proviennent du diesel, des moteurs automobiles, des usines à charbon, et de l'industrie, des feux de forêts, des tempêtes de sable. De nombreux pays ont un taux de particules fines supérieur à la valeur guide de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ recommandée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

Le changement climatique peut aussi entraîner une augmentation de la concentration des $\text{PM}_{2,5}$ atmosphériques, bien que l'effet de l'augmentation de la température soit complexe, du fait des différents types des constituants chimiques des particules. Le taux des particules fines est diminué par les précipitations, car la plupart de ses constituants sont solubles, et par le vent, avec des taux plus élevés en cas de stagnation de l'air [13]. Sans diminution des gaz à effets de serre, l'EPA projette aux États-Unis une augmentation moyenne annuelle de la concentration des $\text{PM}_{2,5}$ atmosphériques des $\text{PM}_{2,5}$ de $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Intervalle de confiance $\pm 0,1$) en 2050 et de $0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\pm 0,1$) en 2100. L'augmentation pendant les mois d'été (juin–août) pourrait atteindre $3,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans la région Est des États-Unis.

Les concentrations de particules fines sont affectées par les feux de forêt [14] notamment. Les modèles climatiques montrent qu'avec une augmentation de la température de 1 °C, les risques de feux de forêt ont augmenté de 2 à 6 fois entre 1950 et 2003, dans la plupart des états américains à l'Ouest du Mississippi. Bien que les feux de forêt soient le plus souvent localisés, la fumée dégagée peut s'étendre sur de grandes distances. Il a été estimé que 339 000 décès prématurés/an en moyenne dans le monde sont attribuables à la pollution dégagée par les feux de forêt, notamment du fait des particules [15]. Par ailleurs, le changement climatique pourrait augmenter la fréquence des tempêtes de sable et des particules qui y sont associées [16].

Pendant les vagues de chaleur, la consommation d'électricité augmente pour assurer la climatisation. Quand l'électricité est fournie par les centrales à charbon, les émissions de particules tendent à augmenter.

Pollution et maladie respiratoires : mécanismes physiopathologiques

Depuis le « smog » tueur en 1952 à Londres qui a fait 4000 victimes, la pollution extérieure d'abord, puis par la suite la pollution intérieure a été reconnue comme responsables de maladies respiratoires telles que l'asthme, la bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) et le cancer du poumon.

Pour la pollution extérieure, les mécanismes responsables sont multiples, on en distingue cependant quatre principaux : la réponse au stress oxydant, le remodelage des voies aériennes, les mécanismes inflammatoires, les réponses immunologiques particulières et l'augmentation des sensibilisations vis-à-vis des allergènes. La pollution extérieure va agir sur les gènes qui régulent ces quatre mécanismes favorisant l'apparition de l'asthme ou l'exacerbation d'un asthme préexistant.

Le stress oxydatif correspond à un déséquilibre entre oxydants et antioxydants se traduisant par la production de radicaux libres responsables d'altérations de la structure et des fonctions cellulaires : diminution de l'activité enzymatique, lésions cellulaires, mutation au niveau de l'ADN et modification des récepteurs, oxydation des lipoprotéines circulantes. Il peut être aggravé par certaines carences nutritionnelles ou lors de l'exercice physique, par le tabagisme, l'exposition aux radiations ionisantes et aux ultraviolets. Le stress oxydatif peut également être la cause initiale de la pathologie (cancer, BPCO, asthme) ou provoquer l'aggravation d'une maladie déjà existante. La pollution en modifiant les gènes capables de produire des antioxydants en réponse aux agents oxydants contenus dans la pollution atmosphérique va provoquer des lésions inflammatoires de l'épithélium bronchique qui vont favoriser l'apparition de l'asthme ou son aggravation [17].

À côté du stress oxydatif, des phénomènes dits épigénétiques peuvent modifier l'expression des gènes qui régulent les réponses immunologiques de l'inflammation allergénique. Par exemple, au contact de la pollution atmosphérique, les gènes responsables de la fonction régulatrice des lymphocytes T-régulateurs seront inhibés, favorisant ainsi une augmentation de la réponse allergénique. De plus, l'inhalation d'allergènes tels que les pollens associés à des particules diesel ou des gaz comme l'ozone, le NO₂ ou le SO₂ pourraient favoriser la pénétration des allergènes au travers des parois bronchiques. La résultante de l'inflammation due au stress oxydant et aux mécanismes immunologiques est le remodelage bronchique qui se traduit par la fibrose sous-épithéliale qui provoque une obstruction bronchique non réversible.

L'environnement intérieur est également source de polluants tels que les allergènes, les endotoxines et les substances chimiques et particulaires. Les allergènes, outre leur action directe grâce au système immunitaire adaptatif sur des cellules telles que les mastocytes via les IgE qui y sont fixées, peuvent activer directement le système immunitaire inné grâce à certains *Toll-like receptors* (TLR4) et favoriser une réponse inflammatoire de type allergique, non-IgE-médiée. Ceci est particulièrement vrai pour les acariens qui sont les allergènes les plus souvent responsables d'asthme allergique. Les endotoxines, quant à elles,

sont par définition les stimulants du système immunitaire inné.

À côté de l'asthme et des maladies allergiques respiratoires, les polluants particulaires et gazeux de l'habitat peuvent favoriser la BPCO chez la femme et des bronchites chez l'enfant lors de la combustion de biomasse dans les pays en voie de développement [18]. Les mécanismes moléculaires impliqués dans la genèse et la progression de la BPCO associés à la pollution intérieure, restent encore inconnus. Des études chez l'animal et l'homme suggèrent un rôle du stress oxydant dans ces processus. Chez le rat, il a été montré que la combustion de la biomasse pouvait être responsable d'emphysème et de bronchite chronique, de manière similaire à celle causée par la fumée de cigarette. Ainsi, une hausse des biomarqueurs de l'inflammation et du stress oxydant secondaire à l'inhalation de fumée issue de la combustion de la biomasse serait responsable de la production de fibronectine par les fibroblastes et de la fibrose qui caractérise les BPCO non liées à la fumée de cigarette [19].

Le tabagisme est le polluant chimique de l'environnement intérieur. Les mécanismes cellulaires et moléculaires conduisant au développement de la BPCO et de l'emphysème post-tabagiques sont mieux connus. Les voies de l'inflammation y sont particulièrement impliquées. De même, la dérégulation de la balance protéases/inhibiteurs de protéases y est également impliquée, tout comme les voies d'activation de l'apoptose. Le stress oxydant est un autre facteur majeur. Ainsi des souris surexprimant la superoxyde dismutase (SOD) sont protégées du développement d'un emphysème après exposition au tabac. D'un autre côté la fumée de tabac induirait la surexpression du gène qui favorise le stress oxydant.

Au total, deux principaux mécanismes semblent agir pour l'asthme et la BPCO induits par la pollution avec cependant des nuances entre les deux maladies. Pour l'asthme, après avoir surtout décrit pendant des années la responsabilité des mécanismes immunologiques, il est admis depuis quelques années le rôle déterminant du stress oxydant dans sa genèse. En revanche, l'évolution est plutôt inverse dans la BPCO, le stress oxydant a été mis en avant et plus récemment les désordres immunitaires sont désormais admis.

Effets à court terme des polluants atmosphériques sur la santé

Généralités

Dans le domaine des effets sanitaires des polluants atmosphériques, il est classique de séparer les effets à court et long termes, bien que cette distinction soit un peu artificielle dans la mesure où la répétition des effets à court terme peut conduire à des effets à long terme.

Il faut signaler en exergue que les connaissances scientifiques dans ce domaine ont été bouleversées depuis une trentaine d'années par le développement de nouvelles méthodologies statistiques. Ces méthodes, appelées études des séries temporelles ou des séries chronologiques, consistent en mettre en relation deux séries de données engrangées dans des banques de données : historique

des taux de pollution mesurés quotidiennement au cours des mois ou des années passées, historique d'indicateurs sanitaires mesurés dans une zone géographique donnée, tels que hospitalisation, passages au service d'accueil des urgences, consultation médicale, appel à SOS Médecins, consommation de médicaments, tous événements consignés quotidiennement sur des registres informatiques au cours des jours, mois ou années précédentes. L'analyse statistique consiste à rechercher s'il existe une association entre l'exposition aux polluants atmosphériques et les indicateurs sanitaires. L'avantage de telles études est qu'elles concernent des groupes de population très importants « suivis » pendant des périodes de temps parfois très prolongées. La puissance statistique de ces études est donc considérable. Elles permettent de mettre en évidence des risques statistiquement significatifs mais d'amplitude extrêmement faibles. Par exemple, un risque relatif de 1,02 signifie que les personnes exposées ont un risque de voir survenir, en réponse à l'augmentation de l'exposition aux polluants d'une valeur donnée, l'évènement sanitaire à l'étude avec une fréquence augmentée de 2 %. C'est ainsi que la littérature a mis en évidence, ces dernières années, des effets sanitaires qui n'avaient jusqu'alors jamais été décrits. Il ne s'agit à l'évidence pas de « nouveaux » effets mais d'effets qui ne pouvaient pas être jusqu'alors être démontrés par les méthodes d'étude jusqu'alors à notre disposition. Il n'en reste pas moins que le public à qui on présente régulièrement de « nouveaux » effets a le sentiment que la situation de la pollution atmosphérique s'aggrave constamment, alors que la situation réelle est différente.

Il faut souligner par ailleurs que les fluctuations à court terme des taux de pollution atmosphérique ont soulevé davantage d'intérêt de la part des pouvoirs publics que les taux moyens. Cet état de fait provient probablement notamment du fait qu'au départ, au début des années 70, les premiers réseaux de surveillance de la qualité de l'air, installés dans des régions très industrialisées, avaient pour vocation de surveiller, voire de prévenir l'installation d'épisodes de forte pollution.

Un dernier point à rappeler : il ne peut y avoir de pointe de pollution si les conditions météorologiques ne s'y prêtent pas, à savoir vent faible et inversion de température qui favorisent la stagnation des polluants à leur lieu de production. En conséquence, on peut prévoir les pointes de pollution, au même titre que les inversions de température. Cela est à la base des procédures STERNES (pour « Système temporaire d'encadrement réglementaire et normatif des émissions soufrées ») par lesquelles le préfet peut demander aux industriels de limiter leurs rejets de polluants dans l'atmosphère lorsqu'un épisode d'inversion de température est anticipé.

Conséquences sanitaires

Par ordre de gravité croissant, ces effets à court terme concernent des symptômes respiratoires, une baisse de la fonction respiratoire ou des épisodes infectieux survenant chez le sujet sain, une exacerbation d'une pathologie préexistante, respiratoire et/ou cardiaque conduisant éventuellement au décès.

Conséquences des fluctuations/pics de pollution en population générale

On trouve, dans la plupart des études, sans effet de seuil, une corrélation entre les fluctuations des polluants gazeux et particulaires et les symptômes de toux, notamment toux nocturne, les sibilances thoraciques et la survenue de bronchites. L'association est plus marquée chez le nourrisson. Le terrain atopique augmenterait la sensibilité aux polluants [20]. Les conséquences à court terme d'un pic de pollution sur la fonction respiratoire de groupes d'enfants n'ont été que peu étudiées. L'impact semble marginal et en relation à la fois avec les poussières fines et les oxydes d'azote [21]. Des publications récentes font par ailleurs état, chez les adolescents, d'une diminution de l'attention soutenue et d'une hyperactivité en relation avec une augmentation des taux de polluants diesel [22]. Dans le domaine de la pathologie infectieuse, on met en évidence une augmentation du taux d'incidence des rhinosinusites, bronchites, bronchiolites à VRS et pneumonies chez les enfants jusqu'à l'âge de 4 ans, en relation avec l'augmentation des taux d'ozone et de particules de diamètre inférieur à 10 μm et à 2,5 μm . L'exercice physique augmente les valeurs spirométriques, même lorsqu'il est réalisé en atmosphère fortement polluée [23].

Exacerbation chez les patients atteints de pathologie respiratoire ou cardiaque

Pathologies cardiovasculaires

La survenue de syndromes coronariens, sous la forme de douleurs thoraciques mais aussi d'infarctus du myocarde et d'insuffisance cardiaque congestive est liée au taux d'oxydes d'azote et surtout de particules fines. Au plan vasculaire, le risque d'accident vasculaire cérébral est accru en période de forte pollution avec une augmentation des admissions hospitalières pour ce motif.

Une récente méta-analyse conclue que l'augmentation du risque est d'environ 1 % pour une élévation de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ du taux de PM_{10} ou de $\text{PM}_{2,5}$ [24]. L'association avec le risque de phlébite et d'embolie pulmonaire, plus récemment suggéré, est encore controversée.

Asthme

La littérature inclue de très nombreuses études, la plupart ayant été réalisées chez l'enfant asthmatique. Toutes ces études mettent en évidence une association statistique entre l'augmentation du taux journalier de polluants et le risque d'exacerbation, le plus souvent évalué par le passage de l'enfant au service d'accueil des urgences, mais aussi par des consultations non programmées chez le médecin traitant. Parmi les polluants, tous sont associés au risque mais les plus souvent considérés sont les particules en suspension. L'augmentation du risque est souvent décalée de 24 heures par rapport au moment où le taux de polluant commence à s'élever. Pour donner un ordre de grandeur, le risque d'exacerbation augmente de 2 % à 6 % quand le taux de polluants s'élève de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'air.

Une étude conduite à l'hôpital Bichat (Paris) en 1998 [25] avait montré que les enfants souffrant d'asthme persistant modéré qui ne suivaient pas leur traitement antiasthmatique de fond étaient plus sensibles aux fluctuations des taux de polluants que les enfants observants, comme si, chez ces

derniers, le traitement de fond « gommait » les effets nocifs de l'exposition aux polluants. Des auteurs britanniques [26] ont évalué la fonction respiratoire d'asthmatiques lors d'une marche de 2 heures à Londres, en zone polluée par des émanations diesel ou en zone verte et observé une diminution des valeurs spirométriques de l'ordre de 6 %, chute plus marquée chez les patients ayant un asthme « modéré » par rapport à ceux atteints d'asthme « léger ».

BPCO

Les fluctuations des taux de polluants atmosphériques sont reconnues comme influençant les symptômes de la BPCO, le taux de passage aux urgences et les hospitalisations pour exacerbations. Une méta-analyse récente [27] estime que ce facteur de risque intervient dans seulement 2 % à 5 % des hospitalisations pour exacerbation de BPCO [28]. L'excès de risque concerne à la fois les polluants gazeux (SO₂, NO₂, O₃) et particulaires (PM₁₀, PM_{2,5}). Il est plus marqué dans les 48 à 72 heures suivant le début de l'épisode qu'au tout début de ce dernier. Dans ces études, il faut prendre compte des variations de température. Récemment, une étude randomisée et croisée a permis de mettre en évidence le fait que l'augmentation du VEMS observée à l'effort, dans une zone peu polluée, chez le patient BPCO ne se manifeste plus dès lors que cet effort s'effectue en zone polluée [29].

Fibrose pulmonaire idiopathique

Une étude récente [30] montre que la survenue d'une exacerbation de fibrose pulmonaire idiopathique est précédée, 6 semaines avant, par une élévation du taux d'ozone.

Mortalité globale, cardiovasculaire et respiratoire

L'augmentation de mortalité est de l'ordre de 1 % pour une élévation de 10 µg/m³ du taux de PM_{2,5} dans une méta-analyse mondiale [31], avec des variations régionales plus importantes pour la mortalité respiratoire que pour la mortalité cardiovasculaire. Les groupes de population les plus à risque sont les personnes âgées de plus de 65 ans, ceux qui

ont une maladie chronique cardiovasculaire ou respiratoire préexistante, les femmes et les sujets inactifs professionnellement.

En France, l'étude PSAS-9 (Programme de surveillance air et santé, au départ dans 9 grandes villes françaises), sous l'égide de l'Institut de veille sanitaire (aujourd'hui, « Santé Publique France », a eu pour objectif de surveiller l'impact à court terme des fluctuations des polluants atmosphériques sur la mortalité et les hospitalisations. L'augmentation de la mortalité, qui survient avec un délai de 24 à 48 heures par rapport au pic de pollution, engendre une augmentation de 1 % à 3 % de la mortalité. Cette augmentation est plus marquée chez les personnes âgées de plus de 65 ans et plus importante par cardiopathie ischémique que par maladie respiratoire. Cette mortalité prématurée en relation avec la pollution atmosphérique a été récemment à 48 000 personnes par un rapport de Santé publique France publié en juin 2016 [32]. Toutefois, il faut rappeler que ce chiffre fait référence à une situation complètement théorique où toute activité industrielle, agricole, de chauffage et de transport mettant en jeu une combustion serait interrompue. Un chiffre plus réaliste est celui de 17 700 décès évités si les taux de polluants respectaient les recommandations émises par l'OMS (Tableau 1).

Effets à long terme

Quels types d'effets à long terme et dans quelles conditions ?

L'ensemble des effets respiratoires à long terme dû à l'exposition à la pollution de l'air peut être schématisé par une pyramide tenant compte à la fois de la gravité de ceux-ci ainsi que du pourcentage de la population qui en est atteint (Fig. 8) [33]. Au total, l'exposition à long terme aux polluants atmosphériques chimiques et biologiques

Tableau 1 Gains attendus des différents scénarios de réduction des niveaux de PM_{2,5}.

Scénario	Nombre de décès évitables en France continentale	Pourcentage de décès évitables ^a (2007–2008)	Gain moyen en espérance de vie à 30 ans (mois) ^b (min ; max)	Nombre de décès évitables dans les unités urbaines de plus de 100 000 hab.	Pourcentage de décès évitables dans les unités urbaines de plus de 100 000 hab. ^c
Sans pollution anthropique	48 300	9	9 (0 ; 55)	25 900	13
Communes équivalentes les moins polluées	34 500	7	9 (0 ; 36)	14 900	7
OMS	17 700	3	4 (0 ; 33)	12 900	6
Grenelle de l'environnement	3000	0,6	3 (0 ; 13)	2900	1,4
Réglementation européenne	10	0,002	1,5 (0 ; 04)	2	0,005

^a Par rapport à l'ensemble des décès observés.

^b Moyenne sur l'ensemble des communes de la classe d'urbanisation.

^c Par rapport à l'ensemble des décès observés dans la classe d'urbanisation correspondante.

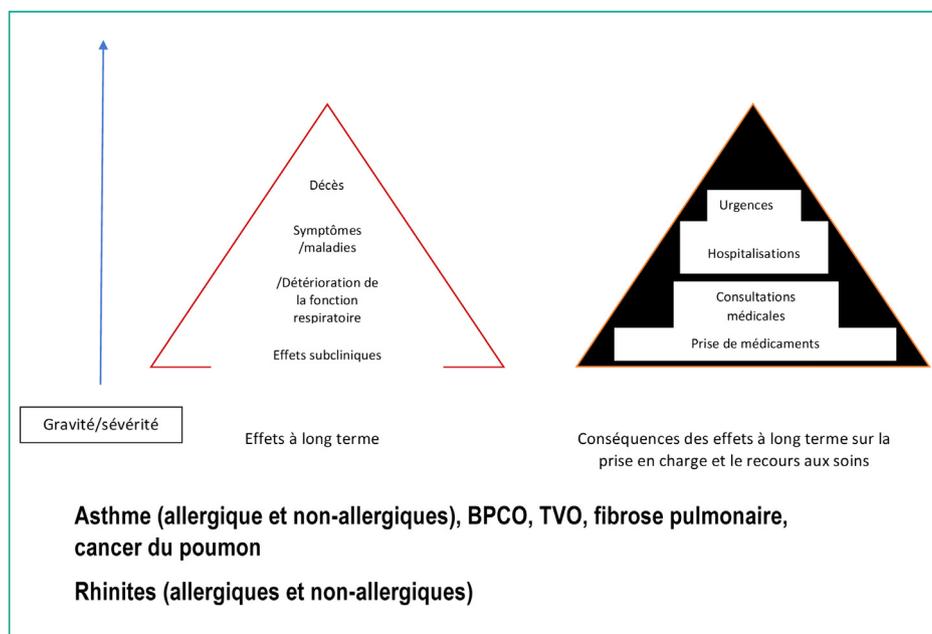


Figure 8. Pyramide des effets respiratoires à long terme de la pollution atmosphérique en fonction de la gravité et leurs conséquences en termes de prise en charge et recours aux soins.

(biocontaminants tels que pollens, moisissures, virus...) est à l'origine d'effets non négligeables au niveau de la population, même à des niveaux qui ne sont pas considérés comme préoccupants d'après les valeurs guides. Alors que dans le cas des effets à court terme, l'effet sanitaire se produit dans les jours suivant l'exposition, dans le cas des effets à long terme, qui font suite à une exposition chronique, l'effet sanitaire se produit au bout de plusieurs années, et se manifeste par l'apparition de maladies chroniques à latence longue.

Dans le cas de la pollution de type chimique à gaz et particules atmosphériques, les effets à long terme sont observés pour des indicateurs de santé respiratoire incluant à la fois la mortalité et la morbidité (prise de médicaments, visites, hospitalisations) et induisent plusieurs pathologies hétérogènes telles que l'asthme, la bronchite chronique, la BPCO, la fibrose pulmonaire idiopathique, le cancer du poumon (Tableau 2). Cependant, la séparation entre les effets à court terme et ceux à long terme n'est pas nette et l'hypothèse a été soulevée que les effets aigus pourraient s'additionner et donner lieu à des effets chroniques.

Le fait que les effets à long terme soient observés alors que les normes en vigueur sur la qualité de l'air sont en général respectées indique que, chez certains individus, même des faibles doses peuvent être toxiques et qu'il est nécessaire de baisser les valeurs de référence afin de protéger le plus grand nombre d'individus. Il faut ajouter qu'il ne semble pas exister de seuils protecteurs en deçà desquels il n'est plus observé d'effet sanitaire. Au total, les données de la littérature montrent que l'essentiel de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique est de type chronique et est dû aux jours de pollution « habituelle ».

L'impact sur la santé respiratoire a été documenté à la fois pour la pollution de l'extérieur et de l'intérieur des locaux. Les principaux polluants considérés incluent les particules respirables (d'aérodiamètre de 10 micron (PM_{10}) et

$2,5\mu m$ ($PM_{2,5}$), appelées aussi particules fines), le dioxyde d'azote (NO_2), le *black carbon* (BC), l'ozone (O_3) et certains COV. Cependant, à ce jour, la majorité des études sur les effets respiratoires à long terme de la pollution atmosphérique a considéré les polluants atmosphériques de l'extérieur des locaux. Dans celles-ci, l'exposition aux polluants a été déterminée par le biais de mesures objectives (fond, proximité, proximité aux sources (axes routiers avec une circulation véhiculaire importante, combustion...)) ou modélisée (modèles de dispersion des polluants atmosphériques tels que STREET, ADMS, CHIMERE...) ou par le biais de réponses subjectives (réponses des individus à des questions sur expositions, proximités aux sources...) (Tableau 2). À l'intérieur des locaux, l'exposition à la pollution a été déterminée par questionnaire sur les sources des polluants, par modèles prédictifs [34] et par mesures in situ avec des capteurs passifs.

Sont présentées dans la suite de ce travail les principales données de la littérature scientifique sur les effets respiratoires à long terme de la pollution atmosphérique chimique de l'extérieur et de l'intérieur des locaux. Mention est faite des données françaises lorsque celles-ci existent afin de disposer d'un regard sur la situation propre à la France. Abstraction est faite des données détaillées sur les effets de l'exposition environnementale à la fumée de tabac car largement documentés ailleurs.

Effets des expositions prolongées des polluants atmosphériques de l'extérieur des locaux

Les effets des expositions prolongées sont plus difficiles à étudier que ceux des expositions aiguës [35–38]. Le rôle du tabac est si puissant qu'il induit un bruit de fond élevé au sein duquel il est délicat d'identifier un signal clair lié à l'exposition à la pollution atmosphérique.

Tableau 2 Effets respiratoires à long terme de la pollution atmosphérique de l'extérieur et de l'intérieur des locaux^a.

Type d'effets	Mesure de l'exposition et méthode utilisée/ Polluants atmosphériques	Types d'études utilisées pour les mettre en évidence	Indicateurs d'effets mis en relation avec l'exposition
<i>Pollution de l'extérieur des locaux</i>			
Chroniques/A long terme	Questionnaire sur proximité au trafic (distance de l'habitation, nombre de véhicule...) Distance mesure de l'habitation des axes routiers Écologique (stations de monitoring de la qualité de l'air de fond, de proximité) In situ (monitoring de la qualité de l'air, enquêtes avec mesures ad hoc...) Individuelle (par capteur) /NO _x , CO, SO ₂ , O ₃ , PM, COV	Études longitudinales (éventuellement rétrospectives) Études de cohorte Études cas-témoins (plus rarement)	Baisse, limitation de la fonction respiratoire Augmentation de : (1) Mortalité par : infections respiratoires infantiles, bronchite chronique, BPCO, fibrose pulmonaire idiopathique, cancer du poumon ; (2) Morbidité : prévalence de symptômes respiratoires chroniques (toux, crachat, sifflements, essoufflements, gêne respiratoires...) Prévalence de maladies chroniques (asthme, bronchite chronique, BPCO...) ; incidence de symptômes respiratoires chroniques (toux, crachat, sifflements, essoufflements, gêne respiratoires...) Incidence de maladies chroniques (asthme, bronchite chronique, BPCO, cancer du poumon)/
<i>Pollution de l'intérieur des locaux</i>			
Chroniques/A long terme	Questionnaire sur sources In situ (enquêtes avec mesures ad hoc...) /Tabagisme passif et environnemental, biomasse /NO _x , PM, CO, COV	Études rétrospectives Études cas-témoins (éventuellement nichées) Études de cohorte (plus rarement)	Mortalité par infections respiratoire, BPCO et cancer du poumon (tabagisme passif, biomasse) Prévalence et Incidence de maladies (asthme et BPCO)/symptômes (sifflements, essoufflements, gêne respiratoires) (tous les polluants y compris ceux émergents)

PM_{2.5} : particule fine de diamètre inférieur à 2,5 µm ; PM₁₀ : particule fine de diamètre inférieur à 10 µm, COV : composants organiques volatiles ; TVO : trouble ventilatoire obstructif ; BPCO : bronchopneumopathie chronique obstructive.

^a La pollution de l'air étant ubiquitaire on ne peut donc pas mettre en œuvre les approches épidémiologiques classiques comparant la fréquence des maladies ou des décès chez des groupes exposés et non-exposés ou la fréquence de l'exposition chez des malades et des témoins. Il est nécessaire de quantifier les différents degrés d'exposition aux polluants ce qui est compliqué en raison de leur grande variabilité spatiotemporelle.

Morbidité

Les résultats des premières études nord-américaines, publiées au début des années 1990, ont été confortés depuis par plusieurs travaux européens. Quelques études ont montré que l'exposition prolongée à la pollution urbaine pouvait augmenter la morbidité (symptômes, maladies, recours aux urgences à la suite de celles-ci...) et diminuer de façon durable la fonction respiratoire, notamment lors du suivi des sujets. Le fait de résider à proximité d'axes avec un trafic important a été mis en relation avec l'asthme [voir rapport du *Health Effect Institute* : <http://pubs.healtheffects.org/getfile.php?u=553>] et la BPCO. En France, le fait de résider depuis la naissance dans des zones avec des teneurs élevées de $PM_{2,5}$, NO_2 et COV a été lié à un risque accru d'asthme à l'effort, d'asthme, de rhinite allergique et de sensibilité allergique chez les enfants de 6 villes françaises [39]. De plus, l'exposition chronique à des concentrations élevées des polluants urbains estimées à proximité de l'adresse de résidence a été reliée aux symptômes évocateurs de bronchite chronique parmi les résidents âgés de plus de 65 ans de l'agglomération de Bordeaux (Étude 3C) [40]. L'étude européenne APHEKOM (*Improving Knowledge and Communication for Decision Making on Air Pollution and Health in Europe*) a montré que, dans les villes étudiées, vivre à proximité de routes était responsable de 15 % à 30 % de nouveaux cas d'asthme chez les enfants ainsi que de BPCO (<http://www.aphekom.org>).

Quelques études de cohorte de naissance ont montré de façon prospective un lien entre les polluants issus du trafic véhiculaire et l'asthme et les allergies, la seule démarche qui permette d'établir la responsabilité de la pollution liée au trafic routier dans l'augmentation de la fréquence de ces pathologies. Dans la cohorte PIAMA (*Prevalence and Incidence of Asthma and Mite Allergy*), à l'âge de 4 ans on observait un risque accru de développer plusieurs indicateurs de santé allergique et respiratoire parmi les enfants ayant été exposés à des concentrations élevées des traceurs du trafic à la naissance. De même, les données provenant de l'intégration des études de cohorte GINI (*German Infant Nutritional Intervention*) et LISA (*Influences of Lifestyle-related factors on the Immune System and the Development of Allergies*) ont montré une association significative entre l'exposition aux $PM_{2,5}$ et l'asthme chez les enfants [33,35,37]. Les estimations du risque global tirées d'une méta-analyse récente ont montré des associations statistiquement significatives pour les expositions à BC, NO_2 , $PM_{2,5}$, aux PM_{10} et le risque d'incidence d'asthme. Ces résultats confirment que l'exposition de l'enfant aux polluants du trafic contribue au développement de l'asthme [41].

Mortalité

Les estimations conservatrices minimales réalisées par le consortium du Lancet « Compte à rebours (Lancet Countdown) » ont indiqué que, dans le monde, la pollution de l'air extérieur est responsable chaque année d'environ 4,2 millions de décès par BPCO et cancer du poumon, à savoir par des pathologies chroniques.

Cependant, en raison des effets aigus de la pollution atmosphérique et des interactions existantes entre pathologies aiguës et chroniques, il n'est pas facile de distinguer les

effets chroniques de la pollution sur la mortalité des effets aigus. Dans le suivi à long terme de l'étude française PAARC (« Pollution atmosphérique et affections respiratoires chroniques »), la pollution de l'air en milieu urbain évaluée dans les années 1970 était associée à une augmentation significative de risque de mortalité toutes causes à 25 ans, avec un risque allant de 5 % pour les particules totales à 14 % pour le NO_2 [42]. En 2013, les données de la cohorte française GAZEL suivie durant 25 ans ont confirmé ces estimations [43]. L'exposition à long terme à $PM_{2,5}$, NO_2 , au dioxyde de soufre (SO_2) et au benzène était associée à un risque accru de mortalité non accidentelle parmi les participants à l'étude. Ces résultats renforcent les preuves existantes indiquant que la pollution chimique de l'air extérieur est un facteur de risque environnemental important de mortalité. En raison de la taille limitée de l'échantillon et de la nature de l'étude (professionnelle), d'autres études épidémiologiques sont nécessaires en France avec un échantillon représentatif plus large de la population. Enfin, la méta-analyse de 22 études de cohorte européenne a permis de dire que l'exposition à long terme à la pollution de l'air par les particules fines était associée à la mortalité due aux causes naturelles, même à l'intérieur de plages de concentration bien inférieures à la valeur limite annuelle moyenne européenne actuelle [44]. La même étude a indiqué que le risque existait pour plusieurs éléments qui avaient été identifiés dans les particules (cuivre, fer, potassium, nickel, soufre, silicium, vanadium et zinc) et en particulier pour le soufre [45].

Typiquement, dans les zones urbaines, on observe une augmentation allant jusqu'à 9 % du risque de décéder d'une pathologie cardiopulmonaire pour une augmentation de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de particules fines et jusqu'à 4 % pour un incrément de 10 ppb d'ozone. Cependant, les risques étaient positifs mais pas statistiquement significatifs entre l'exposition à long terme à l'ozone dans l'année et la mortalité globale et par maladies cardiovasculaires et respiratoires dans une méta-analyse récente ayant porté sur des cohortes [46]. Ces risques devenaient statistiquement significatifs lorsqu'on limitait l'analyse à la période chaude.

La mortalité respiratoire la plus documentée concerne la BPCO. Très récemment, l'étendue des pathologies respiratoires liées à la pollution atmosphérique a été élargie. Ainsi, en France un excès de risque de décès était significativement associé à une exposition cumulative élevée aux PM_{10} et aux $PM_{2,5}$ chez des patients souffrant de fibrose pulmonaire idiopathique [30]. Dans cette étude, les niveaux cumulatifs d'exposition aux PM_{10} et $PM_{2,5}$ étaient supérieurs aux recommandations de l'OMS chez 34 % et 100 % des patients, respectivement. Par ailleurs, plusieurs études de cohortes américaines et européennes, dont une française, suggèrent aussi une augmentation significative du risque de cancer du poumon, bien qu'inférieure à celle causée par le tabac, en cas d'exposition à la pollution atmosphérique : un accroissement de la pollution particulaire de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ était associé à un risque relatif significatif de 1,1 à 1,5 [47–50]. Une méta-analyse a estimé entre 15 % et 21 % l'augmentation du risque de décès par cancer du poumon pour chaque augmentation de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ des $PM_{2,5}$ [51]. Dans cette étude, la proximité au trafic véhiculaire était aussi liée à un risque accru de cancer du poumon. Les HAP contenus dans les effluents diesel sont responsables du processus de cancérisation du poumon.

Cela avait été déjà mis en évidence par le Centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC), qui fait partie de l'OMS. Il a classé les gaz d'échappement des moteurs diesel comme étant cancérigènes pour l'homme (groupe 1), sur la base d'indications suffisantes prouvant qu'une telle exposition est associée à un risque accru de cancer du poumon. Les HAP sont contenus dans les particules ultrafines, de taille nanométrique (moins de 0,1 microns ou 100 nanomètres de diamètre, $PM_{0.1}$), que l'on mesure en nombre et non en masse car très légères.

Effets des expositions des polluants atmosphériques de l'intérieur des locaux

La majorité des études a investigué les variations des prévalences de symptômes et maladies en fonction des variations de la pollution atmosphérique intérieure (Tableau 2).

Morbidité

La pollution de l'air à l'intérieur des locaux peut accroître le risque de phénomènes d'irritation, de sensibilisation allergique, de symptômes et maladies respiratoires aigus ou chroniques et d'atteinte fonctionnelle pulmonaire [52]. Plus aucun doute n'existe sur la nocivité du tabagisme passif in utero et environnemental, qui constitue une autre source de particules respirables. Les enfants de mères fumeuses ont un risque accru d'asthme, de symptômes respiratoires, de baisse de la fonction respiratoire, d'otites et de mort subite du nourrisson ; chez l'adulte, le tabagisme environnemental a été mis en relation avec les cancers du poumon et de la sphère ORL, même chez les femmes non-fumeuses dont les époux fument. Les PM_{10} et $PM_{2.5}$ ont été reliées à plusieurs symptômes et maladies respiratoires, mais peu nombreuses sont les études les ayant mesurées directement et de façon longitudinale. Cependant, l'utilisation domestique de bois et de charbon, autre source connue de particules respirables, a été impliquée dans des symptômes et des maladies chroniques tels que les sifflements dans la poitrine accompagnés par une gêne respiratoire, la toux, l'expectoration, la bronchite et les cancers bronchiques même dans les pays industrialisés [53]. D'autres études ont mis en relation la présence de cuisinières et chauffages à gaz, source de NO_2 , avec un excès de symptômes respiratoires dont la dyspnée chronique chez l'adulte. L'exposition aux produits ménagers qui représentent un mélange de COV a été mise en relation avec le développement de l'asthme chez des femmes au foyer [54]. L'effet d'une exposition aux COV à l'école a été retrouvé parmi des écoliers français (Étude des 6 Villes) [55]. Des nouvelles données mettent en relation l'asthme avec une exposition prolongée aux polluants émergents (phtalates, retardateurs de flamme halogénés et surtout bromés, polluants organiques persistants (POP) retrouvés dans l'air, tels que les biphényles polychlorés (BPC), DDT, dioxines et furanes [42]. Dans l'étude de cohorte de naissance EDEN, l'exposition aux phtalates de la mère pendant la grossesse était responsable du développement de plusieurs problèmes respiratoires, dont l'asthme dans l'enfance (risque accru de 23 %) [56]. L'interprétation de ces études doit toujours tenir compte du fait que les individus sont exposés à un mélange de polluants.

Mortalité

Les estimations conservatrices minimales faites par le consortium du « Lancet Compte à rebours » ont montré que, dans le monde, la pollution de l'air intérieur est responsable chaque année d'environ 2,9 millions de décès, imputables en ce qui concerne les expositions chroniques à la BPCO et au cancer du poumon ; la cause principale de ces décès étant constituée par les infections respiratoires aiguës chez les enfants âgés de moins de 5 ans. Les expositions au tabagisme passif et à la biomasse ont été associées avec un excès de mortalité par BPCO et cancer pulmonaire davantage chez les femmes non-fumeuses et non exposées au tabagisme environnemental, ce qui permet de mettre en cause directement la biomasse [47]. À noter que la biomasse est un combustible dont l'usage augmente même en Europe [43].

Population à risque accru

Si l'ensemble de la population humaine est concerné par la qualité de l'air, car la pollution atmosphérique est ubiquitaire, il existe une grande variabilité dans l'exposition aux polluants atmosphériques, dans la réponse à ceux-ci ainsi que dans la susceptibilité des individus. Certains groupes de population, tels que les enfants, les personnes âgées et les individus souffrant de pathologies chroniques (cardiopulmonaires, diabète de type 2...), ont été identifiés comme plus à risque (susceptible vis-à-vis des effets de la pollution atmosphérique). Mais parmi les sujets susceptibles, on retrouve aussi les sujets obèses et d'autres groupes restent sans doute à identifier. De plus, il faut aussi tenir compte des variations dans la susceptibilité de l'hôte à l'agression des polluants atmosphériques dans le cas de susceptibilité génétique, par exemple la famille des gènes de la glutathion superoxyde dismutase (GST) impliqués dans la réponse aux polluants par le biais d'un mécanisme antioxydant.

Outre les sujets susceptibles, il y a aussi les sujets plus « vulnérables » aux effets de la pollution atmosphérique, lesquels sont exposés de façon excessive à la pollution atmosphérique en raison de leurs caractéristiques socioéconomiques. Par ailleurs, les citadins sont considérés comme une population vulnérable, à cause de l'importante circulation automobile et des rejets industriels survenant de façon continue dans le milieu urbain.

Mécanismes impliqués

Le mécanisme d'amorçage est bien compris : toute altération de l'environnement aérien, même à des taux minimes, cause une charge polluante substantielle et peut entraîner des dommages biologiquement significatifs ; les mécanismes de défenses naturels (élimination, crachat...) se trouvant alors dans l'impossibilité de répondre au surplus d'exposition. Successivement, plusieurs mécanismes d'actions susceptibles de favoriser et d'aggraver les manifestations respiratoires allergiques et la BPCO (O_3 , particules) peuvent se produire. En premier lieu, il y a le mécanisme du stress oxydant au niveau des cellules de l'appareil respiratoire pouvant engendrer une inflammation chronique au niveau des voies aériennes et du poumon. Alternativement, une érosion des télomères et une inflammation qui devient systémique. Dans le cas du développement de l'allergie respiratoire, le mieux étudié à ce

jour, on observe en cas d'exposition à la pollution atmosphérique :

- une sensibilisation primaire avec production d'immuno-globuline E (particules diesel, 40 à 70 % des émissions de particules fines du milieu urbain) ;
- un effet adjuvant dans le déclenchement de la réponse allergique aux allergènes inhalés (particules diesel, NO₂, SO₂ et O₃) ;
- une réponse inflammatoire non spécifique des voies respiratoires (particules diesel, O₃ et NO₂).

Prévention et études d'intervention

La prévention et la prise en charge des maladies respiratoires et la promotion de la santé respiratoire dépendent d'une compréhension claire des interactions entre l'individu et les polluants de l'environnement immédiat. Une prévention efficace peut être basée sur l'éviction des sources, la réduction des émissions ainsi que sur la ventilation à l'intérieur des locaux. L'effet de la réduction de la pollution atmosphérique sur l'impact sanitaire a été montré dans plusieurs situations de vie réelle. Parmi d'autres exemples, à Dublin une diminution significative des taux standardisés de mortalité respiratoire coïncidait avec l'interdiction de la vente de charbon [57]. Ensuite la diminution de la teneur en PM₁₀ a été mise en relation avec une amélioration des symptômes chez les enfants en Suisse [58] et de la fonction respiratoire en Californie [59]. L'amélioration de la qualité de l'air était associée à des réductions atténuées du VEMS/CVF, du FEF₂₅₋₇₅ et du FEF₂₅₋₇₅/CVF au fil du temps chez les participants avec un indice de masse corporelle (IMC) faible et normal, mais pas chez les participants obèses ou en surpoids. L'atténuation était la plus prononcée pour Δ FEF₂₅₋₇₅/FVC (atténuation de 30 % et 22 % en association avec une diminution de 10 µg/m³ des PM₁₀ chez les participants de poids faible et normal respectivement) [60]. Aucun seuil d'effets indésirables n'était observé puisque les effets bénéfiques existaient pour des changements relativement faibles des niveaux de PM₁₀ plutôt modérés. Et en termes d'effets à plus court terme, la fermeture du centre à la circulation automobile lors des jeux olympiques d'Atlanta a conduit à une réduction des concentrations d'ozone et du recours aux soins pour asthme [61]. Plus récemment, le contrôle des émissions diesel à Tokyo a conduit à une réduction de 6 % de la mortalité toutes causes, de 22 % de la mortalité respiratoire et de 5 % de la mortalité par cancer du poumon [62].

Sur le plan théorique, l'étude APHEKOM conduite dans 9 villes françaises a estimé les bénéfices sanitaires et économiques potentiels associés à une amélioration de la qualité de l'air. L'espérance de vie à 30 ans pourrait augmenter de 3,6 à 7,5 mois selon la ville, ce qui équivaut à différer près de 3000 décès par an, si les concentrations moyennes annuelles de PM_{2,5} respectaient la valeur guide de l'OMS (10 µg/m³). De même, une soixantaine de décès et une soixantaine d'hospitalisations respiratoires par an dans les neuf villes pourraient être évités si la valeur guide de l'OMS pour le maximum journalier d'ozone (100 µg/m³) était respectée.

Au total, les mesures de réduction de la pollution atmosphérique montrent leur efficacité avec une diminution significative des événements de santé lui étant associés.

Cependant, les études n'ont ciblé qu'une mesure de réduction et d'autres études prenant en compte plusieurs mesures de prévention et d'évitement à la fois sont nécessaires.

Conclusions

Les effets respiratoires à long terme de l'exposition à la pollution atmosphérique chimique sont bien établis par de larges méta-analyses. Certaines de ces études ont effectué un ajustement sur le tabagisme et sur la profession et ont ainsi permis d'estimer l'effet propre de certains polluants atmosphériques. Au total, l'exposition à long terme aux gaz et particules atmosphériques est responsable d'une augmentation de la morbidité et de la mortalité dans le cas de pathologies chroniques comme asthme, bronchite chronique, BPCO, fibrose pulmonaire idiopathique et cancer du poumon. Ces effets sanitaires sont observés à des niveaux qui ne sont pas considérés comme préoccupants d'après les valeurs guides et ne sont pas négligeables du fait de la population concernée, et peuvent être réduits en diminuant notamment les émissions. Aussi, la pollution atmosphérique est considérée comme un des facteurs de risque environnementaux les plus dangereux et l'OMS en a fait une priorité.

Afin de mieux comprendre les associations, les futures études devraient bénéficier d'une plus grande normalisation des méthodes d'étude, y compris l'harmonisation de l'évaluation de l'exposition, l'harmonisation des résultats, l'harmonisation des facteurs de confusion et l'inclusion de tous les facteurs de confusion importants dans les études individuelles. La mesure de l'exposition doit tenir compte des particules ultrafines, qui ne sont pas dénombrées actuellement et de la composition chimique des particules. Elle doit être aussi mesurée en temps réel à l'aide de micro-capteurs portatifs connectés nomades intelligents, afin de mieux comprendre les expositions, les comportements et les mécanismes d'action de la pollution atmosphérique sur la santé lorsque celle-ci est mesurée en simultané. De tels capteurs sont destinés à aider les patients respiratoires à se protéger notamment de la pollution atmosphérique.

Que faut-il penser du diesel ?

Des années 1960 aux années 1990, la motorisation diesel est restée cantonnée aux véhicules à usage essentiellement utilitaire, ou à de gros rouleurs pour ce qui concerne les véhicules particuliers. Dès cette époque, le gazole était sous taxé en France, mais aussi dans la plupart des pays, car considéré comme un carburant à usage essentiellement professionnel. C'étaient alors des véhicules globalement bruyants, malodorants et réputés pour émettre des fumées noires dont on se tenait à l'écart. En même temps, ils produisaient peu de CO, qui était le polluant majeur des véhicules à essence. Cette pollution des véhicules essence a été considérablement réduite avec la généralisation du pot catalytique à 3 voies au début des années 1990. Maintenant, on nous dit que les véhicules diesel sont « propres ». Est-ce qu'une pollution moins visible et moins odorante serait moins nocive, notamment pour notre santé ? Le rapport de la Commission d'enquête du Sénat sur le coût économique de la pollution atmosphérique publié en juillet 2015 [63] évalue

ce coût à 103 milliards d'euros par an ; le diesel a-t-il une part importante dans ce coût ?

Pourquoi tant de véhicules diesel ?

Dans les années 1990, l'objectif développé notamment par les autorités européennes était la réduction des émissions de CO₂, qui, comme on le sait, est un gaz à effet de serre, mais pas le seul. En Europe, certains constructeurs automobiles et en particulier les constructeurs français ont répondu à cette attente par le développement d'une technologie diesel à injection directe à très haute pression permettant un contrôle plus fin de l'injection et donc une moindre consommation. Ce développement a conduit à une diésélisation généralisée du parc automobile français des véhicules particuliers avec plus de 70 % du marché. Les autorités françaises et européennes ont accompagné cette évolution avec de fortes incitations fiscales par le biais des bonus et du maintien de la sous taxation du gazole, qui n'était plus vraiment un carburant professionnel, sans se soucier des particules et du NO₂. Un rapport publié le 18 septembre 2017 par l'ONG « *Transport and environment* » [64] remet totalement en cause le « bénéfice CO₂ » des motorisations diesel, en démontrant que, dans le cycle de vie complet d'un véhicule diesel et de sa consommation de carburant, celui-ci est responsable d'une émission plus importante de CO₂ que toute autre motorisation.

D'autres acteurs ont choisi d'autres voies qui permettaient de remplir ces objectifs ; notamment en France, les ministères de la santé et de l'environnement tentaient, avec les pétroliers, de développer la filière GPL encore plus économique en CO₂ mais sans pollution. C'est le choix de filière qui a été fait par la Corée du Sud et, dans une moindre mesure, chez certains de nos voisins européens chez qui le GPL représente une part importante du marché (Pologne, Pays Bas, Italie). Le Japon a choisi de bannir totalement le diesel (moins de 1 % du marché) notamment grâce à des normes d'émission très contraignantes et de développer l'hybride essence (à injection indirecte) avec une division par 2 de la pollution particulaire et très peu de NO₂. En Chine et aux États-Unis, le diesel représente aussi moins de 1 % du marché des véhicules légers (mais ils ont d'autres sources de pollution, notamment les centrales à charbon). En Allemagne, les camions fonctionnant au gaz naturel (GNV), à usage urbain ou routier, ont été introduits depuis une quinzaine d'années et on croise maintenant sur nos routes des gros porteurs allemands fonctionnant au GPL. Il n'y a pas de distribution publique de GNV en France, mais certains groupes de distribution, pour « verdir leur image », utilisent maintenant des camions à gaz et le font savoir sur ceux-ci. Les camions de ramassage des ordures ménagères sont pour une part grandissante des véhicules à gaz, notamment pour ne pas exposer le personnel aux émissions de particules diesel classées comme cancérigène certain par le CIRC.

Une tentative d'introduction de bus à gaz à la RATP au début des années 2000 (comme dans beaucoup de grandes villes américaines ou européennes) s'est heurtée à des oppositions de principe. L'expérimentation menée sur deux lignes de bus est restée longtemps sans suite. Mais, récemment, deux de ces lignes de bus au GNV viennent d'être réactivées avec des bus fonctionnant au biogaz et conformes à la norme européenne Euro 6b. Parallèlement,

l'évolution technologique des moteurs à essence s'est ralentie et les pouvoirs publics en France ont voulu développer la voiture électrique avec le succès mitigé que l'on sait. Les ingénieurs en prospective technologique automobile nous disent depuis 10 ans que l'avenir de l'électrique passera par l'hybride rechargeable, ce qu'aucun constructeur français n'a fait, alors que de nombreux constructeurs étrangers ont largement développé cette filière, mais uniquement avec des véhicules haut de gamme correspondant à une clientèle très limitée. L'évolution technologique des moteurs à essence a été réactivée récemment, avec le développement des moteurs turbocompressés à essence à injection directe, une technologie issue du développement des moteurs diesel. Nous verrons plus loin ce qu'il faut en penser, notamment en termes de pollution particulaire ultrafine.

Quelles pollutions en rapport avec les moteurs diesel ?

La pollution qui vient d'abord à l'esprit lorsque l'on évoque les moteurs diesel est la pollution particulaire (le diesel qui fume). Mais l'évolution de la technologie a permis de modifier considérablement les caractéristiques des particules émises, grâce à l'injection haute pression et aux filtres à particules obligatoires depuis 2011 (application de la norme Euro 5). On produit ainsi des particules beaucoup plus fines et en quantité massique beaucoup plus faible. Les particules issues des moteurs diesel ont un diamètre de l'ordre de 100 nanomètres, elles peuvent s'organiser en agrégats de plusieurs dizaines ou centaines de particules. Un diesel qui fume n'émet pas des particules, mais des agrégats de particules. On sait que l'interaction particules-pollens [65] est fonction du nombre de particules, lequel nombre est à masse égale de particules, proportionnel à l'inverse du cube du rayon des particules (considérées par simplification comme des sphères) et que la réactivité des particules, notamment sur les voies respiratoires ou dans le système cardiovasculaire, est fonction de leur surface développée, proportionnelle à l'inverse du carré du rayon des particules. Donc exprimer la quantité de particules émises par les moteurs diesel (ou toute autre source de particules, notamment les combustions du fuel, du bois, des véhicules à essence...) sous forme de masse n'a pas de sens en termes d'effet sur la santé. C'était pourtant la seule référence réglementaire. Ce qui compte, c'est le nombre ou la surface développée des particules, c'est pourquoi la norme Euro 5 a introduit pour les véhicules diesel un nombre maximum de particules de 6×10^{11} /km. Cette valeur a été reprise dans la norme Euro 6b (Tableau 3) et une valeur transitoire plus élevée d'un facteur 10 a été adoptée pour les véhicules essence à injection directe jusqu'en 2017 (Tableau 4). Il faut rappeler que, à masse égale, quand le diamètre des particules est divisé par 10 leur surface augmente d'un facteur 100 et leur nombre d'un facteur 1000. Ainsi, lorsque l'on passe de particules de 10 μm à des particules de 0,1 μm, leur nombre à masse égale est multiplié par un facteur 10⁶. On sait aussi que les particules dont la pénétration dans le système respiratoire est la plus importante sont celles dont le diamètre est de l'ordre de 0,1 à 0,4 μm, les particules d'un diamètre supérieur à 2,5 μm ou inférieur à 0,1 μm étant retenues par les voies

Tableau 3 Évolution des normes européennes d'émission des véhicules diesel.

Norme	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6b
Oxydes d'azote (NO _x)	—	—	500	250	180	80
Monoxyde de carbone (CO)	2 720	1 000	640	500	500	500
Hydrocarbures (HC)	—	—	—	—	—	—
Hydrocarbures non méthaniques (HCNM)	—	—	—	—	—	—
HC + NO _x	970	900	560	300	230	170
Particules (PM)	140	100	50	25	5	4,5
Particules (PN) (Nb/km)	—	—	—	—	6 × 10 ¹¹	6 × 10 ¹¹

Valeurs sauf PN exprimées en mg/km.

Tableau 4 Évolution des normes européennes d'émission des véhicules essence.

Norme	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6b
Oxydes d'azote (NO _x)	—	—	150	80	60	60
Monoxyde de carbone (CO)	2720	2200	2200	1000	1000	1000
Hydrocarbures (HC)	—	—	200	100	100	100
Hydrocarbures non méthaniques (HCNM)	—	—	—	—	68	68
HC + NO _x	—	—	—	—	—	—
Particules (PM)	—	—	—	—	5 ^a	4,5 ^a
Particules (PN) (Nb/km)	—	—	—	—	—	6 × 10 ^{12b}

Valeurs sauf PN exprimées en mg/km.

^a Uniquement pour les voitures à essence à injection directe fonctionnant en mélange pauvre (combustion stratifiée).

^b Le règlement n° 459/2012 autorise les voitures à essence à injection directe à émettre 6 × 10¹² particules jusqu'en 2017 ; au-delà, elles seront limitées à 6 × 10¹¹ comme les véhicules Diesel.

aériennes supérieures. L'effet des particules sur les pollens est de deux ordres : d'une part, en se fixant sur la surface des pollens, les particules augmentent l'allergénicité de surface ; d'autre part, en faisant éclater les pollens, elles libèrent des allergènes contenus dans les pollens [65]. Les particules diesel ont été classées comme cancérigène certain par le Centre international de recherche sur le cancer en juin 2012 et la pollution atmosphérique en octobre 2013. La phase vapeur de l'échappement des moteurs diesel contient des hydrocarbures, notamment des aromatiques polycycliques semi volatils. À haute température, ils restent en phase vapeur. À basse température, ils se condensent sous forme particulaire, notamment nanoparticulaire. En hiver, ces hydrocarbures semi volatils participent à la pollution particulaire secondaire. Cet effet n'est pas observé avec les moteurs à essence ou gaz dont la phase vapeur comporte des composés organiques volatils non susceptibles de se condenser en phase particulaire.

Quels effets sur la santé de la pollution par les moteurs diesel ?

En ce qui concerne les effets à court terme de la pollution particulaire sur la mortalité, une étude de l'InVS (actuellement Santé publique France) [66] montre dans 17 villes françaises qu'une augmentation de 10 µg/m³ des niveaux de PM 10 entraîne avec un retard de 0 à 1 jour une augmentation de 0,51 % de la mortalité toutes causes et de 0,55 % de la mortalité cardiovasculaire. L'effet est plus important avec

un retard de 2 à 5 jours traduisant un effet retardé (sauf en été où l'effet est plus rapide : confusion possible avec l'ozone). Pour les effets à long terme, l'étude européenne Aphekom a montré que les dépassements de niveaux de PM 2,5 par rapport aux directives de l'OMS sont responsables de 2900 décès annuels prématurés dans les villes françaises participant à l'étude. Cette même étude a montré que le gain d'espérance de vie, si les lignes directrices de l'OMS étaient respectées pour les seules PM 2,5 (10 µg/m³), conduirait à un gain d'espérance de vie de 0 à Stockholm à 22 mois à Bucarest (6 mois dans les grandes villes françaises).

Le rapport *Baseline Scenario for the Clean Air for Europe Analysis* (CAFE) pour le compte de la Commission européenne estime que 100 000 décès prématurés et 725 000 années de vies perdues par an sont attribuables aux particules fines en Europe (toutes pathologies confondues). Pour l'année 2002 et pour la France, 600 à 1100 décès par cancers du poumon (2 % à 4 % de la mortalité par cancer du poumon) et 3000 à 5000 décès par maladies cardiovasculaires seraient attribuables à cette exposition chronique. Un total de 6000 à 9000 décès toutes causes confondues pourrait lui être attribué, soit 3 % à 5 % de la mortalité totale de la population.

Une étude récente relative à la relation entre trafic routier et maladies neurodégénératives a montré une relation significative entre la distance aux grands axes de trafic et la survenue de démences [67], mais pas de maladie de Parkinson ni de sclérose en plaque. Une hypothèse serait la translocation à travers la lame criblée des particules

ultrafines issues du trafic routier, du nez vers le cerveau (Les particules ultrafines de moins de 100 nm sont en grande partie retenues dans les voies aériennes supérieures).

La dépollution des moteurs diesel : mythe ou réalité ?

Les filtres à particules, obligatoires sur les véhicules diesel depuis 2011, n'ont pas été la panacée attendue. En effet, on voit souvent des véhicules récents, notamment taxis et petits utilitaires urbains, équipés de filtres à particules, qui fument noir au démarrage et à l'accélération. La raison est qu'un filtre à particule doit être régénéré régulièrement par roulage à vitesse régulière et soutenue pendant au moins 60 km, ce que ne permet pas de faire un usage purement urbain. La régénération se fait soit par pyrolyse à haute température (avec une forte production d'oxydes d'azote), soit par action catalytique d'un liquide injecté dans le filtre à particule (sans que l'on connaisse le devenir des composés issus de cette réaction). Il serait utile de conduire une étude visant à mesurer le nombre et la surface développée des particules avec et sans filtre à particule, pour juger l'efficacité, non pas en termes de diminution de masse, mais en termes de nombre et surface développée des particules.

La pollution particulaire n'est pas la seule cause de pollution en rapport avec la motorisation diesel. L'autre pollution assez spécifique (depuis l'utilisation des pots catalytiques 3 voies sur les véhicules à essence) est la pollution par le NO₂ dont les moteurs diesels sont de gros pourvoyeurs. Globalement, les NO_x ont diminué au cours des 30 dernières années, mais le rapport NO₂/NO a beaucoup augmenté : c'est un traceur de la pollution liée à la motorisation diesel. Les véhicules diesel bénéficient sur ce point de larges dérogations dans les réglementations européennes par rapport aux véhicules essence (180 mg/km de NO_x contre 60 pour les véhicules essence dans la norme Euro 5). Cette différence était, jusqu'à peu, vouée à s'atténuer. Le dioxyde d'azote est un fort irritant bronchique, mais en outre dans la « soupe atmosphérique », ce composé est à l'origine de deux polluants secondaires préoccupants. D'abord, en été lors d'épisodes d'inversion de température, l'ozone, fort irritant des voies aériennes et des muqueuses. C'est un polluant secondaire issu de la réaction des ultraviolets sur des polluants primaires et principalement le NO₂. En période estivale, on peut difficilement accuser le chauffage d'être à l'origine de cette pollution secondaire dont la source principale est alors le trafic routier, notamment les moteurs diesel. L'augmentation des concentrations moyennes d'ozone a été parallèle à la diésélisation du trafic alors que d'autres polluants ont notablement été réduits, notamment ceux issus de l'industrie ou des véhicules à essence (SO₂, CO, COV). L'autre polluant secondaire est constitué par les particules secondaires. La réaction du NO₂ et des COV avec les nitrates de l'agriculture en période d'épandage (et le NH₃ émis par les systèmes SCR des véhicules diesel) conduit à la création de particules secondaires de nitrate d'ammonium. Ainsi, les épisodes de pollution particulaire de mars 2014 et de mars 2015 étaient essentiellement liés à la formation de particules secondaires et relativement peu de particules primaires issues de combustions [68]. Ces épisodes survenaient

à l'occasion d'épandages agricoles concomitants avec des périodes d'inversions de températures et de fort trafic routier. En mars 2015, des vents d'est amenant des pollutions industrielles, notamment en provenance d'Allemagne, ont conduit à étendre cette pollution sur l'ensemble du quart nord-est de la France. Les COV en cause dans cette pollution secondaire provenaient aussi des moteurs à essence et notamment des 2 roues anciens.

Les systèmes de dépollution des NO_x des véhicules diesel sont susceptibles également de produire des polluants primaires et secondaires. Le système SCR (*selective catalytic reaction*) utilise de l'ammoniac NH₃ pour obtenir une réduction catalytique du NO₂ avec un catalyseur à l'oxyde de tungstène ou vanadium.

- $4 \text{ NH}_3 + 2 \text{ NO} + 2 \text{ NO}_2 \Rightarrow 4 \text{ N}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$;
- l'ammoniac est obtenu par hydrolyse de l'urée (Adeblue) : $(\text{CO}(\text{NH}_2))_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{NH}_3 + \text{CO}_2$;
- l'ammoniac excédentaire est éliminé par une catalyse d'oxydation : $4 \text{ NH}_3 + 3 \text{ O}_2 \Rightarrow 2 \text{ N}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$.

Comme toute réaction catalytique, cette réaction n'est effective que dans une plage de température précise, supérieure à 200 °C et optimale vers 350 °C. En dehors de cette plage de température, notamment lors des démarrages à froid, le système SCR va émettre dans l'atmosphère du NH₃ source de pollution particulaire secondaire. Cette situation est aggravée en conduite urbaine par l'utilisation des systèmes « stop and start » qui ne permettent pas de maintenir la température optimale dans le catalyseur. Il en est de même dans le cas des véhicules hybrides diesel. Pour pallier cet effet, un constructeur de bus hybrides diesel (Volvo) injecte dans le catalyseur du gazole pour maintenir la température au-dessus du minimum requis. En outre, à faible température comme à très haute température, les systèmes SCR émettent du protoxyde d'azote (N₂O) [69] dont la principale caractéristique est d'être un gaz à effet de serre 298 fois plus puissant que le CO₂, ce qui ajoute à la production de gaz à effet de serre émis par les moteurs diesel. Ces aspects ont été confirmés par une étude du Centre Commun de recherche d'Ispra portant sur un camion conforme à la norme Euro 5 et équipé d'un système SCR [70].

Un autre dispositif de traitement des NO_x est le piège à NO_x. Son principe, associé à une recirculation des gaz d'échappement pour diminuer la température de combustion, est de capter les NO_x et de les traiter ensuite de manière discontinue. La caractéristique de ce dispositif (notamment utilisé par le constructeur français Renault) est de n'être efficace que dans une plage limitée de température extérieure, de 17 °C à 35 °C, ce qui conduit globalement aux plus mauvais résultats, comme en témoigne la Fig. 9 issue du rapport *Transport and environment* [64] déjà cité. Selon cette étude, aucun constructeur de véhicules diesel n'apparaît, en situation de conduite réelle, conforme à la norme Euro 6 (Fig. 9).

Une sur-diésélisation du parc : une erreur économique

Lors du raffinage du pétrole brut, et pour une qualité de pétrole donnée, le rapport entre la quantité de produits légers (propane, butane, essences) et de produits lourds (gazole, kérosène, goudrons) est fixe. Si la demande

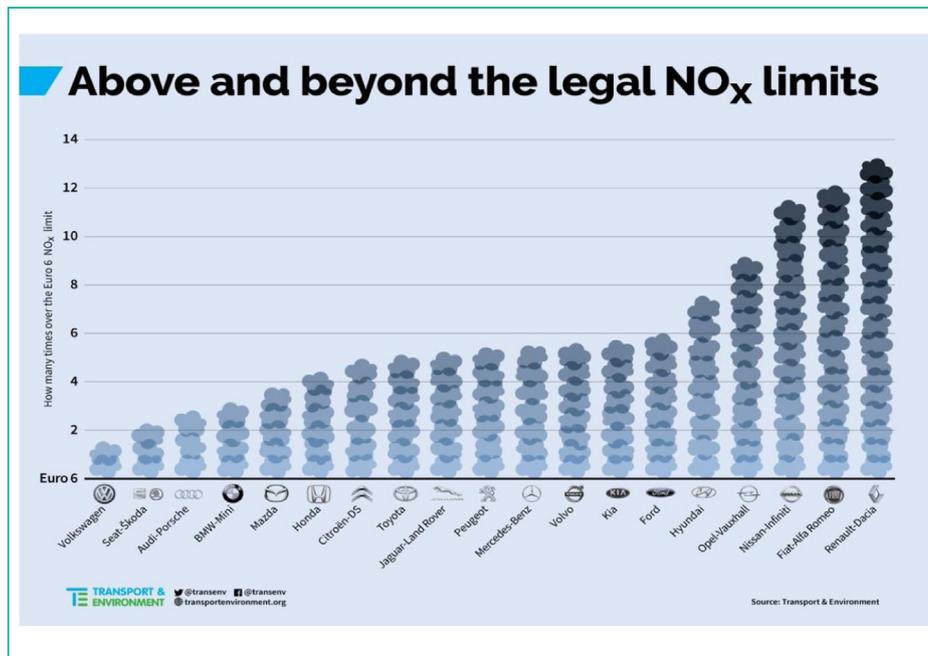


Figure 9. Émission de NO_x par constructeurs.

en gazole est trop importante on se retrouve devant un excédent de produits légers pour lesquels il faut trouver des débouchés. Les États-Unis n'achètent maintenant plus d'essence car ils sont devenus autosuffisants grâce à la production de gaz de schistes. Donc on ne sait quoi faire des produits légers et il faut acheter du gazole, notamment à la Russie qui n'est pas forcément un fournisseur très fiable. Cette situation de déséquilibre a conduit globalement à une augmentation des prix des carburants et à la fermeture de raffineries françaises qui ne pouvaient pas répondre à cette demande déséquilibrée. On croit généralement que rouler au gazole est économique. En fait, le prix de revient du kilomètre, pour la majorité des utilisateurs (parcourant en moyenne 12 700 km par an) est maintenant inférieur avec des véhicules essence. Cela est dû à l'évolution récente des moteurs à essence : les constructeurs, notamment français, ont développé des technologies d'injection directe sur des moteurs turbocompressés, comme ils l'avaient fait sur les moteurs diesel il y a 20 ans. La technologie est plus simple, donc le coût à l'achat et à l'entretien nettement inférieur aux véhicules diesel équivalents. Malgré la sous taxation du gazole, et le bonus accordé aux véhicules diesel, sur les 30 véhicules les plus économiques au kilomètre en France, il n'y a, selon l'étude Argus 2017, que 3 véhicules diesel [71].

Pour ces raisons purement économiques, le marché est en train de s'inverser. La part des véhicules diesel était de 73 % dans le marché neuf en 2012 (contre 4 % en 1980), elle est tombée à 47,5 % sur les 8 premiers mois de 2017, dépassée par les véhicules essence (47,6 %), la part des véhicules hybrides et électriques représentant 6,1 % (source Commissariat Général au développement durable). Les constructeurs automobiles français et européens ne proposent même plus de version diesel pour leurs véhicules urbains. Ils anticipent une envolée des coûts liés au durcissement prévu des normes d'émissions pour les véhicules diesel et à un alignement de la fiscalité du gazole sur celle de

l'essence, réclamé notamment par la Commission d'enquête du Sénat. Actuellement en France, seules les entreprises achètent encore des véhicules diesel, pour des raisons fiscales. Ces véhicules professionnels, possédés souvent dans le cadre de contrats de location, ont de plus en plus de mal à trouver preneur en fin de contrat sur le marché de l'occasion car les particuliers se sont totalement éloignés du diesel. Comme certains constructeurs n'avaient pas anticipé ce renversement du marché, ils sont obligés actuellement d'importer de Chine des moteurs à essence pour alimenter leurs chaînes de production.

Le diesel, une impasse technologique

Depuis septembre 2015, le monde médiatique a été agité par plusieurs révélations majeures relatives aux moteurs diesels : (le *diesel gate*). D'une part, la révélation d'une pratique d'un constructeur allemand de véhicules diesel qui, aux États-Unis, pour satisfaire aux normes d'émission américaines Tier 2 (un peu plus contraignantes que les normes européennes en termes de NO_x puisque la norme Tier 2 mesure uniquement le NO₂) n'avait trouvé d'autre solution que de limiter strictement l'usage des dispositifs de dépollution (par catalyse SCR) aux périodes de mesure des émissions du véhicule. En dehors de ces périodes, en situation de circulation courante, les émissions de NO₂ étaient, selon les véhicules, de 10 à 40 fois supérieures aux valeurs limites de la norme Tier2. D'autre part, la publication du livre blanc [72] d'une organisation non gouvernementale, l'*International Council on clean transportation* (ICCT), réalisé en collaboration avec l'Association des automobile clubs allemands (ADAC). Les véhicules diesel vendus en Europe sont certifiés selon un cycle européen de conduite standardisé (cycle NEDC de 20 minutes à une vitesse moyenne de 33 km/h, destiné à être remplacé à partir de 2017 par un cycle mondial harmonisé à une vitesse plus représentative

des conditions réelles d'utilisation). Les résultats de l'étude de l'ICCT montrent que presque tous les véhicules testés selon le cycle européen actuel satisfont à la norme Euro 6b, obligatoire depuis septembre 2015 (émissions de NOx inférieures à 80 mg/km). Par contre, en situation réelle, les émissions moyennes de NOx des véhicules diesel sont : pour les véhicules équipés d'un recyclage des gaz d'échappement (EGR) en moyenne de 2,3 fois la valeur limite, pour les véhicules équipés d'une réduction catalytique, en moyenne de 2,8 fois la valeur limite et pour les véhicules équipés de piège à NOx de 8 fois la valeur limite en moyenne, avec un maximum à 15 fois la valeur limite.

En septembre 2017 a été publié le rapport de l'ONG *Transport and environment* [64] qui conduit aux mêmes conclusions.

Devant ce constat (connu d'avance), il est apparu impératif de certifier les véhicules diesel en conditions réelles d'utilisation, ce qui était prévu à partir de septembre 2017. Cependant, considérant qu'aucun véhicule diesel ne pourrait dans ces conditions satisfaire à la norme Euro 6b, il a été prévu de multiplier par 2,1 les valeurs limites d'émission de NOx des véhicules diesel légers jusqu'en 2019 puis par 1,5 au-delà. C'est la première fois que les instances européennes font marche arrière en matière d'émissions polluantes et ce en faveur uniquement du lobby du diesel.

Ensuite, d'autres actions ont été engagées en France contre les fabricants de véhicules diesel, à la demande de la Direction générale de la concurrence de la consommation et de la Répression des fraudes en avril 2017. Il est reproché à ce dernier constructeur, chantre du diesel propre, d'avoir mis en vente des véhicules diesel Euro 5 et Euro 6 disposant de plusieurs réglages moteur : un réglage *low NOx* pour les tests de certification et un réglage *low CO₂* pour le fonctionnement hors tests. La fraude concernerait plusieurs millions de véhicules en France, avec à la clef des amendes de plusieurs milliards d'euros [73].

Le moteur diesel est donc dans une impasse technologique, il est maintenu artificiellement en vie grâce à des avantages fiscaux et des tricheries généralisées afin de respecter une réglementation dont le premier objectif n'est pas le respect de la santé des populations.

Les véhicules essence à injection directe risquent de se trouver dans une situation comparable quand on sait que les solutions proposées pour le traitement des particules (en nombre 10 fois plus élevé que les véhicules diesel) auront une efficacité très insuffisante et permettront au mieux d'atteindre le niveau des véhicules diesel. L'objectif était d'atteindre ce niveau en 2017, il n'a pas été atteint et certains constructeurs exportant vers des marchés extra européens, plus rigoureux en termes de réglementation, ont réglé ce problème en alimentant ces moteurs au GPL, ce qui permet de faire quasiment disparaître les particules. En mai 2017, une firme automobile annonçait la fin du développement de véhicules diesel par sa marque et la fin des moteurs thermiques en 2020.

Quant à la filière électrique, la production mondiale actuelle de lithium, nécessaire pour produire les batteries lithium ion, ne permettrait d'assurer que de 1 % à 2 % de la production automobile mondiale. On attend donc une révolution technologique dans le domaine des batteries pour développer largement cette filière.

Moyen de contrôle/maîtrise

L'air est un élément vital et invisible donc, dans un certain sens, au-delà du respect des normes, c'est la bonne santé de la population qui est le meilleur moyen de contrôler la qualité de l'air. Pendant de longues années, ce contrôle s'est effectué à travers le filtre des sens : ce sont les fumées et les mauvaises odeurs qui étaient les critères retenus pour dénoncer la gêne et la nuisance occasionnées. L'empoisonnement, plus difficile à démontrer, était réservé au monoxyde de carbone que les américains désignent sous le nom de « killer ». La pollution ne tue pas instantanément mais l'ampleur des méfaits qu'elle occasionne sur la santé a été progressivement découverte et amplifiée au cours des dernières décennies. C'est pour prévenir ces dommages que les polluants de l'atmosphère ont été mesurés, normés et contrôlés. Le mode de gestion initial reposait sur le respect de normes autorisant les émissions polluantes jusqu'à un certain seuil au-delà duquel la concentration atteinte était censée causer des dommages sur la santé. Les progrès de l'épidémiologie ont montré que pour les polluants atmosphériques majeurs, les effets observés ne respectent aucun seuil ; le respect de la norme est donc associé de fait à un risque sanitaire jugé acceptable quoique liée un risque résiduel de personnes atteintes.

L'air est un bien commun qui se doit d'être géré par la puissance publique au nom de l'intérêt général et de la responsabilité sanitaire des gouvernements mais la prise en charge collective de la qualité de l'air se heurte à plusieurs difficultés qui expliquent le déficit observé dans les résultats et la persistance du dépassement des seuils autorisés. En effet, la gestion de la qualité de l'air se trouve être en tension entre une référence temporelle (les normes) ou territoriale (les cartes) ; entre la responsabilité régaliennne de l'État au titre de la sécurité sanitaire et les leviers de la prévention qui se situent dans les territoires ; entre les phénomènes globaux pour maîtriser les gaz à effet de serre et une gestion de proximité. Le respect des normes qui a guidé la gestion de la qualité de l'air depuis un demi-siècle est-il encore adapté à la complexité du phénomène actuel ?

La pollution de l'air est essentiellement gérée par le respect des normes

Les normes, édictées pour l'ensemble de l'Europe sont des normes portant sur la qualité de l'air, polluant par polluant, complétées par des normes portant sur les émissions de ces mêmes polluants selon les secteurs d'activité.

L'importance des normes d'émissions

L'importance des normes d'émissions s'est imposée à l'échelle européenne en raison de la nature transfrontalière des polluants. En outre, l'évaluation des émissions sert de base pour leur taxation à la faveur du principe pollueur payeur et, au fil des ans, la diminution des émissions a été compensée par l'élargissement de l'assiette fixée pour la taxe. En France, le CITEPA a la charge d'appliquer la méthodologie européenne pour contribuer au « reporting » européen. Ces normes permettent de surveiller les progrès effectués par les entreprises pour diminuer les rejets

Tableau 5 Réductions des émissions de polluants atmosphériques définies par la France dans le PREPA, (exprimés en pourcentage de réduction des émissions une année cible par rapport aux émissions de 2005) conformément à la directive 2016/2284.

% de réduction/2005	2020 (%)	2025 (%)	2030 (%)
SO ₂	-55	-66	-77
NO _x	-50	-60	-69
COVNM	-43	-47	-52
NH ₃	-4	-8	-13
PM _{2,5}	-27	-42	-57

polluants. Pour les véhicules, les normes, dites normes euro doivent être respectées par les nouveaux véhicules mis en service, elles ont été beaucoup sévèrisées depuis la norme euro 0 édictée en 1999 à la norme euro 6c actuellement en vigueur. Ces normes calculées sur les véhicules neufs, selon des protocoles standardisés, parfois transgressés par les constructeurs (voir chapitre précédent), n'indiquent pas les émissions réelles puisque de nombreux facteurs tels que le type de conduite, l'entretien du véhicule, font évoluer les émissions par rapport à la certification effectuée à la sortie de l'usine. C'est pourquoi la Commission a adopté, en septembre 2017, des règlements introduisant dans l'UE la nouvelle procédure mondiale d'essai en laboratoire (*World-wide Light-duty Test Procedure*[WLTP]), complétée par la procédure RDE qui mesure les émissions des VP/VUL sur route.

La France s'est engagée à respecter des limites pour les émissions nationales totales de quatre polluants : le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, les composés organiques volatils et l'ammoniac. (directive NEC 2001/81/CE), révisée en 2016 (UE2016/2284) pour définir des objectifs à atteindre (exprimés en pourcentage de réduction par rapport à la valeur atteinte en 2005 dans le [Tableau 5](#)) pour 5 polluants SO₂, NO_x, NH₃, COVNM et PM_{2,5} pour la période 2020–2029.

Les normes de qualité de l'air

La loi sur l'air énonce en son article 3 que « des objectifs de qualité de l'air, des seuils d'alerte et des valeurs limites sont fixés, après avis du Conseil supérieur d'hygiène publique de France, en conformité avec ceux définis par l'Union européenne ou, à défaut par l'organisation mondiale de la santé. Ces objectifs, seuils d'alerte et valeurs limites sont régulièrement réévalués pour prendre en compte les résultats des études médicales et épidémiologiques ». L'UE comme la France reconnaissent les effets nocifs de la pollution atmosphérique, reconnue comme un enjeu sanitaire majeur [74], sur la santé et la qualité de l'air. Les seuils adoptés par les directives et repris par la France, ont été régulièrement revus à la baisse. La première directive sur la qualité de l'air ambiant date de 1996, elle a engendré plusieurs directives filles et a été réactualisée en 2008 ; L'UE fonde sa stratégie, depuis septembre 2005 avec un objectif d'ici 2020 de baisser d'environ 20 % le nombre de personnes exposées à une valeur dépassant les normes proposées. Les valeurs de référence à atteindre publiées par l'OMS, intitulées « recommandations », sont inférieures aux valeurs

« limites » de la réglementation française. Le recours aux normes portant sur des moyennes annuelles est devenu plus fréquent de manière à éviter de trop focaliser la gestion de la qualité de l'air sur les « pics » de pollution dont les effets sanitaires étaient relativisés. Néanmoins l'éventail des polluants faisant l'objet de normes et donc d'une surveillance est encore limitée. Une étude récente [75] effectuée dans la région industrielle du golfe de Fos a montré l'importance des effets sanitaires du 1-2-dichloroéthane, et du butadiène, qui eux ne font pas l'objet de normes en air extérieur.

Le poids de l'Europe sur la définition des normes est fondamental

Dès que les progrès de la métrologie ont permis de stabiliser les mesures, les industriels ont souhaité objectiver la pollution partout en Europe, à travers des normes, pour éviter les effets de la concurrence. Ils ont pu ainsi fournir des réponses solides aux plaintes fondées sur la perception et donc plus subjectives [76]. Le poids des industriels en Europe a facilité la généralisation de la surveillance de la qualité de l'air plutôt que d'attirer l'attention, comme aux États-Unis, sur les normes d'émission plus directement pénalisantes pour les entreprises.

La France est sous le coup d'un double contentieux avec la Commission européenne en matière de pollution de l'air. Elle est, d'une part, poursuivie depuis mai 2011 devant la Cour de justice de l'UE pour dépassement des normes pour les PM₁₀¹ et, d'autre part, l'exécutif européen lui a adressé un dernier avertissement concernant la pollution par le dioxyde d'azote. Il est reproché à la France de ne pas se conformer aux niveaux réglementaires et de ne pas mettre en place des plans d'action répondant suffisamment aux ambitions de la directive. Bruxelles a identifié 19 zones dans lesquelles doivent être adoptés des plans relatifs à la qualité de l'air.

Effectivement, les normes de qualité de l'air, en intégrant des critères sanitaires, servent de repère pour évaluer les actions à mettre en œuvre pour réduire les risques sanitaires. Néanmoins, « la valeur scientifique d'une norme est très relative. Elle constitue plutôt un espace de négociation dans une perspective juridique et politique. De même qu'elle n'est pas le reflet d'un débat purement scientifique, elle ne se définit pas simplement par l'action normative de l'État ». La norme n'est qu'un indicateur jugé collectivement acceptable qui présente des limites en termes de risque résiduel affectant notamment les personnes les plus vulnérables.

Le contrôle de la qualité de l'air : les limites de la norme

Gérer la qualité de l'air en fonction du respect des normes suppose la construction d'indicateurs de différentes natures. L'évaluation des émissions permet de retrouver quelles sont les sources incriminées dans le cocktail atmo-

¹ La France a reçu un avis motivé en avril 2015 pour 10 zones : Douai-Béthune-Valenciennes, Grenoble, Lyon, Marseille, la Martinique, Nice, Paris, Toulon, la zone urbaine régionale Provence-Alpes-Côte d'Azur et la zone urbaine régionale de Rhône-Alpes.

sphérique tandis que, pour quantifier un risque sanitaire, c'est l'exposition des individus qui a été prise en compte pour estimer la quantité de polluant inhalé sur un certain laps de temps qui peut être celui d'une vie entière. Ainsi, la connaissance des indicateurs d'émission, d'immission et d'exposition s'impose pour une gestion efficace tout en soulevant de nombreuses questions.

La gestion de la qualité de l'air est très dépendante des connaissances scientifiques

La gestion de la qualité de l'air est très dépendante des connaissances scientifiques qui n'ont cessé de progresser à la fois dans le domaine de la métrologie pour mesurer au mieux les différents composants de l'atmosphère que dans le champ de la connaissance scientifique sur les effets délétères et les impacts sanitaires attribués aux polluants. Ainsi, les niveaux observés pour certains composés, comme le dioxyde de soufre, ne cessent de diminuer dans les pays du Nord, l'espérance de vie des populations augmente et, en même temps, la nocivité des polluants est de mieux en mieux démontrée : les études sur les particules, très liées à la vie quotidienne, mettent de plus en plus en lumière leur contribution à de nombreuses pathologies qui n'affectent pas uniquement l'appareil respiratoire.

La complexité des interactions

En dépit des progrès réalisés par la toxicologie et par l'épidémiologie, présentés dans les chapitres précédents, la complexité des interactions caractérise la santé environnementale incompatible avec la recherche de déterminismes simples. Mis à part l'amiante considérée comme seule responsable d'une pathologie bien identifiée, l'influence de l'environnement sur la santé est complexe compte tenu de la pluralité des influences possibles. Il est donc difficile de trouver un indicateur qui permette de contrôler directement la qualité de l'air d'un point de vue sanitaire. Chaque polluant, pris comme indicateur est rarement indépendant des autres et il est souvent difficile de dissocier les effets respectifs de chaque polluant même au moyen de procédés statistiques sophistiqués. Cette difficulté est d'ailleurs renforcée à l'heure actuelle par la maîtrise du changement climatique qui impose de mettre en cause de manière beaucoup plus brutale le système énergétique et les modes de production et de consommation en vigueur.

La pollution intègre une multitude d'échelles spatiotemporelles

La molécule d'air que l'on respire intègre aussi bien des polluants de la maison dans laquelle on vit que ceux qui proviennent de la rue voisine voire même de la région voisine. L'échelle temporelle, la durée de vie d'un polluant, se combine avec les échelles spatiales puisqu'un polluant à courte durée de vie n'aura des effets que sur quelques kilomètres à la ronde tout en sachant qu'il peut se recombiner avec d'autres gaz. Certains gaz comme l'ozone et les particules peuvent avoir une incidence sur le climat, ce sont les « *Short-Lived Climate Forcers* ». Si les effets des gaz à effet de serre (GES) se manifestent à une échelle planétaire, leur maîtrise suppose des actions conjointes, à l'échelle locale, sur des sources qui peuvent être communes

à la fois aux GES et aux polluants toxiques. Compte tenu de l'urgence de la maîtrise du changement climatique, les normes de qualité de l'air et celles concernant les émissions de GES doivent être respectées conjointement.

La synergie nécessaire entre les normes de qualité de l'air et celles concernant les GES

Selon G. Sainteny [77], l'incitation politique en faveur du respect des normes concernant les émissions de CO₂, a été mieux formalisée et plus écoutée en particulier en encourageant la vente des véhicules diesel qui émettent moins de CO₂ que les véhicules à essence mais dégagent plus d'oxydes d'azote. L'amélioration de la qualité de l'air ne peut plus être considérée comme un bénéfice collatéral de la maîtrise du climat, la synergie entre ces deux axes des politiques publiques est essentielle, elle appelle sur certains points une vigilance attentive.

Pour les véhicules, les normes « euro » en vigueur (norme euro 6 C) comportent des restrictions à la fois pour les polluants et pour les émissions de CO₂. Les efforts à accomplir par les constructeurs sont d'autant plus importants que les véhicules ont connu une évolution qui va à l'encontre du mouvement de réduction des taux de CO₂. Depuis 2001, les véhicules sont devenus plus lourds (plus 134 kg), plus longs (plus 12 cm), plus encombrants, plus puissants et plus chers ; les véhicules de loisirs (les *Sport Utility Vehicle* [SUV]) ont représenté en 2017, en Europe, 30 % des ventes.

Un autre point de vigilance concerne le chauffage au bois qui présente plusieurs avantages : cette source d'énergie, outre le fait qu'elle permette de valoriser une ressource locale, est bénéfique pour le climat dans la mesure où le CO₂ émis au moment de la combustion du bois compense celui qui avait été piégé par l'arbre tout au long de sa croissance, de telle sorte que le bilan du bois-énergie, en termes de GES, est considéré comme neutre. Pour limiter l'utilisation de produits pétroliers qui sont une source majeure de GES, le recours à la biomasse a été encouragé à travers le développement d'une filière bois-énergie. Or, la combustion du bois peut contribuer à alimenter le niveau de particules contenu dans l'air extérieur : il représente un tiers des émissions de PM₁₀ de la métropole lyonnaise et la moitié des émissions de PM_{2,5}. Cette constatation est préoccupante quand on connaît les méfaits du carbone-suie sur la santé et nécessite des actions de communication car, selon les résultats d'une enquête lyonnaise [78] : « *Les représentations et usages du chauffage au bois sont très ancrés, et de fait présentent une forte résistance au changement : en plus des considérations pratiques et fonctionnelles, il y a un rapport hédonique et identitaire fort à ce mode de chauffage qui guide le choix de l'équipement. En outre, l'argument écologique est très peu efficace auprès des personnes qui se chauffent au bois* ». À l'échelle intercommunale, la reconfiguration du chauffage urbain en augmentant la part de la biomasse dans la consommation énergétique est un volet majeur des politiques énergie-climat locales [79]. Cependant, les grosses chaudières, très surveillées, ont la possibilité de limiter les émissions de particules nocives.

D'autres points de vigilance concernent l'utilisation de biocarburants et la densification du tissu urbain qui

peut favoriser la stagnation des polluants dans les rues étroites.

C'est pourquoi, à travers le dispositif des plans climat air énergie (PCAET) issus de la LTE (loi de transition énergétique d'août 2015), les collectivités doivent s'engager sur un respect conjoint des émissions de polluants et de GES. Le bénéfice sanitaire apporté par la maîtrise des polluants est aussi une motivation pour que les habitants acceptent les contraintes liées à la réduction ou au changement de la consommation énergétique. Cependant, le respect des normes impose des actions complexes intégrées et situées à des niveaux d'intervention différents et sur des émissions provenant de secteurs variés (transports, industrie, agriculture, habitat, etc.) donc les résultats se déroulent sur le long terme et leur bénéfice est difficile à évaluer.

La réglementation qui s'impose pour gérer un bien commun s'appuie sur l'existence d'un risque collectif

Or, l'exposition d'un individu à la pollution atmosphérique est extrêmement variée, très différenciée dans le temps et dans l'espace selon le mode de vie des individus et leur histoire. S'il est possible d'identifier des territoires ou des populations respectant les normes, ce mode de gestion collectif est de plus en plus décrié à un moment où l'individu règne en maître au sein de la société. Depuis quelques années des capteurs moins coûteux, plus sensibles et plus sophistiqués mais souvent moins précis pour les gaz et les particules sont disponibles ; ils intéressent les associations, les collectivités et les citoyens, qui souhaitent mieux connaître leur exposition aux polluants. Cela installe les habitants dans des rôles de « sentinelles », ou « d'ambassadeurs » des politiques publiques dans le cadre de dispositifs citoyens qui ne peuvent pas se référer à des normes qui sont standardisées à partir d'analyseurs fixes. La connaissance d'un niveau de pollution et en temps réel est-elle un levier suffisant pour susciter des actions permettant de limiter les émissions ? En effet, la connaissance de la pollution et de ses méfaits ne suffit pas pour guider un changement de comportement des citoyens tel qu'il est encouragé dans les différents outils de planification. Par exemple, à Lyon, le document décrivant le plan Oxygène, adopté en 2016, et qui renforce dans la métropole lyonnaise, les actions du PPA [80] « *invite chaque habitant à prendre conscience de son propre impact sur la qualité de l'air et en citoyen responsable, à modifier ses comportements* ». Comme pour la santé environnementale, le respect de normes générales ne peut pas prendre en compte tous les cas individuels qui relèvent de la sphère privée.

Le respect des normes entre surveillance et action

La maîtrise de la pollution atmosphérique est régie, en France, essentiellement par la LAURE² de 1996, (l'article R 221-1 du code de l'environnement) qui comporte trois

volets : l'un sur l'organisation de la surveillance, l'autre sur les actions territoriales à mettre en œuvre et le troisième sur la transition énergétique. Si le premier volet de cette loi a été mis en œuvre de manière efficace, l'application des deux autres volets a été décalée dans le temps, les PPA (« Plans de protection de l'atmosphère ») ont donné lieu à plusieurs éditions et la loi de transition énergétique (LTE) a permis de remettre sur l'agenda politique les questions énergétiques qui avaient été négligées à la fin du siècle dernier.

La surveillance

La surveillance, confiée par la loi à des associations agréées de surveillance de la qualité de l'air, les AASQA, a joué un grand rôle pour assurer le respect des normes. Les industriels, à la faveur de la taxe parafiscale transformée ensuite en TGAP, ont assuré une part importante du financement de ces associations quadripartites bénéficiant d'un financement tripartite (l'État et les collectivités locales contribuent également au financement de la surveillance). De manière générale, compte tenu de l'orientation extrêmement technique prise par les questions environnementales en France, ces associations ont cristallisé sur elles les regards sur la qualité de l'air, préoccupation de plus en plus importante aux yeux des français. La mission des AASQA, regroupées au sein d'une fédération nationale ATMO France, a beaucoup évolué au cours des vingt dernières années. Le développement de la modélisation a permis de passer d'une mesure ponctuelle focalisée sur le court terme et le dépassement des normes à une gestion plus spatiale et territoriale appuyée sur les cartes et des actions déployées sur un temps plus long. Pour cela, les AASQA, en partenariat avec le CITEPA, ont réalisé un « cadastre des émissions » issu d'un recensement, à une échelle fine, des principales sources de pollution installées sur le territoire. Cette investigation sur les émissions des polluants atmosphériques issus, entre autres, de la combustion s'est notamment basée sur les consommations d'énergie permettant également l'évaluation des émissions de dioxyde de carbone et autres GES. Les cadastres intègrent également d'autres sources liées, par exemple, aux émanations produites par l'agriculture. Les AASQA sont ainsi devenues un maillon indispensable pour évaluer la maîtrise des émissions des polluants et des GES, permettant ainsi d'évaluer le niveau d'intégration et de réussite des politiques intégrées air/climat/énergie.

De la surveillance et l'observation, les AASQA ont progressivement évolué vers une mission non seulement d'information des résultats des mesures mais aussi de communication pour sensibiliser le grand public et les élus. Elles s'orientent même vers un rôle d'accompagnement des différents acteurs en produisant des diagnostics de pollution atmosphérique (concentrations et émissions voire énergie) et en évaluant à travers des scénarios la pertinence des projets quant à la maîtrise de la pollution. Le dépassement

² La loi Laure du 30 décembre 1996 (loi sur l'air et de l'utilisation rationnelle de l'énergie), vise à rationaliser l'utilisation de l'énergie et à définir une politique publique intégrant l'air en matière de développement urbain : « La mise en œuvre du droit reconnu à cha-

cun à respirer un air qui ne nuise pas à sa santé consiste à prévenir, à surveiller, à réduire ou à supprimer les pollutions atmosphériques, à préserver la qualité de l'air et, à ces fins, à économiser et à utiliser rationnellement l'énergie ».

récurrent des normes constaté par les AASQA impose des actions de prévention d'autant plus urgentes à mettre en œuvre que la connaissance sur les méfaits sanitaires des polluants et particulièrement des particules s'est beaucoup développée. Avec le chiffre impressionnant de 48 000 morts par an avancé par Santé publique France, il est urgent d'agir. Réduire la pollution urbaine, c'est aussi obéir aux injonctions de l'Europe (cf. ci-dessus).

Le cadre de l'action

Il appartient à l'État, signataire des directives européennes, d'organiser la maîtrise de la pollution de l'air. Au lendemain de la loi sur l'air de 1996 (la LAURE), le gouvernement français avait tenté, à travers les plans de protection de l'atmosphère (PPA), de donner un cadre réglementaire pour mettre en place des actions pour maîtriser la pollution urbaine tandis que les PDU (plans de déplacements urbains) devaient diminuer la mobilité motorisée et promouvoir les transports en commun. Au fil des ans, le champ de la pollution s'est beaucoup élargi, alors que la pollution industrielle diminuait, celle-ci est devenue, urbaine, automobile, agricole, domestique etc. Le nombre d'acteurs détenant des leviers permettant de mettre en œuvre des actions de prévention a beaucoup augmenté à telle enseigne qu'actuellement, la pollution est « l'affaire de tous ». La convergence entre la maîtrise des polluants et celle des gaz à effet de serre a, au plan national, intégré la pollution atmosphérique, à travers le PREPA (Plan national de Réduction des émissions de Polluants Atmosphériques) au sein de la loi de transition énergétique, (article 64) puisque la disparition progressive des énergies fossiles ne peut qu'être favorable à la qualité de l'air. Ce décret transpose en droit français les objectifs européens définis par la directive (UE) 2016/2284 (voir [Tableau 5](#)). La décentralisation encore balbutiante a rendu difficile la synergie entre tous les acteurs ; l'État, dans son rôle régalién, détient seul la possibilité de légiférer pour permettre aux collectivités locales de mettre en œuvre des dispositifs innovants. C'est encore la réglementation qui fixe les normes à suivre pour réduire la consommation énergétique des maisons. La loi dite Grenelle 2 de l'environnement a en 2013 instauré les schémas régionaux Climat Air Energie (SRCAE) copilotés par le préfet de région et le président du Conseil régional. Ces SRCAE ont été intégrés entre-temps dans les Schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) et la réforme territoriale a fait des régions les chefs de file des politiques atmosphérique et énergétique.

En France, l'État, sous la pression des injonctions de l'Europe (cf ci-dessous), a mis en place des dispositifs pour exhorter les collectivités locales à investir dans des mesures locales en faveur de la qualité de l'air. Le 12 décembre 2016, l'ADEME a lancé l'édition 2017 de l'appel à projets intitulé AACT-Air (Aide à l'action des collectivités territoriales et locales en faveur de la qualité de l'air). Depuis 2015, 20 villes bénéficient du label : « Villes respirables en 5 ans » Pendant 5 ans, elles bénéficient d'un appui financier et méthodologique de l'État (jusqu'à un million d'euros par lauréat et des taux bonifiés aux collectivités qui s'engagent dans la création d'une zone à circulation restreinte ou des actions particulièrement innovantes). Ce dispositif vise à

faire émerger des « villes laboratoires » volontaires, situées dans une zone couverte par un PPA, pour mettre en œuvre des mesures exemplaires pour la reconquête de la qualité de l'air, afin de garantir à leurs habitants, dans un délai de cinq ans, un air plus sain.

Les villes, encouragées par les aspirations des citoyens à habiter une ville respirable, s'investissent dans des actions intégrées air/énergie/climat qui s'articulent autour des innovations numériques ou météorologiques et des bénéfices sanitaires obtenus à l'aide de politiques environnementales qui bouleversent les habitudes de l'administration.

La pollution des grandes agglomérations

La pollution des grandes agglomérations est préoccupante ; elle se combine à de fortes émissions de GES. Plus de 50 % de la population mondiale vit dans les villes depuis juillet 2007 (en Europe c'est 77 %) et ce sera 70 % en 2050. Les villes émettent actuellement environ 80 % des gaz à effet de serre de la planète entière. En France, 19 agglomérations dépassent les normes européennes et montrent l'insuffisance des solutions utilisées jusqu'à maintenant pour assainir l'air des villes. L'amélioration de la technologie des véhicules et le développement des transports en commun préconisés par les plans de déplacement urbains (PLU) ont permis de diminuer les émissions rejetées par kilomètre parcouru mais la mobilité motorisée tarde à diminuer (l'effet rebond traduit une utilisation plus intensive grâce à l'amélioration des performances). Les PCAET imposés par la loi (cf ci-dessus) doivent permettre aux agglomérations de miser sur un bénéfice sanitaire immédiat en appliquant des mesures couplées air/climat.

Ainsi les villes européennes cherchent à mettre en œuvre des solutions pour réduire les émissions automobiles en ville. Ainsi, 232 « *Low Emission Zones* » ont été mises en place dans 12 pays d'Europe. En France, le principe des ZCR (zones à circulation restreinte) est soutenu par la loi de transition énergétique, le dispositif fonctionne selon une sélection des véhicules autorisés³ à pénétrer dans le centre-ville en fonction de leur ancienneté et donc de leur appartenance à un niveau de norme Euro. Cette sélection peut être étendue à toute l'agglomération en cas de pics de pollution. La présence d'une LEZ, comme celle d'un péage urbain, devrait, en théorie, accélérer la transformation du parc automobile et encourager la disparition du moteur thermique et contribuer à augmenter l'adhésion aux modes doux ou bien même à la diminution de la fréquentation des centres villes.

Les villes sont confrontées à la complexité de la pollution atmosphérique urbaine dont la diminution ne peut s'imaginer qu'en envisageant, sur le long terme, un ensemble de solutions impliquant l'habitat, l'urbanisme de la ville et les possibilités de mobilité qu'elle offre.

L'intérêt pour les conditions de production et de consommation des énergies nouvelles suscite des innovations et des expérimentations qui portent des enjeux (économiques) nouveaux par rapport aux systèmes techniques environne-

³ Les vignettes « La vignette Crit'Air » est un macaron posé de manière visible sur les voitures, motos et véhicules légers indiquant leur niveau de pollution en fonction de leur date d'immatriculation.

mentaux (eau, déchets) qui ont fait leur preuve depuis longtemps.

Les services de la ville jouent un rôle important pour mettre en réseau différents partenaires et accompagner les initiatives locales. La nouveauté de ce contexte alimente la créativité des entrepreneurs tentés par la mise en œuvre d'expérimentations intéressantes pour la vie urbaine et créatrice d'emplois de proximité non plus seulement dans les grands groupes industriels mais aussi dans un ensemble de PME qui ont vu tout le profit qu'elles pouvaient tirer d'une collaboration avec la ville pour créer un développement économique endogène. Qu'il s'agisse du covoiturage et de ses différentes déclinaisons, du transport à la demande et autres taxis-motos, des systèmes d'autopartage et de vélos en libre-service des pedibus et vélobus, la palette des services à la mobilité n'a cessé de s'enrichir ces dernières années en s'appuyant sur le développement des systèmes numériques ; les innovations se développent dans de nombreux secteurs aussi bien techniques que sociaux : recherche de bâtiments économes en énergie, densification urbaine, réflexions sur les modes de transport, bénéfique sanitaire etc.

Ces nouveaux outils avec une grande flexibilité de formes, permettent à tous les acteurs de la ville d'imaginer la ville et la mobilité du futur tout en restant inclusive. Une partie des habitants a dû trouver un logement en dehors du centre qui doit rester accessible à des populations et à des activités variées. Or, ces aspects innovants ont tendance à privilégier la ville centre par rapport à la périphérie et les habitants les plus aptes à s'investir dans de nouvelles technologies.

Conclusion

La gestion de la qualité de l'air par les normes a permis, dans un premier temps d'encourager la dépollution par les contrôles effectués à la sortie des cheminées ou des pots d'échappement, « *end of pipe* » ; puis le développement durable a permis de réduire les émissions à la source et d'améliorer l'efficacité des systèmes de production en limitant les externalités. Cette démarche suppose une révolution culturelle qui impose, au nom d'un bénéfice sanitaire pour tous, de repenser les différents secteurs de l'activité humaine avec un système énergétique débarassé des combustibles fossiles, une agriculture raisonnée limitant les intrants et les pesticides et des entreprises « propres ». Mais cette orientation est-elle possible sans repenser à des modes de consommation plus sobres favorisant les circuits courts et les possibilités de recyclage ? Sans transférer dans d'autres pays la charge de la fabrication des produits consommés avec les pollutions induites ? Dans cette perspective, le changement climatique et la maîtrise des pollutions s'inscrivent dans une nouvelle économie de la sobriété et du recyclage qu'il convient de construire pour l'ensemble de la planète grâce à un meilleur investissement collectif pour un environnement plus salubre et une société plus conviviale. La réussite d'une telle entreprise suppose la mise en place de nouveaux indicateurs permettant d'évaluer la maîtrise des flux de matière et la circularité de l'économie. La diversité des situations et des contextes contribue-t-elle à sonner le glas des normes dans le cadre

de l'émergence d'une société des individus qui refusent la standardisation des politiques ?

Conseils à donner aux patients concernant la pollution atmosphérique

Les campagnes médiatiques ont permis de sensibiliser la population aux effets sanitaires de la pollution atmosphérique. Pour autant, la qualité des messages délivrés ainsi que leur compréhension par la population laissent parfois à désirer. Le rôle éducatif des médecins, notamment le médecin traitant et le pneumologue, est particulièrement important sur ce sujet.

Les messages délivrés aux patients et plus généralement au public doivent être simples, facilement compréhensibles et les mesures de protection proposées à titre individuel faciles à mettre en œuvre. Les informations doivent reposer sur les données scientifiques établies ou, au minimum, faire l'objet d'un consensus fort au sein de la communauté scientifique. Il faut donc faire la distinction entre les informations destinées aux patients et plus généralement au public et celles qui sont destinées aux décideurs (autorités sanitaires et autorités politiques), par nature plus complexes.

Le premier message est de faire connaître aux patients les effets délétères de la pollution atmosphérique sur la santé. Ces effets sont rappelés plus haut dans ce texte. Bien évidemment, il convient de rappeler que :

- les effets sanitaires de l'exposition chronique aux polluants sont plus graves que ceux provoqués par les pics de pollution ;
- la pollution de l'air ne concerne pas seulement l'air extérieur mais concerne aussi l'air intérieur ;
- la pollution de l'air extérieur n'est pas exclusivement urbaine.

Il faut certainement insister sur le fait que, parmi les facteurs de risque de mortalité recensés en 2015 à l'échelle planétaire, si le tabagisme figure en deuxième position après l'hypertension artérielle, la pollution atmosphérique particulaire arrive en cinquième position [81]. Pour aider dans cette communication avec le patient, les médecins devraient pouvoir s'appuyer sur des documents d'information établis par les sociétés savantes à destination des patients, à l'instar ce qu'ont fait l'*American Thoracic Society* et l'*European Lung Foundation* [82,83].

Le second point est d'amener les personnes à déterminer si elles font partie d'un groupe à risque. Il s'agit essentiellement des enfants, des personnes âgées, des femmes enceintes, des malades atteints de pathologies respiratoires chroniques (asthme, BPCO, fibrose pulmonaire,...), des malades atteints de pathologies cardiovasculaires chroniques. L'appartenance à un groupe à risque implique d'être particulièrement sensibilisé et donc de se tenir régulièrement informé des niveaux de pollution ambiant, d'en parler régulièrement avec son médecin traitant et avec son ou ses médecins spécialistes concernés, au premier rang desquels le pneumologue, et de connaître les mesures individuelles à prendre dans la vie courante notamment en cas de pic de pollution.

Pour se tenir informé de son niveau individuel d'exposition à la pollution atmosphérique, les sources

d'information sont multiples : médias, panneaux urbains, sites internet, applications sur smartphone et, depuis peu, capteurs individuels. La présentation des données sur la pollution est nécessairement simplifiée en s'appuyant sur des standards de qualité de l'air et des seuils publiés par divers organismes (OMS, Union européenne, ...) [84,85]. Ces standards ont pour but de protéger la santé non seulement les individus normaux mais également des individus à risque. Les seuils sont critiquables car il n'y a pas de démonstration de seuils en dessous desquels il n'y a pas de risque sanitaire d'où leur actualisation régulière en fonction des données scientifiques et de ce qui est acceptable pour la population à un moment donné. La présentation simplifiée des données fait souvent appel à des codes couleurs ou à des indices de pollution comme par exemple l'indice ATMO [86]. Ce dernier, utilisé dans les agglomérations de plus de 100 000 habitants est déterminé à partir d'un ensemble de sous-indices représentant chacun un polluant de l'air : SO₂, NO₂, O₃ et PM₁₀. Les indices de qualité de l'air sont régulièrement publiés dans la presse, affichés sur les panneaux urbains, accessibles sur les sites internet. Les applications sur smartphone (avec géolocalisation) et plus récemment les capteurs individuels permettent d'affiner considérablement les informations sur la pollution à l'échelle de l'individu et permettent de personnaliser les conseils. Il est probable que ces nouvelles technologies connaîtront un essor important.

Il importe cependant de bien encadrer la compréhension de ces données devenues particulièrement riches. En effet, il existe un risque de mettre l'accent sur les pics de pollution au détriment de la pollution de fond, plus dangereuse. De surcroît, une communication trop anxiogène peut aboutir paradoxalement à une augmentation du recours aux services médicaux d'urgence en cas de pic de pollution [87].

L'objectif de ces informations est bien évidemment de permettre à l'individu de réduire son niveau d'exposition à la pollution atmosphérique. Il est établi que la prévalence des symptômes respiratoires dans une population varie en fonction de la distance entre le lieu d'habitation et les voies de circulation à fort trafic [88,89]. S'il est difficile de choisir son habitation en ville en fonction de ce critère, il peut être plus aisé de décider de son mode de transport intra-urbain pour limiter son exposition aux agents polluants. Différentes études ont comparé les niveaux d'exposition aux particules ou au NO₂ en fonction du mode de transport choisi : métro, bus, voitures individuelles, tramway, vélo, marche à pied [90–92]. À Paris, les usagers du métro sont particulièrement exposés aux particules PM_{2,5}, tandis que les automobilistes sont particulièrement exposés au NO₂ [90]. Les piétons pour leur part sont particulièrement exposés aux polluants atmosphériques lorsqu'ils marchent à côté sur une voie à fort trafic et ceci peut entraîner des effets physiologiques néfastes sur les bronches et sur le cœur [29].

Une question souvent posée par les patients porte sur l'exercice physique (jogging ou vélo) en milieu urbain. Différentes études ont montré que l'exercice physique par l'augmentation de la ventilation aggravait l'inhalation d'agents polluants [93,94]. Cependant, les études épidémiologiques montrent que les bénéfices de l'exercice physique sur la santé l'emportent sur les risques liés à l'augmentation d'inhalation d'agents polluants urbains [92,95]. Il faut néanmoins bien évidemment recommander de marcher, courir ou

faire du vélo en évitant autant que possible les voies à forte circulation, les zones les plus polluées et les périodes de pic de pollution, notamment pour les personnes à risque. Il sera possible dans un avenir proche de s'aider des capteurs individuels pour choisir son trajet.

Une autre question fréquemment posée par les patients porte sur l'intérêt du port de masque en milieu urbain. Rappelons qu'il existe plusieurs types de masques, notamment des masques filtrants qui protègent contre l'inhalation de particules mais pas contre l'inhalation de gaz mais aussi des masques isolants contre l'inhalation de gaz, sans oublier des masques textiles utilisés dans certains pays. Tous ces masques ne sont pas équivalents pour protéger contre la pollution atmosphérique [96]. Peu d'études cliniques ont évalué rigoureusement l'efficacité clinique du port de masques dans ce contexte. Deux études chinoises ont démontré, lors d'une marche pendant deux heures dans le centre de Pékin, un effet bénéfique du port de masques anti-particulaires FFP1 à soupape sur la pression artérielle systolique, la variabilité de la fréquence cardiaque et, chez des sujets coronariens, le sous-décalage du segment ST [97,98]. Dans l'état actuel des connaissances, certains masques anti-particulaires semblent efficaces cliniquement mais ce ne sont pas des masques courants et ils sont relativement gênants à porter. Les masques chirurgicaux et les masques en tissu n'ont pas d'intérêt démontré par des études cliniques.

Lors des pics de pollution, il existe une procédure d'alerte [99]. Cette procédure concerne 4 polluants : les particules (PM₁₀), le dioxyde de soufre (SO₂), l'ozone (O₃), et le dioxyde d'azote (NO₂). Elle comporte deux niveaux de gravité croissante : un premier niveau dit d'information et de recommandation et un second niveau dit d'alerte. Le premier niveau est déclenché quand le seuil prédéfini d'un des 4 polluants est atteint. Cela déclenche des actions d'information de la population avec des recommandations sanitaires aux catégories de la population particulièrement sensibles et des recommandations et mesures visant à réduire certaines des émissions polluantes. Le niveau d'alerte est déclenché quand le seuil prédéfini d'un des 4 polluants est atteint ou risque de l'être et déclenche les actions prévues au premier niveau, mais aussi des mesures de restriction ou de suspension des activités concourant à la pollution, y compris, le cas échéant, de la circulation des véhicules.

En cas de pic de pollution, les mesures à prendre sont clairement indiquées sur le site Internet du Ministère des Solidarités et de la Santé [100]. En résumé, en cas de dépassement des seuils d'information, il est recommandé pour les personnes à risque :

- de limiter les activités physiques et sportives intenses, autant en plein air qu'à l'intérieur ;
- de limiter les déplacements sur les grands axes routiers et à leurs abords aux périodes de pointe ;
- en cas de symptômes ou d'inquiétude, de prendre conseil auprès du pharmacien ou de consulter son médecin ou une permanence sanitaire locale lorsqu'elle est mise en place ;
- en cas de pollution à l'ozone, de limiter les sorties durant l'après-midi et les activités physiques et sportives intenses en plein air, celles à l'intérieur pouvant être

maintenues car les concentrations d’ozone y sont réduites ce qui n’est pas le cas pour les autres polluants majeurs.

Pour la population générale, il n’est pas nécessaire de modifier ses activités habituelles. En cas de dépassement des seuils d’alerte, il est recommandé pour les personnes à risque :

- d’éviter les activités physiques et sportives intenses, autant en plein air qu’à l’intérieur et de reporter les activités qui demandent le plus d’efforts ;
- d’éviter les déplacements sur les grands axes routiers et à leurs abords ;
- en cas de gêne respiratoire ou cardiaque (par exemple : essoufflement, sifflement, palpitations), de prendre conseil auprès de son pharmacien ou de consulter un médecin ou une permanence sanitaire locale lorsqu’elle est mise en place ; de privilégier des sorties plus brèves et celles qui demandent le moins d’effort ;
- de prendre conseil auprès de son médecin pour savoir si le traitement en cours doit être adapté le cas échéant ;
- en cas d’épisode de pollution à l’ozone, d’éviter les sorties durant l’après-midi et les activités physiques et sportives intenses en plein air, celles peu intenses à l’intérieur pouvant être maintenues.

Pour la population générale, il est recommandé ;

- de réduire les activités physiques et sportives intenses (en cas d’épisode de pollution à l’ozone, les activités physiques et sportives intenses à l’intérieur peuvent être maintenues) ;
- en cas de gêne respiratoire ou cardiaque (par exemple : essoufflement, sifflements, palpitations), de prendre conseil auprès de son pharmacien ou de consulter son médecin ou une permanence sanitaire locale lorsqu’elle est mise en place.

On ajoutera que lors des pics de pollution, les personnes à risque doivent être vigilantes et respecter les conseils de manière particulièrement attentive et les patients sous traitement doivent bien suivre leurs prescriptions, se munir lors de leur sortie des médicaments de secours et consulter si des symptômes apparaissent ou s’aggravent notablement. Il faut rappeler que les effets sanitaires néfastes des pics de pollution atmosphérique peuvent se manifester dans les jours qui suivent le pic et pas forcément le jour même. Enfin, il ne faut pas perdre de vue :

- que nous passons environ 80 % du temps dans les locaux et qu’il importe en conséquence de préserver la qualité de l’air intérieur ;
- que nous pouvons en tant que citoyen œuvrer pour améliorer la qualité de l’air que nous respirons.

Coût de la pollution atmosphérique

Le rapport du Sénat publié en 2015 est consacré à ce sujet complexe qui met en jeu une méthodologie faisant appel à des approches épidémiologiques et économiques [101]. Les études épidémiologiques permettent d’estimer l’impact de polluants sur la prévalence de certaines pathologies et sur le nombre de décès prématurés attribuables à la pollution. Ces études permettent de proposer des relations

« exposition—risque ». Il est ainsi possible de quantifier les relations entre des indicateurs d’exposition (concentration d’un polluant dans l’air) et le risque sanitaire associé tel que décès prématurés, admissions hospitalières, arrêt de travail, consultation aux urgences, crise d’asthme. Une estimation des cas attribuables à la pollution dans la population étudiée est alors possible. L’estimation du risque attribuable est une autre approche qui permet d’exprimer en pourcentage la part de la maladie qui est expliquée par l’exposition à la pollution de l’air. Une seconde étape est de valoriser le coût des effets sanitaires de la pollution. Le consentement à payer est une approche qui permet de valoriser les décès prématurés. Quelle somme un individu est-il prêt à payer pour réduire le risque de décès ? Ce concept de valeur de vie statistique, aussi appelé valeur d’évitement d’un décès, a conduit à proposer des valeurs croissantes avec le temps 525 000 € en 2000 à 3 millions d’euros en 2013. L’application de cette valeur au nombre de décès permet d’évaluer le coût des dommages sanitaires liés à la pollution de l’air en termes de mortalité. Il est également possible d’utiliser la valeur d’une année de vie qui fait référence à l’effort que la collectivité est prête à consentir pour augmenter l’espérance de vie d’une année. Le chiffre fourni par le programme de recherche européen *Needs* est de 41 000 € par année de vie perdue.

La valorisation monétaire de la morbidité est encore plus complexe. Dans le rapport dit « Boiteux », le coût de morbidité était estimé à 30 % du coût de la mortalité attribuable à la pollution de l’air. La Commission européenne a pris en compte différentes composantes des coûts de morbidité : les coûts financiers liés à la maladie (traitement médical), les coûts d’opportunité (perte de productivité), les coûts liés à la perte de loisirs et de travail domestique et enfin des coûts intangibles comme le coût de la souffrance des sujets malades et de leur entourage, de l’altération de la qualité de vie. Les coûts intangibles et notamment les coûts liés à la perte de loisirs et du travail domestique sont des biens qui n’ont pas de prix et leur évaluation monétaire est source de nombreux problèmes méthodologiques.

L’analyse économique distingue ainsi le coût sanitaire et non sanitaire qui pour chacun d’entre eux peuvent être tangibles (marchands) et non tangibles (non marchands) (Fig. 10).

Il est important également de prendre en compte les effets immédiats après une exposition de courte durée et les effets à long terme après des expositions répétées ou continues tout au long de la vie. L’exposition chronique à la pollution de l’air conduit aux impacts les plus importants sur la santé.

Globalement, en France, le rapport du Sénat estime à environ 101,3 milliards d’euros par an le coût de la pollution [101]. Parmi les coûts non sanitaires il faut évoquer par exemple les effets sur le rendement agricole qui est diminué, sur les matériaux du bâti qui peuvent être dégradés et enfin sur les écosystèmes qui peuvent entraîner une réduction de la croissance des plantes. Parmi les coûts sanitaires, estimé entre 68 et 97 milliards d’euros par an en France, on distingue d’une part les coûts indirects liés à l’impact socioéconomique de la pollution et les coûts directs liés aux dépenses de santé qui en France seraient estimés à environ 3 milliards d’euros [101]. Le rapport de l’OCDE publié en

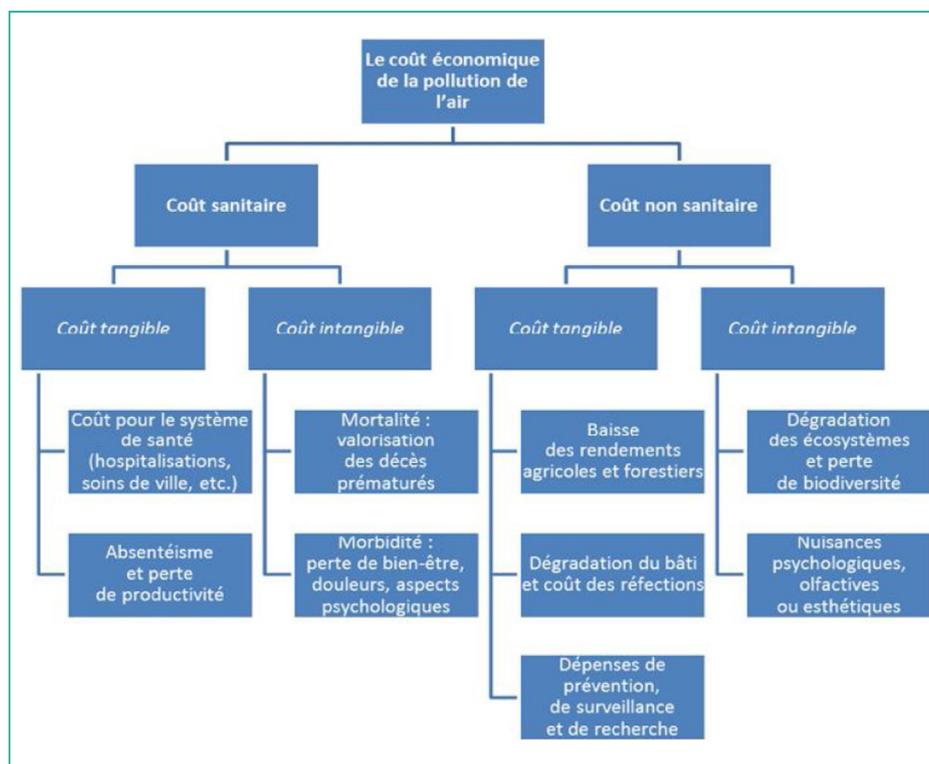


Figure 10. Aperçu synthétique du coût économique de la pollution de l'air [1].

2016 sur les performances environnementales de la France estime le coût de la mortalité liée à la pollution par les particules fines à près de 51 millions d'euros par an [102].

Un travail publié en 2015 estime les coûts pour le système de soins français de cinq maladies respiratoires et des hospitalisations attribuables à la pollution de l'air [103]. Ce travail met bien en exergue les problèmes méthodologiques liés à l'imputabilité de la pollution dans les événements sanitaires étudiés à savoir la bronchite chronique simple, la BPCO, l'asthme, les bronchites aiguës, les cancers et enfin les hospitalisations. L'air extérieur n'est pas le seul responsable des pathologies étudiées qui peuvent aussi être favorisées par la qualité de l'air intérieur, le tabagisme, une exposition professionnelle particulière. Seule la fraction attribuable à l'environnement hors tabac et exposition professionnelle a été prise en compte dans l'imputabilité. L'étude exploite la partie « offre de soins » en y intégrant les indemnités journalières. L'absence de données liées aux seules pathologies imputables à la pollution n'a pas permis de valoriser certains aspects logistiques comme par exemple le transport. Globalement il existe probablement une sous-estimation des coûts du fait d'une connaissance incomplète des examens complémentaires et des traitements prescrits.

Les coûts attribuables à l'environnement sont calculés comme le produit du nombre de cas par la fraction attribuable à l'environnement et le coût par cas. L'estimation de la fraction attribuable par pathologies est un exercice pour le moins délicat faisant appel à diverses hypothèses que nous ne pouvons détailler ici. Les auteurs fournissent pour chaque pathologie une estimation du coût annuel selon le degré de gravité de la pathologie avec une valeur haute et basse.

Le Tableau 6 résume le résultat de ce travail qui chiffre le coût sanitaire des maladies respiratoires en France dans l'intervalle de 0,9 à 1,8 milliards d'euros par an.

En Europe l'OCDE et l'OMS estiment en 2015 le coût de la pollution intérieure et extérieure à environ 1300 milliards d'euros par an [104]. Les projections mondiales de l'OCDE et de l'OMS prévoient un passage du coût annuel par habitant de 470 \$ en 2015 à 2400 \$ en 2060 [105].

Les coûts de la pollution sont probablement sous-évalués car persistent des incertitudes sur les impacts à long terme des polluants sur la santé, sur les effets sanitaires des cocktails de polluants, sur les effets non sanitaires qui restent mal documentés et enfin des difficultés méthodologiques propres aux méthodes de valorisation notamment des coûts intangibles.

Par ailleurs, différents travaux suggèrent des bénéfices sanitaires associés à la baisse des émissions de polluants. Ainsi, à échéance 2030, l'INERIS prévoit que le respect des nouveaux plafonds d'émissions nationaux (directive européenne) pourrait induire en France des bénéfices sanitaires annuels de l'ordre de 17,7 milliards d'euros pour un coût des mesures de réduction estimée à 6,4 milliards d'euros par an soit un gain annuel net de plus de 11 milliards d'euros [104].

Synthèse du document

Nature et origine de la pollution atmosphérique

La pollution a changé de nature : autrefois plutôt d'origine industrielle (poussières, oxydes de soufre), elle est aujourd'

Tableau 6 Coûts imputables à la pollution de l'air de cinq maladies respiratoires et des hospitalisations [103].

Nature de la pathologie et des hospitalisations	Nombre annuel de nouveaux cas attribuables à l'environnement	Coût annuel pour le système de soins de nouveaux cas attribuables à l'environnement			
		Valeur basse	Valeur haute	Valeur basse	Valeur haute
<i>Broncho-pneumopathies chroniques obstructives (BPCO)</i>	47 900	72 000		123 millions €/an	186 millions €/an
<i>Bronchite chronique</i>	120			72 millions €	
<i>Bronchite aiguë</i>					
<i>Asthme*</i>	Enfants 450 218 Adultes 500 000			170,9 million€	
<i>Cancer des voies respiratoires</i>	400 000	1 400 000		314,9 millions €	1,102 milliard €
Voies respiratoires basses (poumons, bronches, plèvre)	1 608	4 020		50,2 millions €	131,3 millions €
Voies respiratoires hautes (lèvres, cavités orales, pharynx)	76	380			
<i>Hospitalisation</i>					
Pour causes respiratoires	13 796			155 millions €	
Pour causes cardiovasculaires	19 761				
<i>Total</i>				886 millions €	1,817 milliard €

* : Pour l'asthme, il s'agit de l'ensemble des cas d'asthme pris en charge au cours de l'année et pas seulement des nouveaux cas.

hui principalement dominée par les émissions ayant pour origine des installations de chauffage et des échappements de véhicules.

L'ozone, représentant des polluants secondaires photo-chimiques, est un polluant particulier : il n'est pas généré directement par les activités humaines mais formé dans la basse atmosphère à partir de polluants primaires précurseurs et sous l'action des ultraviolets. Il a une diffusion régionale et prédomine en été.

Le trafic routier est la principale source des oxydes d'azote, qui sont toutefois en diminution. Les taux sont plus élevés en hiver et le long des axes routiers. Le chauffage résidentiel et le tertiaire (services dont commerces) représentent la source principale des particules fines (PM₁₀). La part des transports diminue. Les particules plus fines (PM_{2,5}) génèrent davantage d'effets sanitaires. Les pics de pollution primaire peuvent être engendrés par accumulation locale (conditions anticycloniques) ou transport de polluants à longue distance.

Évolution des concentrations en polluants atmosphériques

Dans les pays développés, dont la France, la qualité de l'air s'améliore lentement mais régulièrement, y compris en ce

qui concerne les particules fines (PM_{2,5}), mais les taux ne respectent pas encore certaines normes pour la protection de la santé.

Rôle du réchauffement climatique dans l'évolution des polluants atmosphériques

Le réchauffement climatique va augmenter les dépassements des taux d'ozone en été et aussi la pollution particulaire du fait de la multiplication des feux de forêts.

Pollution et maladie respiratoires : mécanismes physiopathologiques

Il s'agit essentiellement de stress oxydant, de remodelage et inflammation des voies aériennes et de mécanismes immunologiques de facilitation de la sensibilisation allergique.

Effets à court terme des polluants atmosphériques sur la santé

Cet effet est globalement marginal par rapport aux conséquences de la pollution de fond.

Les conséquences sont de nature respiratoire (symptômes irritatifs, exacerbations d'asthme, de BPCO et

de fibrose pulmonaire idiopathique) et cardiovasculaires (troubles du rythme, infarctus), notamment chez le sujet âgé. Chez le patient BPCO, la marche en zone polluée fait perdre le bénéfique ventilatoire de l'exercice.

Les nourrissons et les jeunes enfants représentent une population sensible à risque accru de symptômes ORL et bronchiques.

On parle davantage des pics de pollution car les seuils réglementaires à partir desquels ils sont déclenchés ont été abaissés. Ces seuils ne sont pas toujours respectés.

La surmortalité suivant un pic de pollution est encore observée, chez des patients souffrant de maladie cardiovasculaire ou respiratoire chronique, mais n'a plus l'ampleur des années d'après-guerre.

Effets à long terme

En termes d'effets sur la santé, le niveau moyen annuel de pollution, notamment particulaire, a un impact plus important que celui de pics de pollution car les effets chroniques rendent compte de 90 % de la morbidité et mortalité observées.

Les effets sanitaires sont beaucoup mieux connus grâce à des études épidémiologiques puissantes s'appuyant sur des effectifs importants.

On décrit ainsi de « nouveaux » effets sanitaires (sur la croissance, la reproduction, le risque thrombotique ou diabétique) qui passaient jusqu'alors inaperçus avec les méthodes épidémiologiques traditionnelles.

Quinze pour cent des nouveaux cas d'asthme chez l'enfant et de cancer bronchique chez l'adulte et 20 % à 30 % des cas de BPCO seraient liés à la pollution atmosphérique. Le lien avec la fibrose pulmonaire idiopathique et ses exacerbations a récemment été mis en évidence.

La pollution atmosphérique, notamment particulaire, réduirait l'espérance de vie de l'ordre de 6 à 8 mois chez les citoyens français.

À l'inverse, on a pu mettre en évidence l'effet bénéfique de la réduction de la pollution particulaire de fond sur la croissance pulmonaire d'adolescents, sur la mortalité respiratoire et l'espérance de vie en général.

Que faut-il penser du diesel ?

Le bénéfice des moteurs diesel en termes de production de gaz à effet de serre est remis en question.

La composition des émissions diesel a changé à partir de 2011 avec la mise en place des filtres à particules. Néanmoins, ces filtres n'arrêtent pas toutes les particules les plus fines, peuvent en générer et produisent davantage d'oxydes d'azote. Ils ne sont efficaces que lorsque le moteur est chaud.

Le moteur diesel n'a pas l'apanage de la pollution particulaire ni de l'émission de composés organiques volatils qui sont également émis par les moteurs à essence et le chauffage au bois à foyer ouvert.

Le parc diesel se réduit fortement (47 % des véhicules neufs en 2017 contre 73 % en 2011).

Dans d'autres pays européens, d'autres motorisations (GPL, GNV) sont expérimentées.

La diminution de la consommation des nouveaux véhicules à essence et l'évolution de la taxation des combustibles rendent moins attractif l'achat d'un véhicule diesel.

Moyen de contrôle/maîtrise

Même respectées, les normes ne mettent pas à l'abri d'un effet sanitaire puisqu'à l'unicité de la norme correspond la grande diversité des expositions.

Les normes représentent un compromis entre ce qui est souhaitable et ce qui est économiquement faisable.

Aux normes de taux aériens se sont ajoutées, pour les états membres de l'Union européenne, des normes d'émission car, dans une démarche de prévention, il est capital de connaître ce qui sort des cheminées ou des pots d'échappement.

Les normes sont le siège de plusieurs tensions : entre l'État, responsable du respect des normes et les collectivités locales qui détiennent tous les leviers pour réduire les émissions ; tension entre la gestion par les normes, appuyée sur des critères temporels focalisés sur le court terme et une gestion plus spatiale et territoriale appuyée sur les cartes et les actions déployées sur un temps plus long.

La recherche de la maîtrise des polluants et des gaz à effet de serre a suscité de nombreuses innovations urbaines.

Conseils à donner aux patients concernant la pollution atmosphérique

Nécessité d'une information claire et prévisionnelle des épisodes de forte pollution.

Observance rigoureuse des traitements à visée respiratoire et cardiaque lors d'un épisode de forte pollution.

L'activité physique et sportive impliquant une hyperventilation est déconseillée lors des pics de pollution et au voisinage des voies à grande circulation.

Il n'y a pas lieu de garder les enfants à la maison en cas de pic de pollution, notamment du fait de la présence de polluants domestiques, en premier lieu le tabagisme passif.

Les personnes identifiées comme « sensibles » de par leur âge ou leur état de santé font l'objet de conseils plus restrictifs.

Déclaration de liens d'intérêts

G. Dixsaut : placements et hébergements aux CPLF 2016, 2015 et 2014 pris en charge par Pneumologie Développement. B. Housset : communication Club d'expert Chiesi.

D. Caillaud, J.-C. Dalphin, D. Charpin, I. Annesi-Maesano, F. De Blay, I. Roussel, J. Kleinpeter déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

A. Bourin, T. Chinnet, A. Colette et L. Malherbe déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

Références

- [1] CITEPA. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Format SECTEN; 2017 [https://www.qwant.com/?q=citepa inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre&t=all](https://www.qwant.com/?q=citepa+inventaire+des+émissions+de+polluants+atmosphériques+et+de+gaz+à+effet+de+serre&t=all).

- [2] Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Commissariat général, au développement durable, Bilan de la qualité de l'air en France; 2016 http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Datalab/2017/Datalab-26-bilan-de-la-qualite-de-l-air-en-france-en-2016-oct2017.pdf.
- [3] Malherbe L, Beauchamp M, Bourin A, Sauvage S. Analyse de tendances nationales en matière de qualité de l'air. LCSQA. Verneuil-en-Halatte; 2017 <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/2016/ineris-imt-lille-douai/analyse-tendances-nationales-matiere-qualite-air>.
- [4] Fiore AM, Naik V, Leibensperger EM. Air quality and climate connections. *J Air Waste Manage Assoc* 2015;65:645–85.
- [5] Jacob D, Winner D. Effect of climate change on air quality. *Atmos Environ* 2009;43:51–63.
- [6] Ravishankara AR. New directions: adapting air quality management to climate change: a must for planning. *Atmos Environ* 2012;50:387–9.
- [7] Fang Y, Naik V, Horowitz LW, Mauzerall D. Air pollution and associated human mortality: the role of air pollutant emissions, climate change and methane concentration increases from the preindustrial to present. *Atmos Chem Phys* 2013;13:1377–94.
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Synthesis Report, Contribution of Working Groups 1, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, IPCC: Core writing team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer, ed; 2014.
- [9] Monier E, Gao X, Scott J, Solokov A, Schlosser A. A framework for modeling uncertainty in regional climate change. *Clim Change* 2014;131:51–66.
- [10] Patz JA, Frumkin H, Holloway T, Vimont DJ, Haines A. Climate change: challenges and opportunities for global health. *Jama* 2014;312:1565–80.
- [11] U.S. EPA. Climate change in the United States. Benefits of global action. United States Environmental Protection Agency, Office of Atmospheric Programs; 2015. EPA 430-R-15-001.
- [12] Doherty RM, Heal MR, Wilkinson P, et al. Current and future climate- and air pollution-mediated impacts on human health. *Environ Health* 2009;8:58.
- [13] Tai A, Mickley L, Jacob D. Correlation between fine particulate matter (PM_{2.5}) and meteorological variables in the United States: implication for the sensitivity of PM_{2.5} to climate change. *Atmos Environ* 2010;44:3976–84.
- [14] Spracklen DV, Mickley L, Logan J, et al. Impact of climate change from 2000 to 2050 on wildfire activity and carbonaceous aerosol concentrations in the western United States. *J Geophys Res* 2009;114:D203031.
- [15] Johnston FH, Henderson SB, Chen Y, et al. Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. *Environ Health Perspect* 2012;120:695–701.
- [16] Fuzzi S, Baltensperger U, Carslaw K, et al. Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. *atmos. Chem Phys* 2015;15:521–744.
- [17] Guarneri M, Balmes JR. Outdoor air pollution and asthma. *Lancet* 2014;383:1581–92.
- [18] Khayath N, Qi S, de Blay F. Chronic obstructive pulmonary disease (COPD) and the interior environment. *Rev Mal Respir* 2016;33:666–74.
- [19] Krimmer D, Ichimaru Y, Burgess J, Black J, Oliver B. Exposure to biomass smoke extract enhances fibronectin release from fibroblasts. *PLoS One* 2013;8:e83938.
- [20] Simon I, Charpin D. Respiratory symptoms and atmospheric pollution and respiratory symptoms in the general population. *Rev Mal Respir* 2010;27:625–38.
- [21] Paulin L, Hansel N. Particulate air pollution and impaired lung function. *F1000Research*; 2016. p. 5.
- [22] Peterson BS, Rauh VA, Bansal R, et al. Effects of prenatal exposure to air pollutants (polycyclic aromatic hydrocarbons) on the development of brain white matter, cognition, and behavior in later childhood. *JAMA Psychiatry* 2015;72:531–40.
- [23] Kubesch NJ, de Nazelle A, Westerdahl D, et al. Respiratory and inflammatory responses to short-term exposure to traffic-related air pollution with and without moderate physical activity. *Occup Environ Med* 2015;72:284–93.
- [24] Shah AS, Lee KK, McAllister DA, et al. Short term exposure to air pollution and stroke: systematic review and meta-analysis. *BMJ* 2015;350:h1295.
- [25] Segala C, Fauroux B, Just J, Pascual L, Grimfeld A, Neukirch F. Short-term effect of winter air pollution on respiratory health of asthmatic children in Paris. *Eur Respir J* 1998;11:677–85.
- [26] McCreanor J, Cullinan P, Nieuwenhuijsen MJ, et al. Respiratory effects of exposure to diesel traffic in persons with asthma. *N Engl J Med* 2007;357:2348–58.
- [27] Song Q, Christiani DC, Xiaorong Wang, Ren J. The global contribution of outdoor air pollution to the incidence, prevalence, mortality and hospital admission for chronic obstructive pulmonary disease: a systematic review and meta-analysis. *Int J Environ Res Public Health* 2014;11:11822–32.
- [28] Li J, Sun S, Tang R, et al. Major air pollutants and risk of COPD exacerbations: a systematic review and meta-analysis. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis* 2016;11:3079–91.
- [29] Sinharay R, Gong J, Barratt B, et al. Respiratory and cardiovascular responses to walking down a traffic-polluted road compared with walking in a traffic-free area in participants aged 60 years and older with chronic lung or heart disease and age-matched healthy controls: a randomised, crossover study. *Lancet* 2018;391:339–49.
- [30] Sese L, Nunes H, Cottin V, et al. Role of atmospheric pollution on the natural history of idiopathic pulmonary fibrosis. *Thorax* 2018;73:145–50.
- [31] Atkinson RW, Kang S, Anderson HR, Mills IC, Walton HA. Epidemiological time series studies of PM_{2.5} and daily mortality and hospital admissions: a systematic review and meta-analysis. *Thorax* 2014;69:660–5.
- [32] Pascal M, De Crouy P, Chanel P, et al. Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de réduction de la pollution atmosphérique; 2016.
- [33] Annesi-Maesano I, Dab W. Air pollution and the lung: epidemiological approach. *Med Sci (Paris)* 2006;22:589–94.
- [34] Sanyal S, Amrani F, Dallongeville A, et al. Estimating indoor galaxolide concentrations using predictive models based on objective assessments and data about dwelling characteristics. *Inhal Toxicol* 2017;29:611–9.
- [35] Dab W, Segala C, Dor F, et al. Air pollution and health: correlation or causality? The case of the relationship between exposure to particles and cardiopulmonary mortality. *J Air Waste Manage Assoc* 2001;51:220–35.
- [36] Chen H, Goldberg MS, Villeneuve PJ. A systematic review of the relation between long-term exposure to ambient air pollution and chronic diseases. *Rev Environ Health* 2008;23:243–97.
- [37] Penard-Morand C, Annesi-Maesano I. Allergic respiratory diseases and outdoor air pollution. *Rev Mal Respir* 2008;25:1013–26.
- [38] Jerrett M, Burnett RT, Pope 3rd CA, et al. Long-term ozone exposure and mortality. *N Engl J Med* 2009;360:1085–95.
- [39] Penard-Morand C, Raheison C, Charpin D, et al. Long-term exposure to close-proximity air pollution and asthma and allergies in urban children. *Eur Respir J* 2010;36:33–40.

- [40] Bentayeb M, Helmer C, Raheison C, Dartigues JF, Tessier JF, Annesi-Maesano I. Bronchitis-like symptoms and proximity air pollution in French elderly. *Respir Med* 2010;104:880–8.
- [41] Khreis H, Kelly C, Tate J, Parslow R, Lucas K, Nieuwenhuijsen M. Exposure to traffic-related air pollution and risk of development of childhood asthma: A systematic review and meta-analysis. *Environ Int* 2017;100:1–31.
- [42] Filleul L, Rondeau V, Vandentorren S, et al. Twenty five year mortality and air pollution: results from the French PAARC survey. *Occup Environ Med* 2005;62:453–60.
- [43] Bentayeb M, Wagner V, Stempfelet M, et al. Association between long-term exposure to air pollution and mortality in France: a 25-year follow-up study. *Environ Int* 2015;85: 5–14.
- [44] Beelen R, Raaschou-Nielsen O, Stafoggia M, et al. Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. *Lancet* 2014;383:785–95.
- [45] Beelen R, Hoek G, Raaschou-Nielsen O, et al. Natural-cause mortality and long-term exposure to particle components: an analysis of 19 European cohorts within the multicenter ESCAPE project. *Environ Health Perspect* 2015;123: 525–33.
- [46] Atkinson RW, Butland BK, Dimitroulopoulou C, et al. Long-term exposure to ambient ozone and mortality: a quantitative systematic review and meta-analysis of evidence from cohort studies. *BMJ open* 2016;6:e009493.
- [47] Yu YW, Wang CP, Han YF, et al. Meta-analysis on related risk factors regarding lung cancer in non-smoking Chinese women. *Zhonghua Liu Xing Bing Xue Za Zhi* 2016;37:268–72.
- [48] Hamra GB, Guha N, Cohen A, et al. Outdoor particulate matter exposure and lung cancer: a systematic review and meta-analysis. *Environ Health Perspect* 2014;122:906–11.
- [49] Cui P, Huang Y, Han J, Song F, Chen K. Ambient particulate matter and lung cancer incidence and mortality: a meta-analysis of prospective studies. *Eur J Public Health* 2015;25:324–9.
- [50] Hamra GB, Laden F, Cohen AJ, Raaschou-Nielsen O, Brauer M, Loomis D. Lung cancer and exposure to nitrogen dioxide and traffic: a systematic review and meta-analysis. *Environ Health Perspect* 2015;123:1107–12.
- [51] Raaschou-Nielsen O, Andersen ZJ, Beelen R, et al. Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE). *Lancet Oncol* 2013;14:813–22.
- [52] Hulin M, Simoni M, Viegi G, Annesi-Maesano I. Respiratory health and indoor air pollutants based on quantitative exposure assessments. *Eur Respir J* 2012;40:1033–45.
- [53] Sigsgaard T, Forsberg B, Annesi-Maesano I, et al. Health impacts of anthropogenic biomass burning in the developed world. *Eur Respir J* 2015;46:1577–88.
- [54] Zock JP, Plana E, Jarvis D, et al. The use of household cleaning sprays and adult asthma: an international longitudinal study. *Am J Respir Crit Care Med* 2007;176:735–41.
- [55] Annesi-Maesano I, Hulin M, Lavaud F, et al. Poor air quality in classrooms related to asthma and rhinitis in primary school-children of the French 6 Cities Study. *Thorax* 2012;67:682–8.
- [56] Vernet C, Pin I, Giorgis-Allemand L, et al. In utero exposure to select phenols and phthalates and respiratory health in five-year-old boys: a prospective study. *Environ Health Perspect* 2017;125:097006.
- [57] Clancy L, Goodman P, Sinclair H, Dockery DW. Effect of air-pollution control on death rates in Dublin, Ireland: an intervention study. *Lancet* 2002;360:1210–4.
- [58] Bayer-Oglesby L, Grize L, Gassner M, et al. Decline of ambient air pollution levels and improved respiratory health in Swiss children. *Environ Health Perspect* 2005;113:1632–7.
- [59] Gauderman WJ, Urman R, Avol E, et al. Association of improved air quality with lung development in children. *N Engl J Med* 2015;372:905–13.
- [60] Schikowski T, Schaffner E, Meier F, et al. Improved air quality and attenuated lung function decline: modification by obesity in the SAPALDIA cohort. *Environ Health Perspect* 2013;121:1034–9.
- [61] Friedman MS, Powell KE, Hutwagner L, Graham LM, Teague WG. Impact of changes in transportation and commuting behaviors during the 1996 Summer Olympic Games in Atlanta on air quality and childhood asthma. *JAMA* 2001;285:897–905.
- [62] Yorifuji T, Kashima S, Doi H. Fine-particulate air pollution from diesel emission control and mortality rates in Tokyo: a quasi-experimental study. *Epidemiology* 2016;27:769–78.
- [63] Aichi L. Commission d'enquête du sénat sur le coût économique et financier de la pollution de l'air; 2015. p. 610. http://www.senat.fr/commission/enquete/cout_economique_et_financier_de_la_pollution_de_lair.html, Tome 1.
- [64] https://www.transportenvironnement.org/sites/te/files/2017_09_Diesel_report_final.pdf.
- [65] ANSES. Groupe de Travail « pollens ». État des connaissances sur l'impact sanitaire lié à l'exposition de la population générale aux pollens présents dans l'air ambiant. Rapport d'expertise collective Saisine « n°2011-SA-0151 - Pollens ». Comité d'experts spécialisé « Évaluation des risques liés aux milieux aériens »; 2014. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2011sa0151Ra.pdf>, Groupe de Travail, « pollens ».
- [66] Corso M, Pascal M, Wagner V, et al. Short-term impacts of particulate matter (PM10) on mortality in 17 French cities, 2007-2010. *Bull Epidemiol Heb* 2015;12:14–20.
- [67] Chen H, Kwong JC, Copes R, et al. Living near major roads and the incidence of dementia, Parkinson's disease, and multiple sclerosis: a population-based cohort study. *Lancet* 2017;389:718–26.
- [68] Fritz A, Dugay F, Honoré C, et al. Bilan de l'épisode de pollution de mars 2014 et évaluation de la mise en place de la circulation alternée le 17 mars 2014 en Ile-de-France. *Pol Atm* 2015 [Numéro Spécial].
- [69] Kamasamudram K, Henry C, Yezerets A. N2O Emissions From 2010 SCR Systems; 2011 https://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f8/deer11_kamasamudram.pdf.
- [70] Suarez-Bertoa R, Mendoza-Villafuerte P, Riccobono F, et al. On-road measurement of NH3 emissions from gasoline and diesel passenger cars during real world driving conditions. *Atmos Env* 2017;166:488–97.
- [71] L'argus. Les 30 voitures les plus économiques en France; 2017 <http://www.largus.fr/actualite-automobile/prk-2017-les-30-voitures-les-plus-economiques-en-france-577141-minidiapo.html#ixzz5ESs1dHpN>.
- [72] Yang L, Franco V, Campestrini A, German J, Mock P. NOx control technologies for Euro 6 Diesel passenger cars. Market penetration and experimental performance assessment. <http://www.theicct.org>. International Council Clean Transportation white paper; 2015.
- [73] Mandard S. Dieselgate » : PSA et sa « stratégie globale visant à fabriquer des moteurs frauduleux. https://www.lemonde.fr/economie/article/2017/09/08/dieselgate-psa-et-sa-strategie-globale-visant-a-fabriquer-des-moteurs-frauduleux_5182716_3234.html.
- [74] Le Tertre A, Henschel S, Atkinson RW, et al. Impact of legislative changes to reduce the sulphur content in fuels in Europe on daily mortality in 20 European cities: an analysis of data from the Aphekom project; 2014. p. 83–91.
- [75] SCENARII. https://www.airpaca.org/sites/paca/files/atoms/files/180125_synthese_scenarii.pdf.

- [76] Frioux S, Charvolin F, Kamoun L, Mélard F, Roussel I. Un air familial ? Sociohistoire des pollutions atmosphériques. Presses Mines 2015;236.
- [77] Sainteny G. Le climat qui cache la forêt, Paris, rue de l'échiquier; 2015. p. 267.
- [78] Métropole de Lyon. Enquête Métropolitaine Bois REsidentiel. ADEME; 2016 <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/enquete-metropolitaine-bois-residentiel-rapport-final-vf.pdf>.
- [79] Bertrand F, Rocher L. Les territoires face aux changements climatiques. Une première génération d'initiatives locales. Peter Lang; 2013. p. 239.
- [80] Métropole de Lyon. Plan oxygène; 2016 <https://www.grandlyon.com/projets/amelioration-qualite-air.html>.
- [81] Cohen AJ, Brauer M, Burnett R, et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *Lancet* 2017;389:1907–18.
- [82] Rice M, Balmes J, Malhotra A. Outdoor air pollution and your health. *Am J Respir Crit Care Med* 2016;194:17–8.
- [83] European Lung Foundation. Outdoor air pollution and the lungs. http://www.europeanlung.org/assets/files/en/publications/outdoor_air_pollution.pdf.
- [84] Airparif. Les directives européennes. <http://www.airparif.asso.fr/reglementation/normes-europeennes>.
- [85] WHO. Ambient (outdoor) air quality and health; 2018 <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/f>.
- [86] Atmo France. Indice ATMO. <http://www.atmo-france.org>.
- [87] Lyons RA, Rodgers SE, Thomas S, et al. Effects of an air pollution personal alert system on health service usage in a high-risk general population: a quasi-experimental study using linked data. *J Epidemiol Comm Health* 2016;70:1184–90.
- [88] Hazenkamp-von Arx ME, Schindler C, Ragetti MS, Kunzli N, Braun-Fahrländer C, Liu LJ. Impacts of highway traffic exhaust in alpine valleys on the respiratory health in adults: a cross-sectional study. *Environ Health* 2011;10:13.
- [89] Brauer M, Hoek G, Van Vliet P, et al. Air pollution from traffic and the development of respiratory infections and asthmatic and allergic symptoms in children. *Am J Respir Crit Care Med* 2002;166:1092–8.
- [90] Primequal. Exposition des citoyens aux polluants atmosphériques au cours de leurs déplacements dans l'agglomération parisienne - nouvelle évaluation dix ans après. <https://www.primequal.fr/fr/exposition-des-citoyens-aux-polluants-atmospheriques-au-cours-de-leurs-deplacements-dans>.
- [91] Moreno T, Reche C, Rivas I, et al. Urban air quality comparison for bus, tram, subway and pedestrian commutes in Barcelona. *Environ Res* 2015;142:495–510.
- [92] Cepeda M, Schoufour J, Freak-Poli R, et al. Levels of ambient air pollution according to mode of transport: a systematic review. *Lancet Public Health* 2017;2:e23–34.
- [93] Nwokoro C, Ewin C, Harrison C, et al. Cycling to work in London and inhaled dose of black carbon. *Eur Respir J* 2012;40:1091–7.
- [94] Strak M, Boogaard H, Meliefste K, Oldenwening M, et al. Respiratory health effects of ultrafine and fine particle exposure in cyclists. *Occup Environ Med* 2010;67:118–24.
- [95] Rojas-Rueda D, de Nazelle A, Tainio M, Nieuwenhuijsen MJ. The health risks and benefits of cycling in urban environments compared with car use: health impact assessment study. *BMJ* 2011;343:d4521.
- [96] Patel D, Shibata T, Wilson J, Maidin A. Challenges in evaluating PM concentration levels, commuting exposure, and mask efficacy in reducing PM exposure in growing, urban communities in a developing country. *Sci Total Environ* 2016;543:416–24.
- [97] Langrish JP, Mills NL, Chan JK, et al. Beneficial cardiovascular effects of reducing exposure to particulate air pollution with a simple facemask. *Part Fibre Toxicol* 2009;6:8.
- [98] Langrish JP, Li X, Wang S, et al. Reducing personal exposure to particulate air pollution improves cardiovascular health in patients with coronary heart disease. *Environ Health Perspect* 2012;120:367–72.
- [99] Airparif. La procédure d'information et d'alerte en région Ile-de-France. <http://www.airparif.asso.fr/reglementation/episodes-pollution>.
- [100] Ministère des Solidarités et de la Santé. Se protéger en cas de pic de pollution de l'air. <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/air-exterieur/qualite-de-l-air-exterieur-10984/article/recommandations-en-cas-d-episode-de-pollution>.
- [101] Sénat. Commission d'enquête sur le coût économique et financier de la pollution de l'air. http://www.senat.fr/commission/enquete/cout_economique_et_financier_de_la_pollution_de_lair.html.
- [102] OCDE. Examens environnementaux de l'OCDE : France 2016. Paris: Examens environnementaux de l'OCDE, Éditions OCDE; 2016 <https://doi.org/10.1787/9789264252592-fr>.
- [103] Rafenberg C. Estimation des coûts pour le système de soins français de cinq maladies respiratoires et des hospitalisations attribuables à la pollution de l'air. *Etud Doc* 2015;122:36.
- [104] WHO. Economic cost of the health impact of air pollution in Europe: clean air, health and wealth. http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0004/276772/Economic-cost-health-impact-air-pollution-en.pdf.
- [105] OCDE. Les conséquences économiques de la pollution de l'air extérieur; 2016 <http://www.oecd.org/fr/env/les-consequences-economiques-de-la-pollution-de-l-air-exterieur-9789264262294-fr.htm>.