

La pollution par l'ozone (O₃) et le dioxyde d'azote (NO₂) en Île-de-France : un état des connaissances

Martine Tabeaud, université Paris I et Anne Cori, Ecole nationale supérieure des Mines de Paris

Une impossible définition de l'air sain

La directive du 30 décembre 1996 dont provient la Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie (LAURE) donne la définition suivante de la pollution atmosphérique : il s'agit de « *l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre la santé humaine en danger, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives excessives.* » Il apparaît ici que la pollution de l'air est définie uniquement par son origine anthropique (alors qu'il existe des origines naturelles de la transformation de l'atmosphère) et par ses effets nocifs sur les êtres vivants et leur(s) environnement(s). La notion même de pollution est donc par définition difficilement saisissable, de même que celle, contraire, d'air « sain ».

La mesure des polluants dans des stations fixes ou mobiles et leur représentativité : un compromis difficile coût/suivi/nombre de points de mesure

Des agences comme Airparif remplissent leur rôle de surveillance de la qualité de l'air notamment en mesurant en permanence la concentration en divers polluants atmosphériques dans des stations fixes et lors de campagnes avec des stations mobiles.

Mais à partir de cette connaissance ponctuelle de la composition de l'air se pose la question de la notion de « représentativité » des stations de mesure, afin de répondre simultanément à de fortes contraintes législatives (loi sur l'air) et techniques (importance des coûts de mesures), ainsi qu'à la demande du public (connaître en tout lieu la qualité de l'air). Cette notion de représentativité dépend nécessairement de l'objectif visé : la représentativité d'un site n'est pas identique pour des moyennes annuelles ou des moyennes horaires, qui sont par exemple très fortement influencées par les conditions météorologiques du moment.

De même, la représentativité ne sera pas la même pour tous les polluants, puisque les seuils légaux ne sont pas tous identiques (certains concernent des moyennes horaires, d'autres des moyennes annuelles, d'autres encore sont bien plus compliqués...). De nombreux travaux sont menés actuellement pour optimiser le réseau, pour améliorer la cartographie des différents polluants à partir du maillage des stations de mesure.

En tout état de cause, les mesures des teneurs en postes fixes donnent une image utile, nécessaire même, mais imparfaite de l'exposition de la population car les teneurs varient dans l'espace (rue, cour, jardin, etc) et dans le temps (selon les jours et les heures).

Les impacts nocifs du dioxyde d'azote (NO₂) et de l'ozone (O₃) sur la santé humaine

Les travaux de Quénel en 1999 ont bien montré qu'en Europe du Nord Ouest et aux Etats-Unis même avec des concentrations modérées de polluants dans l'air, la pollution est encore à l'origine de dizaines de milliers de décès prématurés chaque année. Toutefois, en France métropolitaine, l'inventaire des émissions dans l'air montre que pour la plupart des substances, les émissions ont été réduites au cours des 10 ou 20 dernières années, grâce à des décisions politiques fortes prises au niveau national et européen. Cette réduction 1990-2001 a été de 40 % pour le dioxyde de soufre (SO₂), indicateur majeur des combustions industrielles et de 20 à 40 % pour les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils (Cov) –les Cov et NO_x sont des précurseurs d'ozone- et de 5 à 20 % pour les particules.

Les impacts du dioxyde d'azote sur la santé humaine concernent surtout le système respiratoire. Il pourrait favoriser les maladies cardio-vasculaires et les cancers du poumon ainsi que les infections pulmonaires de l'enfant. Il est l'un des facteurs causant l'asthme et les diminutions respiratoires des citadins. Mais il a aussi des impacts sur la végétation (défoliation, jaunissement), le bâti (détérioration, noircissement), le climat local (diminution de la visibilité par absorption du rayonnement solaire, donc refroidissement) et il participe, comme l'ozone dont il contribue à la formation, à l'effet de serre, enfin, il est à l'origine de certains phénomènes de pluies acides.

Les seuils légaux

En France, tous les polluants répertoriés et considérés comme dangereux pour les êtres vivants sont soumis à des seuils légaux à ne pas dépasser. Ceux-ci peuvent concerner des moyennes horaires, journalières, annuelles, etc.

- Pour le **dioxyde d'azote**, la norme est fixée par la directive européenne 85/203/CEE du Conseil du 7 mars 1985 : la concentration moyenne annuelle sur l'année civile ne doit pas dépasser le seuil de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$. Au-delà de ce seuil, il existe encore deux « valeurs guide », calculées en moyenne horaire cette fois (G. Escourrou, 1996). Au-dessus de $200\mu\text{g}/\text{m}^3$, les services techniques sont en alertes. Au-delà de $300\mu\text{g}/\text{m}^3$, les insuffisants respiratoires et les asthmatiques doivent éviter de sortir et toute activité sportive est potentiellement dangereuse. Enfin, pour des concentrations supérieures à $400\mu\text{g}/\text{m}^3$, le préfet peut prendre des mesures de restriction de la circulation (alternance des voitures selon l'immatriculation ou même interdiction totale). D'ici 2010, le seuil d'alerte devrait passer de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ à $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans le cadre du décret 2002-213 du 15 Février 2002, qui impose des objectifs de qualité pour les quatre prochaines années.

- Pour l'**ozone**, le décret 2003-1085 du 12 novembre 2003 instaure les seuils suivants :

- Seuil de protection de la santé : le maximum journalier des moyennes glissantes sur 8 heures ne doit pas dépasser $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ plus de 25 jours par année civile.

- Seuil de recommandation et d'information : $180\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire.

- Seuils d'alerte pour la mise en place progressive de mesures d'urgence :

1er seuil : $240\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire dépassé pendant trois heures consécutives ;

2e seuil : $300\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire dépassé pendant trois heures consécutives ;

3e seuil : $360\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire.

Ces seuils sont fixés par des comités d'experts tels que l'EPAQS (Expert Panel on Air Quality Standards : commission d'expertise sur les standards de la qualité de l'air) composés de divers spécialistes (médecins, chimistes, physiciens, statisticiens, etc...)

Les objectifs de la décennie

Les directives relatives aux émissions de polluants des véhicules automobiles (étapes EURO II, EURO III, EURO IV, et EURO IV bis), directive 2001/81/CE du 3 octobre 2001 (cf site Internet du Ministère en charge de l'environnement) prônent au niveau du transport routier :

- la limitation des teneurs en soufre des carburants à 10 ppm à compter de 2009,

- le développement des modes alternatifs à la route, la taxation kilométrique des poids lourds, l'incitation fiscale au renouvellement du parc, les aides aux transports collectifs, ...

Le plan Air Bachelot Narquin de 2003, impose l'utilisation d'un catalyseur « DeNOx » et un filtre à particules sur les véhicules. De plus la directive 2002/5/CE fixait à 2006 des réductions spécifiques concernant les motos.

Enfin le Plan Air EURO V à l'horizon 2010 vise à réduire les émissions de particules de 50% et les émissions de dioxyde d'azote de 25 % pour les véhicules neufs.

L'origine des polluants

Les problèmes de pollution atmosphérique extérieure sont en France dus à deux sources majeures : les industries et les transports. Il est donc évident que le milieu urbain est particulièrement sujet à la pollution, et que les enjeux liés à celle-ci sont d'autant plus importants en ville, puisque les habitants y sont nombreux.

- le dioxyde d'azote

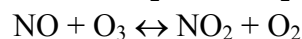
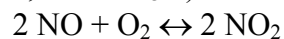
Parmi les nombreux oxydes d'azote existant dans l'atmosphère (protoxyde N_2O , sesquioxyde N_2O_3 , pentoxyde N_2O_5 , ...), le monoxyde (NO) et le dioxyde d'azote (NO_2) sont les plus impliqués dans les mécanismes de pollution atmosphérique. Ce sont des gaz présents naturellement dans l'atmosphère. En effet, les orages, les éruptions volcaniques et les activités bactériennes produisent de très grandes quantités d'oxydes d'azote. Toutefois, ces concentrations atmosphériques naturelles d'oxydes d'azote demeurent très faibles. Ces polluants sont donc principalement liés aux activités humaines.

Le monoxyde d'azote NO se forme par la combinaison du diazote N_2 et du dioxygène O_2 atmosphériques lors des combustions à haute température :



Ce polluant est donc émis par les installations de chauffage des locaux, les centrales thermiques de production électrique, les usines d'incinération et le moteur à explosion des automobiles.

Le monoxyde d'azote NO est rapidement transformé en dioxyde d'azote NO_2 par réaction avec d'autres oxydants de l'air (oxygène O_2 , ozone O_3 ...) :



En raison de leur origine, les oxydes d'azote sont principalement présents dans l'atmosphère des villes et des zones industrielles. Près des axes routiers, qui en produisent environ 48 %, les concentrations de monoxyde d'azote sont généralement plus élevées que celles de dioxyde d'azote, car la transformation du monoxyde d'azote émis par les véhicules en dioxyde d'azote n'est pas instantanée. A l'inverse, sur les sites urbains éloignés des voies de circulation, la pollution par le dioxyde d'azote est plus forte que celle par le monoxyde d'azote.

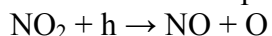
La circulation est un facteur de pollution au NO_x qui décroît très rapidement avec l'éloignement de la source. Donc, la teneur en NO_x dépend de la distance aux axes routiers. Mais c'est aussi la résultante de l'intensité et de la fluidité du trafic. Des voitures prisonnières dans un embouteillage polluent au maximum. Donc fluidifier la circulation c'est diminuer les émissions de polluants. Si le nombre de véhicules pris dans les mouvements pendulaires de trafic routier est constant alors, multiplier les espaces de circulation, c'est fluidifier la circulation...

De plus, le trafic routier généré par transports de marchandises augmente même en zone urbaine plus rapidement que celui lié aux déplacements de personnes. Airparif estime par exemple que les camions diesel émettront en 2015 70 % des NO_x et 50 % des particules et seront donc des émetteurs plus importants que les voitures des particuliers..

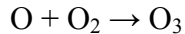
- l'ozone dans la troposphère (dix premiers km de l'atmosphère en contact avec la planète)

Depuis plusieurs années, le niveau de fond en ozone augmente partout en Europe, ce qui justifie en partie l'intérêt porté à ce polluant.

Il existe naturellement de l'ozone dans la troposphère. Pour 1/10, il provient de la descente de l'ozone stratosphérique dans la troposphère et pour 9/10 l'ozone est produit dans la troposphère elle-même. Il provient de la catalyse sous l'effet des photons (h) de la lumière du soleil de molécules de composés organiques volatils ou d'oxydes d'azote et de l'oxygène de l'air.

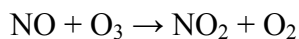


Et



On trouve donc de l'ozone jusqu'en Amazonie, puisque la photosynthèse produit de l'O₂. Les forêts et donc les bois périurbains sont des lieux privilégiés de fabrication d'O₃. Ce n'est donc pas un polluant uniquement urbain, bien au contraire. Par ailleurs, comme l'ensoleillement est indispensable à la libération d'O à partir du NO₂, l'ozone connaît un pic estival et le « beau temps » n'est pas le bon ! Les variations constatées sont dues en grande partie aux variations de l'ensoleillement. En 2003, les conditions climatiques exceptionnelles avaient conduit à des niveaux de pollution photochimique particulièrement élevés qui n'avaient jamais été observés depuis 1991, date de la généralisation des mesures d'ozone à l'ensemble de la France. Ce constat a été général en Europe. En revanche, en 2004, les conditions météorologiques de l'été, avec notamment peu de situations anticycloniques, et donc de soleil, ont conduit en France à un nombre nettement moins important de dépassements des seuils. Selon le Ministère en charge de l'Environnement, 65 % des dépassements du seuil d'information ont eu lieu lors de l'épisode de pollution photochimique du 28 juillet au 4 août 2004 alors qu'aucun dépassement du seuil de 240 µg/m³ sur 3 heures consécutives (seuil entraînant la mise en œuvre de plans d'actions à court terme) n'a été enregistré en 2004.

Mais la réaction chimique qui produit de l'ozone est réversible, ce qui veut dire que dans certaines conditions il se détruit de l'ozone dans la troposphère.



Sous l'influence directe des émissions de véhicules automobiles en milieu urbain les polluants primaires favorisent la destruction de l'ozone (O₃) par réaction avec le monoxyde d'azote. Par conséquent les pics d'ozone se situent à distance des zones d'émissions de polluants primaires (NO_x, SO₂, PS, COV, CO) et donc de façon préférentielle en milieu périurbain. C'est pour cette raison que certains scientifiques considèrent que limiter la circulation lors des pics d'ozone n'est pas une bonne solution...

Les concentrations sont aussi le reflet de la diffusion dans l'atmosphère

Mais les concentrations observées ne répondent pas seulement aux logiques spatiales des lieux d'émissions ou de fabrication. L'ozone par exemple présente des concentrations en général plus fortes en milieu rural qu'en milieu urbain, parce qu'il s'en détruit plus en ville mais aussi parce que sa dispersion se fait à une échelle spatiale large, celle de la région. Au contraire le NO_x répond à une logique spatiale locale, en quelque sorte il s'écarte peu de ses sources d'émission. C'est pour cela que les cartes de NO_x montrent très clairement les axes de transport qui ne sont pas aussi évidents sur les cartes d'ozone.

La dispersion dépend des polluants, de leur masse volumique mais aussi de la pression atmosphérique et donc du temps qu'il fait. Par temps anticyclonique elle est minimale car l'air est plus dense dans les basses couches. Au contraire elle est meilleure lorsque la situation est dépressionnaire. En conséquence, les cartes de pollution en saison froide sont plus contrastées en Île-de-France qu'en été. En été les teneurs sont plus uniformes car il y a une plus grande dispersion verticale, alors qu'en hiver l'air pollué stagne près du sol.

En dehors de la pression, la mobilité de l'air est importante. La pollution est maximale pour des vitesses de vents inférieures à 3 m/s. Lors de ces situations de calme relatif, des brises légères déplacent les nuages de pollution en fonction des heures en particulier au voisinage des secteurs forestiers périurbains. En effet, à certaines heures les forêts sont plus fraîches que les secteurs bâtis, alors une « brise » thermique déplace l'air des forêts vers les quartiers urbanisés. Au contraire la nuit lorsque les forêts sont moins fraîches elles attirent (aspirent) l'air venu des quartiers construits. Donc en 24 heures sans changement de temps, le nuage de pollution se « balade » en quelque sorte en fonction des heures.

Pour ce qui concerne les directions des vents supérieurs à 3 m/s, en Île-de-France, elles se subdivisent grossièrement en deux grandes directions : ouest et est. Les vents de secteurs ouest (SW à NW) sont les plus fréquents dans l'année (près de 40 % des situations). Mais en particulier au cours du semestre froid, les vents d'est correspondent à près d'un quart des types de temps. Comme les situations à vent d'ouest sont associées à de basses pressions et des vitesses élevées, voire des précipitations - trois facteurs qui diminuent les teneurs en polluants de l'air - la pollution se dilue alors dans un grand volume d'air ou bien est lessivée par la pluie. Au contraire, les situations à vent d'est, sont associées à des vents souvent moins forts, une pression plus élevée et des pluies plus rares. Ce qui a pour conséquence une pollution plus importante par vent d'est.

L'exposition des individus aux pollutions

Les divers transports ont fait l'objet de nombreuses études quant aux niveaux d'exposition des individus. Elles ont montré que la pollution au CO est par exemple très importante dans les véhicules, mêmes climatisés. Quant à la pollution dans les rues elles-mêmes à hauteur de piéton elle varie fortement d'une rue à une autre en fonction du bâti (haut, bas, dense, ...). Une étude menée à Amsterdam, sur des conducteurs d'automobiles (voitures bus, taxis, voitures personnelles), des cyclistes et des piétons a montré que la dose inhalée de CO, benzène, toluène, xylènes était maximale chez les conducteurs de voitures et moins élevée chez les cyclistes. Ces derniers utilisent en effet des trajets moins embouteillés, ne stationnent pas dans les « bouchons » et éliminent plus vite parce que leur ventilation interne est accrue par l'effort. Au total, c'est l'automobiliste qui est le premier pollué en quelque sorte !

Par ailleurs, rappelons que les français passent une grande partie de leur vie à l'intérieur de locaux (80 à 95 %), en particulier lorsqu'ils dorment, mais également durant la journée. Ainsi les problèmes de pollution de l'air en France concernent non seulement l'air extérieur, mais aussi l'air intérieur, pollué par des sources extérieures de polluants ayant pénétré à l'intérieur des locaux, mais aussi par des sources intérieures structurelles (radiateurs à gaz par ex.) ou conjoncturelles (utilisation de produits chimiques). Or, il n'existe pas de cartographie de l'air prenant en compte le milieu intérieur. Pourtant Mosqueron a montré en 2001 qu'en Île-de-France l'exposition aux PM₅, Cov et NO₂ est dominée par l'exposition intérieure.

L'étalement urbain répond aux demandes des citadins de vivre dans un milieu le plus sain possible (jardin autour de la maison, forêts à proximité etc.). Mais cette aspiration est ambivalente puisque par définition elle a augmenté les nuisances (pollution, bruit...) liées à la voiture dans les campagnes autour des agglomérations. Ces nuisances concernent bien sûr en premier lieu les voies de transport, mais aussi les maisons où le garage communique souvent avec des pièces du pavillon. Enfin les massifs forestiers périurbains sont des sites préférentiels d'accumulation de l'ozone. Les rurbains et les banlieusards n'échappent donc pas aux effets de la pollution atmosphérique, qu'ils avaient cru fuir en s'éloignant du centre-ville. Un environnement « vert » autour de soi ne prémunit pas contre certaines pollutions, en particulier l'ozone. La pollution chimique de l'atmosphère n'est pas toujours aisément perceptible, il faut souvent se méfier des apparences.

Bibliographie

Ouvrages :

ESCOURROU G., 1980, *Climat et environnement, les facteurs locaux du climat*, MASSON, collection géographie 182 p

ESCOURROU G., 1996, *Transports, contraintes climatiques et pollutions*, SEDES, collection mobilité spatiale, 172 p

JACOBSON M.Z., 2002, *Atmospheric pollution, history, science, and regulation*, Cambridge University press, 399p

UNG A., 2003, *Cartographie de la pollution atmosphérique en milieu urbain à l'aide de données multisources*, thèse de doctorat, Université Paris 7 et Ecole des Mines de Paris, 99p, téléchargeable sur : http://tel.ccsd.cnrs.fr/documents/archives0/00/00/42/09/index_fr.html

Articles :

FOUQUET C. de, Des statistiques contre la pollution, 2p, dans *La Recherche*, n°368, Septembre 2004

LAJAUNIE C., 1984, A geostatistical approach to air pollution modeling, dans *Geostatistics for natural resources characterization*, ed A. G. Journel e A. Marechal, pp877-891

MOSQUETON L., et NEDELEC V. 2001, *Inventaire des données françaises sur la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments*, Observatoire de la qualité de l'air intérieur, 173 p.

QUENEL P., ZMIROU D., DAB W. et al., 1999, Premature deaths and long term mortality effects of Pollution, *International journal of epidemiology*, 28, 2, p.362

WACKERNAGEL H., LAJAUNIE C., BLOND N., ROTH C., VAUTARD R., 2004, Geostatistical risk mapping with chemical transport model output and ozone station data, dans *Ecological Modelling*, 179, 177-185

Rapports :

AFSSE, 2004, *Impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine*, rapport n°2, 146 p.

BOBBIA M., MIETLICKI F., ROTH C., 2000, *Surveillance de la qualité de l'air par cartographie : l'approche géostatistique*, 4p, téléchargeable sur : <http://www.airnormand.asso.fr/>

CORI A., Juin 2005, *Utilisation de données environnementales pour la cartographie du NO₂ sur la région Rouennaise*, 60p

CORI A., Juin 2005, « Représentativité » spatiale des stations de mesure de la concentration moyenne annuelle en NO₂, 55p

CORI A., Juin 2005, *Définition de zones homogènes vis-à-vis du dépassement de seuil pour la concentration en ozone*, 25p

FOUQUET C. de, Avril 2003, *Méthodologie de cartographie de la concentration annuelle de NO₂ sur l'agglomération de Mulhouse*, 41p

GARCIA-FOUQUE S., HOUDRET J.L., PLAISANCE H., 2000, *Synthèse de l'expérience acquise par les réseaux sur l'échantillonnage passif du NO₂*, Ecole des Mines de Douai, département Chimie et environnement, 66p, téléchargeable sur :

<http://www.lcsqa.org/rapport/rap/prog2000/emd/Etude7.pdf>

JEANNEE N., 2003, *Contributions pratiques d'une géostatistique raisonnée en environnement : méthodes et application à la cartographie nationale de la pollution par l'ozone en France*, 7p, téléchargeable sur :

http://www.geovariances.com/IMG/pdf/Contributions_pratiques_Geoevenement.pdf

MALHERBE L., ROUIL L., 2002, *Assistance en modélisation de la qualité de l'air*, INERIS, Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air, 43p, téléchargeable sur :

http://www.lcsqa.org/rapport/rap/prog2002/ineris/Etude_18_assistance.pdf

MALHERBE L., ROUIL L., 2003, *Méthode de représentation de la qualité de l'air, guide d'utilisation des méthodes de la géostatistique linéaire*, INERIS, Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air, 70p, téléchargeable sur :

http://www.lcsqa.org/rapport/rap/prog2003/ineris/Etude14_1_guide_nelle_version.pdf

PERDRIX E., FOURCHE B., PLAISANCE H., WROBLEWSKI A., 2002, *Représentativité spatiale des stations urbaines*, Ecole des Mines de Douai, département Chimie et environnement, 57p, téléchargeable sur :

<http://www.lcsqa.org/rapport/rap/prog2001/emd/LCSQA7.PDF>

Sites Internet :

Principaux textes réglementaires sur la qualité de l'air, au niveau français et européen :

http://www.airaq.asso.fr/reglementation/centre_reglement.htm#fr

Texte complet de la *Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie* disponible sur :

http://www.ligair.fr/pollution/loi_air.pdf

Site de l'IFEN : www.ifen.fr

Cartes de concentrations en ozone : <http://www.prevoir.org/fr/>

Site du Ministère chargé de l'environnement : www.Ecologie.gouv.fr

Site d'Airparif : www.airparif.asso.fr