

Les impacts de la pollution de l'air

Par Eva LEOZ-GARZIANDIA

Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA)

C'est la mise en évidence des effets induits par la pollution atmosphérique qui permet, grâce à une prise de conscience collective, la mise en place de politiques publiques visant à protéger les cibles de la pollution, à savoir la santé humaine et l'environnement, ou, plus largement, les écosystèmes dans leur ensemble. Des nombreuses études nationales et internationales permettent de mieux comprendre les mécanismes d'action de la pollution atmosphérique sur la santé humaine, mais également de chiffrer le nombre de personnes exposées à celle-ci. Les connaissances sur l'impact de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes naturels et agricoles évoluent également et sont sous surveillance, notamment en Europe. En plus des effets observés sur les différents milieux, la pollution atmosphérique a également des conséquences économiques importantes. Enfin, le changement climatique et la pollution de l'air sont étroitement liés. Ainsi, il est nécessaire d'identifier les actions de réduction des émissions s'avérant cobénéfiques dans les deux cas.

L'état du sujet

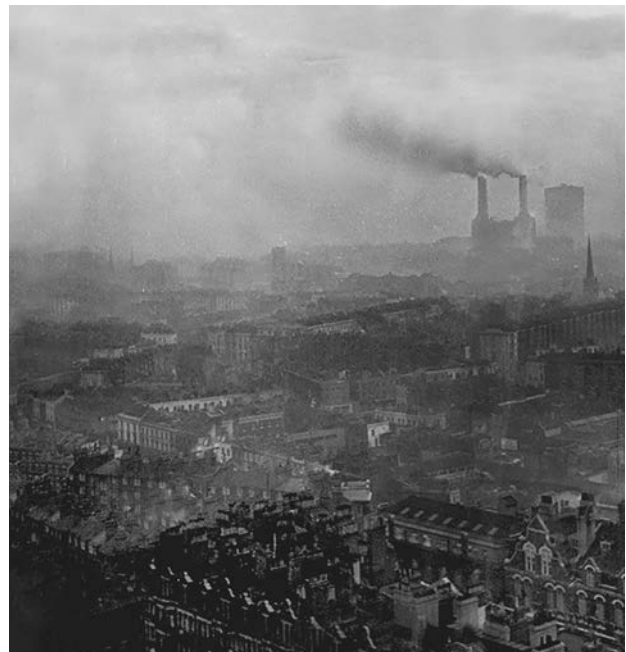
Les effets de la pollution atmosphérique sont divers : ils concernent aussi bien la santé humaine que les écosystèmes naturels (lacs, rivières, forêts, zones agricoles, etc.) et la sauvegarde du patrimoine et des monuments historiques. C'est bien la mise en évidence des effets induits par la pollution atmosphérique, par exemple le fameux *smog* de Londres en 1952 ou les pluies acides qui contaminaient les lacs scandinaves dans les années 1970, qui a permis une prise de conscience collective des enjeux de protection de la santé humaine et des écosystèmes, laquelle s'est traduite par :

- la mise en place des observatoires nationaux et européens de surveillance ;
- la définition des réglementations nationales et internationales imposant des objectifs environnementaux à respecter ;
- la proposition de programmes de recherche pour l'acquisition des connaissances ;
- la mise en œuvre des plans d'action de réduction des émissions et de protection.

En plus des effets observés sur les différents milieux, la pollution atmosphérique a également des conséquences économiques importantes, du fait des pertes induites par les dommages (mortalité, morbidité, baisse des rendements agricoles, baisse d'attractivité des sites touristiques, etc.), et génère une importante perte de bien-être qu'il est cependant difficile de quantifier. La monétarisation des impacts dus à la pollution atmosphérique permet de montrer le coût de l'inaction, de comparer en unité commune les coûts des politiques de lutte contre la pollution atmosphérique avec leurs bénéfices et d'identifier des stratégies « optimales » de réduction de la pollution.

Impacts sanitaires de la pollution atmosphérique

Nous sommes en décembre 1952, à Londres, un brouillard très dense, appelé *smog*, recouvre la ville durant environ cinq jours. Les consultations dans les hôpitaux augmentent et font état d'environ 150 000 personnes hospitalisées. À l'époque, la surmortalité liée à cet épisode a été estimée à environ 4 000 décès lors de celui-ci et des jours



Le Smog de Londres en décembre 1952 (source : *The Guardian*, <https://www.theguardian.com/environment/gallery/2012/dec/05/60-years-great-smog-london-in-pictures>).
Photograph: Associated Newspapers/Rex Fea/Rex Features

qui ont suivi. Depuis, des travaux plus récents ont estimé que le nombre de morts prématurées sous l'effet de ce *smog* se serait élevé à 12 000. Cet épisode est considéré comme la pire pollution atmosphérique de toute l'histoire du Royaume-Uni, voire de l'Europe.

Cet événement est une bonne illustration des effets à court terme ainsi que des effets à long terme ou effets chroniques de la pollution atmosphérique. En effet, alors que les effets à court terme se traduisent par des manifestations cliniques, fonctionnelles ou biologiques (essoufflement, asthme, etc.) survenant dans des délais brefs (quelques jours, semaines) après l'exposition, les effets à long terme ou chroniques induisent le développement de processus pathogènes au long cours (diminution des fonctions respiratoires, maladies chroniques, cancers, etc.) qui peuvent conduire finalement à un événement morbide ou même au décès.

Les différents effets sanitaires observés sont fonction de la composition chimique des polluants et de leur taille (notamment pour les particules), lesquels peuvent se manifester différemment en fonction des caractéristiques de la cible (âge, sexe, etc.), du mode de vie (tabagisme, etc.), de l'état de santé, mais aussi du degré d'exposition (spatiale et temporelle) et de la dose inhalée. Sans pour autant oublier l'exposition de la population à la pollution par d'autres voies comme l'ingestion et la voie cutanée, cette dernière étant marginale pour ce qui concerne la pollution atmosphérique.

Les différents polluants présents dans l'air, qu'ils soient primaires ou secondaires, peuvent ainsi contribuer à la survenue d'effets sanitaires. Dans le cas de Londres, des travaux scientifiques récents incriminent la présence d'acides forts, comme l'acide sulfurique (composé secondaire formé à partir du dioxyde de soufre issu de la combustion du charbon et des oxydes d'azote issus du transport urbain) dans la survenue des effets néfastes constatés (Wang G. *et al.*, "Persistent sulfate formation from London Fog to Chinese haze", *PNAS*, first published November 14, 2016, <https://doi.org/10.1073/pnas.1616540113>).

De plus, le ministère de la Santé précise que des interactions peuvent se produire entre les polluants chimiques de l'air et d'autres facteurs de risque, tels que les pollens ou la température. Dans un document publié en 2013, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) présente les données disponibles les plus récentes dans ce domaine :

- des études toxicologiques confirment que des effets synergiques (c'est-à-dire plus importants quand les polluants sont présents simultanément que pris séparément) ont été observés, au niveau des tissus biologiques, d'une part, entre les particules ultrafines et des métaux de transition, et, d'autre part, entre les particules et les composés organiques volatils ;
- des interactions entre polluants et température élevée ont aussi été notées : il a, par exemple, été observé que l'impact sanitaire associé à une exposition aux particules et à l'ozone était plus important les jours où les températures étaient particulièrement élevées. Une augmenta-

tion des concentrations en particules (PM_{10}) et en ozone a ainsi été associée à une augmentation du nombre total de décès (hors accidents et morts violentes), et du nombre de décès pour causes cardiovasculaires qui est plus important en été qu'en moyenne sur l'année entière. Ce dernier effet peut être dû à des interactions et à une composition particulière du mélange polluant, mais aussi à une exposition plus importante à l'air extérieur en été.

C'est à partir des résultats obtenus lors des études épidémiologiques et toxicologiques que l'OMS définit des lignes directrices relatives à la qualité de l'air visant à dispenser des conseils sur la façon de réduire les effets sanitaires de la pollution de l'air. Ces lignes directrices sont ensuite utilisées comme point de départ par les différents pays afin de définir des objectifs de qualité réglementaires tenant compte de la faisabilité technique, de considérations économiques et autres facteurs politiques et sociaux.

Les experts du Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) ont conclu en octobre 2013 que la pollution atmosphérique était cancérigène pour l'homme, elle est de ce fait classée dans le groupe 1 (cancérogène avéré pour l'homme, au même titre que la matière particulaire (ou particules)). Dans le monde, la pollution de l'air intérieur et extérieur serait responsable d'environ 7 millions de décès en moyenne par an (étude de l'OMS, mars 2014). En septembre 2016, l'OMS évaluait à 92 % la population mondiale respirant un air ambiant trop pollué.

En France, l'Agence nationale de santé publique – Santé Publique France (ANSP) – estime que la pollution par les particules fines ($PM_{2,5}$) émises par les activités humaines est à l'origine d'au moins 48 000 décès prématurés par an, ce qui correspond à 9 % de la mortalité en France continentale et à une perte d'espérance de vie à trente ans pouvant dépasser deux ans. Si les effets de cette pollution sont plus importants dans les grandes villes, les villes moyennes et petites ainsi que les milieux ruraux sont aussi concernés.

En 2012, l'étude Aphekom avait déjà mis en évidence que le dépassement de la valeur guide préconisée par l'OMS pour les $PM_{2,5}$ se traduisait, pour les 25 villes européennes (39 millions d'habitants) étudiées, par près de 19 000 décès prématurés chaque année, dont 15 000 causés par des maladies cardiovasculaires. Le respect de cette valeur guide de l'OMS se traduirait par environ 31,5 milliards d'euros d'économies par an, grâce à la diminution des dépenses de santé, de l'absentéisme et des coûts associés à la perte de bien-être, de qualité et d'espérance de vie. Ainsi, si toutes les communes françaises respectaient la valeur recommandée par l'OMS pour les $PM_{2,5}$ ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ce sont plus de 17 000 décès qui pourraient être évités chaque année en France (www.aphekom.org).

Ces résultats soulignent que la pollution de l'air a encore un impact sur la santé publique en France et en Europe, et que la mise en œuvre de réglementations efficaces dans le domaine de la pollution atmosphérique conduirait à des bénéfices sanitaires et monétaires non négligeables. À titre d'exemple, la commission d'enquête du Sénat a

évalué le coût sanitaire annuel de la pollution atmosphérique à 100 milliards d'euros (Rapport n°610 (2014-2015) de Mme Leila Aïchi).

Enfin, l'ANSP précise que l'impact sanitaire prépondérant de la pollution de l'air est dû à l'exposition tout au long de l'année aux niveaux moyens de pollution plutôt qu'aux pics, ainsi l'exposition chronique à la pollution de l'air conduit aux impacts les plus importants sur la santé alors que la part des effets sanitaires attribuables aux pics de pollution demeure très faible.

Impacts de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes

Lors de la 1^{ère} Conférence des Nations Unies sur l'environnement en 1972 à Stockholm, de nouvelles preuves de l'acidification des lacs en Suède sont présentées dans une étude de cas intitulée « Pollution de l'air au-delà des frontières nationales. L'impact sur l'environnement du soufre dans l'air et les précipitations ». De plus, les dépôts atmosphériques de soufre ont été désignés comme responsables du dépérissement de certaines forêts en Allemagne et en Scandinavie. Au niveau européen, la lutte contre ce type de pollution a été organisée au sein de la Convention de Genève sur la pollution atmosphérique transfrontière, aujourd'hui appelée Convention Air, mise en place en 1979.

C'est dans ce cadre que s'est développée la notion de charges critiques. Elle est conçue pour établir les niveaux maximum de dépôts de polluants atmosphériques acceptables pour chaque type d'écosystème. Ainsi, lorsque cette charge est dépassée, on considère que les effets nocifs de la pollution (acidification, eutrophisation, dépérissement par l'ozone...) sont significatifs, mais pas irréversibles. La Convention Air a également mis en place des réseaux de surveillance des effets de la pollution sur les écosystèmes, qui permettent de confirmer les diagnostics élaborés à travers la prévision de dépassements de charges critiques et de suivre l'impact des mesures de réduction des émissions mises en œuvre. Le concept de charge critique a ainsi permis l'élaboration de politiques de réduction des émissions, tels que le protocole d'Helsinki sur le soufre de 1985 ou le protocole multipolluants multi-effets de Göteborg adopté en 1999, puis révisé en 2012, qui cible, dans sa version amendée, l'ozone, les particules fines, ainsi que les polluants acidifiants et eutrophisants. On trouve dans la littérature scientifique des calculs de charges critiques appliqués à l'Asie ou aux pays sud-américains. L'acidification des sols et des eaux de surface est en effet de plus en plus visible dans les pays en voie de développement.

De plus, de fortes concentrations de certains polluants atmosphériques peuvent conduire à des nécroses visibles sur les plantes. La pollution de l'air peut également entraîner une réduction de la croissance des plantes, même sans dommages visibles, ou une résistance amoindrie des plantes à certains agents infectieux.

À titre d'exemple, l'ozone – composé secondaire et oxydant puissant de l'atmosphère – réagit directement avec

les composés chimiques présents à la surface des cellules végétales (parois et membranes). Il pénètre dans les feuilles par les stomates (minuscules orifices situés au niveau de l'épiderme des végétaux et servant aux échanges gazeux) et se dégrade instantanément au contact des cellules, entraînant des réactions en chaîne et aboutissant à la mort de celles-ci. Sur les plantes les plus sensibles, les symptômes sont identifiables dans un premier temps par la présence de nécroses foliaires, puis par la chute prématurée des feuilles. Ces pertes foliaires entraînent des diminutions de la croissance et un affaiblissement des plantes, les rendant plus sensibles aux attaques parasitaires (insectes, champignons) et aux aléas climatiques (sécheresse) (www.onf.fr).

Ainsi, il est estimé qu'en Europe, en 2000, la pollution atmosphérique à l'ozone a été à l'origine d'une perte de production de blé d'environ 13 % (Mills et Harmens, septembre 2011). La valeur de cette production perdue, évaluée sur la base des prix de vente, s'élevait à plus de 3 milliards d'euros (plus de 800 millions d'euros en France).

Impacts de la pollution atmosphérique sur le bâti

La pollution atmosphérique induit également des effets néfastes sur les bâtiments et les monuments historiques. C'est notamment la corrosion due au dioxyde de soufre, le noircissement et l'encroûtement des bâtiments par les particules en grande partie issues de la combustion ainsi que les altérations diverses en association avec le gel, l'humidité et les micro-organismes qui en sont responsables.

Ces manifestations macroscopiques sont la traduction de phénomènes microscopiques résultant de l'interaction des polluants gazeux (essentiellement le dioxyde de soufre) et particulaires (essentiellement les cendres volantes et les suies) et de l'eau (liquide et vapeur) avec les différents substrats constituant les façades des bâtiments (essentiellement la pierre, le ciment, le mortier, le béton et le verre).

En effet, l'observation des façades des bâtiments ou des statues en milieu urbain pollué révèle la présence de zones claires et de zones foncées juxtaposées. Les zones claires sont soumises aux pluies battantes ou ruisselantes et sont



Les effets de la pollution sur l'église Saint-Paul-Saint-Louis, située dans le Marais (Paris), avant et après son nettoyage (Source : www.cnews.fr).

le siège d'un lessivage, voire d'une érosion par dissolution ; les zones foncées sont celles à l'abri des pluies et sont le siège d'une accumulation de poussières (salissure ou *soiling*) qui, peu à peu, seront cimentées pour former une croûte noire gypseuse (voir Lefevre R. (2004), pour une modélisation des effets de la pollution atmosphérique sur les matériaux des bâtiments (calcaire, mortier, verre)).

Ce problème reste d'actualité en France malgré la forte diminution de la pollution due au soufre dans les zones urbaines.

Pollution de l'air et climat

Bien qu'ils puissent apparaître comme deux problèmes très différents, les changements climatiques et la pollution de l'air sont étroitement liés : de sorte que réduire la pollution de l'air par des mesures qui ciblent également les gaz à effet de serre, tels que l'ozone, a également un effet positif sur le climat et, réciproquement, travailler sur la mitigation du climat peut être source de co-bénéfices au regard de la qualité de l'air. La question concernant les liens entre pollution de l'air et changement climatique peut être abordée soit sous l'angle de l'atténuation (politiques de gestion) soit sous celui de l'adaptation (impacts futurs du changement climatique).

Pour ce qui concerne l'atténuation, les sources anthropiques de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques sont souvent les mêmes. Ainsi, les mesures de gestion visant à améliorer la qualité de l'air ou à atténuer le changement climatique auront donc en général des effets mutuels pouvant cependant être cobénéfiques ou

contradictoires, ce qui explique la difficulté de la prise de décision. Cependant, certains polluants atmosphériques contribuent aussi à l'effet de serre (particules, ozone). Ainsi, cibler ces substances permet d'optimiser les cobénéfices. D'autant qu'ils ont souvent une durée de vie dans l'atmosphère inférieure à celle du CO₂, et pourraient donc avoir un effet plus rapide.

Sur le plan de l'adaptation, le changement climatique conduit à la modification des phénomènes météorologiques régissant l'évolution des polluants dans l'atmosphère. L'été, l'augmentation de la fréquence et/ou de la sévérité des vagues de chaleur renforce la pollution à l'ozone. On parle de pénalité climatique, son importance est à présent bien documentée. Elle est d'autant plus préoccupante qu'elle est du même ordre que l'évolution récente de la pollution à l'ozone malgré des efforts substantiels dans la réduction des émissions. Pour les particules, la situation est plus complexe avec des impacts parfois contradictoires. Comme pour l'ozone, il y a un effet de pénalité climatique : l'assèchement des sols dans le sud de l'Europe favorise la re-suspension de poussières minérales et l'augmentation des températures renforce les émissions de composés organiques volatils biotiques qui contribuent à la formation d'aérosols organiques secondaires (et d'ozone). Mais il y a aussi un bénéfice climatique : l'augmentation des températures conduit à la volatilisation d'une fraction des particules. Les précipitations ont un effet qui conduit soit à une pénalité, soit à un bénéfice suivant les zones géographiques. Le changement climatique tendra aussi à augmenter le risque lié à l'exposition aux pollens, notamment pour l'ambrosie.