

Jean-Alain HERAUD, Julien LAURENT, Jean-Paul MASQUIDA et Emmanuel MULLER

La pollution de l'air en ville : le cas des particules fines

En matière de prospective, il y a des domaines où les tendances lourdes autorisent des prédictions aisées, où les scénarios alternatifs vraiment contrastés ont peu de chances de se réaliser avant le très long terme. La démographie fait partie des systèmes à forte inertie et les chiffres de la population globale comme sa répartition peuvent faire l'objet de prévisions très sûres à moyen terme. Ainsi, la concentration croissante de la population mondiale dans les villes et le développement explosif de beaucoup de métropoles fait partie des certitudes pour le présent et le siècle à venir au moins. Avec le phénomène de concentration urbaine vient un certain nombre de conséquences:

- une dynamique évolutive des systèmes urbains très soutenue (économies d'échelles et de variété, innovations techniques, diverses formes de créativité socio-économique et culturelle), et qui ne fait que renforcer l'intérêt de la concentration des activités et des personnes dans les métropoles, créant une boucle de rétroaction très puissante sur la base de ces *externalités positives*;
- un développement concomitant des *externalités négatives* liées à la concentration: encombrements et temps perdu dans les transports, nuisances sonores et olfactives, pollutions multiples qui portent atteinte à la santé.

C'est sur ce dernier point que nous souhaitons faire un peu de prospective et évoquer des pistes de solution. Une pollution particulièrement grave des villes - pour ses habitants - est celle de l'air. Dans ce cadre, la pollution par les *émissions gazeuses* ne sera pas abordée. Non qu'elle soit négligeable, mais parce que les problèmes sont plutôt globaux et relativement bien connus. L'émission de gaz carbonique (CO₂) par les villes est un problème pour la planète mais pas directement pour l'écosystème local: tout effort local de mitigation (diminuer le relâchement ou absorber durablement du gaz), pour utile qu'il soit, ne change que de manière infinitésimale l'impact local. Les oxydes d'azote et de soufre sont des polluants plus locaux/régionaux. Ils ont commencé à faire l'objet de politiques relativement efficaces depuis plusieurs décennies. Par exemple, les pluies acides ont commencé à reculer à partir des années 1980 en Europe – en partie grâce à un meilleur choix de combustible, mais aussi, il faut le reconnaître, du fait de la délocalisation industrielle vers la Chine et les autres pays émergents. Cette pollution n'est pas typiquement citadine, bien que la concentration de la circulation automobile en ville et le chauffage en fasse un vrai sujet de préoccupation. Les controverses sur les moteurs diesel et leurs émissions de NOx sont en train de relancer le débat mais il ne faut pas oublier que le diesel produit aussi beaucoup de particules fines au moins aussi dangereuses pour la santé que les NOx. L'ozone troposphérique, enfin, est un autre problème important (intermittent) en ville, mais il s'agit d'un polluant secondaire lié à l'existence d'autres pollutions aériennes en interaction avec le rayonnement solaire. Sa solution passe donc par la réduction des autres facteurs de pollution aérienne.

Cette note se concentre sur l'autre grande catégorie de polluants atmosphériques, les *aérosols* (particules, éléments solides en suspension dans l'air) qui deviennent un grand enjeu sociétal car les experts commencent à mieux en comprendre la nocivité et les citoyens prennent conscience du sujet. Cette pollution est en grande partie émise *et* respirée en ville ; c'est une caractéristique *endogène* du système. Ces «poussières» sont de taille et de nature très variés. Les études de santé publique se concentrent sur le rôle des micro et nanoparticules dans de multiples pathologies, dont des cancers. Le problème sanitaire que posent les particules a longtemps été sous-évalué, mais la situation est en train d'évoluer très vite. Une étude publiée par la revue médicale *The Lancet* (citée dans *Le Monde* du 21/10/2017) estime à 6,5 millions le nombre de décès dus à la pollution aérienne dans le monde sur l'année 2015, soit 2 à 3 fois plus que le nombre cumulé de décès par le Sida, la tuberculose et le paludisme. Des solutions techniques ou organisationnelles de remédiation existent sans qu'aucune ne puisse résoudre à elle seule l'ensemble du problème. Beaucoup de solutions restent aussi à inventer ou à tester à grande échelle.

Une perception de plus en plus forte du problème

Un nombre croissant de rapports d'experts révèlent le coût sanitaire considérable de la pollution aérienne. Les normes internationales comme celles de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) sont rarement respectées dans les grandes métropoles européennes; et les mégapoles de Chine ou celles des pays en développement atteignent des niveaux insensés. Or, rien qu'en Afrique, les villes de plus d'un million d'habitants qui étaient au nombre de trois en 1960 sont en train de se banaliser : 24 en 2013 et 95 en 2030 (*Le Monde*, 8/08/17). On voit que l'exposition de l'humanité aux pollutions métropolitaines va devenir un enjeu majeur. La responsabilité des pouvoirs publics et des industriels est engagée face à ce qui peut devenir un scandale sanitaire d'une ampleur sans précédent au niveau mondial.

Des décisions politiques brutales sont prises dans le domaine des transports, qui mèneront certainement bientôt à l'interdiction des véhicules utilisant le diesel, voire à terme tous les moteurs à combustion. Le terme «brutal» n'est pas exagéré lorsqu'on pense au contraste avec les politiques laxistes des années passées. Il aurait cependant mieux valu pour les constructeurs eux-mêmes que les autorités publiques aient lancé bien plus tôt des signaux réglementaires et fiscaux dans le bon sens – au lieu d'encourager le diesel comme ce fut le cas particulièrement en France.

En France, le Sénat a estimé à plus de 100 milliards d'Euros par an le coût de la pollution de l'air, et les particules y sont pour beaucoup. L'inhalation des particules génère de nombreux problèmes de santé tels que les maladies respiratoires, cardiovasculaires, immunitaires et neurologiques. On estime qu'actuellement, en Europe, l'espérance de vie a été réduite de 8 mois en raison de l'exposition aux particules issues des activités humaines. Les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé ne sont pas respectées, y compris dans des villes comme Strasbourg qui se veulent particulièrement «écologiques» depuis longtemps et qui ont mis en œuvre des politiques alternatives à la circulation automobile (avec succès, puisqu'à taille comparable le taux de possession de véhicules par les ménages y est particulièrement bas, comme le montre la Note APR du 3/07/2017, de Bernard Aubry).

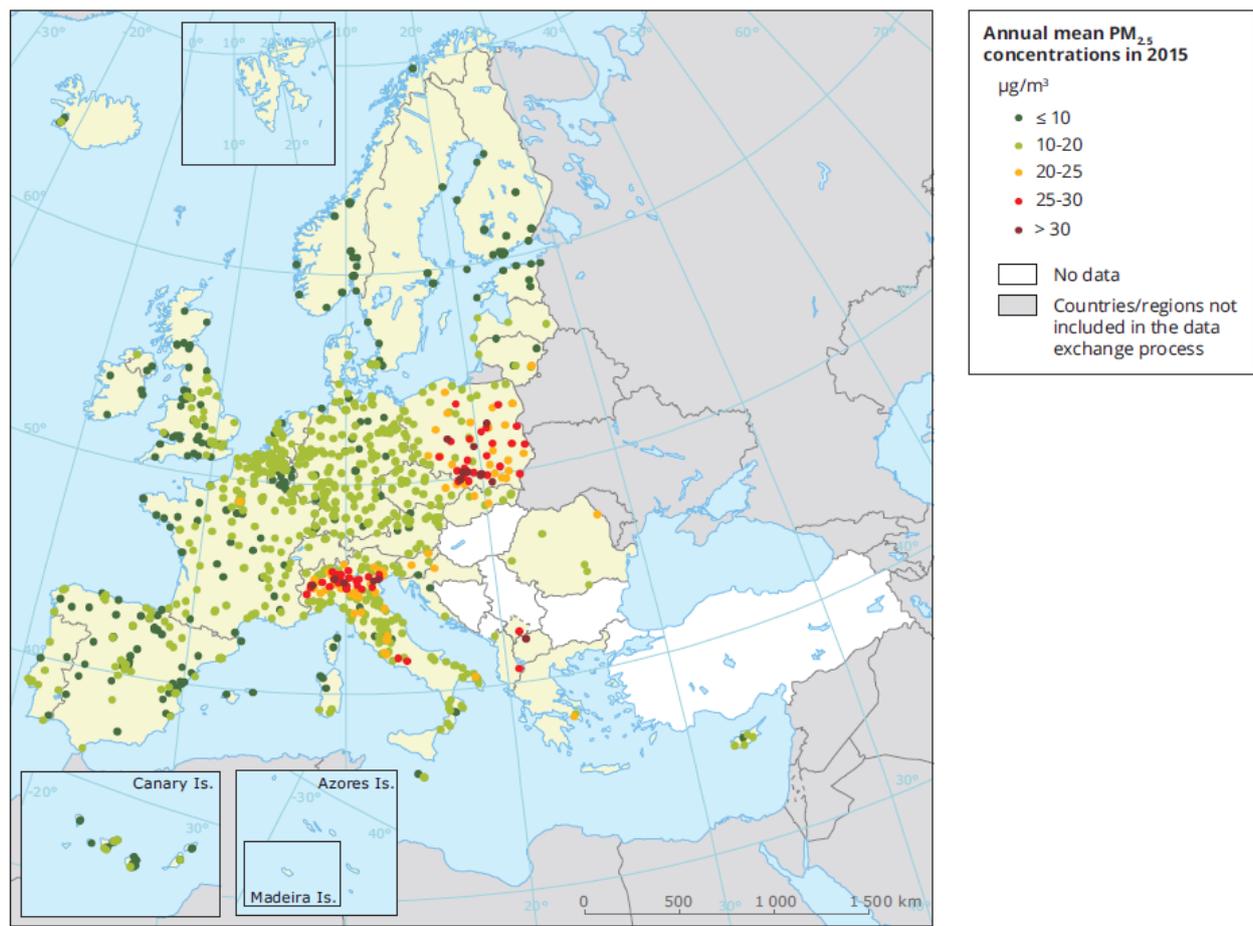
Atmo Grand Est (ex-ASPA) fait état d'une diminution des particules fines de l'atmosphère de l'Eurométropole de Strasbourg entre 2012 et 2014 (*Dernières Nouvelles d'Alsace*, 19/09/17), mais l'agglomération est encore loin des normes de l'OMS. La responsabilité des pouvoirs publics et des industriels est engagée face à ce problème sanitaire d'une ampleur considérable. Signe des temps, des citoyens des villes européennes (exemple récent à Paris) commencent à réagir en attaquant en justice les pouvoirs publics. A Strasbourg, un collectif d'habitants a été créé par Barbara Bouillon,

le *Groupe strasbourgeois pour la santé et la qualité de l'air* (GSSQA) ; le Dr Thomas Bourdrel, radiologue, a aussi pris la tête d'un collectif, *Strasbourg Breathe*. Ces collectifs soulignent que la pollution par les particules n'est pas assez prise en compte parce qu'elle ne se voit pas, mais ils ont bien l'intention de se faire entendre !

Les territoires particulièrement touchés

L'Agence Européenne de l'Environnement (AEE) estime dans son rapport de 2017 que la pollution aérienne a causé en 2014 le décès prématuré (avant 65 ans) de 487 600 personnes au sein de l'Union Européenne (« Air Quality in Europe », *EEA Report N°13/2017*). Or, au palmarès des polluants les plus dangereux sont comptées les particules fines de moins de 2,5 microns (PM_{2,5}). L'AEE estime sur ce seul type de polluant 400 000 décès prématurés. Bien sûr ce genre de calcul est à prendre pour ce qu'il est, à savoir le résultat d'une modélisation sur un certain nombre d'hypothèses qui peuvent toujours être questionnées, mais l'ordre de grandeur indiqué ne peut laisser indifférent. L'autre observation marquante est visible sur la carte suivante extraite du rapport de l'AEE qui illustre l'extrême variété des situations d'exposition des humains sur un territoire comme l'Europe.

Map 4.3 Concentrations of PM_{2,5}, 2015



On notera non seulement la concentration de la pollution dans les grandes régions urbaines, mais aussi la persistance de bassins régionaux entiers extrêmement touchés, comme la Plaine du Pô dans le Nord de l'Italie et le Sud-Est de la Pologne. Dans le premier cas on doit visiblement cette situation à la conjonction d'une forte densité de villes, de beaucoup de transports et d'une industrie très présente. Mais la Ruhr correspond au même schéma, ce qui tend à prouver que si l'on veut bien tenter de réguler la situation on arrive à quelques résultats... La partie de la Pologne qui apparaît extrêmement atteinte est caractérisée également par de l'industrie, mais la problématique est ici celle du charbon (le chauffage individuel porte aussi une forte responsabilité).

Dans le cas des métropoles, la variance du phénomène est tout aussi forte. L'AEE estime que 7% de la population urbaine de l'UE est exposée à des niveaux de PM supérieurs à la limite posée par l'Europe - sachant que celle-ci, 25 microgrammes par m³, est déjà peu contraignante à côté des recommandations de l'OMS. Le point à souligner ici c'est que certains habitants des métropoles sont beaucoup plus exposés que les autres. Quelques tests réalisés à Strasbourg par des chimistes et physiciens de l'atmosphère de l'Unistra/CNRS (autour du laboratoire ICPEES) mettent en évidence que les habitations donnant sur les grands axes routiers de l'agglomération sont beaucoup plus exposées que les autres.

La France, comme beaucoup d'autres pays, est visée par la Commission Européenne et pourrait être un jour condamnée si elle ne fait pas d'efforts notables. On lui reproche particulièrement des dépassements dans certaines zones métropolitaines (Paris, Lyon, Marseille) mais aussi dans la vallée de l'Arve qui cumule des industries et un fort trafic autoroutier vers le tunnel du Mont Blanc. Lors d'une réunion récente (9 octobre 2017) le Ministre en charge de l'environnement, N. Hulot, a proposé de réfléchir à une douzaine de zones prioritaires pour examiner les mesures à prendre en fonction du détail fin des situations sur le terrain.

Nous concluons de tout ce qui vient d'être évoqué que la pollution par les particules fines constitue un enjeu très fort de la politique environnementale et que les mesures à prendre sont à considérer de manière très locale. Par ailleurs, le niveau de gravité des atteintes sur certains lieux demande plus que des mesures générales d'évitement : il s'agit carrément de *dépolluer*. C'est particulièrement le cas pour les zones métropolitaines où les sources d'émission proviennent de sources multiples et décentralisées - et donc difficiles à contrôler. A l'inverse si la pollution est liée à un site industriel précis, l'expérience montre qu'on peut arriver à imposer des mesures efficaces à condition que la volonté politique soit là. Nous proposons donc de regarder particulièrement la problématique de la dépollution en milieu urbain.

Des solutions qui ne sont que partielles

En analysant le cas de la pollution aux particules fines, on trouve un bon exemple de *complexité systémique* et on peut facilement se convaincre qu'il n'existe pas de solution unique. Les particules fines qui vont provoquer des maladies chez les citoyens ne proviennent pas toutes et surtout pas directement du moteur des véhicules circulant en ville. La physico-chimie de l'atmosphère révèle le cocktail malsain dans ses détails: un noyau de particule carbonée émis par un moteur va être impliqué dans l'atmosphère de la ville par toute une chaîne de transformations impliquant d'autres sources de pollution (y compris exogènes comme celles qui proviennent de la campagne environnante comme les nitrates et les pesticides). Les pollutions secondaires issues de ces transformations peuvent se révéler particulièrement délétères.

Il faut aussi prendre conscience du fait que les sources de particules sont multiples, y compris dans un même registre comme celui de la pollution automobile, et que cela complique les recherches de solutions. Par exemple, l'interdiction des véhicules à essence et diesel en ville qui peut déjà apparaître comme une mesure très radicale ne réglera pas complètement la question, car les véhicules électriques produiront toujours deux autres types de particules : celles issues du freinage et celles que produit le frottement du pneu sur l'asphalte. Il faut donc continuer, en parallèle, à faire évoluer la technologie automobile, comme Michelin qui a déposé un brevet concernant des pneumatiques plus adaptés, comme les recherches sur les freins, les revêtements routiers, etc. Rajoutons que les particules carbonées proviennent aussi du chauffage individuel ou collectif et de bien d'autres sources locales ou régionales.

Constatons que pour l'instant peu d'effort a été réalisé en la matière (en comparaison d'autres domaines environnementaux, peut-être plus visibles ou plus faciles à régler). Non seulement la qualité de l'air est mauvaise en ville, mais elle est extrêmement inégale, car la densité de particules à proximité d'un grand axe de circulation est beaucoup plus importante qu'à quelques dizaines de mètres de distance – par exemple de l'autre côté des bâtiments qui bordent l'axe. Pour l'instant on n'a pas encore fait savoir aux habitants qu'ils mettent plus en danger leur santé en prenant l'air sur le balcon au-dessus du boulevard que sur une fenêtre à l'arrière. On imagine aussi les inégalités sociales supplémentaires qu'induit le phénomène selon qu'on habite un quartier résidentiel arboré ou un immeuble au bord d'une autoroute urbaine.

Vers de nouvelles voies de remédiation

On dit souvent qu'il vaut mieux prévenir que guérir. Dans le cas qui nous intéresse il faut au contraire ne pas oublier la remédiation, car rien ne parviendra à supprimer totalement les émissions de particules nocives. Même la sève des arbres et les pollens en produisent (y compris par combinaison en polluants secondaires). Beaucoup de solutions techniques et organisationnelles (comme la structure urbaine) peuvent contribuer partiellement à la politique de «mitigation» environnementale, mais tout n'est pas facilement réalisable. On peut certes penser à la ville idéale parsemée de parcs, voire de forêts urbaines, filtrant les particules, mais on ne peut pas transformer Paris en Berlin... La densification urbaine est par ailleurs une manière de lutter contre l'étalement urbain, ce qui est aussi un objectif du développement durable. Il faut donc se résoudre à vivre aussi intelligemment que possible dans un environnement urbain dense où des particules sont émises. D'où la nécessité de dépolluer en permanence l'air des villes.

Diverses idées ont été récemment proposées pour capter les particules et beaucoup reste à faire en matière d'expérimentation à grande échelle. Les équipements de captage doivent être installés au plus près des sources pour la raison évoquée ci-dessus: à la différence des polluants gazeux comme le CO₂ et les NO_x, les particules diffusent peu ou lentement en dehors de leur lieu d'émission. Il s'agit de commencer l'effort par les lieux où se concentre une grande partie de la pollution comme les boulevards et autoroutes urbaines. On peut aussi tester des systèmes en façade d'immeubles: murs végétalisés ou enduits de produits contenant des photo-catalyseurs. Une des idées fortes consiste à utiliser le mobilier urbain qui est à proximité des voies – lequel devient alors multi-fonctionnel. Une solution expérimentée à Paris comme la colonne-Morris contenant des micro-organismes permet certes de fixer du CO₂, mais ne contribue guère à éliminer les particules et reste un aménagement très ponctuel. Des chercheurs strasbourgeois et des membres de l'APR réfléchissent à d'autres idées pour capter une proportion significative de particules le long des axes les plus pollués. Les systèmes de captation au plus près des voies de circulation présentent l'avantage de traiter les polluants en cours d'émission mais aussi les anciens qui sont remis en circulation par le trafic. Une société a été créée à cette occasion, *La Ville Propre*, dont l'objectif est

de favoriser l'émergence de solutions techniques nouvelles correspondant à cet objectif. Les quatre auteurs de cette note sont impliqués dans le projet.

Une revue des brevets de procédés déposés dans le domaine montre la variété des pistes à suivre. On peut par exemple citer un brevet allemand qui suggère l'utilisation des égouts comme système d'aspiration de l'air. Cette solution semble intéressante mais nécessite sans doute une consommation significative d'énergie. Eurovia a déposé et développé une idée de mur anti-bruit capable de fixer les NOx. Le procédé est testé depuis 2005 le long du périphérique parisien ; il met en œuvre un système photocatalytique. L'inconvénient est qu'il ne traite efficacement que les oxydes d'azote. En Chine, on expérimente des systèmes d'aspiration de l'air au pied des immeubles, à hauteur de piéton ; l'inconvénient est qu'un tel procédé consomme de l'énergie.

Au bout du compte il paraît essentiel de penser de manière systémique les solutions à développer. Le piégeage et la fixation des particules constituent un vrai enjeu de santé public et il existe de multiples pistes de recherche, mais la question est complexe et ne sera pas réglée par un modèle unique de solution technique. A chaque lieu doit correspondre une solution adaptée. Par exemple, il est plus facile de filtrer l'air d'un silo à voiture ou d'un tunnel que d'une portion de voirie à l'air libre. Il faut enfin considérer globalement *l'économie* du système de dépollution, car il s'agit de mettre en place un dispositif économe et durable qui fasse appel autant que possible à des ressources renouvelables pour son fonctionnement, comme à des investissements physiques à durée de vie longue et faciles à entretenir.