

L'évolution de la **qualité de l'air** sous l'influence des **changements globaux**

Si les gaz à effet de serre émis par les activités humaines exercent une influence déterminante sur les changements climatiques globaux, en revanche, d'autres gaz comme les polluants et les aérosols déterminent la qualité de l'air et affectent la santé. De l'échelle planétaire à l'échelle régionale ou locale, l'évolution des émissions polluantes et du climat modifiera fortement l'air que nous respirons.



Campagne dans l'océan Atlantique équatorial, à bord du navire de recherche *Meteor*, pour mesurer les émissions de gaz en **trace** (CO, composés organiques volatils) par l'océan.

Conséquence du développement technologique spatial des années 1960, l'observation de la **Terre** depuis l'espace a permis une réelle prise de conscience de l'environnement global et de sa fragilité. En effet, polluants, gaz et **aérosols** émis depuis le début de l'ère industrielle par les activités humaines, perturbent la composition d'une couche de fluide **atmosphérique** très mince à l'échelle du globe (10 à 100 kilomètres), chacun de ces constituants suivant ensuite sa propre évolution. Par exemple, la concentration du **dioxyde de carbone**, chimiquement inerte, a progressé de 30 % en 150 ans bien que la végétation et l'océan réabsorbent près de la moitié des émissions. Le **protoxyde d'azote**, provenant des activités agricoles, enregistre une augmentation analogue. Dans le même temps, la concentration de **méthane** a triplé. Il est vrai qu'il ne s'agit pas d'un gaz chimiquement inerte, étant **oxydé**,

comme tous les **composés organiques** volatils, par le **radical hydroxyle (OH)** provenant essentiellement de l'interaction de l'**ozone** avec la vapeur d'eau en présence de **rayonnement ultraviolet**.

Du fait de leur présence, ces principaux **gaz à effet de serre** perturbent le **climat** en piégeant l'énergie rayonnant depuis la Terre. Aucun d'entre eux n'a d'effet direct sur la santé ou l'environnement terrestre. En revanche, de nombreux autres gaz ou aérosols, émis par les activités humaines ou résultant de leur transformation chimique, influent sur la santé et les **écosystèmes** vivant à la surface du globe : il s'agit des polluants qui déterminent la qualité de l'air. Entrent dans cette catégorie les aérosols de petite taille (de taille inférieure à 10 **microns**, appelés PM 10) qui peuvent être primaires (c'est-à-dire directement émis comme, par exemple, la suie) ou secondaires comme les **nitrites**



ou les **sulfates**. Cette catégorie comprend également les polluants oxydants issus de la **photochimie**, l'ozone par exemple.

Toute politique de contrôle et de réduction d'émissions polluantes doit donc faire face à de multiples contraintes dont la prise en compte ne peut se faire que de façon intégrée. Le défi sera de ne pas entraver le développement économique tout en préservant le climat et la qualité de l'air au mieux.

Les facteurs d'évolution de la qualité de l'air

Deux facteurs contribueront, dans les décennies à venir, à modifier la qualité de l'air dans un lieu donné : l'évolution des émissions polluantes et celle du climat. Concernant les émissions polluantes et l'environnement proche, leur impact s'évalue à court terme. Par exemple, la qualité de l'air à proximité d'une voie de circulation se modifie très rapidement en fonction du trafic. Selon une enquête d'**Airparif**, son influence

opère sur quelques centaines de mètres⁽¹⁾. Au-delà, les concentrations deviennent plus homogènes et principalement influencées par les émissions régionales. Les concentrations dépendent, dans ce cas, de la proximité d'une grande ville, de grands pôles industriels et de la densité de population. En Europe, les régions les plus émettrices sont le Benelux et la plaine du Pô en raison de la densité de population. L'évolution de la qualité de l'air régionale dépend alors des politiques régionales, nationales ou européennes pour réduire les émissions polluantes. Bien plus lente, l'échelle de temps de ces évolutions varie de quelques années à la décennie. Les réductions d'émissions associées à une innovation technologique, par exemple le catalyseur d'oxydation posé sur certains véhicules, ne peuvent pleinement se faire sentir que sur une vingtaine d'années, période correspondant au renouvellement du

(1) Les résultats complets de cette enquête, réalisée par Airparif, sont disponibles sur le site : <http://www.airparif.asso.fr/airparif/pdf/Rapbagn.pdf>.

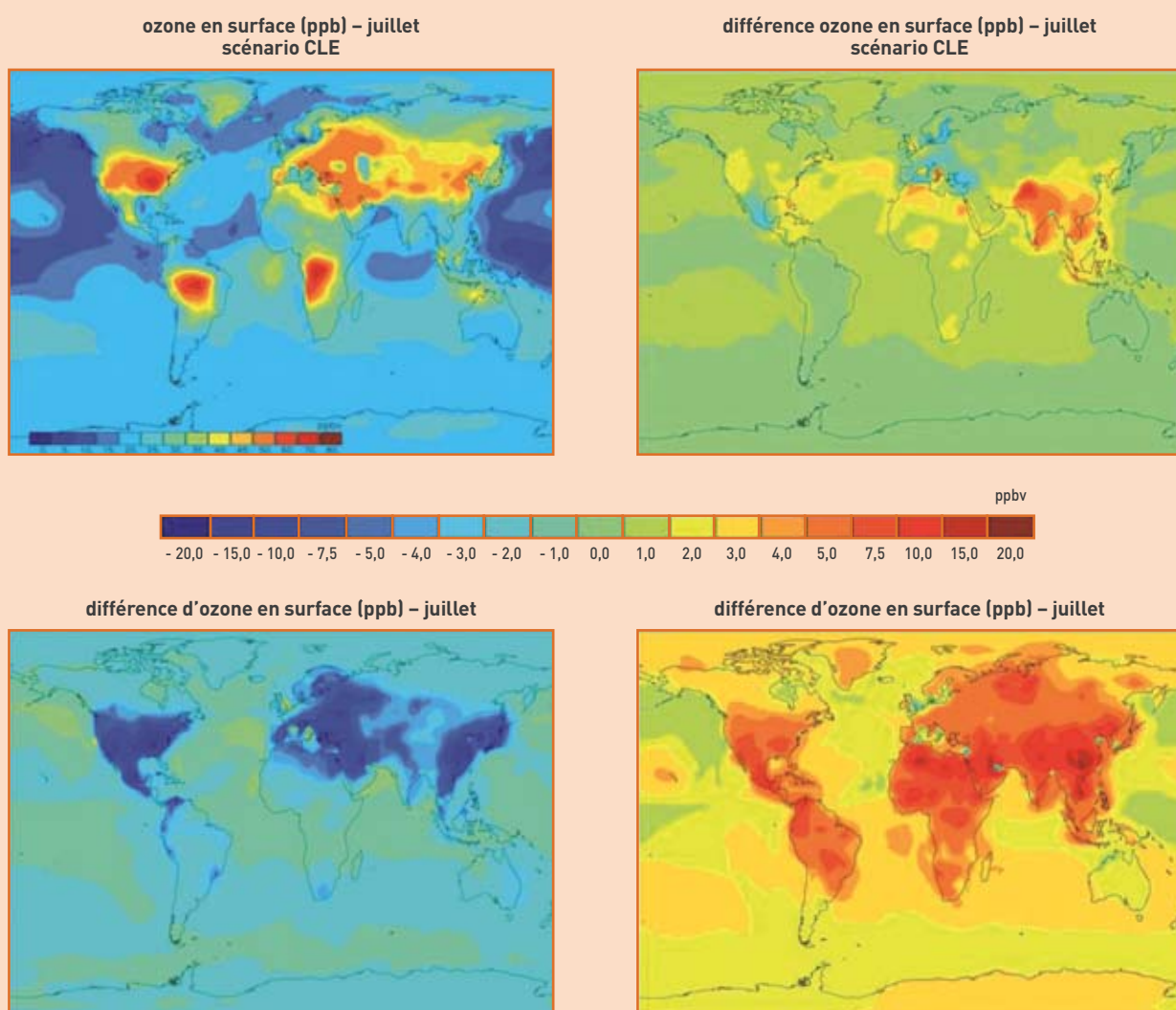


Figure 1. En haut à gauche : concentration moyenne de l'ozone (en ppb), en surface, sur le globe, en 2001, simulée par le modèle LMDz-INCA développé à l'Institut Pierre-Simon Laplace. En haut à droite : différence entre les concentrations moyennes prévues pour l'année 2030, à météorologie constante, si les émissions globales suivent un scénario régi par l'application stricte de la législation actuelle. En bas à gauche : différence obtenue avec le scénario le plus optimiste de réduction des émissions tenant compte des technologies disponibles. En bas à droite : différence obtenue en supposant le scénario pessimiste A2 du GIEC (d'après Szopa *et al.*, 2006).

parc automobile. Ainsi, grâce à ces premières mesures, les émissions d'**oxyde d'azote** dues au trafic routier français enregistrent une baisse de moitié depuis 1990. Il n'en va pas de même d'autres secteurs d'activité.

Un autre facteur d'aggravation vient s'ajouter à cette situation. Il peut arriver que les polluants soient transportés, d'un continent à l'autre. En effet, il arrive fréquemment de retrouver dans l'**atmosphère** européenne des couches d'aérosols produits par des incendies en Amérique du Nord ou en Russie après un voyage autour de la Terre. Ceux-ci viennent s'ajouter aux polluants émis en proximité locale ou régionale. Si, jusqu'à présent, la qualité de l'air a principalement évolué en fonction des différentes émissions, dans le futur, elle sera influencée aussi par le changement climatique.

Évolution de la qualité de l'air globale

La composition de l'atmosphère globale en gaz réactifs et en aérosols susceptibles d'influencer la qualité de l'air a beaucoup évolué depuis un siècle, principalement sous l'effet de l'augmentation d'émissions polluantes. Au niveau mondial, les émissions d'oxydes d'azote, de composés organiques volatils (COV) ont augmenté depuis le début de l'ère industrielle jusque dans les années 1980, en commençant d'abord dans les régions développées. Ainsi, la concentration globale d'ozone **troposphérique** a plus que triplé depuis le XIX^e siècle. Bien que l'évolution des émissions d'aérosols au cours du XX^e siècle soit encore mal connue, il paraît fort probable que les émissions industrielles et l'utilisation du charbon comme source d'énergie aient généré, jusque vers la fin du XX^e siècle, des concentrations importantes d'aérosols dans l'atmosphère. Aujourd'hui, ces émissions ont baissé ou baissent en Europe et en Amérique du Nord; en revanche, elles augmentent fortement dans les pays émergents, notamment en Asie.

L'évolution future des émissions globales et l'évolution associée de la qualité de l'air globale demeurent très incertaines. Une étude, réalisée au **Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE)**, a mis en évidence plusieurs estimations des différences de concentrations entre 2001 et 2030 (figure 1). Ces résultats ont été obtenus grâce à l'utilisation du **modèle de simulation** développé par l'**Institut Pierre-Simon Laplace (LMDz-INCA)**⁽²⁾ qui permet de calculer, en même temps, la chimie oxydante et le transport des polluants à l'échelle globale. Ce modèle sera utilisé lors des prochaines simulations qui seront réalisées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour la prévision des scénarios climatiques futurs. Dans le scénario le plus probable, appelé *Current legislation (CLE)*, les concentrations d'ozone augmentent nettement avec les émissions produites par l'Asie (notamment en Inde et Chine) tandis que les tendances demeurent contrastées sur l'Europe. Ces résultats ne prennent pas en compte les effets liés au changement du



Transport des polluants à l'échelle d'une région, d'un continent ou à l'échelle globale, étudié grâce à des modèles numériques intégrant chimie et transport. Ces modèles permettent notamment de donner une prévision de l'évolution de la composition atmosphérique sous l'influence des changements d'émissions et du changement climatique.

climat puisque, dans ces simulations, les mêmes valeurs des variables **météorologiques** (celles de l'année 2001) sont utilisées pour simuler les concentrations d'ozone en 2030 et en 2001. Or, le changement climatique induit de multiples effets, parfois contradictoires, rendant très difficile une prédiction pour la fin du XXI^e siècle. L'augmentation de la température s'accompagnera vraisemblablement d'une augmentation de la concentration de vapeur d'eau atmosphérique occasionnant une baisse des concentrations d'ozone. Cette baisse devrait être significative dans les régions tropicales et équatoriales. En revanche, dans la partie Sud des régions tempérées, à la faveur d'émissions de gaz polluants, une plus grande sécheresse et une stagnation **anticyclonique** permettront un accroissement photochimique de la teneur en ozone en surface.

Des températures plus fortes devraient également augmenter sur les émissions naturelles de certains **composés chimiques**. Par exemple, l'**isoprène**, un **hydrocarbure** réactif produit par certains arbres dont les chênes blancs d'Europe du Nord, augmente sensi-

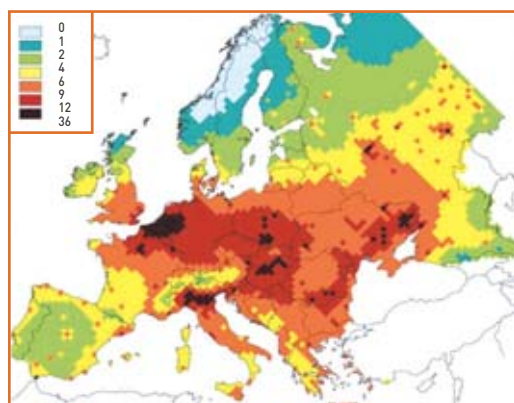
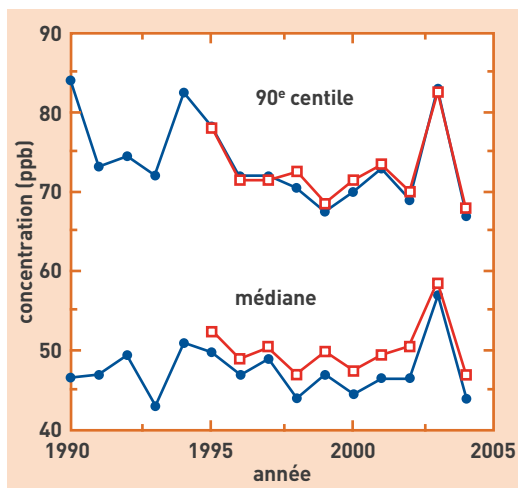


Figure 2. Carte de la diminution de l'espérance de vie, en mois, estimée par l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), due à la pollution atmosphérique par les particules fines (taille inférieure à 2,5 microns). La moyenne européenne de cette estimation de la diminution de l'espérance de vie est supérieure à 8 mois. La figure est tirée du rapport du programme *Clean Air For Europe (CAFE)* de la **Commission européenne** (Amann *et al.*, 2005; *CAFE Report N° 6: Analysis for the final CAFE scenario*; disponible sur <http://www.iiasa.ac.at/rains/cafe.html>).

(2) Interactions avec la chimie et les aérosols (INCA) est un modèle de chimie – aérosols et émissions. Il est couplé au modèle de circulation générale LMDz permettant de simuler interactivement les gaz à effet de serre de longue durée de vie (CO₂, CH₄, N₂O).



Figure 3. Médiane et 90^e centile des maxima journaliers de l'ozone (ppb), pour chaque été, calculés sur un ensemble de 34 stations avec données homogènes (pas de grande période manquante), depuis 1990 jusqu'à 2004 (carrés pleins) et pour un autre ensemble (61 stations) avec données homogènes de 1995 à 2004 (cercles ouverts). D'après Vautard et al. (2007).



blement avec la température, favorisant ainsi la formation photochimique d'ozone. Les oxydes d'azote provenant de la combustion mais aussi des éclairs progresseront également dans les régions tropicales avec une augmentation de la **convection**. L'assèchement de régions comme la Méditerranée devrait favoriser l'érosion éolienne et, en conséquence, la partie minérale des particules d'aérosols dans l'atmosphère (notamment, le soulèvement de poussières ou sable). Une autre conséquence de cet assèchement réside dans la vulnérabilité des forêts aux feux dont la plus grande fréquence alimenterait l'atmosphère en dioxyde, monoxyde de carbone, particules carbonées (suie), occasionnant une dégradation de la qualité de l'air. Bien que mal connu, le changement de la fréquence des intrusions d'ozone depuis la **stratosphère** vers la troposphère pourrait également figurer comme facteur d'évolution de la qualité de l'air. Enfin, le changement anthropique de l'usage des sols influe également sur les émissions liées à l'agriculture et sur le dépôt de composés comme l'ozone à la surface des plantes: un affaiblissement du dépôt d'ozone provoque une augmentation de sa concentration dans l'atmosphère.

Aujourd'hui encore, il s'avère bien difficile de quantifier l'effet net de tous ces phénomènes dont notre connaissance demeure lacunaire. Les difficultés à

prédire l'évolution de la composition atmosphérique globale ne se limitent pas à la connaissance. En effet, la puissance de calcul nécessaire à intégrer ces phénomènes de façon suffisamment détaillée dans les modèles de prévision du climat reste largement inférieure aux besoins.

Évolution de la qualité de l'air en Europe

En Europe, nous savons désormais que la qualité de l'air provoque un impact sur la santé. Selon les estimations, les particules fines contribuent à diminuer l'espérance de vie de plus de 8 mois en moyenne, voire 15 mois dans certaines régions comme le Benelux (figure 2). Sur la base de ce constat, des objectifs de réduction des émissions polluantes ont été établis et traduits en directives. Par exemple, la France envisage de réduire d'environ 40 % ses émissions d'oxydes d'azote entre 2000 et 2010. Les objectifs des autres pays européens étant similaires, les concentrations de polluants tendent généralement à la baisse en Europe. Des baisses assez spectaculaires de concentration de composés primaires ont même été observées à Paris qui a enregistré une chute de 40 % d'oxydes d'azote entre 1990 et 2007. L'évolution des maxima de concentration d'ozone sur l'Europe (figure 3), caractérisés par le 90^e centile annuel de la concentration observée sur plusieurs dizaines de sites est à la baisse: environ 5 ppb (7 %) entre 1990 et 2005, avec toutefois un "accident" en 2003, dû à l'exceptionnelle vague de chaleur. Pourtant, malgré le caractère hors norme des conditions rencontrées au cours de cet été, les concentrations maximales d'ozone demeuraient inférieures ou comparables à celles des étés 1990 et 1994. Cela s'explique par le fait que les concentrations d'ozone subissent des influences contradictoires. En effet, sous l'influence des réductions d'émissions en Europe, les fortes valeurs baissent. Mais l'augmentation des émissions globales de précurseurs d'ozone tend à accroître les concentrations "de fond" présentes dans l'atmosphère. Ainsi, plusieurs sites européens montrent simultanément une baisse des maxima et une hausse des minima; les valeurs médianes représentées (figure 3) n'ayant pas de tendance particulière. Le

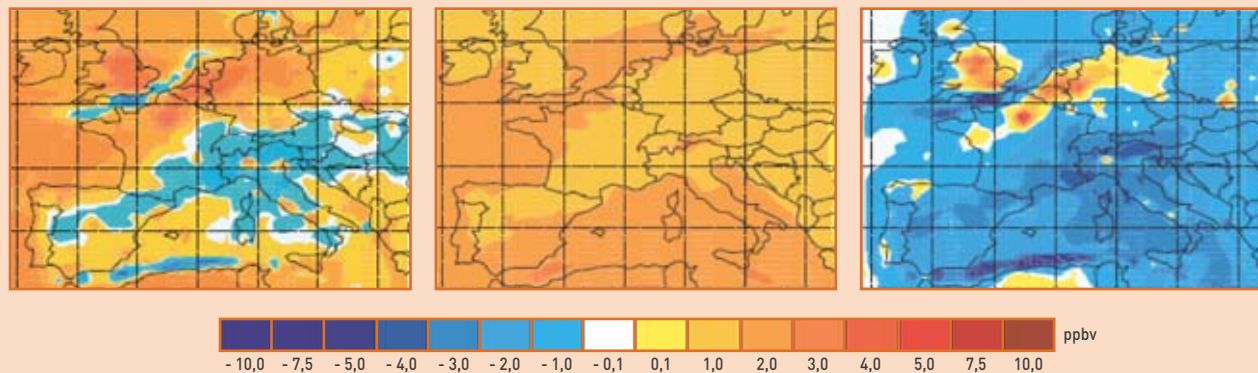


Figure 4. À gauche, différence des concentrations d'ozone entre 2030 et 2001 estimée selon un scénario d'application de la législation en vigueur, à l'échelle globale comme à l'échelle européenne. Au milieu, les émissions globales sont modifiées mais pas les émissions européennes. À droite, seules les émissions européennes sont modifiées. D'après Szopa et al., 2006.

LSCE a réalisé une estimation de l'évolution des concentrations d'ozone, sous ce double effet, en simulant séparément et simultanément les différences d'émissions globales et européennes prévues entre 2001 et 2030, mais aussi en utilisant les conditions météorologiques de l'année 2001 dans tous les cas de figure. Le résultat montre des différences très contrastées entre 2001 et 2030 (figure 4). Comme pour l'échelle globale, le changement climatique affectera également la qualité de l'air en Europe où la température moyenne augmente, depuis plusieurs décennies, à un rythme au moins aussi soutenu que l'évolution prévue par les modèles du GIEC. La

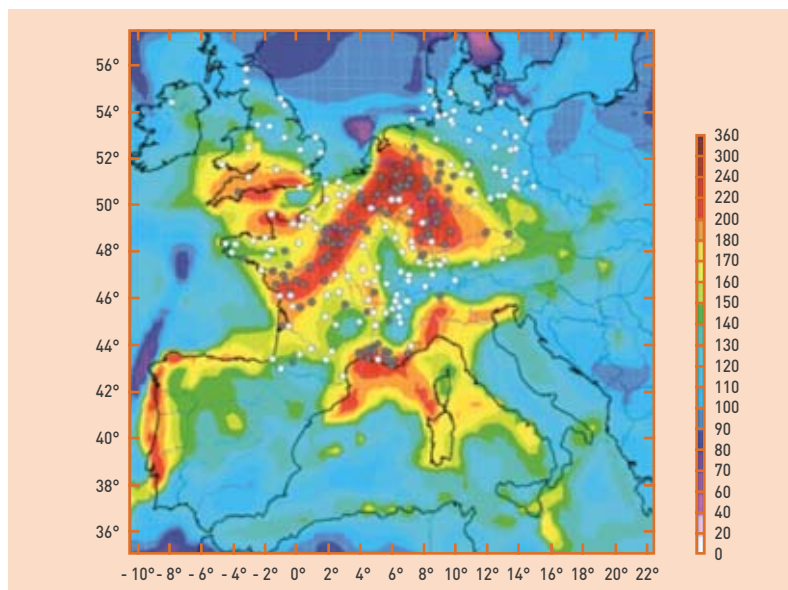


Figure 5.
Concentrations d'ozone en surface (en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, diviser par 2 pour obtenir des ppb), simulées par le modèle, pour le 8 août 2003, à 14 h UTC, avec les stations marquées par des cercles vides si la concentration ne dépasse pas $180 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, et en cercles pleins si elle dépasse $180 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.
D'après Vautard et al. (2005).

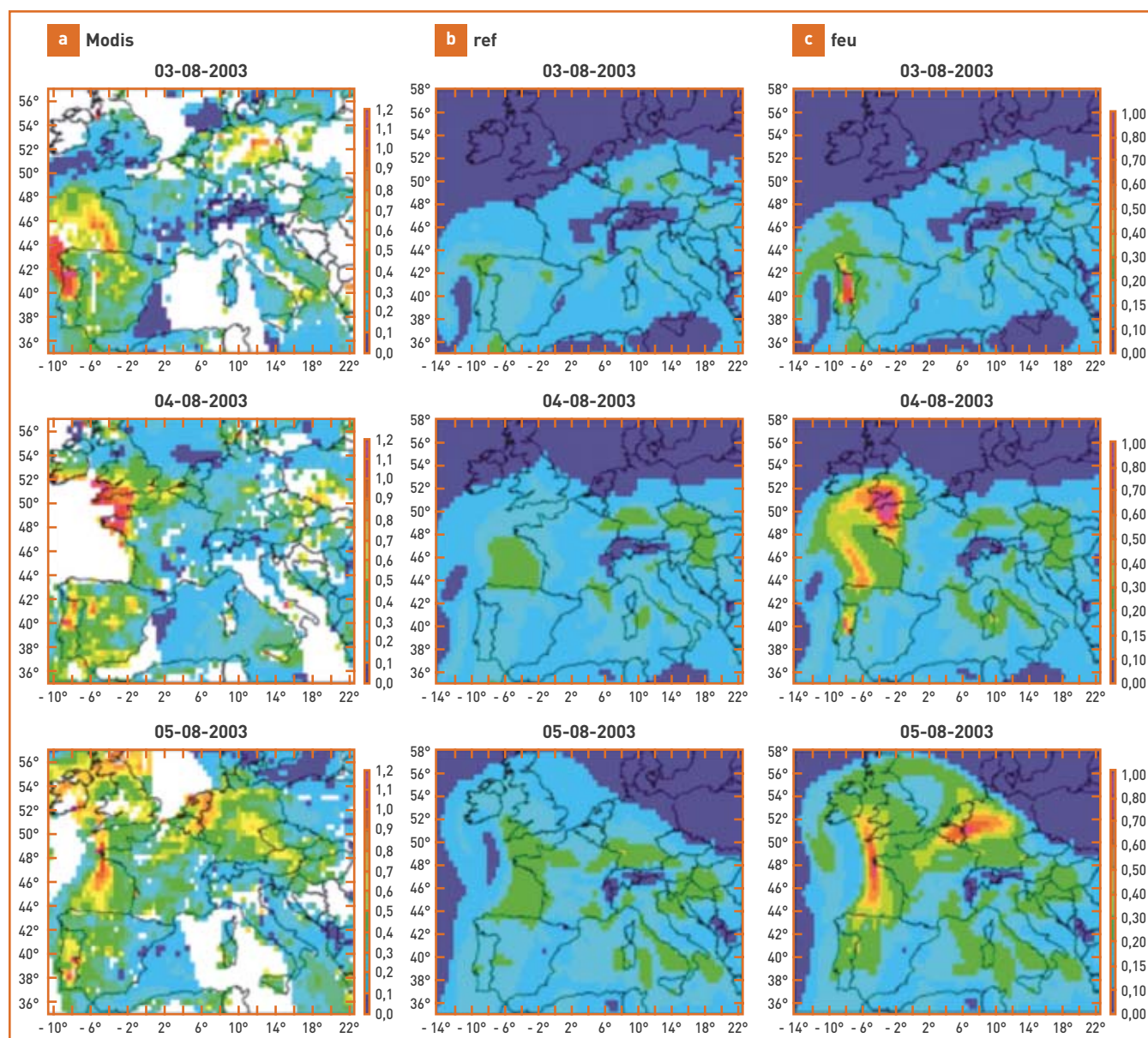


Figure 6.
Distribution géographique des épaisseurs optiques d'aérosols à 550 nm sur l'Europe, du 3 au 5 août 2003 ; A (colonne de gauche) établie à partir de MODIS et simulée par le modèle Chimere ; B (colonne du milieu) sans et C (colonne de droite) avec les émissions dues aux feux. D'après Vautard et al. (2007).

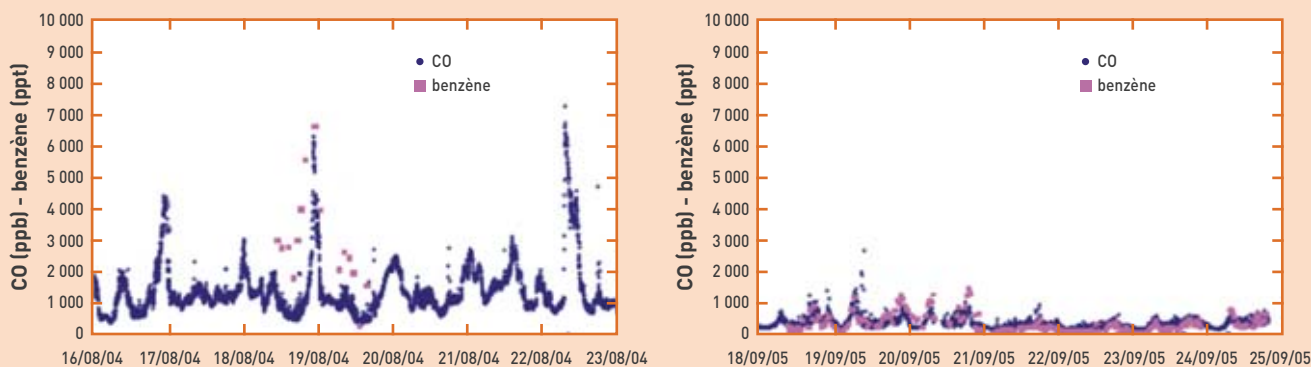


Figure 7. Évolution, sur une semaine, des concentrations de benzène et de monoxyde de carbone, au centre de Pékin (à gauche) et au centre de Paris (à droite). D'après Gros et al. (2007).

dernière décennie se caractérise par l'occurrence de plusieurs étés très chauds. En 2003, une vague de chaleur sans précédent a touché toute l'Europe, notamment la France. En 2006, ce fut le tour de l'Europe centrale et, en 2007, de l'Europe du Sud-Est. L'augmentation de la fréquence des vagues de chaleur fait partie du tableau des conséquences du changement climatique en Europe. Aussi, l'été 2003 est-il désormais considéré comme le prototype des étés que vivront les Européens dans la deuxième moitié du XXI^e siècle. Il s'avère donc particulièrement instructif d'étudier les conséquences de la vague de chaleur de 2003 sur la qualité de l'air.

Une des premières caractéristiques des concentrations d'ozone observées lors de la première moitié du mois d'août 2003 se situe dans l'extension spatiale et temporelle des fortes valeurs. La stagnation des masses d'air en Europe a permis l'accumulation, jour après jour, de polluants photochimiques. Pour le 8 août 2003, la simulation opérée par le modèle de qualité de l'air (Chimere) de l'Institut Pierre-Simon Laplace, montre les concentrations d'ozone avec une représentation des concentrations observées sur plusieurs stations en Europe (figure 5). La taille du nuage de pollution dépasse largement le cadre des frontières nationales et seules des réductions d'émissions, à l'échelle européenne et anticipées de plusieurs jours, auraient permis de réduire ces concentrations de façon significative.

La conséquence des vagues de chaleur attendues dans le cadre du changement climatique en Europe ne se limite pas à la pollution photochimique à grande échelle. En 2003, les feux de forêt d'Europe du Sud

ont ravagé une surface importante, émettant dans l'atmosphère une grande quantité de polluants, notamment des aérosols carbonés qui se sont ensuite dispersés sur le continent. Le panache des feux, au Portugal, a été retrouvé en Europe du Nord, comme le confirment les observations du satellite Modis et les **simulations numériques** (figure 6).

Les émissions, l'usage des sols et bien d'autres facteurs évolueront probablement dans plusieurs décennies. Néanmoins, l'analyse des conséquences de la vague de chaleur de 2003 a permis de montrer que, lors d'événements extrêmes de ce type, nous pouvons attendre des épisodes de stagnation atmosphérique conduisant à une forte dégradation, à grande échelle, de la qualité de l'air.

La qualité de l'air dans les mégapoles émergentes

Les problèmes les plus sérieux de santé publique liés à la pollution atmosphérique ne surviendront probablement pas en Europe. En effet, la part de population urbaine mondiale ne cesse de s'accroître notamment dans les pays émergents. Elle concentre les émissions polluantes dans un nombre de mégapoles en proportion. Ces agglomérations urbaines de plus de 10 millions d'habitants, au nombre de 8 en 1950, de 41 en 2000, pourraient atteindre les 59 en 2015. D'où l'importance de déterminer les niveaux de concentration et la composition chimique rencontrés dans ces centres urbains émergents très différents des villes occidentales. Pour cette raison, une équipe du LSCE dédie une part de ses activités à des campagnes de terrain afin de déterminer ces propriétés. Par exemple, le centre urbain de Pékin se trouve soumis à des concentrations en **benzène** et monoxyde de carbone 5 à 10 fois plus élevées que le centre urbain parisien (figure 7). Des impacts majeurs de la pollution atmosphérique sur la santé ne devraient pas manquer de se produire dans ces nouvelles mégapoles.

> **Robert Vautard**

Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE)
Institut Pierre-Simon Laplace
Direction des sciences de la matière
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

POUR EN SAVOIR PLUS

V. GROS, J. SCIARE and T. Yu, "Air quality measurements in megacities : focus on gaseous organic and particulate pollutants and comparison between two contrasted cities, Paris and Beijing", *C. R. Geosciences*, 339, 764-774, 2007.

S. SZOPA, D. A. HAUGLUSTAIN, L. MENUT, R. VAUTARD, "Future global tropospheric ozone changes and impact on European air quality", *Geophys. Res. Lett.*, 33, L14805, doi:10.1029/2006GL025860, 2006.

M. BEEKMANN, J. DESPLATS, A. HODZIC, S. MOREL, R. VAUTARD, "Air quality in Europe during the summer of 2003 as prototype of air quality in a warmer climate", *C. R. Geoscience*, 339, 747-763, 2007.