

État et perspectives de la recherche dans le domaine de la qualité de l'air

Par Gilles FORET,
Isabelle COLL
et Patrice COLL

Laboratoire Interuniversitaire des systèmes atmosphériques (LISA), UMR CNRS 7583,
Université Paris-Est-Créteil, Université de Paris, Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)

La pollution de l'air reste un problème environnemental majeur. Malgré les efforts importants réalisés pour limiter cette pollution, les niveaux de polluants présents dans l'atmosphère restent encore problématiques pour la santé, notamment en Asie et en Afrique.

Si l'état des connaissances a considérablement progressé au cours des dernières décennies dans les domaines de la physico-chimie de l'atmosphère, de la toxicologie et de l'épidémiologie, d'importants verrous scientifiques subsistent. Notre capacité à relier sources de pollution et leurs impacts doit être améliorée pour mettre en œuvre des solutions plus efficaces. Cela passe par une meilleure estimation de l'exposition individuelle, mais aussi par une meilleure connaissance des pathologies et des mécanismes associés.

Cette problématique nécessite non seulement de mettre en œuvre des approches transdisciplinaires entre acteurs académiques, mais aussi de développer des approches intégrant les institutionnels, les partenaires socio-économiques, les collectivités et, plus directement, les citoyens.

Les polluants atmosphériques sont des espèces rejetées dans l'atmosphère par les activités humaines, ou issues de la transformation des espèces émises par ces activités. Si ces polluants sont susceptibles d'avoir des effets néfastes sur l'environnement, ils peuvent également s'avérer dangereux pour notre santé. La notion de qualité de l'air recouvre le bilan des polluants présents dans l'air extérieur, mais elle inclut également l'atmosphère des environnements confinés (lieux d'habitation, de travail, de loisirs...). Aujourd'hui, la dégradation de la qualité de l'air dans les espaces urbanisés est devenue une problématique majeure de santé publique : l'Organisation mondiale de la santé (OMS) estime ainsi que 7 millions de décès prématurés par an seraient attribuables à la pollution atmosphérique (OMS, 2018).

Le besoin de maîtriser la qualité de l'air s'est imposé suite aux dramatiques épisodes de pollution qui ont affecté la vallée de la Meuse, la Pennsylvanie, ou encore les villes de Londres et de Los Angeles entre les années 1930 et 1950. L'avancée des connaissances scientifiques et le développement de techniques de mesure précises et spécifiques ont permis d'établir les liens de causalité entre la pollution et ses impacts, mais également de créer les conditions d'une bonne acceptabilité publique des réglementations en faveur d'une meilleure qualité de l'air. Les autorités, d'abord locales, se sont attachées à trouver des solutions opérationnelles pour prévenir ces phénomènes de pollu-

tion aiguë. Puis, dans les années 1960 en Amérique du Nord et 1970 en Europe, ces efforts se sont concrétisés par la mise en place de réglementations harmonisées à l'échelle continentale, prescrivant des valeurs limites pour les polluants majeurs et s'appuyant sur une maîtrise technologique accrue des processus émetteurs de polluants (industrie et combustion automobile, notamment). Les efforts se sont aussi portés sur la création de structures nationales et régionales, en charge de la surveillance et de la gestion opérationnelles des niveaux de polluants dans l'atmosphère. Les actions conduites pour respecter les seuils réglementaires de pollution ont entraîné des baisses significatives des concentrations des polluants primaires concernés. Ainsi, les niveaux de concentration atmosphérique du dioxyde de soufre (SO₂) – un polluant emblématique du *smog* de Londres, également associé aux pluies acides des années 1970 et très majoritairement issu de la combustion du charbon – ne sont aujourd'hui plus une menace en Europe. Toutefois, les niveaux observés dans les environnements urbains pour la plupart des autres polluants primaires (NO₂ et particules primaires, notamment) et en périphérie des villes pour les polluants secondaires (ozone et particules organiques secondaires) sont suffisamment élevés pour constituer un danger pour la santé humaine à court, moyen et long termes. Ce sont aujourd'hui les manifestations les plus ostensibles de la pollution atmosphérique – notamment la réduction de la visibilité –, ainsi que la perception d'effets sanitaires in-

désirables durant les épisodes (irritation des yeux et des voies respiratoires supérieures, gêne respiratoire...) – qui contribuent à maintenir une forte pression sociale sur l'action publique. En parallèle, la situation dans le reste du monde, notamment en Asie, a considérablement changé depuis trois décennies : la révolution industrielle chinoise des années 1980 et le déplacement de la production industrielle vers l'Asie, associés à la croissance de la population, ont eu comme conséquence une dégradation spectaculaire de la qualité de l'air dans cette région du globe. Les dernières années ont cependant vu s'amorcer un virage, et les tendances récentes, en tout cas pour les émissions chinoises, semblent encourageantes. En revanche, les situations de l'Inde, de certaines zones du Moyen-Orient et de l'Afrique demeurent très préoccupantes.

Du point de vue de la connaissance, d'importants progrès ont été réalisés depuis les années 2000 afin de mieux identifier et quantifier les sources, et de contraindre les bilans réactionnels de la pollution atmosphérique. Les techniques d'analyse « modernes » permettent la caractérisation des polluants atmosphériques à l'échelle moléculaire, ce qui a permis d'importantes avancées pour comprendre les mécanismes chimiques mis en jeu dans l'atmosphère et identifier les sources responsables de cette pollution. Notre capacité à aborder ces questions à toutes les échelles (depuis l'échelle moléculaire jusqu'à l'échelle globale) s'est aussi largement améliorée avec l'émergence d'observations satellitaires mieux adaptées à l'observation de la partie basse de l'atmosphère. Cette capacité d'observation multi-échelle a été accompagnée par le développement des modèles numériques (intégrateurs des nouvelles connaissances), lui-même soutenu par des capacités de calcul en croissance constante. Ces évolutions technologiques et numériques ont notamment permis l'émergence de systèmes de surveillance et de prévision bien plus fiables et efficaces. En parallèle, grâce à la mise en œuvre de nombreuses études épidémiologiques et toxicologiques, les scientifiques ont pu rassembler des éléments factuels convergents sur la nocivité de la pollution atmosphérique pour la santé et faire avancer notre connaissance des mécanismes biologiques possiblement impliqués (REVIHAAP, 2013 ; Newby *et al.*, 2015). Ces travaux ont en particulier permis de renforcer l'association entre l'exposition à court et long termes aux particules fines et les maladies respiratoires de l'enfant, et, plus généralement, la morbidité et la mortalité cardiovasculaires qui se situent à des niveaux bien inférieurs aux niveaux actuels utilisés pour surveiller la qualité de l'air. Ces travaux ont à leur tour permis l'établissement de relations dose-réponse (Cohen *et al.*, 2016) permettant d'estimer le coût sanitaire de la pollution et les gains potentiels d'un contrôle renforcé de la qualité de l'air.

Malgré cela, d'importants verrous scientifiques subsistent encore dans notre capacité à relier quantitativement les sources de pollution et leurs impacts sanitaires, une étape pourtant essentielle dans la conception et la mise en œuvre de solutions efficaces de gestion de la qualité de l'air.

Une des clés de voûte de cette étape est la caractérisation de l'exposition individuelle, véritable porte d'entrée de la quantification des impacts sanitaires de la pollution atmosphérique. Pour approcher ce paramètre, il faut pouvoir accéder à une connaissance précise des champs de concentrations des polluants aux échelles spatiales réellement représentatives de ce que nous inhalons. Mais il faut également prendre en compte la mobilité des individus qui sont confrontés au cours d'une journée à différents environnements atmosphériques. Cela concerne l'air extérieur ambiant, mais aussi l'air intérieur : celui des environnements domestiques, des transports en commun ou de notre lieu de travail. L'air intérieur, par nature, n'a pas pu bénéficier du grand nombre des observations relatives à l'air extérieur, et du contrôle assuré depuis la loi sur l'Air de 1996 par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air. En outre, au-delà des questions d'échelles et de milieux fréquentés, une large partie de la composition atmosphérique est loin d'être très bien caractérisée ; notre connaissance de certains processus de transformation physico-chimique et d'émission doit, par conséquent, être améliorée. Cela concerne des espèces dont la réactivité n'est que partiellement décrite, des polluants émergents non réglementés et/ou des espèces chimiques dont les concentrations ne sont pas bien documentées (composés organiques volatils comme le formaldéhyde, nanoparticules, composés organiques à faible volatilité et aérosols organiques secondaires, suies, métaux, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), pesticides, effluents biologiques...). De façon générale, connaître la forme et le devenir du carbone dans l'atmosphère reste un immense défi.

En second lieu, malgré les avancées remarquables faites depuis la fin du XX^e siècle, l'état des connaissances sur les mécanismes d'action (inflammation, stress oxydatif...) et les effets physiologiques de la pollution sur les individus reste fortement lacunaire, cela requiert d'importants efforts de recherche supplémentaires. Il nous faut notamment comprendre les possibles effets de synergie – dits « cocktails » – des mélanges de polluants sur la santé respiratoire et cardiovasculaire, mais aussi considérer l'existence de liens entre la pollution et d'autres pathologies (pathologies de la reproduction, maladies auto-immunes, diabète, mucoviscidose, maladies mentales...). La caractérisation de ces liens potentiels fait à nouveau résonance avec la notion d'exposition individuelle et plus spécifiquement au concept d'exposome qui doit nous pousser systématiquement à considérer le rôle combiné de l'ensemble des facteurs environnementaux (au sens large, et par opposition aux facteurs génétiques) sur l'émergence de différentes pathologies. Des cofacteurs comme l'alimentation, la qualité de l'eau, le bruit ou encore l'environnement social doivent ainsi être pris en compte dans les études épidémiologiques.

La production de connaissance est un moteur puissant de la recherche, mais dans le cas de la pollution atmosphérique qui est un problème de santé publique, l'objectif est aussi de traduire cette connaissance en actions et en solutions pour améliorer la qualité de l'air que nous res-

pirons. Le levier d'action le plus évident est le renforcement de la réglementation sur les émissions de polluants, notamment pour les activités responsables d'une part majeure du bilan atmosphérique des polluants : transport routier, production d'énergie, industries et agriculture, notamment. Depuis la fin des années 1970, en Europe, les exigences réglementaires de réduction des émissions ont toujours été assurées et accompagnées par des améliorations technologiques visant à réduire les émissions à la source, ce qui a permis d'assurer leur acceptation par la société. Dans le cas de la qualité de l'air, il est aujourd'hui reconnu que la palette des actions doit être élargie et inclure une réflexion sur l'aménagement du territoire, et, plus généralement, sur les politiques publiques qui permettent de contraindre la consommation énergétique urbaine, d'améliorer l'offre de transport pour promouvoir une mobilité plus durable et de réfléchir à un urbanisme plus favorable à la santé. Là aussi, les chercheurs ont un rôle à jouer dans la construction de ces solutions. Créer des liens avec les institutionnels est bien sûr indispensable pour allier expertise scientifique, connaissance du terrain et contraintes de gouvernance, mais l'interaction directe avec les collectivités et les citoyens doit également être renforcée. Ainsi, des solutions intégrant la modification des comportements individuels (éviter des zones polluées, changement de modes de consommation et de mobilité...) pourront être conçues comme des leviers supplémentaires pour la réduction des impacts liés à une mauvaise qualité de l'air. Par ailleurs, ce lien entre chercheurs, institutionnels et citoyens est nécessaire pour que les solutions proposées pour améliorer la gestion de la qualité de l'air, parfois impopulaires et mal comprises, soient acceptées, voire co-construites. Les sciences participatives (citoyennes), portées par certaines innovations technologiques (capteurs, réseaux sociaux), constituent, dans ce contexte, des directions d'avenir pour notre recherche. Enfin, dernier aspect important sur ce volet des solutions, celui de la dépollution, notamment de l'air intérieur, qui s'affirme d'ores et déjà comme un sujet majeur de recherche et d'action. En définitive, on doit noter que les solutions pour améliorer la qualité de l'air et surtout leurs applications ne sont pas universelles : les spécificités culturelles ainsi que les caractéristiques sociodémographiques et les pratiques des citoyens, ainsi que le niveau économique, la géographie ou encore la gouvernance des agglomérations, des régions ou des États ciblés vont impacter les impacts sanitaires et environnementaux que l'on peut attendre des stratégies mises en place. La variété des dynamiques de lutte contre la pollution dans les pays européens, asiatiques et africains illustre ce point.

Parler du futur de ce domaine de recherche, c'est aussi parler de la façon dont il doit se structurer pour avancer. La recherche dans le domaine de la qualité de l'air est clairement pluridisciplinaire. Ainsi, sans être exhaustif, on fait appel à des disciplines, telles que la physique, la chimie, la physico-chimie de l'atmosphère, la médecine, la toxicologie, l'épidémiologie, la géographie, l'urbanisme, l'ingénierie des transports, la sociologie et l'économie. Mais créer une rupture dans les connaissances exige aujourd'hui de penser une structuration inter- ou transdisciplinaire de la recherche, seules approches permettant de développer une pensée systémique notamment autour de l'espace urbain. Cette réflexion sur l'inter- ou la transdisciplinarité n'est pas nouvelle, mais l'état des connaissances et le bilan des besoins dressé dans de nombreuses disciplines les rendent aujourd'hui prêtes pour ce couplage. Ces approches devront aussi permettre de porter le développement d'outils transverses indispensables pour la gestion intégrée de la qualité de l'air, de ses causes et de ses impacts. Et comme souvent dans le domaine des sciences environnementales, il faut pour cela s'assurer que les acteurs académiques ne soient pas déconnectés des acteurs opérationnels (c'est-à-dire ceux en charge de la surveillance de la qualité de l'air et de ses impacts), de la sphère politique (représentée par des agences comme l'ADEME ou l'ANSES), du monde socio-économique, et, bien sûr, des citoyens. Cette structuration que l'on peut qualifier d'intersectorielle, si elle est indispensable, ne doit cependant pas tirer les activités de recherche vers des développements uniquement opérationnels au détriment de travaux plus fondamentaux, ce qui aurait pour effet d'assécher la production des connaissances et l'innovation à moyen et long termes.

Références bibliographiques

- COHEN A. J., BRAUER M., BURNETT R. *et al.* (2015), "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", *Lancet* 2016; 389, pp. 1907-1918.
- NEWBY D. E., MANNUCCI P. M., TELL G. S. *et al.* (2015), *European Heart Journal*, Vol. 36, Issue 2, 7, pp. 83-93, <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehu458>
- Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP project (This project has been co-funded by the European Union under Contribution Agreement No.07-0307/2011/604850/SUB/C3, 2013).
- OMS (2018), "9 out of 10 people worldwide breathe polluted air, but more countries are taking action", News release, Geneva.