

La pollution de l'air par les particules : des connaissances scientifiques au service des acteurs

Air Pollution by Particulate Matter : Connecting Stakeholders and Scientific Advances

Éric VILLENAVE⁽¹⁾, Gilles AYMOZ⁽²⁾, Matthias BEEKMANN⁽³⁾,
Armelle BAEZA-SQUIBAN⁽⁴⁾, Joëlle COLOSIO⁽⁵⁾

Les particules dans l'air ambiant

Dans le langage des sciences de l'atmosphère, les particules désignent la matière solide ou liquide suspendue dans une masse d'air, à l'exclusion des gouttelettes (ou des cristaux) de nuage et de pluie, plus généralement définis sous le terme d'hydrométéores. La distinction, quelque peu artificielle, entre particules et hydrométéores peut s'expliquer par le fait que l'on considère que la vitesse de chute d'une particule sous l'action de la gravité est faible au regard des déplacements dus au transport dans les masses d'air.

De nombreux termes sont employés pour désigner la matière particulaire. Le terme « aérosol », ou « aérosol atmosphérique », correspond aux particules atmosphériques et à leur environnement gazeux. Il est plutôt employé par la communauté des chercheurs s'intéressant au climat. La communauté des chercheurs s'intéressant aux impacts de la pollution de l'air sur la santé emploie plutôt le terme « particules ». La raison principale en est que l'air associé aux particules, formant l'aérosol, est expiré et n'est donc que le vecteur de transport des particules au sein de l'appareil respiratoire.

Les questions « particules et santé » ayant débouché sur des réglementations plus rapidement que celles liant « aérosols et climat », le terme particule possède aujourd'hui un net avantage. Pour preuve, les termes PM₁₀ et PM_{2,5} qui en découlent (PM pour *Particulate Matter* en anglais), correspondent aux particules dont le diamètre⁽⁶⁾ est inférieur respectivement à 10 µm et 2,5 µm, et font l'objet de normes

météorologiques et de réglementations bien définies dans l'air ambiant. D'autres termes sont également d'usages courants comme les poussières ou les poussières fines. Les termes particules fines, ultrafines et nanoparticules sont également abondamment utilisés, y compris dans ce numéro spécial de *Pollution Atmosphérique*, mais leur définition est moins précise. Les nanoparticules désignent des particules pour lesquelles l'unité appropriée pour en décrire la taille est le nanomètre (soit un milliardième de mètre), principalement par différence avec les particules micrométriques. Cette catégorie de particule couvre donc généralement des classes de particules de taille comprise entre quelques nanomètres à la centaine de nanomètres. Elles présentent un grand intérêt, notamment sur le plan sanitaire. Notons enfin que les nanoparticules désignent souvent dans la littérature des particules nanométriques manufacturées, alors que le terme de particules ultrafines englobe plutôt l'ensemble des particules nanométriques ambiantes.

Le bilan de la qualité de l'air en France en 2011⁽⁷⁾ montre qu'il est difficile de dégager une véritable tendance à la hausse ou à la baisse des concentrations de PM₁₀ sur la période 2000-2011. Comparée à l'évolution des émissions de particules primaires (voir l'article de Chang *et al.* dans ce numéro), les fluctuations interannuelles ne semblent pas refléter d'évolution des émissions, mais semblent plutôt guidées par d'autres paramètres comme les conditions météorologiques (voir dans ce numéro l'article de Favez *et al.*).

Afin de prendre en compte les recommandations de l'OMS sur l'impact des particules sur la santé, la surveillance en continu des particules dans l'air

(1) Université Bordeaux 1 – CNRS, OASU-EPOC, 33405 Talence.

(2) ADEME, Service Évaluation de la Qualité de l'Air – 27 rue Louis Vicat – 75737 PARIS cedex 15.

(3) Laboratoire Inter-universitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA), Laboratoire mixte Paris VII-UPEC-CNRS, UMR 7583, 61 avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil, France.

(4) Université Paris-Diderot, Sorbonne Paris cité, unité de Biologie Fonctionnelle et Adaptative, EAC CNRS 4413, laboratoire des Réponses Moléculaires et Cellulaires aux Xénobiotiques, 75205 Paris.

(5) ADEME, Service Évaluation de la Qualité de l'Air – 27 rue Louis Vicat – 75737 PARIS cedex 15.

(6) Il s'agit, pour être exact, du diamètre aérodynamique des particules.

(7) Bilan de la qualité de l'air en France en 2011 et des principales tendances observées au cours de la période 2000-2011 (ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie).

ambiant a fortement évolué. Elle est basée depuis une dizaine d'année sur l'indicateur PM_{10} , principalement parce que ce paramètre était, notamment à fin des années 1990, le seul permettant d'établir une réglementation et un suivi homogène sur tout le territoire européen. Le suivi de cet indicateur, complété désormais par celui des $PM_{2,5}$, permet d'établir des bilans factuels et comparables de qualité de l'air, sur tout le territoire européen et ce depuis l'échelle locale ; ces bilans permettent un porté à connaissance de tous les publics. Compte tenu des dépassements récurrents de valeurs limites de PM_{10} , la prise de conscience collective s'est largement renforcée, et se traduit actuellement par la mise en place de plans d'actions comme le « plan particules ».

Aujourd'hui, les connaissances nouvelles sur les particules fines nous montrent que la masse des particules atmosphériques PM_{10} et $PM_{2,5}$, n'est très probablement pas l'indicateur le plus pertinent pour qualifier leurs impacts sur l'environnement et la santé, et donc pour orienter de façon optimale les actions de réduction ou de limitation des émissions dans l'air. De nouveaux paramètres, issus de travaux scientifiques récents, sont aujourd'hui développés et proposés à l'ensemble des communautés concernées par la qualité de l'air, afin d'affiner les prises de décision en lien avec les impacts. Notamment, le carbone-suie (parfois désigné par le terme *black carbon*, ou BC) est un traceur intéressant à la fois pour la qualité de l'air et le climat (voir les articles dans ce numéro de P. Laj et celui de B. Festy et Y. Le Moulec). Son introduction dans les réglementations internationales et européennes sur les émissions et sur la qualité de l'air pourrait intervenir prochainement notamment dans le cadre de la révision de la directive sur la qualité de l'air en 2013. Un autre exemple concerne les particules de diamètres inférieurs à 100 nm ($PM_{0,1}$), qui ont un impact direct important sur la santé, alors que leur masse est négligeable par rapport à celles de particules plus grossières comme les $PM_{2,5}$ et PM_{10} .

La législation en Europe et en France

La législation européenne sur la qualité de l'air impose, pour les particules, la surveillance des particules PM_{10} depuis plus de 10 ans, et des $PM_{2,5}$ depuis 2008. Certains éléments toxiques des particules font également l'objet d'un suivi réglementaire dans l'air ambiant, comme les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) ou certains métaux lourds.

Les textes européens définissent les modalités pratiques de la surveillance et, en particulier pour les PM_{10} , des valeurs limites pour la protection de la santé humaine. En cas de dépassement d'une valeur limite, les États membres doivent mettre en place des

plans d'actions visant à ramener la valeur du polluant en dessous de la valeur limite. En France, ces plans sont les PPA, Plans de Protection de l'Atmosphère.

La transposition des obligations européennes est reprise et complétée dans la législation française. Les réseaux de surveillance de la qualité de l'air, réunis en France au sein de la Fédération nationale ATMO, mettent en œuvre cette surveillance réglementaire sur leurs territoires de compétence, en lien avec le ministère de l'Écologie et sous la coordination technique du LCSQA⁽⁸⁾. Dans ce cadre et conformément à la Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie de 1996, ils transmettent aux préfets les informations relatives aux dépassements ou prévisions de dépassements des seuils réglementaires et mettent à disposition d'un large public toutes les données mesurées ou prédictives sur la qualité de l'air. On distingue dans la législation française deux catégories de seuils de vigilance, i) des seuils à court terme permettant d'informer notamment les personnes sensibles en période de pics de pollution et permettant d'agir *via* des mesures dites « d'urgence » telles que la diminution ou modification de certaines productions industrielles, le ralentissement de la vitesse du trafic automobile... ii) de seuils à long terme qui s'inscrivent dans un objectif de protection de la santé humaine pour des expositions chroniques (il définit une valeur journalière ne devant pas être dépassée un certain nombre de jours par an), le dépassement des seuils à long terme entraîne la mise en place de mesures de réduction pérennes telles que les PPA ou le plan particules actuellement.

Les impacts des particules sur l'homme et l'environnement

Parmi les nombreux composés présents dans l'atmosphère, certains ont un impact reconnu sur la santé humaine, comme les composés organiques volatils (COV) ou le monoxyde de carbone (CO), alors que d'autres, tels que les gaz à effet de serre, ont un impact direct sur le climat. Les particules atmosphériques présentent la particularité d'avoir non seulement des impacts sanitaires mais aussi des impacts sur le climat. Elles ont également des effets sur les écosystèmes et le patrimoine bâti. Pour ce dernier thème, non développé dans ce numéro, le lecteur souhaitant plus d'informations pourra se référer aux résultats du programme de recherche Primequal⁽⁹⁾.

Santé

Lorsque l'on respire, l'air est logiquement expiré. Ce n'est pas toujours le cas pour la phase particulaire qui va pénétrer plus ou moins profondément dans

(8) Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air – <http://www.lcsqa.org/>

(9) Voir notamment les actes du colloque de restitution « Qualité de l'air et particules : Impacts sur environnement et santé. Que préconiser pour demain ? » sur le site de Primequal : www.primequal.developpement-durable.gouv.fr/

l'appareil respiratoire, selon la taille des particules. Lorsque les particules ont un diamètre aérodynamique compris entre 10 et 3 μm , elles se déposent au niveau de la trachée et des bronches. À moins de 3 μm , elles peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires et pour les ultrafines passer dans le sang. Malgré l'existence de systèmes d'épuration des particules, celles-ci s'accumulent dans l'organisme au cours des expositions chroniques. Les particules les plus fines génèrent des affections respiratoires et cardio-vasculaires qui résultent en grande partie d'une inflammation du système respiratoire. Les particules, par leurs propriétés physiques (morphologie, granulométrie) et leur composition chimique, produisent dans les tissus cibles des espèces oxydantes responsables de l'induction des processus inflammatoires qui seront plus ou moins exacerbés selon la sensibilité des personnes exposées et la nature des particules. Les particules de composition très variée transportent plusieurs familles de polluants persistants comme les métaux lourds, les dioxines, les PCB, certains pesticides, les HAP, les pollens, etc. Une grande partie de ces composés ont une action cancérigène, voire mutagène et tératogène pour certains, susceptible de s'ajouter, à plus long terme, aux effets des particules précitées.

Les symptômes associés aux aérosols sont souvent multipliés autour ou à l'intérieur des grandes villes, du fait de la proximité de leurs sources et de leur forte concentration, mais aussi de la multi-exposition des populations, cumulant par effet « cocktail » les effets dus à la présence simultanée de plusieurs polluants (comme l'ozone ou les oxydes d'azotes).

La stratégie thématique sur l'air de la Commission européenne (Communication COM (2005) 446 du 21.09.2005) indique que les niveaux ambiants de $\text{PM}_{2,5}$ sont responsables d'une baisse de l'espérance de vie de près d'une année en moyenne sur le territoire de l'Union européenne. Plus récemment, cet effet sur l'espérance de vie a été confirmé par l'étude « Aphekom » conduite par l'INVS (voir le résumé de l'étude « Aphekom » proposé dans ce numéro). Ce constat a servi de base au renforcement de la législation européenne sur la qualité de l'air ambiant en matière de $\text{PM}_{2,5}$ (directive 2008/50/CE). Par ailleurs, l'avis de l'ANSES sur les particules fines du 23.03.2009 conclut qu'on ne peut trouver de seuil de pollution au-dessous duquel il n'y aurait pas d'impact sanitaire et que les expositions fréquentes à des niveaux modérés de pollution ont plus d'impact sanitaire que les expositions à des épisodes ponctuels de « pics » de pollution, même répétés. L'ANSES recommande donc de donner la priorité à des actions de réduction aux sources d'émissions. Pour aller plus loin, plusieurs articles de ce numéro sont consacrés à cette question.

Du point de vue socio-économique, un rapport de juin 2012 du CGDD évalue entre 20 et 30 milliards d'euros par an pour la France métropolitaine les coûts pour la santé de la pollution de l'air extérieur. Ces

coûts sont des ordres de grandeur quantifiés *via* l'attribution d'une valeur monétaire des impacts sanitaires liés à la pollution de l'air en termes de mortalité et de morbidité.

Climat

Les particules ont des impacts sur le climat, car elles affectent de façon significative le bilan radiatif terrestre, par deux types d'effets (direct et indirect). Le bilan radiatif terrestre est défini simplement par le GIEC comme les quantités d'énergie reçues par le système climatique Terre-atmosphère et réémises vers l'espace. Lorsque le bilan est nul, la température moyenne de la planète est stable.

La présence de particules dans l'atmosphère entraîne une diminution du flux solaire incident qui arrive sur la surface de la Terre (tel un parasol) et donc globalement, un refroidissement. C'est l'effet direct. Les effets indirects résultent quant à eux des interactions entre les nuages et les particules : lors de la formation des nuages, les particules peuvent servir de noyaux de condensation. Ainsi, pour un contenu en eau fixé, un nuage issu d'une masse d'air polluée contiendra plus de gouttelettes qu'un nuage « classique ». Un tel nuage sera alors plus réfléchissant que celui issu d'une masse d'air sans ces particules, modifiant ainsi l'albédo⁽¹⁰⁾ planétaire et diminuant donc le flux lumineux arrivant à la surface terrestre. De plus, le nombre de gouttelettes (plus élevé) et leur taille (plus réduite) ne pourront pas permettre au nuage d'atteindre rapidement la taille critique au-delà de laquelle il y a précipitation (pluies, etc.). Ainsi, l'augmentation de la durée de vie du nuage entraînera une hausse de la couverture nuageuse sur Terre, ce qui aura, selon l'altitude du nuage, un effet refroidissant ou réchauffant. La composition chimique des particules joue également un rôle important : les particules contenant une fraction importante de carbone élémentaire (ou *black carbon*) ont globalement un effet positif sur la variation de température moyenne, tandis que celles qui contiennent une fraction importante de sulfates contribuent plutôt à un refroidissement global.

Au final, déterminer l'effet des particules sur le climat est donc un exercice complexe. Bien qu'étant la cible d'un effort de recherche important de la part de la communauté scientifique, les effets directs et indirects des particules sont encore mal caractérisés. Les modèles de simulation du climat indiquent toutefois qu'une nette réduction des émissions/générations de particules se traduirait globalement par une aggravation du réchauffement climatique (voir l'article d'Isabelle Coll dans ce numéro).

Les particules sont encore aujourd'hui une des sources majeures d'incertitude sur la compréhension du changement climatique. Un des enjeux principaux en termes d'évaluation de l'impact du changement climatique sur la qualité de l'air et la santé, est de

(10) Fraction du rayonnement solaire réfléchi par une surface (comme celle de la Terre).

mieux appréhender les polluants atmosphériques secondaires, tels que l'ozone ou ici les Aérosols Organiques Secondaires (AOS), qui ne peuvent être réglementés directement à l'émission, et dont les impacts à la fois sanitaires et climatiques ne peuvent plus être traités de façon dissociée.

Écosystèmes

Les particules ont d'autres impacts environnementaux, contribuant aux dépôts de polluants sur les sols. Ces dépôts engendrent des phénomènes d'acidification et d'eutrophisation, dégradant les écosystèmes notamment forestiers et aquatiques. L'acidification est le résultat de l'augmentation de l'acidité dans les milieux. Elle est à l'origine, dans les années 70 et 80, des dégâts causés par les pluies acides sur les forêts des pays du Nord. Ce phénomène a également touché les forêts du Nord de la France, dans les Vosges et dans les Ardennes ainsi que certaines zones du Massif Central. Plusieurs protocoles au sein de la convention de Genève ont été signés depuis, pour adapter les lois à l'évolution des connaissances en matière d'environnement. Leur application a permis de faire baisser significativement l'acidification, en agissant notamment sur les émissions d'oxydes de soufre, dont la transformation dans l'atmosphère amène à la formation de particules composées d'acide sulfurique. En revanche, le phénomène d'eutrophisation, résultat d'un apport exagéré de substances nutritives (dont l'azote), semble, lui, en augmentation. Bien que les conséquences d'une modification du cycle de l'azote dans les écosystèmes soient complexes à déterminer, l'eutrophisation peut entraîner des dégradations ou des nuisances avérées sur tous les écosystèmes terrestres ou aquatiques, comme des changements d'espèces et des pertes de biodiversité.

La complexité de la relation entre les sources de particules et leurs concentrations dans l'air ambiant

Une difficulté majeure rencontrée dans la description des processus physico-chimiques en lien avec l'action et l'impact des particules est non seulement leur complexité mais leur caractère éminemment non linéaire. Par exemple, il ne suffit pas de restreindre les émissions de particules pour que leurs niveaux de concentrations observés dans l'air ambiant diminuent d'autant. Plusieurs paramètres sont en effet à prendre en compte :

Des particules primaires et secondaires : Les particules sont composées d'une fraction primaire (directement émise sous forme particulaire dans l'atmosphère), et/ou secondaires, c'est-à-dire générées directement dans l'atmosphère à partir de pré-curseurs gazeux.

La fraction primaire des particules est par exemple issue naturellement de l'érosion des sols (poussières, particules minérales), et comprend également les

sels de mer (embruns), des suies émises lors de feux de forêts, ou encore les cendres volcaniques. L'activité de l'homme est également à l'origine d'émissions primaires de suie (combustion d'énergie fossile, de bois de déchets), de particules résultant de l'usure des pneumatiques ou des catalyseurs équipant les véhicules, ou encore de la remise en suspension par le passage de véhicules des particules initialement déposées sur la chaussée. Un point sur les inventaires d'émissions de particules primaires est proposé par Chang *et al.* dans ce numéro.

Les particules secondaires, en revanche, sont directement formées dans l'atmosphère, par des processus physico-chimiques de conversion de gaz en particules. Ainsi, la plus grande part des sulfates et des nitrates, ainsi que des particules organiques présentes dans l'atmosphère en France sont des aérosols secondaires (voir l'article de Favez *et al.* dans ce numéro).

Des polluants réactifs : Les particules présentes dans l'atmosphère ne sont pas toujours inertes sur le plan physico-chimique, et leurs processus de formation/transformation dépendent de nombreux facteurs (météorologiques, géographiques, sources...). Par exemple, il est admis que les températures les plus basses favorisent la condensation d'espèces semi-volatiles en particules par des processus dits de nucléation.

Des polluants à courte durée de vie : La durée de vie du CO₂, de l'ordre de la centaine d'année, implique que sa concentration dans l'atmosphère soit relativement homogène à l'échelle du globe. Ce n'est pas le cas pour les particules dont la durée de vie dans l'air est de l'ordre de quelques jours (en fait, de quelques heures à quelques semaines selon leur taille et les conditions météorologiques). Ce temps de vie ne permet pas aux différents niveaux de particules de s'homogénéiser dans l'air, aussi observe-t-on de façon systématique des concentrations en particules plus élevées à proximité des zones d'émission.

In fine, la concentration de particules dans l'air est un équilibre subtil entre les processus de formation (et en particulier les émissions primaires et la formation de la fraction secondaire), les conditions de dispersion, de transport dans l'air (dynamique et météorologie) depuis les sources d'émission jusqu'à leur élimination. Les particules disparaissent de l'atmosphère lorsqu'elles se déposent sur les surfaces par dépôt sec, soit sous forme de dépôt humide lors des précipitations (pluie, neige).

En conséquence, selon le temps de résidence dans l'atmosphère des particules et leur transport (dû à la circulation atmosphérique des masses d'air), les changements induits en termes de santé et de climat peuvent s'étendre au-delà des grandes zones d'émission comme les milieux urbains et périurbains, à une échelle régionale, voire continentale ou globale. Les émissions locales de polluants primaires et la formation de polluants secondaires dans les panaches de pollution contribuent ainsi à l'augmentation des teneurs de fond des polluants atmosphériques.

Plusieurs types d'outils existent à ce jour pour relier les sources de polluants à leurs concentrations dans l'air ambiant. En tenant compte au mieux de l'ensemble des processus complexes décrits plus haut, plusieurs types de modèles ont été développés :

Les modèles chimie-transport. Ces modèles numériques de qualité de l'air sont principalement utilisés pour la prévision à court terme de la qualité de l'air, ou pour des projections d'impacts sur la qualité de l'air, d'évolution de l'intensité des sources d'émissions. Ces modèles représentent la chaîne de processus émissions – transport – transformations physico-chimiques – dépôts, intégrant ainsi les différentes étapes du cycle de vie des espèces gazeuses et des particules.

Les valeurs limites pour les particules étant définies en termes de masse de PM_{10} et $PM_{2,5}$, les efforts d'amélioration des modèles ont beaucoup porté sur une meilleure simulation de la masse de particules. Ainsi, le système de prévision de pollution PREVAIR (www.prevoir.org), délivre quotidiennement des cartes de concentrations en PM_{10} et $PM_{2,5}$, prévues pour le jour même ou quelques jours en avance.

Pour bien représenter la composition chimique des particules, ces modèles doivent être nourris des émissions de particules primaires et de leur composition chimique (comme le carbone-suie ou organique, émis lors de processus de combustion, ou les minéraux issus de l'érosion et remis en suspension par les vents proches du sol, ou encore le sel de mer...). La formation d'aérosol secondaire, par nucléation ou par condensation de gaz peu volatils doit également être prise en compte. Si pour l'aérosol inorganique (sulfates, nitrates, ammonium...), cette formation est assez bien connue et simulée, elle n'est pas encore suffisamment élucidée pour l'aérosol organique, dont la plupart des modèles sous-estiment leurs concentrations.

De la même façon, le nombre total de particules présentes dans un volume d'air, qui est surtout déterminé par celui des très petites particules (d'un diamètre en dessous de 100 nm) contribuant peu à la masse, n'est pas encore bien modélisé. Ainsi, la modélisation correcte du nombre de particules constitue encore un défi important.

Enfin, pour une composition chimique et pour une distribution de taille de particules données, c'est le type de mélange de particules qui déterminera leurs propriétés optiques et hygroscopiques et ainsi leur impact sur le climat (effets directs et indirects). Entre les deux cas extrêmes de mélange externe (particules chimiquement pures) et de mélange interne (toutes les particules ont la même composition chimique), de multiples formes intermédiaires de combinaison ont été mises en évidence sur le terrain et en laboratoire (notamment par microscopie électronique). En effet, différentes phases solides et liquides de composition chimique variée peuvent coexister au sein d'une

même particule, donnant naissance à une multitude de formes possibles. Ici, l'enjeu est de faire la part de ce qui est nécessaire à représenter dans les modèles, afin de reproduire au mieux, sur un plan macroscopique, les propriétés optiques et hygroscopiques de l'aérosol déterminant son impact sur le climat.

Les modèles source/récepteur. Ces modèles ont pour objectif d'identifier les sources des particules sur la base des prélèvements effectués directement dans l'air ambiant. Un intérêt important de cette méthode est de caractériser précisément la composition chimique de particules prélevées, et d'en déduire la contribution réelle de certains émetteurs (voir l'article dans ce numéro de Jaffrezo *et al*). Ces modèles ont notamment constitué une étape importante pour mieux appréhender l'impact réel des combustions de biomasse (chauffage au bois et brûlage de déchets verts).

Ces modèles permettent également d'identifier et de quantifier l'impact de sources difficiles à renseigner dans les inventaires. Elles permettent de s'affranchir de certaines incertitudes sur les émissions réelles, et de prendre en compte certains processus de formation et de transformation qui contribuent à la fraction secondaire de ces particules.

Ces méthodes apportent des informations sur la contribution réelle de nombreuses sources de particules aux niveaux de pollution ambiante. L'identification plus fine des contributions de certaines sources au niveaux de particules, comme la distinction des contributions du chauffage au bois et du brûlage à l'air libre de déchets, ou la détermination de la part des véhicules diesel par rapport à celle des véhicules essence, sont des perspectives nécessitant encore des travaux de recherche.

Enfin, ces modèles peuvent être utilisés pour contribuer à l'évaluation réelle *in situ* d'actions d'amélioration de la qualité de l'air. Par rapport au suivi des indicateurs PM_{10} ou $PM_{2,5}$, ces modèles peuvent apporter une information plus précise sur l'évolution de l'impact de l'action aux niveaux de particules.

Finalement, plusieurs articles dans ce numéro de *Pollution Atmosphérique* font référence à ces outils reliant les sources de polluants à leurs concentrations dans l'air ambiant. Par exemple, la synthèse des actions de recherche soutenues par les programmes LEFE/CHAT⁽¹¹⁾ et PRIMEQUAL proposée par P. Laj permet une vue d'ensemble sur les progrès réalisés dans ce domaine.

Comment tenir compte de ces connaissances pour améliorer la qualité de l'air ?

En France, les dépassements récurrents de valeurs limites européennes de concentrations de PM_{10} et $PM_{2,5}$, ont entraîné une accélération dans la mise en place de plans d'actions et de mesures de

(11) Programme national de recherche LEFE/CHAT (Les enveloppes fluides et l'environnement /CHimieAtmosphérique) coordonné par l'INSU – voir le site : <http://www.insu.cnrs.fr/lefe/chimie-atmospherique-chat>

réduction des émissions. L'intégration rapide des résultats récents des travaux scientifiques et de l'observation de la qualité de l'air permet aujourd'hui d'améliorer l'efficacité de ces actions à mettre en œuvre. Parmi les enseignements à prendre en compte, on note en particulier :

- **Premier enseignement**, les particules ont un caractère multi-sources et multi-origine géographique. Même en proximité du trafic routier, fortement influencé par les émissions véhiculaires et où se concentrent les dépassements de valeurs limites de concentrations, plusieurs niveaux d'actions sont nécessaires, comme illustré dans la figure ci-dessous :

- **Second enseignement** : Les niveaux de particules mesurés dans l'air ambiant sont liés de façon non linéaire à des émissions primaires et à la formation de particules secondaires à partir de précurseurs gazeux. En conséquence, une réduction quantifiée des émissions primaires constitue un levier d'action fondamental, mais n'aura pas forcément un impact proportionnel sur les niveaux de particules observés. Les outils de modélisation permettent d'estimer *a priori* l'efficacité potentielle de ces actions, afin de les dimensionner plus finement. Toutefois, ces outils ont des performances encore limitées pour représenter la fraction secondaire des particules (notamment la fraction organique secondaire).

Il est donc très important de disposer d'une connaissance fine et territorialisée des sources de particules, afin de cibler au mieux des actions locales. Il est également nécessaire d'évaluer *a priori* l'efficacité des actions mises en place, en particulier pour des actions touchant aux émissions de précurseurs de particules ou à des émissions diffusées sur le territoire, comme le chauffage au bois individuel, l'agriculture ou les émissions par les véhicules. Enfin, une évaluation fine de l'impact réel d'actions sur la qualité de l'air peut nécessiter la mise en œuvre d'outils complexes et le recours à des indicateurs plus fins que les $PM_{2,5}$ et les PM_{10} .

- **Troisième enseignement** : au-delà de la santé publique, les particules ont d'autres impacts, notamment sur le climat et les écosystèmes. Il est donc nécessaire d'évaluer les impacts croisés, de rechercher des cobénéfices, et d'éviter les antagonismes.

À titre d'exemple, les résultats de l'étude « Aphekom » indiquent qu'habiter à proximité du trafic routier augmente sensiblement la morbidité attribuable à la pollution atmosphérique. En complément, d'autres études montrent que le carbone-suie, émis exclusivement par les sources de combustion, semble être un indicateur plus pertinent de la toxicité des particules issues de ce type de source que les

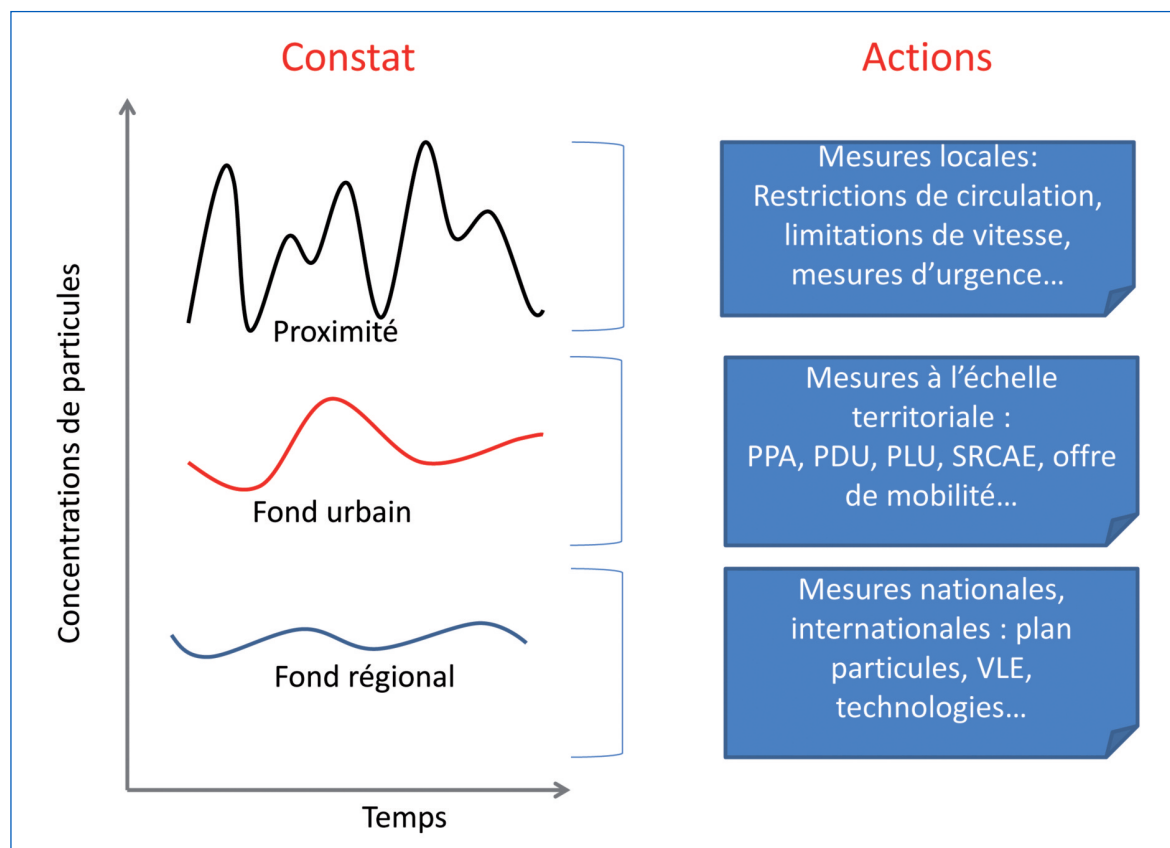


Figure 1. Échelle de pollutions atmosphériques et échelle d'actions (source ADEME).

PM₁₀ et PM_{2,5}. Le carbone-suie étant également un composé participant au réchauffement climatique, agir sur ces types de source présente donc un double bénéfice environnemental, à la fois sanitaire et climatique.

Quels besoins de recherche finalisée pour contribuer à la société de demain ?

En premier lieu, l'amélioration des connaissances sur les particules (sources, formation/transformation, dépôts...) nécessite le développement ou l'optimisation d'outils. En particulier, un enjeu important est lié à l'amélioration générale des connaissances de la fraction organique secondaire des particules et à une approche plus réaliste des connaissances des émissions. Ceci est d'autant plus important à appréhender du fait de la non linéarité des processus mis en jeu.

Les actions correctives efficaces à court terme sont de plus en plus difficiles à mettre en œuvre compte tenu de sources diffuses, nombreuses, impliquant des coûts de « dépollution » de plus en plus élevés, des ruptures technologiques ou des pratiques nouvelles, auxquelles la société n'est pas toujours préparée.

Les solutions purement techniques, comme la réduction des émissions canalisées de l'industrie, les performances des moteurs thermiques des véhicules, et dans un futur assez proche, celles des appareils de chauffage au bois, ne connaîtront très probablement plus d'évolutions aussi fortes à l'avenir que dans un passé récent. Pour ces dernières sources, l'évolution des émissions est en grande partie liée au renouvellement des parcs pour remplacer ou substituer les véhicules ou appareils les plus émetteurs ; à court terme, les mesures de réduction de la pollution atmosphérique peuvent se traduire par des mesures plus ou moins contraignantes, notamment pour la population, et avoir des impacts en matière d'acceptabilité sociale. Pour être efficace, il est nécessaire de développer une visibilité des actions leur permettant d'être assimilées par le plus grand nombre.

Intégrer la qualité de l'air dans l'urbanisme et la mobilité de demain

Pour prévenir les problématiques de qualité de l'air, il est nécessaire d'intégrer les enjeux de qualité de l'air intérieur et ambiant dans les projets de développement des territoires urbanisés de demain, dans les moyens de transport et de mobilité associés, et dans les futurs métiers et activités économiques.

Pour ce qui est de l'air ambiant, des outils de modélisation de plus en plus performants doivent encore être développés pour établir des scénarios globaux, qui plus est dans un contexte de réchauffement climatique. La prise en compte des impacts sur le patrimoine bâti et les écosystèmes (à des fins de préservation de la biodiversité, de la fertilité des sols

naturels et agricoles, des ressources forestières et des milieux aquifères) constitue également un domaine où la recherche doit jouer pleinement son rôle pour éclairer la décision et fournir les bons outils de diagnostic et permettre les projections.

Pour ce qui est de l'air intérieur, et notamment parce que les constructions deviennent de plus en plus étanches dans un souci de contrôle des échanges énergétiques avec l'extérieur, il est important de poursuivre le développement, d'une part, des connaissances sur les déterminants de la qualité de l'air intérieur et, d'autre part, des technologies performantes et économes de ventilation et d'aération à la fois dans les constructions neuves mais également dans les bâtiments à réhabiliter.

En complément, la caractérisation préventive de polluants émergeant tant dans l'air intérieur que dans l'air ambiant est nécessaire. Ceci nécessite notamment des travaux prospectifs sur les émissions atmosphériques liées à l'évolution des activités anthropiques (nouveaux process, nouveaux produits...).

Développer des approches intégrées

Les indicateurs de qualité de l'air doivent également être perfectionnés et évoluer vers des indicateurs intégrés. Il est nécessaire de continuer de développer des indicateurs, comme le carbone-suie, permettant de relier plus directement les émissions de polluants à leurs impacts environnementaux et sanitaires.

En matière d'impact sanitaire, la connaissance est encore à améliorer afin notamment de limiter les incertitudes sur les effets sur la santé, de renforcer la quantification de la relation dose-réponse, d'approfondir les savoirs sur l'interaction entre les différents polluants ainsi que sur les multi-expositions. Ces connaissances nouvelles devraient permettre également de produire des évaluations plus précises des coûts sanitaires liés à la qualité de l'air.

Compte tenu notamment de la complexité des phénomènes atmosphériques, de l'imbrication des problématiques à différentes dimensions (du local au global) et des corrélations avec les effets du changement climatique, les mesures, et notamment l'action publique en matière de qualité de l'air, doivent être de plus en plus intégrées, multifformes et ce à différents échelles (territoriale, nationale, européenne, internationale).

La poursuite de la recherche sur les aérosols et notamment sur les AOS est une illustration de la complémentarité désormais nécessaire entre les problématiques de qualité de l'air (dont l'air intérieur) et celles en lien avec le changement climatique. C'est notamment par le développement de travaux de recherche sur les impacts croisés air-énergie-climat que les acteurs publics pourront mettre en œuvre des mesures plus intégrées et donc plus exhaustives.