

© CHRISTIAN WEISS/ADEME

QUALITÉ DE L'AIR

La recherche se mobilise

On parle aujourd'hui plus volontiers de « qualité de l'air » que de « pollution atmosphérique ». C'est le signe que les efforts entrepris depuis plus de deux décennies ont porté leurs fruits. La pollution régresse. La qualité de l'air s'améliore. Il reste encore beaucoup à faire, et la recherche joue ici un rôle crucial. Elle s'efforce de relever deux grands défis pour réduire les émissions : mieux déterminer leur source, mieux évaluer la situation de l'atmosphère. S'en ajoute depuis peu un troisième : comprendre les liens entre la qualité de l'air et le réchauffement climatique.

> P. 2
Qualité de l'air :
en progrès,
mais...

> P. 5
Un important
dispositif
de recherche

> P. 6
Déterminer
la source
des émissions

> P. 8
Évaluer pour
réduire
les émissions

> P. 10
Comprendre
les liens avec
le climat

> P. 12
Recherche
et
innovations

Cahier réalisé en partenariat avec :



Qualité de l'air : en progrès, mais...

L'impact de la pollution atmosphérique sur la santé n'est plus à démontrer. La qualité de l'air s'est améliorée, mais ce n'est pas encore suffisant.

Mieux. Beaucoup mieux. Depuis une vingtaine d'années, la qualité de l'air extérieur en France s'est très nettement améliorée. La présence de polluants comme le dioxyde de soufre, le monoxyde de carbone, le plomb et le benzène a considérablement chuté. « *Cela montre que dans ce domaine, lorsqu'on met en place des actions, il est possible d'obtenir des résultats* », souligne Joëlle Colosio, chef du service Évaluation de la qualité de l'air à l'ADEME. Vrai.

Il serait cependant prématuré de crier victoire et de clore le dossier de la pollution. Il reste une foule d'autres polluants à maîtriser et, à la différence des précédents, ils sont souvent bien plus délicats à gérer. D'une certaine façon, le plus facile a été fait. L'origine des polluants incriminés à l'époque était en effet bien identifiée et circonscrite : essentiellement les grands sites industriels. Les solutions pour limiter l'émission de ces sources fixes ont été mises en place notamment grâce à la réglementation et au développement de nouvelles technologies. Les autres en revanche proviennent d'une variété de sources, multiples, mobiles (transports) et extrêmement diffuses. Pire encore, ils résultent souvent d'interactions chimiques complexes et parfois difficiles à cerner.

Résultat : parmi la longue liste des polluants atmosphériques, plusieurs continuent à afficher des concentrations trop élevées au regard de la réglementation. C'est en particulier le cas pour les oxydes d'azote (NO_x) et les particules fines dans certaines grandes agglomérations ainsi que pour l'ozone en zones périurbaines ou en zones rurales.

Ce qui a été baptisé « particule » est un mélange de polluants solides et/ou liquides en suspension dans l'air. Ces particules sont émises par nombre de sources, naturelles ou anthropiques : industrie, chauffage, transports, agriculture, végétation... Leur danger pour la santé dépend des espèces chimiques qui les composent et de leur taille. Elles sont aujourd'hui dans le collimateur. Un « plan particules » prévoit ainsi des mesures pour en réduire de 30 % la concentration à l'horizon 2015 en France. Deux catégories sont actuellement réglementées, les particules dites PM_{10} (diamètre aérodynamique inférieur à $10 \mu\text{m}$) et depuis 2008, s'y sont ajoutées les particules fines, les $\text{PM}_{2,5}$ (diamètre inférieur à $2,5 \mu\text{m}$) qui présentent le danger de pénétrer plus profondément dans l'appareil respiratoire. Les transformations chimiques sont aussi à l'origine de particules dites « secondaires » créées à

partir de molécules « précurseurs » comme l'ammoniac et les oxydes d'azote.

L'ozone, c'est une autre affaire. Il fait partie des polluants dits « secondaires », c'est-à-dire issus de transformations physico-chimiques dans l'atmosphère, ce qui rend leur étude

PRINCIPAUX POLLUANTS CHIMIQUES

COMPOSÉS GAZEUX COURANTS

NO_x (NO , NO_2)
Oxydes d'azote

Foudre, installations de combustion, véhicules automobiles, engrais azotés participent à la formation de l'ozone polluant.

SO_2
Dioxyde de soufre

Éruptions volcaniques, combustion du charbon, du fioul.

CO
Monoxyde de carbone

Trafic routier, chauffage participent à la formation de l'ozone polluant.

O_3
Ozone

Polluant secondaire, se forme à partir d'autres polluants.

COV
Composés organiques volatils
Vaste famille de polluants comprenant le benzène, le formaldéhyde, etc.

Forêts, transports, industrie chimique, chauffage individuel, traitements agricoles (pesticides, engrais) participent à la formation de l'ozone polluant.

POPs
Polluants organiques persistants dont HAP
Hydrocarbures aromatiques polycycliques

Combustions incomplètes (incinération des ordures, métallurgie, incendies de forêt, moteurs Diesel). Souvent liés aux particules.

Métaux lourds : plomb, mercure, cadmium, nickel, zinc, etc.

Combustion du charbon, du pétrole, des ordures ménagères. Généralement liés aux particules.

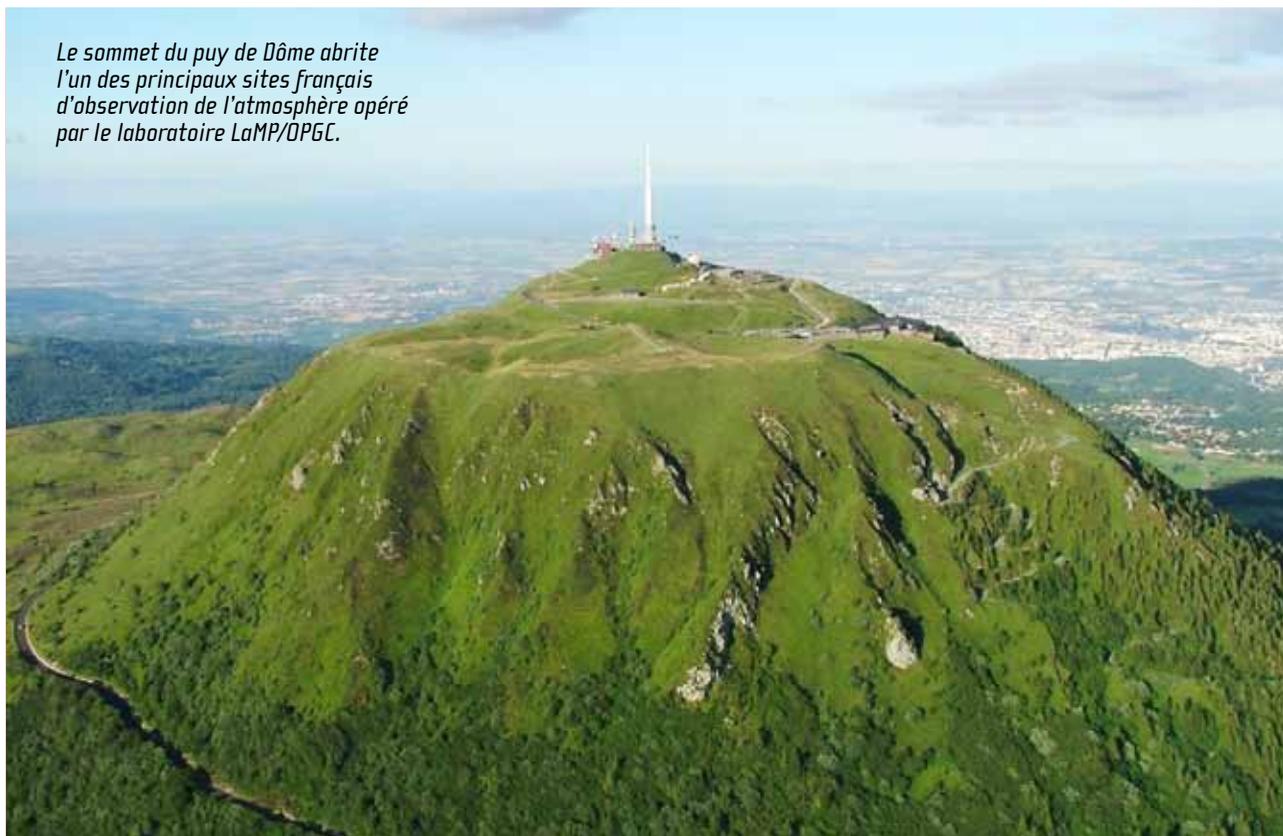
PARTICULES

PM_{10} (particules inhalables $< 10 \mu\text{m}$)
 $\text{PM}_{2,5}$ (particules fines $< 2,5 \mu\text{m}$)

Pollens, fumées, poussières provenant de l'érosion et des éruptions volcaniques, fumées des combustions, du trafic routier, des industries, poussières des carrières, des cimenteries. Servent souvent de véhicules à d'autres polluants.

Source : ADEME

Le sommet du puy de Dôme abrite l'un des principaux sites français d'observation de l'atmosphère opéré par le laboratoire LaMP/OPGC.



© AURÉLIE COLOMB

et leur maîtrise particulièrement difficiles. L'ozone se forme ainsi à partir de composés organiques volatils et d'oxydes d'azote, réaction activée par l'ensoleillement.

Troisième mauvais élève de la pollution, les NO_x . Ces oxydes d'azote résultent de la combustion des combustibles fossiles, les transports étant aujourd'hui leur principale source, devant l'industrie. Les niveaux d'oxydes d'azote sont également liés à des processus chimiques dans l'atmosphère et dépendent des conditions météorologiques et de l'ensoleillement. Dans la famille NO_x , c'est le dioxyde d'azote (NO_2) qui est le plus nocif et le plus réglementé.

De par son impact sur la santé des populations, la pollution de l'air est reconnue comme un véritable problème de santé publique. Concernant les polluants les plus préoccupants, comme l'ozone, le dioxyde d'azote, ou les particules fines, des corrélations ont ainsi été observées entre l'exposition à ces polluants et la mortalité cardio-respiratoire. Une relation causale est maintenant admise par la communauté scientifique entre expositions aux particules et impact sur la santé. Globalement, les impacts de la pollution de l'air se traduisent par des affections et insuffisances respiratoires, maladies cardio-vasculaires, asthme, cancer du poumon...

LE SUJET EST D'AUTANT PLUS PRÉOCCUPANT, et justifie les mesures prises notamment dans le cadre des lois portant engagement pour l'environnement, que les populations les plus affectées sont celles des villes, qui en France réunissent déjà plus de 70% de la population, chiffre appelé

à croître. Paradoxalement, si les personnes interrogées sont préoccupées par la pollution de l'air, elles ne se sentent pas directement concernées et ne font pas forcément le lien avec leurs actions individuelles. D'où un nécessaire effort de pédagogie.

Et cet impact sur la santé a un coût : diverses études ont permis d'estimer le coût sanitaire de la pollution entre 20 et 30 milliards d'euros en France, soit de l'ordre de 400 à 500 euros par habitant. Ce qui n'est pas négligeable. D'autant que les effets environnementaux de la pollution de l'air viennent s'ajouter aux effets sur la santé : diminution de la croissance chez les végétaux, nécroses foliaires, pluies acides, perturbation des écosystèmes aquatiques et terrestres, altération des matériaux et du patrimoine immobilier...

Mais la qualité de l'air, c'est aussi un marché économique. Il est estimé à plus de 4,4 milliards d'euros avec un fort potentiel de croissance. Le nombre d'emplois directs liés à la qualité de l'air devrait atteindre 15 000 postes en 2020. Dans les pays en développement et les pays émergents, les besoins en matière de qualité de l'air sont considérables. La bonne nouvelle est que les industriels français sont plutôt bien placés par rapport à leurs concurrents. Ils disposent des technologies avancées, que ce soit dans le domaine de la mesure, de la modélisation ou du traitement des émissions (COV, NO_x , particules...). La Fédération interprofessionnelle des métiers de l'environnement atmosphérique (Fimea), créée en 2010, s'est donné pour

L'AIR INTÉRIEUR AUSSI !

Rentrer chez soi et fermer portes et fenêtres pour se protéger de la pollution de l'air n'est pas la bonne solution. On a en effet pris conscience depuis quelques années que la qualité de l'air intérieur, celui des habitations, lieux publics, bureaux... laisse elle aussi sérieusement à désirer. Inquiétant lorsqu'on sait que nous passons environ 80% de notre temps à l'intérieur de locaux. Moisissures, fibres, composés organiques volatils, monoxyde de carbone, formaldéhyde, acariens... font parties des polluants les plus fréquents. Mais comparées aux données disponibles sur l'air ambiant, les connaissances relatives aux sources et aux niveaux de contamination sont encore fragmentaires. C'est à l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI), créé en 2001, qu'il revient d'identifier les causes et les substances affectant la qualité de l'air intérieur, à évaluer leurs concentrations ainsi que l'exposition de la population et les risques, que ce soit dans les logements, les bureaux ou les lieux fréquentés par le public (écoles, crèches...).

Côté industriel, de nombreuses entreprises s'intéressent au sujet, et cela dans tous les domaines. Une société comme Beewair a par exemple développé une technique originale (DBD-Lyse) pour décontaminer l'air intérieur. Airsûr propose une offre intégrée pour les milieux industriels comprenant l'analyse, la mesure et le traitement de l'air pollué. LCB vise l'industrie alimentaire et joue la carte inverse en utilisant la voie aérienne pour... la décontamination des locaux. Arcom intègre des technologies de détection des pollutions (COV, ammoniac...) et de décontamination au sein de ses systèmes de gestion technique du bâtiment. La problématique de la qualité de l'air intérieur constitue aujourd'hui une préoccupation majeure du secteur du bâtiment. Cela d'autant que les économies d'énergie militent pour des bâtiments de plus en plus étanches, ce qui nécessite de gérer de façon performante le renouvellement d'air (ventilation, aération) afin de maintenir une qualité de l'air intérieur satisfaisante.

ambition de fédérer et structurer la filière sur toute la chaîne de valeur, de l'industrie à l'innovation, au travers des sociétés d'ingénierie ou de service de ce secteur composé en grande partie de TPE/PME. En tout juste deux ans, elle compte déjà une cinquantaine de membres. «*Entre autres actions, elle a vocation à développer le rapprochement de la recherche avec les entreprises pour créer de la valeur par les transferts de technologie*», déclare Étienne de Vanssay, président de la Fimea.



© WAHID MELLOUKI

HELIOS, chambre de simulation atmosphérique à irradiation naturelle d'Orléans pour l'étude des processus atmosphériques.

DEUX LEVIERS D'ACTION. En France, l'ADEME joue un rôle clé en matière de qualité de l'air. L'Agence appuie le ministère en charge de l'Écologie dans la mise en œuvre des politiques visant à réduire la pollution atmosphérique. Elle intervient ainsi en jouant sur les deux leviers possibles pour le faire. D'abord sur la recherche, en initiant des travaux de recherche. L'objectif est de mieux connaître l'origine de polluants, leur évolution dans l'air, ainsi que leurs impacts. De quoi concevoir, expérimenter et évaluer des mesures et des actions pertinentes.

Le second levier d'action consiste à travailler sur les émissions. Dans cette optique, l'Agence soutient le développement de technologies propres et de solutions de réduction des émissions à la source. Un socle nécessaire pour accompagner les collectivités dans la mise en place des plans d'amélioration de la qualité de l'air, les entreprises pour la réduction de leurs émissions (industrie, trafic, combustion, agriculture...) et les particuliers dans leurs prises de décisions quotidiennes (transports, logement...).

Un important dispositif de recherche

Pour la recherche, améliorer la qualité de l'air signifie recenser les polluants, déterminer leur origine et comprendre leurs déplacements. Cela afin de prévoir leur évolution et de fixer les moyens d'action pour les diminuer.

Déterminer la source des polluants est un beau challenge pour les chercheurs, car le problème est d'une extraordinaire complexité. À l'instant t en un lieu x , la pollution est en effet la superposition d'émissions locales, mais aussi de polluants venus de centaines, voire de milliers de kilomètres... Qui plus est, de nombreux polluants résultent d'interactions chimiques complexes au sein de l'atmosphère, ce qui rend très ardue l'identification précise de leurs sources. Outre ces réactions chimiques dans l'air, le niveau de pollution est affecté par le mouvement des masses d'air, la topographie, l'ensoleillement, la pluie... Sans compter les effets croisés avec le changement climatique.

Mesure et simulation (numérique ou physique) sont les deux instruments clés de cette recherche. Ils interagissent étroitement. En France, ces travaux sont en particulier menés par une dizaine de laboratoires dont la plupart sont regroupés au sein de l'Institut national des sciences de l'Univers (INSU). L'institut, à travers ses laboratoires, possède notamment plusieurs grands instruments de mesure.

Afin de structurer les travaux scientifiques sur l'air, des programmes sont mis en place par les différents acteurs français soutenant la recherche. L'INSU pilote ainsi les programmes pluripartenaires LEFE (Les enveloppes fluides et l'environnement) et MISTRALS (Mediterranean Integrated Studies at Regional And Local Scales). Le ministère chargé de l'Écologie et l'ADEME copilotent PRIMEQUAL, Programme de recherche interorganisme pour une meilleure qualité de l'air à l'échelle locale. Autre exemple, CORTEA, à l'ADEME, traite des connaissances, de la réduction à la source et du traitement des émissions dans l'air.

Les efforts des chercheurs ont permis de développer des outils de mesure ou de modélisation qui sont actuellement utilisés de façon opérationnelle pour la surveillance de la qualité de l'air. C'est le cas de la plate-forme PREV'AIR, mise en place par un consortium INERIS-Météo-France-INSU-ADEME. Elle diffuse quotidiennement via Internet des cartographies et prévisions, pour les trois jours à venir, de la qualité de l'air en France et en Europe.

Au-delà de la France, plusieurs grands programmes de recherche européens sont concernés par la pollution atmosphérique. GMES (Global Monitoring for Environment and

Security), le programme d'observation de la Terre, comporte un important volet sur le sujet. D'autres programmes européens sont en cours, dont trois, IAGOS, ACTRIS, ICOS, constituent la pierre angulaire des observations pour le climat et la qualité de l'air en Europe. Complémentaires aux observations par télédétection depuis l'espace, ces projets fournissent à l'ensemble de la communauté scientifique les informations les plus pertinentes sur l'évolution de la composition atmosphérique.

IAGOS a équipé des avions de ligne avec des instruments sophistiqués pour effectuer des mesures de gaz et d'aérosols dans la haute troposphère. ICOS et ACTRIS forment un réseau international de stations d'observation au sol pour le suivi des gaz à effet de serre (ICOS) et des aérosols (ACTRIS). Ces initiatives européennes, dans lesquelles la France joue un rôle moteur, viennent en complément des observations réglementaires et fournissent un ensemble unique de paramètres sur l'évolution de la composition atmosphérique loin des sources de pollution. Ces observations sont ensuite utilisées dans les modèles de prévision du climat et de la qualité de l'air au sein d'un système intégré qui, dans le futur, pourrait être très similaire à celui de la prévision météorologique. ■



Durant la campagne PEGASOS en 2012, ce dirigeable a survolé l'Europe pour comprendre les liens entre pollution et climat.

DÉFI 1 Déterminer la source des émissions



Instrument national de l'INSU, la chambre Cesam est dédiée à l'étude des processus atmosphériques multiphasiques.

© LISA/CNRS. PHOTO : J.-F. DOUSSIN

Déterminer la provenance des polluants exige de connaître leur source physique mais aussi de découvrir leur origine géographique, sachant que les substances polluantes ont le goût du voyage au long cours.

Les sources de polluants sont extrêmement diverses. Elles sont biogéniques comme les forêts qui émettent des composés organiques volatils (COV), précurseurs de l'ozone. Elles sont anthropiques, et l'agriculture comme l'industrie, les transports ou le bâtiment (chauffage) ajoutent chacun leur pierre à l'édifice.

Les émissions par types de source sont assez bien identifiées. Par exemple, les transports sont notamment responsables de la présence d'oxydes d'azote et de particules fines. La combustion de biomasse produit des $PM_{2,5}$ et des HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques). L'agriculture est notamment source d'ammoniac, de méthane et de PM_{10} . L'industrie rejette des COV et des métaux lourds.

Pour les polluants secondaires, l'affaire se complique. Produits des transformations chimiques dans l'atmosphère des polluants primaires, ils sont souvent plus nuisibles, sont beaucoup plus nombreux et forment des mélanges extrêmement

complexes. Les chercheurs ont donc recours à des chambres de simulation atmosphérique. Il s'agit « simplement » de reconstituer des atmosphères simplifiées, de les soumettre à un rayonnement solaire simulé – et, polluant par polluant, de calculer la vitesse à laquelle ils se transforment, d'en élucider le mécanisme, de déterminer leur capacité à produire de l'ozone, des photo-oxydants ou des particules, de caractériser la toxicité de leurs produits secondaires, bref de produire les données pour construire les modèles numériques.

De tels outils sont rares car ils sont nécessairement lourds et puissamment équipés. L'un d'entre eux, CESAM (Chambre expérimentale de simulation atmosphérique multiphasique), une enceinte superéquipée d'un volume de $4,2\text{ m}^3$, est installée au LISA (Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques, Paris). Elle est dédiée à l'étude des processus atmosphériques multiphasiques telles que la formation des aérosols secondaires ou la réactivité des composés gazeux en phase nuageuse. CESAM fait partie du consortium européen Eurochamp-2 qui réunit 14 partenaires. Ce consortium a déjà une réussite à son actif : la création d'une base de données d'expériences en libre accès, qui est largement utilisée pour l'établissement de mécanismes décrivant la dégradation des polluants atmosphériques.

Remonter à la source des émissions est un vrai travail d'enquête. Il nécessite en premier lieu d'acquérir des données. C'est ce que font en permanence les laboratoires de recherche à l'aide d'une multiplicité d'instruments (voir page 7). Ils permettent de faire l'inventaire des composants chimiques – gaz, particules... – présents dans l'atmosphère en un lieu donné. Des campagnes de mesures ponctuelles complètent ces inventaires.

Une fois ces données recueillies, le rôle du chercheur est de parvenir à identifier les espèces chimiques typiques de chaque source d'émission. Et ce sont les outils de chimie analytique qui lui permettront de le faire. Toute une batterie d'outils est utilisée en parallèle : mesures par chromatographie gazeuse et liquide, par spectrométrie de masse, par méthodes optiques. Ils permettent d'étudier la composition chimique des particules, et ses caractéristiques – ses signatures chimiques – apportent des éléments qui, par combinaison et recoupement, tendent à l'identification des sources : combustion de biomasse, combustion d'énergie fossile, etc. Souvent, mais... pas toujours. Certaines émissions primaires, comme celles des particules ultrafines, restent mal connues. Il en va de même pour de nombreux aérosols secondaires d'origine organique, alors que leurs homologues inorganiques sont mieux cernés. ■

DANS LES LABOS

L'impact des mégapoles

Megapoli* est un vaste programme de recherche européen mené entre 2008 et 2011. Réunissant plus de 20 partenaires européens, il visait un objectif précis : étudier l'impact des mégapoles sur la qualité de l'air. Avec aussi l'ambition de parvenir à mieux comprendre l'origine des particules fines. «*Les émissions primaires comme celles des particules carbonées étaient mal connues. Il en était de même pour les aérosols organiques secondaires formés à partir de précurseurs gazeux*», précise Matthias Beekmann. Ce chercheur du LISA (Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques, Paris) représentait le CNRS au sein de ce projet. Paris s'est imposé comme la mégapole de choix pour cette étude. Deux campagnes de terrain intensives ont été menées en 2009 et en 2010. Elles comprenaient trois sites de mesure au sol représentant le fond urbain, équipés notamment de récents

spectromètres de masse propres à bien analyser les aérosols. S'y ajoutait également l'utilisation d'un avion (ATR 42) instrumenté. De quoi élargir l'étude au long panache issu de la ville. Les résultats de Megapoli sont significatifs. Et parfois étonnants. Ainsi, il s'avère que l'origine des particules fines est très majoritairement extérieure à la ville et qu'elles viennent de loin. Autre constatation : les aérosols organiques semblent principalement issus de sources non fossiles : en hiver, la combustion de biomasse, et en été, les émissions de la végétation (à savoir les composés organiques volatils qui en sont issus). Enfin, les simulations réalisées à partir des données recueillies ont montré qu'en moyenne l'influence à moyenne distance (200 km)



© CHRISTIAN WEISS/ADEME

des émissions de la mégapole est assez faible : quelques pour-cent seulement de particules fines. Cela dit, bien que l'impact de la mégapole parisienne sur la pollution en particules fines se soit avéré plus faible que prévu, il subsiste des problèmes de pollution locale pour certains polluants, notamment des suies et les particules d'un diamètre inférieur à 10 µm.

* Laboratoires français impliqués : LISA, LSCE, GAME-CNRM, LaMP, LCE, LGGE, SAFIRE, Air-Parif, INERIS, IPSL, LATMOS, LMD, Écoles des Mines, CERE, ARIA, LEOSPHERE.

DANS LES LABOS

Les vallées alpines scrutées à la loupe

Les vallées alpines sont l'objet d'une problématique singulière du point de vue de la pollution atmosphérique : elles cumulent deux caractéristiques qui les rendent particulièrement sensibles. La première tient à ce que l'essentiel de la population et des activités – et donc les émissions de polluants – est concen-

tré en fond de vallée. La seconde, due aux conditions météorologiques avec des inversions de température à basse altitude particulièrement fortes dans ces vallées étroites, est responsable d'une circulation limitée de l'air et donc de mauvaises conditions de dispersion de ces polluants. Pour ces raisons, ces vallées font l'objet depuis une dizaine d'années d'une attention soutenue. «*Nous avons mené plusieurs actions pour étudier la pollution atmosphérique et déterminer l'origine des polluants*», déclare Jean-Luc Jaffrezo, directeur adjoint du Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (LGGE), qui rassemble à Grenoble une centaine de personnes. Avec ses partenaires (Air Rhône-Alpes, LCME-Chambéry), le LGGE a donc mené différentes campagnes de mesures permettant de réaliser des prélèvements de particules atmosphériques (de l'ordre de 10 mg de matière). Ils sont ensuite analysés à

l'aide de tout un arsenal d'outils de chimie analytique. Cela permet de qualifier précisément le niveau de pollution et de tenter de déterminer ses origines. Dans le cas des vallées alpines, il s'avère que les concentrations en polluants sont beaucoup plus fortes en hiver qu'en été – à cause de ces couches d'inversion – et qu'une des sources principales des polluants est... le chauffage individuel au bois avec des appareils peu performants, mais également le brûlage à l'air libre. «*Nous avons également constaté une présence significative de BaP [Benzo a Pyrène], une substance réglementée et qui doit être surveillée. L'un des objets de nos recherches est de proposer une méthode pour en déterminer les origines.*» Autre thème de travail : «*Il est très important de mesurer la hauteur de la couche d'inversion de façon à pouvoir prévoir son évolution, ce qui permettrait d'anticiper les épisodes de forte pollution*», conclut Jean-Luc Jaffrezo.



© AIR-APS

Une couche d'inversion maintient les polluants au fond d'une vallée alpine.

DÉFI 2 Évaluer pour agir

Facile à dire. Mais difficile de savoir au final quelles sont les émissions globales des différents polluants atmosphériques. Comment en effet quantifier les émissions de l'ensemble de la biosphère – les arbres (COV), les animaux (méthane)... – ou celles de l'ensemble des industries, ou celles de tous les véhicules en circulation ?

« **Le plus souvent**, on en est réduit à faire des estimations, et l'incertitude est assez grande », explique Paolo Laj, directeur du LGGE (Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement), unité mixte de recherche CNRS et Université de Grenoble 1. Il est pourtant nécessaire, notamment pour les décideurs, d'en savoir plus, pour fixer des objectifs, mettre en place des actions et vérifier que les engagements pris sont tenus.

Pour en savoir plus, la solution consiste à mener en continu des observations afin de déterminer la composition de l'atmosphère et de suivre son évolution. Ces observations menées par des laboratoires de recherche ne doivent

pas être confondues avec la surveillance de certains composés visés par les directives européennes sur la qualité de l'air. En France, cette activité de surveillance est réalisée sur tout le ter-

LA SOLUTION CONSISTE À MENER EN PERMANENCE DES OBSERVATIONS.

ritoire, principalement à proximité des lieux de vie des populations, par 26 Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA). Elles effectuent un suivi quotidien de la dizaine de polluants réglementés (NO₂, ozone, benzène, PM₁₀, PM_{2,5}, métaux lourds, HAP...). Leur rôle est principalement de diffuser les résultats de ces mesures et des prévisions, et de transmettre aux préfets des informations relatives aux dépassements ou prévisions de dépassement des seuils d'alerte.

Les observatoires de recherche, eux, ont un tout autre objectif : comprendre les phénomènes mis en jeu et prévoir l'évolution future. Les mesures effectuées portent ainsi sur tous les composants d'intérêt présents dans l'atmosphère – gaz réactifs, particules, gaz à effet de serre... – et pas uniquement ceux qui font l'objet d'une réglementation. En outre, des mesures sont effectuées en trois dimensions, afin d'évaluer la composition chimique de la colonne atmosphérique. Tout est bon d'ailleurs pour recueillir les informations : des stations au sol ou en altitude ; des

bateaux ; des avions super-équipés comme l'ATR 42 du programme Safire (CNRS, Météo-France, CNES), voire des avions de ligne ; et même des satellites comme MetOp qui permet d'étudier d'en haut l'ozone présent dans l'atmosphère (voir page 9).

Après le recueil de données, entre en scène la simulation numérique, outil privilégié de la recherche. Les connaissances des chercheurs sur les mécanismes de formation des polluants et de leur transport dans l'atmosphère sont mises en équations et entrées dans des modèles numériques. Forts des données acquises sur le terrain, les modèles numériques, à l'instar des logiciels utilisés pour la météo, fournissent des prévisions à court, moyen et long termes. L'intérêt de ces simulations est en particulier de pouvoir étudier des scénarios d'évolution de la pollution atmosphérique en fonction de différents paramètres et de déterminer les efforts à entreprendre. Elles constituent ainsi un précieux outil d'aide à la décision pour les acteurs publics leur permettant de s'appuyer sur des données scientifiques de façon à définir et évaluer les nouvelles réglementations.

Les données acquises sur le terrain sont donc indispensables pour valider les modèles qui les utilisent. Rien de tel en effet qu'une comparaison entre les résultats obtenus par la simulation et les valeurs réelles pour juger de la pertinence du modèle. C'est ainsi qu'évoluent non seulement les modèles, mais surtout la description des mécanismes sur lesquels ils reposent. ■■

MODÈLES DE QUALITÉ DE L'AIR

Plusieurs modèles de qualité de l'air ont été développés en France au cours des derniers dix à quinze ans, dont CHIMERE (par le Laboratoire de météorologie dynamique-LMD, l'INERIS et le LISA), MOCAGE (par Météo-France) et Polyphemus (par le CERE). Ces modèles sont aujourd'hui mis en œuvre pour l'interprétation scientifique des campagnes de mesures, ou encore pour simuler les effets de réduction d'émissions sur la qualité de l'air. Les simulations de

CHIMERE à l'échelle de l'Europe et de MOCAGE à l'échelle globale sont aujourd'hui utilisées dans le système PREV'AIR (mis en œuvre par l'INERIS) pour la prévision de la qualité de l'air à l'échéance de quelques jours. Dans le cadre du programme européen GMES (Global Monitoring for Environment and Security), une approche originale consiste à utiliser plusieurs modèles de qualité de l'air conjointement pour optimiser cette prévision.

DANS LES LABOS

Que se passerait-il si... ?



© CHRISTIAN WEISS/ADEME

Au début de l'année l'ADEME a demandé à deux laboratoires de recherche d'effectuer une série de simulations numériques. Le programme Air 2030 vise à étudier

l'évolution de la qualité de l'air à long terme dans les zones fortement urbanisées sur la base d'un scénario d'évolution des consommations d'énergie élaboré par l'ADEME à l'horizon 2030. Les laboratoires sont le LISA (Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques) et le CEREAA (Centre d'enseignement et de recherche en environnement atmosphérique). Trois villes de France, de différentes tailles, servent de base à cette étude. De nombreux scénarios seront testés, couvrant les principales sources d'émission puisqu'ils concernent aussi bien l'énergie (impact par exemple des modes de chauffage), que les transports (impact de l'évolution des modes de transport, de la modification du parc de véhicules...), l'agriculture et l'industrie. «*L'objectif est de tester différentes hypothèses*

pour mieux comprendre les liens entre émission et concentrations atmosphériques de polluants, pour donner un retour scientifique sur les réductions d'émission proposées et anticiper les actions à mettre en œuvre. Le programme permettra également de voir les impacts croisés air-climat», explique Isabelle Coll, chercheuse au LISA. Le programme, d'une durée de deux ans, possède une originalité. Il fait travailler en parallèle deux laboratoires qui disposent chacun d'un outil de simulation. CHIMERE pour le LISA ; Polyphemos pour le CEREAA. «*Une analyse comparative et statistique des résultats obtenus avec chacun des modèles sera menée. Elle doit nous conduire à une estimation chiffrée des incertitudes sur les prévisions à long terme fournies par les simulations*», poursuit Isabelle Coll. Une façon donc d'estimer la robustesse des résultats.

DANS LES LABOS

La qualité de l'air se mesure aussi d'en haut

Depuis 2006, le satellite MetOp (ESA et Eumetsat) tourne autour du globe. Il recèle notamment un instrument conçu par le CNES : IASI. Cet interféromètre permet de mesurer divers composants chimiques présents dans la basse troposphère, en particulier l'ozone. «*Grâce à des méthodes mathématiques assez complexes, nous parvenons à analyser le profil vertical de l'ozone, c'est-à-dire la façon dont sa concentration varie avec l'altitude*», raconte Gaëlle Dufour, chercheuse au LISA (Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques). Le but de cette mesure est de mieux comprendre les processus de formation et de transport de l'ozone de façon à améliorer la fiabilité des prévisions de la qualité de l'air. À cette fin, toutes les données acquises sont réinjectées dans un outil de modélisation de la qualité de l'air, CHIMERE, une opération qui exige

elle aussi un traitement mathématique complexe. Ces données permettent à la fois d'établir des prévisions et... d'améliorer l'outil de simulation. «*L'avantage du satellite, explique Gaëlle Dufour, est sa couverture globale et en continu sur le long terme.*» Metop-A qui arrive en fin de vie sera d'ailleurs suivi de ses clones, un Metop-B puis un Metop-C. À eux trois, ils auront procuré au moins quinze ans d'observation de l'atmosphère. Depuis six ans, IASI a fourni quantité d'informations. «*La fiabilité des données est très bonne entre trois et quatre kilomètres d'altitude pour ce type de sondeur spatial. Désormais, nous voudrions améliorer nos mesures de l'ozone à plus basse altitude*», précise Gaëlle Dufour. Pour cela, elle planche déjà sur des futures missions satellitaires qui embarqueront des instruments dédiés spécifiquement à la mesure de la qualité de l'air.

De quoi améliorer considérablement les mesures proches de la surface terrestre. À long terme, le lancement d'un satellite géostationnaire permettrait d'améliorer la capacité de surveillance et de prévision des événements de pollution.



© ESA/EUMETSAT

DÉFI 3 Comprendre les liens avec le climat

Depuis quelques années, les spécialistes de la qualité de l'air et les climatologues ont pris conscience que qualité de l'air et réchauffement climatique ne sont pas indépendants l'un de l'autre, bien au contraire.

Les gaz et les particules étudiés dans le cadre de la pollution atmosphérique peuvent avoir un effet positif ou négatif sur le réchauffement climatique. Ainsi, certaines particules réfléchissent les radiations solaires et, ce faisant, participent activement à un refroidissement de la planète. D'autres en revanche, comme l'ozone, sont non seulement nocives du point de vue de la qualité de l'air mais, en plus, absorbent le rayonnement de la Terre ajoutant ainsi leur quote-part au réchauffement.

Comment ces processus évolueront-ils dans un climat changé et quels impacts pourrait avoir cette évolution sur la qualité de l'air ? La question est au centre des débats scientifiques. Par exemple, un climat plus aride et plus chaud

LA RÉDUCTION DE LA POLLUTION GLOBALE POURRAIT CONDUIRE À UNE ACCÉLÉRATION DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE !

n'entraînera-t-il pas des concentrations plus importantes de particules fines dans l'atmosphère ? Moins de précipitations, ce qui est prévu en Europe de l'Ouest, conduirait en effet à un accroissement de la pollution, puisque l'action nettoyante de la pluie sur l'atmosphère serait amoindrie. D'un autre côté, une température plus élevée pourrait induire un surcroît d'émissions de composés organiques volatils par la végétation. Des composés qui se transforment ensuite en particules susceptibles d'agir sur le climat.

Un grand programme européen mené entre 2007 et 2011 (*voir encadré*) a étudié les interactions entre les gaz présents dans l'atmosphère, les aérosols, les nuages et le climat. En guise de conclusion, il pose une question qui met clairement en évidence la problématique actuelle : « Pollution ou réchauffement climatique, faudra-t-il choisir ? » L'un des principaux résultats du projet est en effet que, globalement, les aérosols contribuent aujourd'hui à refroidir le système Terre. Mais cet effet positif pour la planète va fortement diminuer d'ici à 2030 du fait des réductions plus rigoureuses de la pollution atmosphérique mises en œuvre dans le monde entier. Autrement dit, la réduction de la pollution globale

EUCAARI : UN PROJET DE 15 M€ SUR L'INTERACTION POLLUTION-CLIMAT

EUCAARI, pour European Integrated Project On Aerosol Cloud Climate Air Quality Interactions, a étudié entre 2007 et 2011 les interactions entre les gaz présents dans l'atmosphère, les aérosols, les nuages et le climat.

Ce projet de 15 M€, financé aux deux tiers par la Commission européenne, regroupait 48 instituts de recherche de 24 pays. Acteurs français, le CNRS, Météo-France et les universités de Clermont-Ferrand, Grenoble, Toulouse, Lille, Lyon et Paris à travers leurs unités de recherche : Laboratoire de météorologie physique (LaMP), Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (LGGE), Laboratoire d'aérodynamique (LA), Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon (IRCELYON), Laboratoire

d'optique atmosphérique (LOA) et Laboratoire atmosphères, milieux, observation spatiale (LATMOS).

Le programme a mobilisé des plates-formes au sol, des avions et des satellites, non seulement en Europe, mais également en Chine, en Afrique du Sud, au Brésil et en Inde. Il témoigne de l'intérêt de ces grands projets internationaux, les seuls à autoriser de tels déploiements instrumentaux à même de fournir aux scientifiques les informations sur l'atmosphère dans toute sa complexité spatiale et temporelle. Les données recueillies lors de ces campagnes fournissent pendant de nombreuses années les entrées ou les contraintes pour les modèles de simulation de l'atmosphère.

pourrait conduire à une accélération du réchauffement climatique ! Les études concernant les relations entre la pollution atmosphérique et l'évolution du climat sont ainsi devenues l'un des grands axes de la recherche sur la qualité de l'air ainsi que de la climatologie. En particulier, côté qualité de l'air, les chercheurs s'attachent désormais à faire évoluer et à affiner leurs modèles de façon à mieux prendre en compte l'impact sur le climat des mesures prises en faveur de la qualité de l'air. Ils sont également amenés à quantifier plus précisément les effets du climat sur la pollution et cherchent à mieux comprendre les mécanismes atmosphériques fondamentaux mis en jeu. ■■

INDUSTRIE AUTOMOBILE

La révolution des véhicules électriques

Renault, qui commercialise plusieurs modèles de véhicules électriques, peut aujourd'hui affirmer que ce type de motorisation est bénéfique pour la qualité de l'air. Il dispose en effet de résultats très précis pour en être aussi sûr. Ils sont le fruit d'une étude menée l'an passé à Rome en partenariat avec la municipalité et la société Aria Technologies. Le travail a consisté, à partir des données réelles des émissions de la ville de Rome, à comparer via la simulation numérique deux scénarios. Le but : mesurer l'impact du véhicule électrique sur la qualité de l'air à l'horizon 2020. Le premier scénario consistait à conserver le parc actuel projeté en 2020. Le second à se mettre dans la situation où, dans la zone à trafic limité du centre-ville, 25 % des véhicules (publics et de livraison, en particulier) seraient électriques ainsi que 10 % dans la zone périphérique.

La simulation a été faite à deux échelles : sur une large zone (50 x 50 km autour de Rome) et avec un maillage très fin (1 x 1 km). Les résultats sont significatifs. Martine Meyer, responsable Environnement Santé, chez Renault, indique ainsi qu'avec l'introduction des véhicules électriques « la réduction des émissions s'étend de -14 % (pour les NO_x et PM10) à -30 % pour le CO et le benzène. En ce qui concerne la concentration de polluants dans l'atmosphère, à large échelle, la baisse atteint -9 % avec le NO₂. Mais c'est à l'échelle "micro" que la baisse est la plus sensible. Dans les traditionnels points noirs de la ville, elle atteindrait -30 % pour les PM₁₀ et

La motorisation électrique a fait ses preuves.



© RENAULT

jusqu'à -45 % pour le NO₂ ! Quant au benzène, il reste désormais en deçà des normes réglementaires». Autant de progrès qui se traduiraient en bénéfices immédiats pour la santé de la population.

RÉGLEMENTATION

Des zones à circulation réduite

Le problème est clair. En zones urbanisées, les valeurs limites fixées pour les polluants atmosphériques sont souvent dépassées. Trois principaux polluants sont dans le collimateur : les PM₁₀, le dioxyde d'azote et l'ozone. Tous trois ont pour principale origine locale la circulation routière. La limitation de la circulation des véhicules les plus polluants dans les centres-villes est donc à l'évidence un moyen de diminuer cette pollution. Plusieurs villes européennes ont déjà mis en place des zones à circulation réduite, des LEZ, pour Low Emission Zone. En France, la loi Grenelle II prévoit la possibilité d'instituer à titre expérimental des zones de ce type dans les communes ou groupements de communes de plus de 100 000 habitants où une mauvaise qualité de l'air est avérée. La mesure socle de ce dispositif est la limitation, voire l'interdiction, de circulation des véhicules contribuant le plus



© CHRISTIAN WEISS/ADEME

La limitation de la circulation dans les centres-villes est un moyen de diminuer la pollution.

à la pollution atmosphérique. Sont concernés les véhicules particuliers mais également les véhicules utilitaires, les bus, les poids-lourds, les deux-

roues... les plus polluants. La mise en place de zones de ce type demande toutefois des solutions innovantes. Avant de se lancer, il est nécessaire d'abord de bien estimer le parc de véhicules circulant dans la zone et d'évaluer les gains réels sur la qualité de l'air des restrictions envisagées. Mais pas seulement. Il faut évidemment prendre également en compte les impacts socio-économiques et les conséquences sur les nuisances sonores ou les émissions de gaz à effet de serre notamment, et enfin l'acceptabilité sociale du dispositif et sa gouvernance. L'ADEME planche depuis un certain temps déjà sur le sujet afin d'identifier les scénarios les mieux adaptés à ces différentes contraintes. L'idée de base est de s'appuyer sur une réglementation nationale permettant de larges possibilités de déclinaisons locales afin de pouvoir prendre en considération les spécificités de chaque agglomération.

RECHERCHE

Combustion sans flamme pour l'industrie

L'ADEME a lancé en 2010 un programme de recherche sur quatre ans qui implique Gdf Suez et deux laboratoires académiques, le Coria (CNRS, université de Rouen et INSA de Rouen) et le laboratoire EM2C de l'École Centrale de Paris. Le but : parvenir à une combustion « sans flamme » dans les chaudières industrielles à gaz naturel. En réalité, il y a bien une flamme, mais elle est répartie à l'intérieur de la chambre de combustion. Cela a pour effet de la faire disparaître aux yeux de l'observateur car elle n'émet alors plus dans le visible. De tels dispositifs sont déjà utilisés dans des fours pour la sidérurgie qui travaillent à haute température. L'ambition est de mettre au point ce type de combustion dans des chaudières fonctionnant à plus basse température. Le programme vise un démonstrateur industriel à l'horizon 2020. Pourquoi brûler sans

flamme ? Pour diminuer les émissions en NO_x . La formation de ces oxydes est en effet due à la transformation du N_2 atmosphérique en NO_x au contact de la flamme à haute température (plus de $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$). En répartissant la flamme de façon homogène, sa température est abaissée et la formation d'oxyde est divisée par un facteur au moins égal à 2. De quoi diminuer encore les

émissions de NO_x de l'industrie. Elles ont considérablement baissé au cours de ces dernières décennies, mais les efforts doivent être poursuivis afin de respecter les seuils de plus en plus stricts des directives européennes en la matière. D'où cet accent mis sur l'industrie et la combustion de ses chaudières qui apporte une solution novatrice au problème.



Combustion sans flamme : répartie, la flamme disparaît et les émissions de NO_x diminuent.

© CORIA

ÉQUIPEMENT

Chauffage au bois : un village test



© MCZ

En hiver, il arrive fréquemment qu'un nuage de fumée plane au-dessus d'un village de moins de 1 000 habitants dans la vallée de la Maurienne. Mauvais pour l'image et la santé des habitants. Responsables : les conditions météo dans la vallée (voir page 7) et certains anciens appareils individuels de chauffage à bois très

largement utilisés par les habitants. Ce problème a été à l'origine d'une initiative originale de la commune en lien avec l'ADEME. Pour la première fois en France, elle va mener une expérience à l'échelle d'un village. Les habitants vont être incités financièrement à remplacer leurs appareils de chauffage à bois – souvent d'au moins une quinzaine d'années – par un matériel très performant comme des appareils labélisés « flamme verte cinq étoiles ». Ils permettent de diminuer de façon drastique les émissions de particules dans l'air. Cette solution permettra de valoriser la ressource bois et de l'économiser car ils ont un meilleur rendement. Au cours de l'opération, les habitants seront également sensibilisés sur le renforcement de l'isolation de

leur logement, qui constitue le moyen le plus efficace pour réduire les besoins de chauffage. Parallèlement à ce programme, une campagne de mesures de la qualité de l'air est menée afin d'évaluer précisément l'impact du remplacement des appareils. Elle présente elle aussi son originalité. En plus des mesures classiques de particules (PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$), des appareils scrutent également en continu les concentrations de carbone-suie, dans l'air. Il constitue un indicateur spécifique de la qualité de l'air qui permettra de bien discerner le rôle du chauffage au bois par rapport aux contributions des autres sources de particules. À ce jour, tous les travaux préliminaires ont été menés. L'installation des nouveaux appareils débutera en 2013.