

# DETECTION ET MESURES



*NDLR. Article paru dans le n° 161 de novembre 1997 d'Environnement et Technique, et reproduit avec l'aimable autorisation de son directeur et de l'auteur*

## Pollution atmosphérique : surveillance et métrologie au service de la santé publique

Jean-Claude OPPENEAU (\*)

Les effets des pollutions atmosphériques sur la santé sont devenus ces derniers mois une des préoccupations majeures des responsables de santé publique. Dans ce contexte, la surveillance de la qualité de l'air prend une place essentielle dans la politique de prévention. Son efficacité est alors inséparable de l'évolution des techniques de mesure et de l'organisation des réseaux à qui elle est confiée, comme de l'accomplissement de leur mission.

Les problèmes de pollution de l'air ont aujourd'hui évolué et l'opinion publique a pris conscience de leur acuité. Après la pression exercée sur la question des pluies acides, les préoccupations ont changé sans que l'on soit allé au bout du sujet.

L'inquiétude s'est portée aujourd'hui sur la pollution urbaine, liée majoritairement aux émissions dues aux moyens de transport, en rapport avec l'accroissement de la démographie urbaine, mais aussi sur l'effet de serre après la réduction de la couche d'ozone stratosphérique.

La loi sur l'air que le parlement devrait prochainement adopter définitivement met l'accent sur le renforcement de la surveillance, sur la prévention avec l'établissement de plans, comme les plans de protection de l'atmosphère (urbaine), les plans de déplacements urbains ou les plans régionaux de la qualité de l'air, la mise en place de mesures pour encourager le développement de véhicules moins polluants.

La surveillance de l'atmosphère occupe une place essentielle dans ce nouveau dispositif. L'atmosphère est un milieu complexe et vital. Non seulement elle accueille les polluants, mais elle les transforme et les transporte tout en subissant les contraintes consécutives à de multiples influences, locales, régionales ou planétaires. Il est indispensable de comprendre le fonctionnement de ces systèmes et d'en suivre leur évolu-

tion afin de protéger la population et d'adopter les mesures adéquates.

La conception de la surveillance a beaucoup évolué en quelques années et de nombreux pays y consacrent des moyens substantiels, bien supérieurs aux nôtres, en personnel, en équipement et en exploitation des résultats. Il est urgent d'en faire autant en France, d'étendre notre capacité sur l'ensemble du territoire, d'apporter les possibilités de profiter des techniques les plus modernes et de pouvoir dresser un bilan annuel de l'état de l'atmosphère avec une valorisation globale des données pour aider à l'appréciation du risque sanitaire.

Il ne s'agit pas de « surveiller pour surveiller ». La surveillance est une composante essentielle de l'action, du repérage des tendances à moyen et long termes, de la prévision et de la veille. Elle est aussi un passage obligé pour approfondir la connaissance des effets des polluants, d'autant que souvent les plus toxiques sont présents en faibles quantités et difficiles à identifier et à mesurer. C'est pourquoi les réseaux de surveillance de la qualité de l'air doivent travailler en relation étroite avec les milieux de la recherche comme ils constituent un terrain expérimental pour les industriels de la mesure. Le réseau est aussi un lieu d'échange privilégié avec les mondes de la recherche, de l'industrie, des spécialistes de la santé, tout en assurant l'information du public et des élus.

### Mieux exploiter les connaissances acquises

Le ministre de l'Environnement vient de créer une commission « Environnement-Santé » ; c'est fondamental. On peut simplement regretter qu'elle n'ait pas été créée plus tôt, car l'objet d'une politique de lutte contre la pollution atmosphérique, c'est de protéger la santé et le bien-être de la population, en fixant des objectifs de qualité de l'air qui tiennent compte de l'ensemble des situa-

(\*) Ademe.

tions et des polluants toxiques. Il faut donc déterminer les effets sur la santé, qu'ils soient à court terme à partir d'épisodes aigus de pollution ou qu'ils soient le fait d'une exposition modérée, mais continue et à long terme. Des études ont été réalisées, en France et beaucoup plus à l'étranger. Mais il y a encore de nombreuses lacunes sur la connaissance de ces effets. L'approche toxicologique, l'étude de la génotoxicité, l'interprétation des effets sur les cellules respiratoires sont très insuffisantes, d'autant que la surveillance n'apporte pas d'informations relatives à certains polluants toxiques à de bas niveaux ou pendant les pointes de pollution et que l'implantation des capteurs doit être plus optimisée. L'épidémiologie n'a pas non plus été suffisamment développée et les statistiques de morbidité et de mortalité ont encore été peu utilisées pour quantifier les pathologies liées à la pollution.

On peut d'ailleurs s'étonner que les documents parus ces derniers temps ne mentionnent pas l'enquête coopérative Paarc (Pollution atmosphérique et affections respiratoires chroniques), effectuée à la fin des années 70 auprès de 8 000 adultes pour chercher une association entre des paramètres de santé et des pics de pollution urbaine, tout comme on ne trouve pas de référence à l'étude EDF relative à la mortalité sur des personnes fragiles (début des années 80) à la suite d'épisodes de pollution aiguë. Fort heureusement, le programme Primequal (Programme de recherche interorganismes pour une meilleure qualité de l'air à l'échelle locale) a lancé une étude pour déterminer les effets à long terme sur la mortalité et les symptômes pulmonaires (cancer pulmonaire et maladie cardio-pulmonaire) de la pollution atmosphérique sur l'échantillon de l'enquête Paarc. Cette enquête a été effectuée avec les moyens de mesure existant, il y a 15 ans et en l'absence de prise en compte de facteurs saisonniers, de variables météorologiques fines et de tendances à long terme. Cependant, les protocoles opératoires, comme l'intercalibration des appareils de mesure, les questionnaires de santé ou le suivi des fonctions pulmonaires ont été très précis. Des corrélations entre la concentration de certains polluants de l'atmosphère et les paramètres respiratoires ont été observées. Ainsi la prévalence des affections respiratoires inférieures chez les adultes s'est révélée plus élevée quand la concentration de  $\text{SO}_2$  augmente. De même, chez les adultes, comme les enfants, le VEMS était d'autant plus bas que la pollution est forte. Dans les conditions de mesures de l'époque, il a donc pu être identifié l'action du  $\text{SO}_2$  et des particules. On peut estimer que la population de l'enquête Paarc constitue aujourd'hui une source de données unique pour évaluer les effets à long terme de la pollution atmosphérique sur la santé ; elle devrait

ainsi fournir des informations utiles sur les facteurs d'environnement qui ont un effet sur les pathologies respiratoires obstructives, mais aussi les pathologies cardio-vasculaires et le cancer du poumon.

### Accroître la surveillance épidémiologique

A la lumière de ces résultats et de ceux d'autres études menées à l'étranger, il semble prioritaire de porter un effort important sur la surveillance épidémiologique, en même temps que s'affine la surveillance de la pollution et que la recherche fournit une meilleure connaissance des interactions entre polluants. Cette priorité doit s'adresser particulièrement au suivi des populations sensibles (enfants, personnes âgées, insuffisants respiratoires) et doit intégrer la pollution de fond et la pollution de proximité (surveillance à proximité ou surveillance de risque environnemental). En parallèle, il est nécessaire de développer les études toxicologiques, notamment à partir des mélanges de polluants atmosphériques réactifs.

Une enquête épidémiologique coûte cher, si l'on veut avoir une cohorte suffisante et un nombre représentatif de zones à observer, si l'on introduit l'analyse de polluants encore difficiles à mesurer, si l'on veut réaliser une étude transversale pour caractériser les effets à long terme, si l'on veut prendre en compte le budget « espace-temps » des personnes observées. Il est nécessaire que, dès maintenant, une décision soit prise à partir d'une concertation interministérielle, pour réserver un volume suffisant de crédits sur plusieurs années afin de relayer l'étude Paarc.

Il faut aussi insister sur le cas des particules fines (dont 25 % sont émises par les moyens de transport). Elles constituent un milieu complexe, très hétérogène, par leur état physique et leur dimension, leur nature chimique, leur capacité d'absorber des gaz et par l'influence de l'humidité. On distingue aussi les aérosols primaires émis dans l'atmosphère à partir des sources de pollution et les aérosols secondaires qui sont formés dans l'atmosphère à partir des produits émis et interagissant (formation de sulfates et de nitrates d'ammonium). A partir de diamètres bien définis, elles peuvent pénétrer plus ou moins profondément dans les voies respiratoires. Ainsi on distingue la fraction inhalable, qui est la fraction massique de particules inhalées par la bouche et le nez, la fraction thoracique, qui est la fraction de particules inhalées qui vont au-delà du larynx (avec un diamètre médian de  $11,64 \mu\text{m}$ ), et la fraction alvéolaire pour les particules inhalées qui pénètrent dans les voies aériennes ciliées (avec un diamètre médian de  $4,25 \mu\text{m}$ ). Il est important pour la mesure des particules d'examiner les seuils des diamètres que l'on veut prendre en

considération et de déterminer la nature de ces particules (métaux, sulfates, espèces carbonées). Pour être représentatif du total des fractions thoracique et alvéolaire, on adopte de plus en plus une tête de coupure à 10 microns (appelée en général PM 10), pour aller ensuite peut-être à 2,5  $\mu$  (PM 2,5). De récentes études épidémiologiques américaines et néerlandaises qui convergent ont permis de noter que la composition de l'atmosphère tend vers une augmentation de la concentration en particules fines et en NO<sub>2</sub>, avec une diminution du SO<sub>2</sub> (même remarque pour la France) : elles ont montré qu'à une moyenne annuelle en PM 10 de 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de particules fines, on constate une augmentation statistiquement significative de l'incidence des bronchites, notamment chez les enfants. Le même constat est réalisé pour des concentrations de moyenne journalière de 140  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Ces résultats obtenus après de nombreux travaux n'empêchent pas les autorités correspondantes de penser qu'ils ne sont pas suffisamment péremptoirs. La distribution des dimensions, notamment celle des particules émises par les moyens de transport, est mal connue. Il s'avère donc nécessaire de poursuivre les recherches sur la caractérisation des particules fines, sur les méthodes de mesure concernant notamment les fumées noires, les suies émises par les diesels et les HAP absorbées sur les particules. Il est aussi préconisé de renforcer la recherche toxicologique, particulièrement en situation de smog hivernal. De même, il s'avère nécessaire d'approfondir les enquêtes épidémiologiques réalisées afin de mieux interpréter l'influence des paramètres individuels et socio-culturels sur les réponses aux concentrations observées.

A titre d'exemple, l'Ineris étudie un marqueur diesel et travaille sur un microcapteur catalytique à couches minces avec électrode collectrice d'ions pour la mesure des particules carbonées.

Ces observations conduisent à promouvoir une meilleure appréhension de la structure des couches atmosphériques, au niveau local comme aux dimensions régionales et planétaires. Dans cette perspective, la mesure des polluants doit aujourd'hui utiliser les moyens que l'évolution des techniques propose.

## Utiliser les nouveaux outils de la prévision et de la mesure

### Le Sodar

Il est important de rappeler qu'il existe un appareil susceptible de permettre la prévision des pointes de pollution à quelques heures avec une bonne précision, c'est le sondeur acoustique (Sodar). Malheureusement, aucun réseau fran-

çais n'en dispose, alors que l'appareil le plus avancé aujourd'hui est français, qu'il est opérationnel et que son coût est acceptable pour un appareil de mesure à distance. On en trouve évidemment à l'étranger. Ce matériel est utilisé aux États-Unis (70 exemplaires) pour la surveillance de l'air, pour la sécurité industrielle, pour la mesure des turbulences de sillage des avions autour des aéroports, pour la recherche météorologique, pour des applications militaires. Il a équipé cependant en France la plupart des centrales nucléaires, la fiabilité de l'appareil est telle qu'il constitue une pièce maîtresse des procédures d'urgence.

La prise en compte des données micrométéorologique est essentielle pour faire de la prévision. Il faut une description des basses couches météorologiques qui soit locale et il faut opérer en temps réel. Il faut connaître la hauteur de mélange, la ventilation dans la couche de mélange, la hauteur et la force de l'inversion, le gradient thermique en fonction de l'altitude, ce qui permettra de mesurer les coefficients de diffusion en vertical et en horizontal (jusqu'à 2 000 mètres). Le profil de vent dans la couche de mélange n'est pas constant, de même que les coefficients de diffusion. La géographie du site joue également un rôle. Le succès de ces appareils tient notamment au fait qu'ils permettent de déterminer la hauteur du « chapeau » (hauteur de mélange et/ou de la base des inversions de températures) et les vents qui assurent la ventilation sous ce chapeau, qui sont généralement très différents des vents mesurés près du sol. Grâce à l'utilisation d'une micro-informatique puissante, aujourd'hui peu coûteuse, ces systèmes peuvent être intégrés dans les programmes urbains et industriels de surveillance de la qualité de l'air.

Associé à un modèle statistique simplifié et des capteurs au sol, le Sodar Doppler fournit en temps réel et en continu les données météorologiques locales nécessaires à la prise de décision rapide. En ce qui concerne les cheminées industrielles de moyenne et grande hauteur, les données fournies permettent de mieux contrôler les émissions de manière à maintenir les impacts à des niveaux acceptables. En matière de surveillance de la qualité de l'air urbain, le sodar permet de comprendre et de suivre les paramètres atmosphériques susceptibles d'entraîner d'importants épisodes de pollution, et de prévoir leur évolution : il est ainsi possible, non seulement de simuler différentes stratégies de contrôle des émissions, mais également de prévoir l'état physique de l'air à court terme, c'est-à-dire déclencher à temps « l'alerte ». C'est une sorte « de tour météo invisible de deux mille mètres, qui mesure le gradient thermique ». La prévision, qui permet d'anticiper une situation, est fondamentale pour un réseau.

## Les instruments optiques

L'exemple du Sodar conduit à rappeler la difficulté de convaincre sur l'avantage que l'on peut avoir en matière de surveillance dans l'utilisation des méthodes de télédétection. Des années de recherche ont conduit aujourd'hui à y voir plus clair. On aurait pu aller plus vite, mais pour avancer il faut expérimenter en conditions réelles.

Les instruments optiques de mesure à distance permettent de procéder sans échantillonnage du milieu à des mesures quasi-simultanées et en temps réel en exploitant les propriétés optiques des gaz et des particules présents dans l'atmosphère. Il existe aujourd'hui deux catégories de procédés : l'absorption différentielle, qui consiste à émettre dans l'atmosphère un faisceau lumineux correspondant à la bande d'absorption d'une molécule, et la diffusion de la lumière (MIE), l'effet Raman ou encore la fluorescence.

En France, il a été développé, après des années de recherche sur financement du Ministère de l'Environnement, un Doas (Differential optical absorption by atmosphere spectroscopy) qui vient d'entrer au stade de la commercialisation. Le signal, facture du rayonnement absorbé par le polluant analysé sur un chemin optique de plusieurs centaines de mètres, est capté par un détecteur (photodiode ou spectromètre). Ce signal est complexe, c'est pourquoi son décodage nécessite des opérations plus ou moins difficiles à mettre au point, mais on peut estimer que pour plusieurs polluants gazeux, les résultats sont opérationnels et que l'on a ainsi accès à des informations que l'on ne peut pas obtenir par les analyseurs au sol. Les gaz que l'on peut mesurer sont les  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ , le toluène, le benzène, et l'on pourra probablement aller plus loin par la suite.

Le Lidar, lui aussi, a fait des progrès. Le modèle, issu d'une collaboration entre Français et Allemands, apporte de grands espoirs, à la suite des différents essais effectués dans plusieurs villes à l'étranger et à l'Ineris. Le laser titane-saphir est un laser UV pulsé, performant et fiable, qui est muni d'un double résonateur breveté pour permettre la conversion de fréquence. L'émission est réalisée via un télescope et on mesure la lumière diffusée en retour, en comparaison avec une fréquence proche (Dial System : Differential absorption system and scattering lidar technique). Ce système, qui peut être installé dans un véhicule, est prévu pour la mesure de  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , le benzène, le toluène et les aérosols. Même s'il faut poursuivre les tests, on peut estimer qu'il y a là un outil qui permet d'apporter des informations significatives sur la concentration et les mouvements de polluants mesurés, sur la formation et sur l'évolution des situations de smog, qui ne peuvent être obtenues par des cap-

teurs au sol. On doit pouvoir ainsi suivre l'impact spécifique du trafic sur la qualité de l'air urbain.

## Le laser

Le laser peut fournir d'autres services, à condition de poursuivre les recherches correspondantes. La spectrométrie infrarouge par transformée de Fourier, la spectrométrie par diodes laser accordables (en infrarouge) peuvent permettre d'étendre le champ de polluants mesurés, ou d'abaisser les seuils de détection. On peut aussi penser au microlaser (type YAG pompé par une diode laser), utilisé aujourd'hui en télémétrie de nuage : ce laser, qui se situe dans l'infrarouge, peut conduire à des systèmes pratiques de faible coût et léger. Le laser  $\text{CO}_2$  accordable est aujourd'hui couramment utilisé pour certaines applications, on peut certainement faire un transfert de technologie vers l'environnement et parvenir à mesurer plusieurs polluants, presque simultanément. Détecter plusieurs polluants avec le même appareil est une voie réaliste pour l'avenir.

## Elargir les possibilités de la métrologie

La recherche technologique en matière de métrologie doit avoir une place importante aussi. Elle est indispensable pour développer une instrumentation plus précise, plus fiable, ouverte à tous les polluants et dont les progrès constants correspondent aux exigences croissantes des réglementations françaises et européennes. La mesure en environnement présente des caractéristiques spécifiques : il faut disposer d'instruments sensibles et sélectifs, adaptés à la mesure d'espèces généralement en faible quantité dans des milieux complexes et influencés par de nombreux paramètres physiques. C'est pourquoi les besoins doivent être exprimés aussi par les opérateurs des réseaux de surveillance de la qualité de l'air sur le terrain et leur coopération est indispensable pour progresser.

L'enjeu de la mesure à distance a été montré, mais il existe aussi sur le capteur au sol un champ de découverte prometteur.

Quelques exemples devraient convaincre.

Le capteur à couches sensibles est potentiellement plein de promesses. Il se prête à des procédés de fabrication proches de la micro-électronique, il peut conduire à des instruments économiques et compacts. Il est constitué de deux éléments : « la couche sensible » et le transducteur, qui fournit le signal électrique. Cette fameuse couche peut utiliser différentes propriétés de la matière : la conductivité d'oxydes métalliques ou organiques, la fréquence de résonance de matériaux piézo-électriques, les propriétés optiques spécifiques de matériaux organiques complexes (comme les porphyrines métalliques)

immobilisées dans des couches minces de polymères, les propriétés ferro-électriques de céramiques intégrées dans le silicium. Sur chaque catégorie, on mesure des variations de propriétés physiques, ou des modifications. Mais la couche sensible peut aussi utiliser un matériel biologique (enzymes, bactéries modifiées, matériel cellulaire). L'intérêt est alors de fournir une mesure de toxicité relevant de la présence de plusieurs polluants et de leurs interactions. Il s'ouvre ainsi une multiplicité de possibilités. Et si l'on veut être provocateur, on peut imaginer la mise au point d'un autocollant recouvert de cristaux polymères sensibles au seuil limite d'un polluant urbain caractéristique et doués de propriétés réversibles. Cet autocollant serait placé sur chaque pare-brise et indiquerait au conducteur que la limite est dépassée par variation de sa couleur. Il y aurait là un contrôle facile. Cela peut prêter à sourire, mais après tout, il y a dix ans, quand Airparif et le Sretie travaillaient sur un indice de pollution, bien des esprits tournaient l'idée en dérision. Il existe aujourd'hui des cristaux sensibles au dépassement d'un seuil de température et cela rend des services pour la chaîne du froid, pourquoi pas pour un seuil de concentration d'un polluant !

Un autre besoin de recherche s'exprime pour la mesure des composés organiques volatils (COV) : bien entendu il s'agit de caractériser et de mesurer les espèces spécifiques. On connaît aujourd'hui l'avancée faite sur les benzène, toluène, xylène. Il faut aller plus loin et prendre en considération les aldéhydes, les acides, les hydrocarbures aromatiques monocycliques et polycycliques, les composés chlorés. Le prélèvement, la séparation et l'aide des différents procédés chromatographiques, la détection (notamment la spectrométrie de masse) doivent encore être améliorés afin de développer des appareils plus compacts pour la mesure sur le terrain de composés traces, pourquoi pas les dioxines et les furanes ? Et il y a encore le cas des odeurs et même si quelques progrès ont été réalisés dernièrement, là encore l'effort est à poursuivre. Le « nez électronique » a encore besoin de perfectionnement.

A travers cet élargissement des possibilités de mesure, comment peut-on imaginer un réseau de surveillance plus optimisé ? Il faut certainement intégrer ces moyens nouveaux, qui complètent l'existant et permettent de concevoir une stratégie de prévision pour prendre les mesures dont l'opportunité peut être validée avec une précision croissante. Il faut également connaître la représentativité des sites d'un réseau en terme

de couverture de pollution, en améliorant la méthodologie d'implantation.

Pour une ville de plus de 100 000 habitants, une configuration de progrès pour une action plus adaptée aux situations est certainement l'utilisation combinée de ces différents moyens complémentaires. La combinaison de mesures à distance (au moins, un sodar associé à un DOAS et/ou un lidar), de stations au sol (peut-être moins nombreuses mais plus diversifiées, avec des capteurs spécifiques en fonction des caractéristiques du milieu environnant), d'une station mobile et d'un modèle permettant l'intégration des données fournies par les différents instruments est certainement la voie la plus satisfaisante pour faire état d'une situation urbaine. Au fur et à mesure de la mise au point de nouveaux capteurs spécifiques, il est utile de les insérer dans les réseaux, même si certaines incertitudes demeurent. C'est en confrontant les nouvelles technologies avec les réalités du terrain que l'on peut avancer efficacement. C'est pourquoi les agents des réseaux sont conduits à développer une coopération avec l'industriel de la métrologie, ce qui limitera les risques inhérents à l'installation d'appareils nouveaux. A ce titre, les réseaux sont aussi des espaces d'expérimentation, qui contribuent au développement de l'industrie métrologique. Il faut renforcer en parallèle les capacités d'évaluation dans les centres adéquats (comme les composantes du Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air) des nouveaux capteurs et leur permettre de répondre aux certifications des pays clients.

Ces observations ont visé à montrer qu'il y a urgence à renforcer les moyens de surveillance de la pollution de l'air et que les solutions existent en France. Une politique volontariste de surveillance est à afficher : elle demande la contribution des différents acteurs cités et des moyens. Elle va de pair avec la surveillance des effets sur la santé causés par les différentes composantes de cette pollution, là aussi il est nécessaire d'afficher une volonté et de travailler en coordonnant l'ensemble des initiatives afin de rassembler les moyens indispensables. Le coût social des conséquences de l'action de certains polluants sur la santé des personnes sensibles justifie d'entreprendre cette modernisation, l'élargissement des capacités des réseaux fournira les éléments pour adopter les mesures les plus appropriées pour réduire la pollution de l'air urbain et pour améliorer la connaissance de l'exposition individuelle.