

## RECHERCHES SUR LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

## La pollution atmosphérique : des données de la recherche aux décisions réglementaires et à la gestion des risques

**Francelyne Marano**

Professeure émérite Université de Paris Cité

### Résumé

Francelyne Marano est professeure à l'Université de Paris Cité. Elle est spécialiste de l'étude des mécanismes d'action des polluants atmosphériques (amiante, particules Diesel, particules atmosphériques, nanoparticules). Elle a été présidente de la commission spécialisée sur les risques environnementaux au Haut Conseil de la Santé Publique. Dans cet article, elle souligne que les différents épisodes aigus de pollution atmosphérique d'origine anthropique pendant la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, accompagnés d'une augmentation brutale et importante de la mortalité, ont constitué les premières alertes sur les impacts néfastes des polluants atmosphériques sur la santé. Ils ont été suivis par des études épidémiologiques qui ont associé des mesures de plus en plus précises des polluants atmosphériques à la morbidité et la mortalité d'origine respiratoire, cardiovasculaire puis au cancer. Cependant, ce sont les recherches expérimentales pluridisciplinaires de la fin du XX<sup>e</sup> siècle qui ont fourni les explications causales nécessaires. Ceci a conduit à une prise de conscience internationale et des réglementations de plus en plus contraignantes sur les émissions de polluants.

**Mots-clés :** pollution atmosphérique, particules fines, épidémiologie, recherches expérimentales, réglementation

### Abstract

#### **Air pollution: from research findings to regulatory decisions and risk management**

*Francelyne Marano is Professor at the Université of Paris Cité. She is an expert in the study of the mechanisms of action of atmospheric pollutants (asbestos, diesel particles, atmospheric particles, nanoparticles). She has chaired the specialized commission on environmental risks at the Haut Conseil de la Santé Publique. In this paper, she underlines that the various acute episodes of air pollution of anthropic origin during the first half of the 20th century, accompanied by a sudden and important increase in mortality, constituted the first warnings on the harmful impacts of air pollutants on health. Epidemiological studies followed, linking increasingly precise measurements of air pollutants to morbidity and mortality of respiratory and cardiovascular origin, and then to cancer. However, it was the multidisciplinary experimental research of the late 20th century that provided the necessary causal explanations. This led to international awareness and increasingly stringent regulations on pollutant emissions.*

**Keywords:** Air Pollution, Particulate Matter, Epidemiology, Experimental Research, Regulation

Au siècle dernier, la perception de la pollution atmosphérique s'est accentuée et les premières études scientifiques ont pu associer clairement la dégradation de qualité de l'air avec ses impacts sanitaires. Si les épisodes aigus de pollution de l'air ont été des événements rendus visibles par leur impact sanitaire dramatique et déjà médiatisé, le cheminement a été plus long pour obtenir un consensus scientifique autour des maladies chroniques liées à la pollution atmosphérique. Une autre voie, longue encore, est celle de l'action et de la réglementation en santé publique.

### **Les crises environnementales liées à la pollution atmosphérique au début du xx<sup>e</sup> siècle ont déclenché l'alerte**

Au début du XX<sup>e</sup> siècle avec le développement d'usines utilisant le charbon comme source principale d'énergie, la transformation des modes de transport avec l'avènement de l'automobile, l'exode rural vers les villes, a amplifié considérablement la dégradation de la qualité de l'air. La mise en évidence de ses impacts sanitaires s'est faite à travers des épisodes dramatiques qui ont été à l'origine du développement des systèmes de mesures des polluants atmosphériques et des premières études épidémiologiques.

#### *1930 : brouillard toxique dans la vallée de la Meuse et impact sanitaire*

Un épisode qui a laissé des traces importantes dans les journaux de l'époque est celui de la vallée industrielle de la Meuse, près de Liège en Belgique. Du 1<sup>er</sup> au 5 décembre 1930, un important brouillard s'est maintenu dans la vallée pendant cinq jours à la faveur d'une situation anticyclonique et d'une forte inversion de température. Les usines, notamment métallurgiques, s'étaient fixées dès le XIX<sup>e</sup> siècle à proximité des fleuves et des rivières pour bénéficier des livraisons de charbon et de la force motrice hydraulique. 10 000 tonnes de charbon étaient brûlées par jour dans les usines de la vallée de la Meuse. Les nombreux polluants émis par les cheminées, en particulier le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et les particules, s'étaient accumulés en ce début de décembre dans la vallée, étroite et profonde. Il n'existait pas encore de mesures de concentrations de polluants dans l'air, mais des calculs ultérieurs ont évalué que la concentration en SO<sub>2</sub> avait dû atteindre 100 mg/m<sup>3</sup> alors que la valeur admissible actuellement est de 125 µg/m<sup>3</sup>/jour. Le brouillard ambiant et l'absence de vent ont permis la dissolution du dioxyde de soufre dans les gouttelettes en suspension et sa transformation en acide sulfurique, avec des effets sanitaires délétères. De nombreux décès (dix fois plus qu'en période normale) et plusieurs centaines de malades ont été constatés et attribués à la pollution, après analyse en 2001 par l'équipe de B. Némery (université de Louvain) des données de l'époque<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Zimmer A. *Brouillards toxiques. Vallée de la Meuse, 1930, contre-enquête*. Bruxelles : Zones sensibles, 2017 ; Némery B, Hoet P, Nemmar A. The Meuse Valley fog of 1930: an air pollution disaster. *The Lancet*, 2001, 357:704-8.

### *1952, le smog de Londres : catastrophe sanitaire et alerte*

L'épisode qui a joué un rôle réel d'alerte pour les chercheurs et les pouvoirs publics est celui du « smog »<sup>2</sup> de Londres en 1952. Le 5 décembre, un brouillard brunâtre a envahi la ville rendant l'air irrespirable. Il ne se dissipe que quatre jours plus tard. On commençait déjà à mesurer les polluants atmosphériques, en particulier le dioxyde de soufre et les fumées noires. Ces mesures ont permis de constater un pic de ces deux polluants dont les concentrations ont été multipliées par près de dix pendant l'épisode et ceci en lien avec le chauffage individuel au charbon, le trafic routier intense dont les bus roulant au diesel et les fumées d'usine. Parallèlement, les admissions à l'hôpital et les décès ont suivi la courbe d'augmentation des polluants. Les premières études épidémiologiques réalisées ont montré que ce pic de pollution était responsable de 4 000 décès prématurés ; une réévaluation des données collectées porte ce nombre à 12 000<sup>3</sup>.

Cet épisode traumatisant a entraîné une prise de conscience de l'opinion et des pouvoirs publics bien au-delà de l'Angleterre. Des programmes de recherche ont alors été financés en Europe et aux États-Unis conduisant à des études épidémiologiques et expérimentales afin de déterminer les relations causales entre pollution atmosphérique et impacts sanitaires et de mieux comprendre les mécanismes d'action des polluants atmosphériques<sup>4</sup>.

### **Les effets chroniques de la pollution atmosphérique, un consensus scientifique lent à s'établir.**

#### *Les années 1990 : des études épidémiologiques significatives*

Si l'impact des épisodes aigus de pollution (les « pics ») a pu être montré facilement en associant les mesures des polluants dans l'atmosphère et les admissions à l'hôpital ou les visites chez les médecins, l'impact de la pollution de fond, qui est de loin l'effet sanitaire le plus important sur la population, a été beaucoup plus difficile à mettre en évidence. Ce constat a joué un rôle déterminant à la fin du XX<sup>e</sup> siècle pour durcir les réglementations en Europe. La première étude épidémiologique aux résultats non contestés, car très large, est celle de Dockery et al<sup>5</sup> publiée en 1993 sur six grandes villes américaines largement polluées. Elle montrait qu'une augmentation de 10 µg/m<sup>3</sup> de la pollution annuelle particulaire était responsable d'une augmentation de 1,4 % de la mortalité cardiorespiratoire. L'étude faisait donc apparaître en plus des effets de long terme sur les pathologies respiratoires une augmentation des risques cardiovasculaires, fait plus surprenant mais qui a été ensuite clairement démontré<sup>6</sup>. Cette étude a été suivie de nombreuses autres allant toutes dans le même sens aux États-Unis et en Europe. Une autre étude américaine très large a mis en avant la relation entre l'exposition chronique à la pollution atmosphérique et le risque de développer un cancer du poumon<sup>7</sup> – rappelons que la pollution atmosphérique est actuellement classée dans le groupe 1 (cancérogène certain) par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Malgré ces études, le doute subsistait sur les effets de

<sup>2</sup> Le néologisme anglais *smog*, qui a été largement repris, correspond à la fusion des mots *smoke* (fumée) et *fog* (brouillard).

<sup>3</sup> Bell ML, Davis DH, Fletcher T. Retrospective Assessment of Mortality from the London Smog Episode of 1952. *Environ Health Perspect*, 2004,112: 6-8.

<sup>4</sup> Anderson HR, Air pollution and mortality: A history. *Atmospheric Environment*, 2009, 43:142-52.

<sup>5</sup> Dockery DW, Pope CA, Xu X et al. An association between air pollution and mortality in six US Cities. *N. Engl. J. Med*, 3219, 1993 : 1753-9.

<sup>6</sup> Pope CA et al. Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. *Circulation*, 2004, 109: 71-7.

<sup>7</sup> Cohen AJ, Pope CA, Lung cancer and air pollution. *Env Health Persp*, 1995, 103: 219-224.

l'exposition chronique à la pollution atmosphérique : les facteurs de confusion étaient nombreux et l'augmentation des risques modérée.

### *L'importance des études expérimentales pour éclairer les causalités*

L'apport des études expérimentales chez l'animal, sur des cultures cellulaires et même des études d'exposition de volontaires, a été déterminant pour donner des explications causales aux données épidémiologiques. Les particules atmosphériques ont été tout spécialement étudiées car elles apparaissaient comme le facteur de risque le plus important<sup>8</sup>. Les recherches expérimentales ont mis en avant le rôle primordial des particules fines et ultrafines (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> et PM<sub>0,1</sub>)<sup>9</sup>. Ces particules sont essentiellement des suies, c'est-à-dire le produit de la combustion inachevée de carburants fossiles comme le gasoil, le charbon, les ordures ménagères, le bois... Ce sont des agglomérats ou agrégats dont la taille est en moyenne inférieure à 1µm, les plus étudiées ayant été les particules Diesel (PDi). Cette classe de PM 2.5 (Particulate Matter 2.5)<sup>15</sup> est celle qui est susceptible d'atteindre les voies respiratoires inférieures, de s'accumuler dans les poumons et d'y développer une réponse inflammatoire. De très nombreuses études, souvent multidisciplinaires, sur les particules Diesel prises comme modèles, puis sur des particules atmosphériques de diverses provenances ont pu établir clairement les déterminants des effets biologiques et les mécanismes d'action. Elles ont mis en évidence que la notion d'accumulation, démontrée en condition d'exposition professionnelle, se posait aussi pour les particules atmosphériques. Les observations de Churg en 2003<sup>10</sup> sur des poumons de femmes non fumeuses lourdement exposées à la pollution atmosphérique à Mexico comparés à des poumons de femmes peu exposées à Vancouver étaient concluantes. Elles démontraient que l'accumulation dépendait quantitativement du niveau d'exposition aux particules atmosphériques, c'est-à-dire de leur concentration dans l'atmosphère. Elles entraînaient un épaississement et un remodelage de la paroi des bronchioles pulmonaires comme chez les fumeurs ou les mineurs.

### *La compréhension des mécanismes d'action des particules atmosphériques*

Parallèlement, les études expérimentales permettaient d'expliquer les différents effets biologiques des particules : leur capacité à agir comme un adjuvant en association avec un allergène, les mécanismes d'internalisation et d'induction de la réponse inflammatoire via la production de cytokines, le rôle du stress oxydant dans cette réponse, l'importance des métaux et des molécules organiques absorbés sur les particules<sup>11</sup>. La question du passage des barrières biologiques s'est posée rapidement liée à l'observation épidémiologique d'une augmentation de la mortalité et de la morbidité cardiovasculaire lors des épisodes de pollution particulaire. Deux hypothèses se sont alors confrontées pour expliquer les effets systémiques des PM, sans doute non exclusives, la réponse inflammatoire pulmonaire pouvant avoir des conséquences à distance ou la possibilité d'un passage de la barrière alvéolo-capillaire et d'un effet direct des particules. Les protagonistes des deux hypothèses se sont confrontés, parfois rudement, par publications interposées<sup>12</sup>. Actuellement, les arguments pour

<sup>8</sup> Marano F et al. Particle-associated organics and proinflammatory signalling. In Donaldson K, Borm P dir. *Particle Toxicology*, Boca Raton, CRC Press 2007 211-26.

<sup>9</sup> Les particules fines ou PM 2.5 et PM<sub>1</sub> ont un diamètre aérodynamique égal ou inférieur à 2.5 ou 1 µm. Les particules ultrafines ou PM 0.1 sont de taille nanométrique et ont un diamètre égal ou inférieur à 100nm.

<sup>10</sup> Churg A et al. Chronic exposure to high levels of particulate air pollutants is associated with small airway remodeling, *Environ. health Perspect*, 2003, 111: 714-18.

<sup>11</sup> Nous renvoyons à l'article avec la figure associée « Réponse inflammatoire induite par l'ozone et les particules atmosphériques au niveau de l'épithélium bronchique humain », en accès libre : Armelle Baeza, Francelyne Marano, Pollution atmosphérique et maladies respiratoires, Un rôle central pour le stress oxydant, *Médecine/sciences*, 2007, 23 : 497-501.

<sup>12</sup> Mills N et al. Effects of particles on the cardiovascular system. In *Particle Toxicology...*, op. cit : 259-74.

considérer que les particules fines et ultrafines peuvent traverser les barrières biologiques devient de plus en plus convaincant des données expérimentales ayant montré qu'on peut les retrouver jusque dans le placenta.

En France, les recherches sur les effets sanitaires de la pollution atmosphérique se continuent, essentiellement sur les particules ultrafines, dont des études épidémiologiques qui ont montré un impact sur les femmes enceintes et les nouveau-nés<sup>13</sup>. Par ailleurs, Santé Publique France a récemment publié la dernière étude épidémiologique sur la perte d'espérance de vie liée à la pollution atmosphérique particulaire et l'évalue à 40 000 décès anticipés par an, en retrait par rapport aux 48 000 décès de l'étude précédente<sup>14</sup>.

Des données de la science aux réglementations et à la gestion des risques, une histoire difficile et complexe.

Des lois, directives européennes et réglementations se sont succédé sur plus d'un demi-siècle mais toujours en retard sur l'avancée des connaissances, ce qui pose la question de la prise en compte des alertes de la recherche par les pouvoirs publics et les décideurs. Il faut cependant avoir conscience que les décisions politiques à prendre pour réduire ces polluants afin de protéger la santé et l'environnement ont des impacts socio-économiques considérables et peuvent être très mal perçues par la population si elles sont mal expliquées<sup>15</sup>. La crise des « gilets jaunes » en est un exemple. En France, la première et timide loi sur l'air de 1961 a été suivie d'un décret de 1974 qui a mis en place les associations de surveillance de la qualité de l'air et le CITEPA<sup>16</sup>. Par la suite, les réglementations sont venues de l'Union Européenne avec les premières directives au cours des années 1980 pour limiter les émissions de SO<sub>2</sub>, particules et plomb et prendre en compte la pollution transfrontalière, les polluants secondaires<sup>17</sup> comme l'ozone, la question des particules fines secondaires d'origine agricole. Toutes ces dispositions ont permis d'obtenir une diminution notable des niveaux de pollution en France<sup>18</sup>. La pollution par le dioxyde de soufre et par le plomb n'est plus un problème sauf sur certains sites industriels. Les autres polluants primaires (NO<sub>x</sub>, PM 10 et 2.5) ont diminué notablement, mais la question des polluants secondaires reste posée. L'ozone ne diminue toujours pas et les particules fines et ultrafines restent trop élevées selon les valeurs guides de l'OMS qui ont récemment été divisées par deux en passant de 10 à 5 µg/m<sup>3</sup> d'air, bien loin de la valeur réglementaire actuelle de l'UE de 25 µg/m<sup>3</sup>. Les particules fines et ultrafines représentent un faible pourcentage de la masse des PM donnée actuellement en µg/m<sup>3</sup> d'air, mesure qui détermine tous les seuils réglementaires actuels. Cependant elles sont beaucoup plus nombreuses et ce sont elles qui posent les problèmes sanitaires les plus importants.

<sup>13</sup> Lepeule J *et al.* Effet de l'exposition maternelle à la pollution atmosphérique sur le déroulement de la grossesse : résultat de la cohorte mère-enfant Eden. *Pollution Atmosphérique*, 2012, numéro spécial : 72-79.

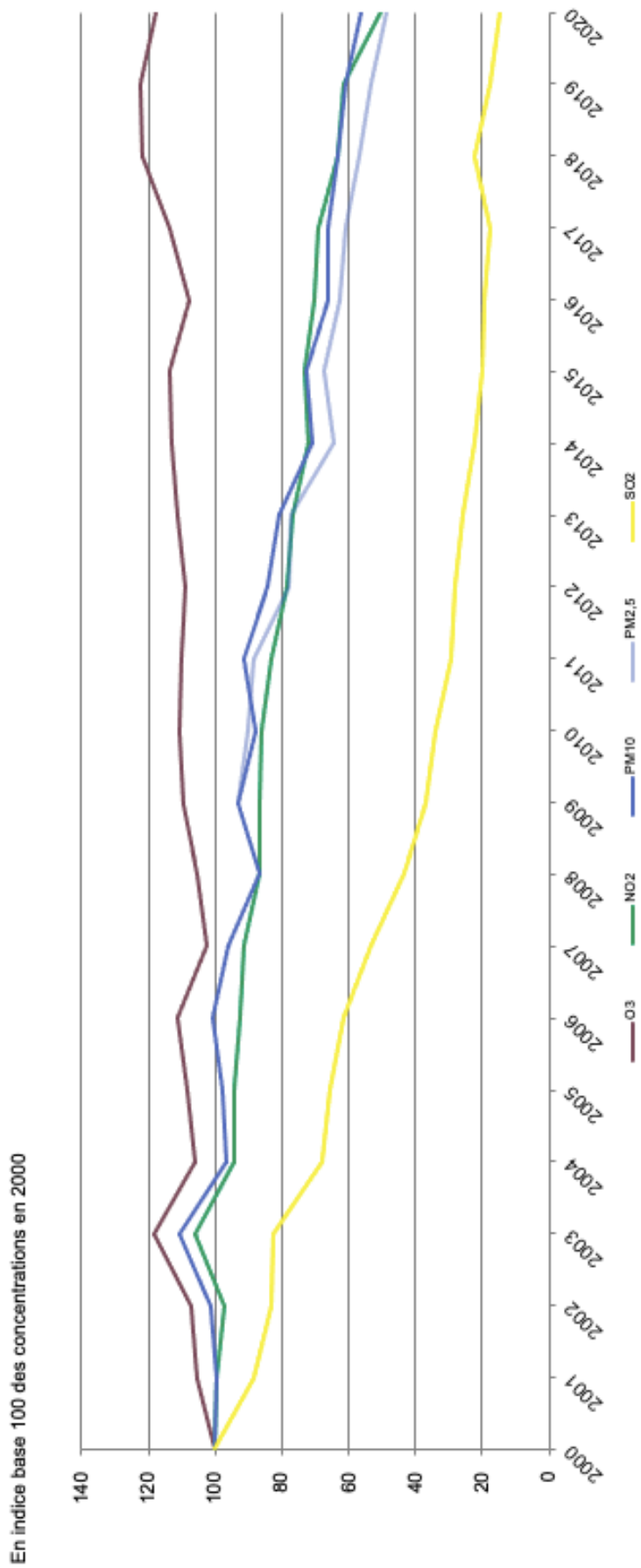
<sup>14</sup> Medina S *et al.* Impact de la pollution de l'air ambiant sur la mortalité en France métropolitaine : réduction en lien avec le confinement du printemps 2020 et nouvelles données sur le poids total pour la période 2016-2019, Rapport avril 2021, en libre accès sur [www.santepubliquefrance.fr](http://www.santepubliquefrance.fr)

<sup>15</sup> Loumé L Marano F. *Notre air est-il respirable ? Le vrai du faux sur la pollution intérieure et extérieure*. Paris, Ed. Quae, 2018.

<sup>16</sup> Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique.

<sup>17</sup> Les polluants secondaires se forment dans l'atmosphère par réactions chimiques à partir des polluants primaires émis par les sources naturelles ou anthropiques sous l'effet des rayonnements UV, c'est le cas de l'ozone et des particules secondaires.

<sup>18</sup> Rapport national d'inventaire format Secten du CITEPA. Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2021, juin 2021, en libre accès sur [www.citepa.org](http://www.citepa.org)



Évolution des concentrations moyennes annuelles pour les polluants SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>, en fond urbain. Bilan de la qualité de l'air en France en 2020, en libre accès sur le site du SDES.

## Conclusion

Les recherches actuelles, qui démontrent de nouveaux impacts sanitaires et leur éventuelle capacité à se disséminer dans l'organisme, vont-elles conduire à modifier la réglementation ? Comment les mesurer alors que les réseaux de surveillance de la qualité de l'air ne sont pas tous équipés pour cela ? La mesure de la masse par m<sup>3</sup> d'air est-elle toujours pertinente ? Comment réglementer les véhicules de transport qui émettent ces particules ? Faut-il les interdire ? Par ailleurs la question de la pollution atmosphérique est directement liée à celle du changement climatique avec des interactions complexes entre l'ozone, les particules, les gaz à effet de serre dont le méthane et le protoxyde d'azote d'origine agricole. On voit que les recherches débouchent directement sur des problèmes de gestion des risques environnementaux dans l'urgence, alors qu'on se trouve encore pour certains aspects en situation d'incertitude scientifique.