Les effets environnementaux des particules

Environmental effects of particulate matter

Jean-Marc BRIGNON*

Résumé

En dehors de leur effet sur la santé humaine, les particules interviennent dans de nombreuses problématiques environnementales, dont le changement climatique, la formation d'ozone troposphérique, la réduction de la visibilité, et les régimes hydrologiques.

L'effet des particules en terme de changement climatique est complexe et emprunte plusieurs voies. Il se traduit par des effets opposés de réchauffement ou de refroidissement de l'atmosphère, notamment selon la composition chimique des particules.

On semble assister actuellement à la remise en cause de l'idée qui prévalait que, globalement, les aérosols refroidissaient l'atmosphère, notamment en raison de nouveaux faits scientifiques concernant l'action réchauffante des particules de carbone. Par conséquent, certains scientifiques estiment que les stratégies de lutte contre le changement climatique pourraient inclure une réduction des aérosols de carbone-suie, en permettant un effet à court terme de ralentissement du changement climatique, complémentaire des actions sur le CO_2, qui sont plus difficiles à mettre en place à court terme, et qui n'auront pas un impact rapide. Des bénéfices supplémentaires en terme de qualité de l'air sont en outre à attendre d'une telle stratégie. Enfin, les politiques passées et actuelles de réduction importante des émissions de SO_2 et NH_3 en Europe vont amener une baisse des aérosols secondaires de sulfate et de nitrate, globalement refroidissants, qui devrait être accompagnée par une baisse suffisante des aérosols de carbone-suie, sous peine d'une évolution négative du forçage radiatif global par les aérosols en Europe.

Des liens étroits unissent pollution particulaire et formation d'ozone (impact des particules sur les réactions photo-oxydantes, précurseurs communs pour les particules secondaires et l'ozone...), ce qui a conduit à intégrer complètement les deux stratégies, dans le cadre de la Stratégie nord-américaine pour l'ozone troposphérique (NARSTO**). Ce souci de cohérence des stratégies de réduction des particules avec les problèmes de formation d'ozone serait utile à considérer pour la Convention de Genève sur la pollution atmosphérique transfrontière en Europe.

Un autre impact qui leur est imputable est la réduction de la visibilité, qui est principalement le fait des aérosols de sulfates et des aérosols organiques. Aux États-Unis, il s'agit d'un problème important, considéré comme portant atteinte aux parcs nationaux, mais également à l'ensemble de la population. On a pu évaluer aux États-Unis que les bénéfices monétarisés du Clean Air Act sont deux fois plus importants, en terme d'amélioration de la visibilité, que pour la réduction des dommages aux cultures par l'ozone troposphérique. On dispose de peu d'informations sur la perception de cette question par les populations, et aucun pays d'Europe ne semble disposer d'une politique en la matière. Cependant, une étude récente a estimé que la réduction de visibilité est significativement plus grande en Europe qu'aux États-Unis.

Au vu de cette synthèse des effets environnementaux des particules, il semble probable que la seule façon d'obtenir des politiques globalement positives pour l'ensemble des effets pris en considération soit de rechercher une baisse continue et simultanée des émissions de l'ensemble des polluants atmosphériques. Il semble notamment important de veiller à ce que les mesures de réduction des émissions de polluants atmosphériques prises dans le futur, hors gaz à effets de serre, prennent en compte le carbone-suie, car sinon il existe un risque qu'elles conduisent à un effet contre-productif en terme de lutte contre le réchauffement global.

* *Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS) – France.*

** *NARSTO est une entité regroupant les acteurs (universités, agences gouvernementales, secteur privé...) du Canada, des États-Unis et du Mexique, mise en place en 1994 pour prendre en charge des travaux scientifiques sur l'ozone troposphérique, de nature à guider les stratégies de réduction de la pollution. NARSTO s'intéresse désormais aussi aux particules, notamment aux processus physico-chimiques les concernant en commun avec l'ozone.*

Abstract

Apart from its impact on human health, particulate matter is involved in different environmental problems, such as climate change, tropospheric ozone formation, visibility impairment and hydrology disruption.

The role of particulate matter in global warming depends on the composition of the particles, and can lead to a cooling or a warming effect. New scientific results are currently showing the possibility of a stronger warming of the atmosphere by black carbon aerosols than previously thought. For that reason, some scientists claim that strategies to fight global warming should include black carbon emission reductions. These reductions would have an immediate action of slowing global warming, that would complete actions taken on CO_2 targeting long-term effects. Such a strategy would bring ancillary benefits in terms of air quality and health effects. At least, past and current European policies of emission reduction of SO_2 and NH_3 are expected to lead to a decrease in the cooling effect of sulphate and nitrate aerosols, that should be offset as much as possible by efforts on black carbon emission reductions, otherwise the net effect of aerosols on global warming in Europe could go the wrong way.

Pollution by particulate matter and tropospheric ozone formation are closely interconnected (particulate matter impacts on photolysis rates, secondary aerosol and ozone have common precursor gases...), and for that reason the North-American Strategy on Tropospheric Ozone (NARSTO) chose to integrate both aspects in its strategy. Such a concern for consistency should be considered at a higher degree within the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution in Europe.

Another environmental effect of particulate matter is visibility impairment, mainly attributable to sulphate and organic aerosols. In the United States, it is considered as an important problem that affects not only National Parks but also the entire population. It has been evaluated in the USA that monetarised benefits from the Clean Air Act are twice as high as benefits expected from reduced damages to crops by tropospheric ozone. There is very few knowledge about public perception of this environmental problem in Europe, and European countries seem to have policies to address the issue. However, a recent study found that visibility impairment was more pronounced for most parts of Europe than in the USA.

Finally, considering all environmental effects of particulate matter, it is likely that the best way to address such a variety of problems is to search for a simultaneous and general reduction of all air pollutants emissions. It is especially important that future emissions reduction of atmospheric pollutants address black carbon, if we want to avoid the risk that these reductions might lead to counter-productive effects in terms of climate change.

Introduction

Les particules sont redevenues un aspect important de la pollution atmosphérique, principalement du fait de nouvelles données épidémiologiques concernant leur impact sur la santé humaine. Bien que de nombreuses incertitudes subsistent, notamment sur les mécanismes et sur l'ampleur de cet impact, c'est cet aspect des effets des particules qui a été la motivation principale pour décider de les inclure lors de la prochaine révision du Protocole relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique (dit Protocole de Göteborg, signé dans le cadre de la Convention de Genève sur la prévention de la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance).

Mais par ailleurs, les particules interviennent dans de nombreuses problématiques environnementales, dont le changement climatique, la chimie et la qualité de l'air, la réduction de la visibilité, les régimes hydrologiques. Ces faits semblent moins connus que les impacts sanitaires, et pourtant leurs conséquences ne sont pas négligeables.

Dans cet article, nous passerons rapidement en revue ces différents effets environnementaux, en nous basant le plus possible sur la littérature scientifique la plus récente. Ce panorama nous conduira à mettre en évidence les raisons pour lesquelles il est important de considérer non seulement les effets sanitaires mais également ces effets environnementaux des particules dans les négociations internationales, comme celles placées sous l'égide de la Convention de Genève conclue dans le cadre de la Commission Économique pour l'Europe de l'Organisation des Nations Unies.

Les particules et le changement climatique

La température moyenne de notre planète résulte de l'équilibre entre le flux de rayonnement qui lui parvient du soleil, et le flux de rayonnement infrarouge qu'elle renvoie vers l'espace. L'effet de serre est dû à la présence de certains gaz qui interfèrent avec ce flux infrarouge et l'empêchent partiellement de s'échapper vers l'espace, ce qui provoque un réchauffement de l'atmosphère.

L'effet des particules en terme de changement climatique est plus complexe et emprunte plusieurs voies. Il se traduit par des effets opposés de réchauffement ou de refroidissement de l'atmosphère, notamment selon la composition chimique des particules.

Ces différents effets sont en général classés en deux grandes catégories :

– les effets directs : dans ce cas ce sont les propriétés de dispersion et d'absorption par les particules des rayonnements solaires incidents et des rayonnements infrarouges renvoyés qui interviennent ;

– les effets indirects : les particules interviennent par l'intermédiaire d'autres acteurs de l'équilibre radiatif

du globe, et principalement les différentes catégories de nuages.

Les effets directs des particules sur l'équilibre radiatif du globe

Les particules ont la capacité d'absorber ou de réfléchir une fraction des radiations solaires incidentes, et d'émettre ou d'absorber les radiations infrarouges émises par la terre en réponse au rayonnement solaire [1]. Pour chaque cas d'espèce, le comportement des particules considérées dépendra principalement des paramètres suivants : leur composition chimique, l'humidité ambiante, leur état de mélange*, et leur localisation dans l'atmosphère.

Les relations existant entre ces paramètres et l'effet radiatif des particules sont très complexes et ne sont pas encore complètement élucidées, mais on peut cependant, pour chaque type de particules pris isolément de façon assez théorique, les résumer schématiquement de la façon suivante :

Les *sulfates* réfléchissent les radiations solaires vers l'espace [2], et en même temps n'absorbent que faiblement le rayonnement infrarouge émis par la terre : par conséquent ils ont globalement un effet de *refroidissement* du climat.

Les *nitrates* ont un *effet similaire*, mais peu d'études globales permettent d'estimer l'importance de leur rôle au niveau planétaire.

Les particules de *matière organique carbonée* réfléchissent les rayonnements solaires entrant dans l'atmosphère, par conséquent elles ont globalement un effet de refroidissement climatique [2, 3].

Les particules de *carbone-suie*** ont un effet inverse de *réchauffement* : elles ont pour propriété d'absorber fortement les rayonnements solaires, et de réémettre l'énergie sous forme de rayonnements infrarouges au sein de l'atmosphère, ce qui conduit à la réchauffer [4].

Les particules de poussières minérales (d'origine naturelle) ont la capacité de diffuser les rayonnements solaires incidents, mais également d'absorber les rayonnements infrarouges. Leur effet global est relativement mal connu. Il serait selon certains auteurs de toute façon assez faible [5]. Cependant, pour des émissions massives « accidentelles », comme celles liées aux éruptions volcaniques (Mont Saint-Helen's), l'effet sur le climat peut être significatif, à la fois sur le climat et l'ozone stratosphérique.

Les effets indirects des particules sur l'équilibre radiatif du globe

Les effets indirects des particules font intervenir une interaction avec les nuages. Ils sont généralement classés en deux catégories.

Le *premier effet indirect* des particules se traduit, pour les nuages avec lesquels ils interagissent, par une augmentation de leur pouvoir de dispersion des rayons solaires incidents (augmentation de l'albédo). Ce phénomène provient du fait que les particules, se comportant comme des noyaux de condensation supplémentaires, vont provoquer une réduction de la taille des gouttes des nuages, et entraîner une extension de la couverture nuageuse.

Le *second effet indirect* est analogue, et est lié à une augmentation de la durée de vie des nuages, conduisant donc à la réflexion vers l'espace d'une plus grande fraction des rayonnements solaires incidents.

Il faut souligner ici que les effets indirects des aérosols sont parmi les phénomènes les plus mal connus du changement climatique, et ils sont souvent considérés comme la première source d'incertitude dans les prévisions des modèles.

Cette incertitude provient en premier lieu d'une connaissance incomplète des phénomènes physiques en jeu. En effet, ce qui vient d'être décrit vaut essentiellement pour les aérosols de sulfate. Pour les aérosols organiques, les effets indirects sont mal décrits et pourraient se traduire par un refroidissement ou un réchauffement, en fonction des composés organiques en jeu et des conditions locales [6].

Enfin, les mécanismes d'interaction particuliers entre les aérosols carbonés émis par les avions et les nuages de haute altitude (les cirrus), conduisent à un réchauffement.

Le Panel International sur le Changement Climatique (IPCC) considère dans son dernier rapport [7], que ces divers effets directs et indirects ont globalement un effet de refroidissement, avec cependant un niveau élevé d'incertitude (*voir* Figure 1, p. 94).

Importance du rôle des aérosols de carbone-suie dans le problème du changement climatique

Le fait que l'effet global des aérosols conduise à un refroidissement a pu jusqu'à présent occulter le fait que le carbone-suie est un composé à effet de serre (de par son effet direct, et dans une moindre mesure par son effet sur les nuages de haute altitude),

---

** Les particules se trouveront en pratique dans une situation intermédiaire entre deux cas extrêmes : l'état de mélange externe et l'état de mélange interne. Les particules sont dites en état de mélange externe lorsque chaque particule ne contient qu'une seule substance chimique (une particule de sulfate d'ammonium, par exemple). Elles sont dites en état de mélange interne lorsque, au contraire, les particules sont composées de diverses substances (dans les modèles numériques, on sous-entend souvent que dans ce cas, les particules d'une même taille ont une composition chimique identique).*

*** Dans cet article, nous traduirons le terme « black carbon » par le terme carbone-suie. En fait, les deux termes ne sont pas équivalents, et il n'existe pas de définition universelle du « black carbon (BC) ». Le BC est la partie la plus réfractaire de particules issues de combustions, et celle qui possède la plus grande capacité d'absorption des radiations lumineuses dans le domaine visible. Il y a trois grandes méthodes de mesure et donc de définition du BC dans un aérosol : mesure d'atténuation d'un signal optique, partie résistant à une attaque chimique d'un filtrat, partie résistant à une destruction thermique d'un filtrat. Pour plus de précisions, on peut se reporter à : Cachier H. Carbonaceous combustion aerosols. In : Harrison RM, Van Grieken R (eds). Atmospheric Particles. John Wiley and Sons Ltd, 1998.*

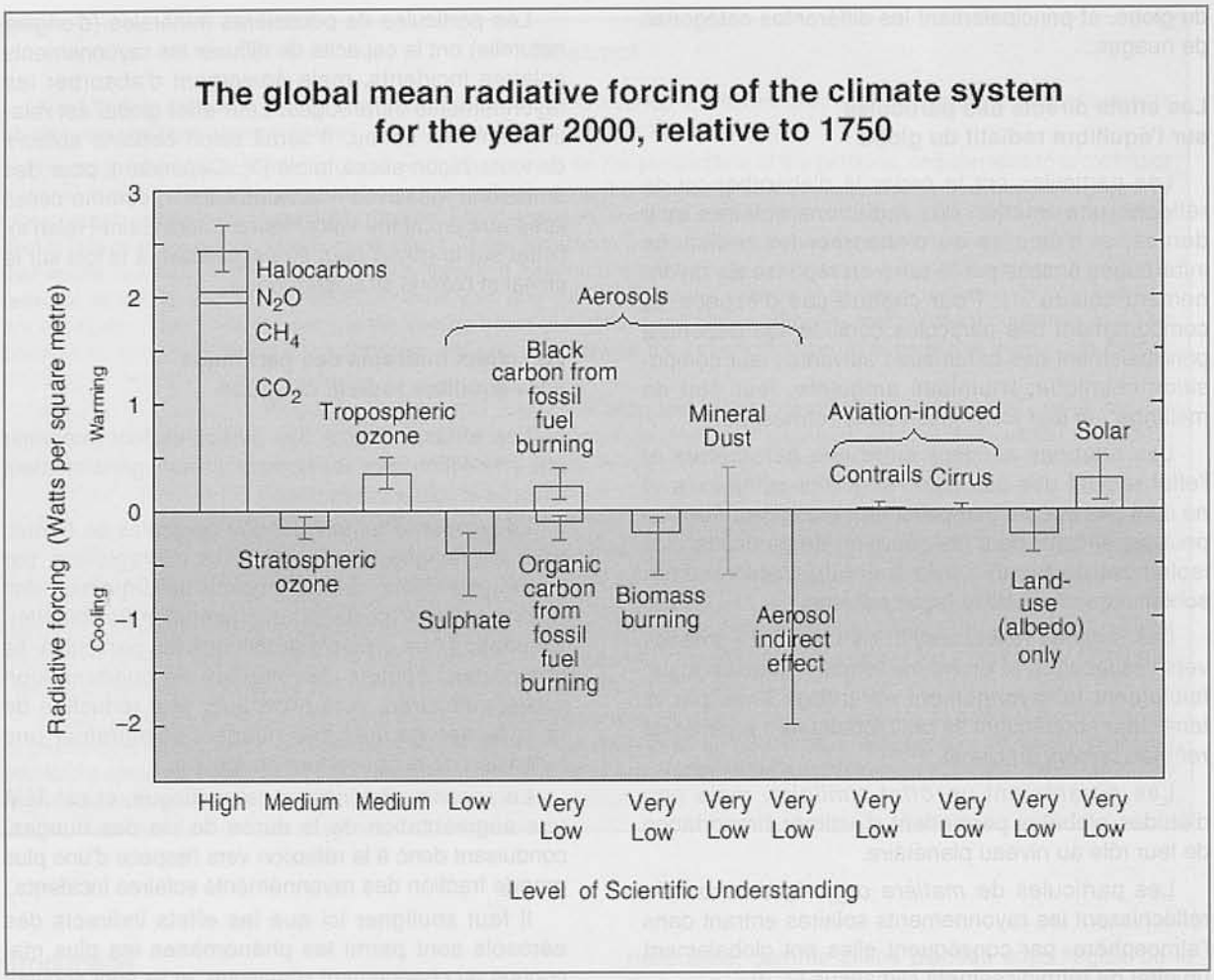


Figure 1.
Forçage radiatif moyen du climat en 2000 relativement à 1750.
(IPCC, Report of Working Group I of the Intergovermental Panel on Climate Change, Summary for Policymakers, 2001 [7]).
Reproduit avec autorisation.

Global mean radiative forcing of the climate system for the year 2000, relative to 1750.
(IPCC, Report of Working Group I of the Intergovermental Panel on Climate Change, Summary for Policymakers, 2001 [7]).
Reproduced with permission.

et expliquer qu'il n'est pas visé dans le Protocole de Kyoto.

Cependant, plusieurs études récentes ont mis en lumière de nouveaux mécanismes de réchauffement liés à ce type d'aérosols.

En premier lieu, l'effet direct de réchauffement lié au carbone-suie pourrait être selon les études récentes [4, 8] nettement plus puissant que ce qui était estimé jusqu'à présent.

En effet, ces études ont considéré que le carbone-suie était mélangé avec les sulfates sous forme interne : les particules de suie sont dans ce cas environnées extérieurement de gouttes de sulfate, qui agissent comme des lentilles, ce qui conduit à une plus grande absorption de rayonnement solaire par le carbone-suie [9]. Cette hypothèse de travail a été prise en compte à la suite de sa mise en évidence expérimentale au-dessus des océans Atlantique et Pacifique, et aux États-Unis (campagnes de mesure TARFOX). Avec ces nouvelles hypothèses sur les propriétés de l'aérosol de carbone-suie, il apparaît qu'il pourrait être globalement le deuxième composé à effet de serre, après le dioxyde de carbone, et avant le méthane.

Il faut également signaler que l'état de mélange entre le carbone-suie et l'aérosol organique est à l'heure actuelle mal connu [10] et pourrait lui aussi réserver des surprises.

Contrairement au cas du CO_2 dont la présence et le mode d'action sont assez homogènes sur l'ensemble du globe, les particules sont inégalement réparties dans l'atmosphère, et leur mode d'action dépend des conditions locales. On doit donc s'intéresser, dans le cas des particules, à la répartition spatiale (et temporelle) de leurs effets sur le changement climatique. Une telle étude est décrite par exemple dans Penner [11] qui utilise un modèle global couplé circulation atmosphérique/chimie atmosphérique pour estimer la

répartition spatiale du forçage radiatif imputable aux aérosols de sulfate et aux aérosols carbonés (carbone-suie et carbone organique). Il apparaît dans cette étude que, dans l'hémisphère Nord, le forçage positif dû aux particules de carbone provenant de la combustion de combustibles fossiles est plus important en Europe qu'en Amérique du Nord, ce qui peut être attribué au charbon et au gazole. Localement, des valeurs de forçage positif élevées sont atteintes (de l'ordre de 2 $W.m^{-2}$, *voir* Figure 2b, p. 96), et de telles valeurs sont susceptibles de compenser en Europe centrale l'effet de refroidissement dû aux sulfates (*voir* Figure 2a, p. 96).

En deuxième lieu, de nouveaux éléments concernant les effets indirects des particules de carbone-suie ont été mis en évidence lors de la campagne internationale de mesures INDOEX [12]. Les résultats obtenus au-dessus de l'océan Indien durant cette campagne ont permis de montrer que, contrairement au cas du « premier effet indirect », les particules de carbone-suie peuvent provoquer une réduction de la couverture nuageuse, car ils absorbent une fraction du rayonnement solaire, ce qui provoque le réchauffement puis l'évaporation des gouttelettes d'eau des nuages. Ainsi, le pouvoir de réflexion du rayonnement solaire incident des nuages est altéré, ce qui conduit à réchauffement de l'atmosphère. Ce nouvel effet a été baptisé l'effet semi-direct, car il se rapproche de l'effet direct des particules carbonées, mais en faisant intervenir les nuages comme intermédiaires. Même sans être en mesure de compenser l'effet de refroidissement par les sulfates, cet effet semi-direct pouvait en réduire sensiblement la portée [13].

Enfin, des incertitudes très importantes entourent encore l'ampleur de l'effet de réchauffement dû à l'action du carbone-suie sur les nuages de la haute atmosphère, et il est possible que ces effets de réchauffement soient en réalité plus importants que ce qui est indiqué dans la synthèse de l'IPCC [14].

Compte tenu de ces différents éléments, il est instructif de reprendre le « palmarès » établi récemment par l'IPCC des composés à effet de serre, en y intégrant de manière qualitative ces nouveaux éléments concernant le carbone-suie. C'est ce que tente de représenter la figure 3, p. 97, qui illustre bien la remise en cause de l'idée qui prévalait que, globalement, les aérosols refroidissaient l'atmosphère.

Des scientifiques ont déjà commencé à énoncer les implications de ces progrès dans la compréhension de l'impact des aérosols sur le climat, en termes de stratégies de lutte contre le changement climatique. Ainsi, certains estiment que les stratégies de réduction des composés à effet de serre devraient inclure les aérosols de carbone-suie [9, 15]. L'intérêt de faire porter une partie des efforts sur ce polluant tient principalement à deux raisons :

– premièrement, puisqu'il s'agit d'un polluant non persistant dans l'atmosphère (contrairement au CO_2), les bénéfices d'une réduction des émissions seront rapides, et se traduiront presque immédiatement en réduction des concentrations ambiantes, et donc en termes de ralentissement du réchauffement global. En terme de "timing" de la lutte contre le réchauffement, l'action sur les particules de carbone-suie serait complémentaire des actions sur le CO_2, qui sont plus difficiles à mettre en place à court terme, et qui n'auront pas un impact rapide ;

– deuxièmement, alors que le CO_2 n'est pas un polluant toxique (aux concentrations en jeu ici), les particules de carbone-suie sont suspectées d'être toxiques, voire cancérogènes dans le cas de la combustion des combustibles fossiles. Ainsi, des bénéfices supplémentaires en terme de qualité de l'air sont possibles avec une telle stratégie.

Ces réductions d'émissions devraient viser les pays développés en raison des émissions de carbone liées aux combustibles fossiles, mais également les pays en voie de développement, responsables à travers les feux de biomasse et l'utilisation massive de charbon ou lignite de l'émission de quantités très importantes de carbone-suie. Ces arguments développés notamment par James Hansen aux États-Unis, ne doivent pas cependant devenir des moyens d'excuser une inaction ou un ralentissement des efforts sur le CO_2, ou de remettre en cause la part d'effort des pays développés.

Inversement, dans le cadre de la Convention de Genève, l'étude de l'efficacité de la réduction des émissions de particules devrait prendre en compte les actions des différents types d'aérosols sur le climat, et l'intérêt particulier qu'il pourrait y avoir à réduire sensiblement les émissions de carbone-suie, en raison de leur action de réchauffement de l'atmosphère. Ce point pourrait devenir d'autant plus sensible à l'avenir que les politiques passées et actuelles de réduction importante des émissions de SO_2 et NH_3 en Europe vont amener une baisse des aérosols secondaires de sulfate et de nitrate*, globalement refroidissants, qui devra être accompagnée par une baisse suffisante des aérosols de carbone-suie, sous peine d'une aggravation du forçage radiatif global par les aérosols en Europe.

Les interactions entre les particules et les autres composantes de la pollution atmosphérique

Les particules sont en interaction avec les autres polluants de l'atmosphère.

Les particules sont d'une grande variété de tailles, de formes et de compositions chimiques, ce qui donne une gamme très large et complexe d'interactions avec les autres polluants gazeux (SO_2, NO_x, COV, NH_3), dont nous allons essayer de donner une vision simplifiée.

** En effet, l'oxydation du dioxyde de soufre et des oxydes d'azote dans l'atmosphère conduit à la formation de sulfates et de nitrates, qui, combinés à l'ammoniac, forment des aérosols de sulfate et de nitrate d'ammonium.*

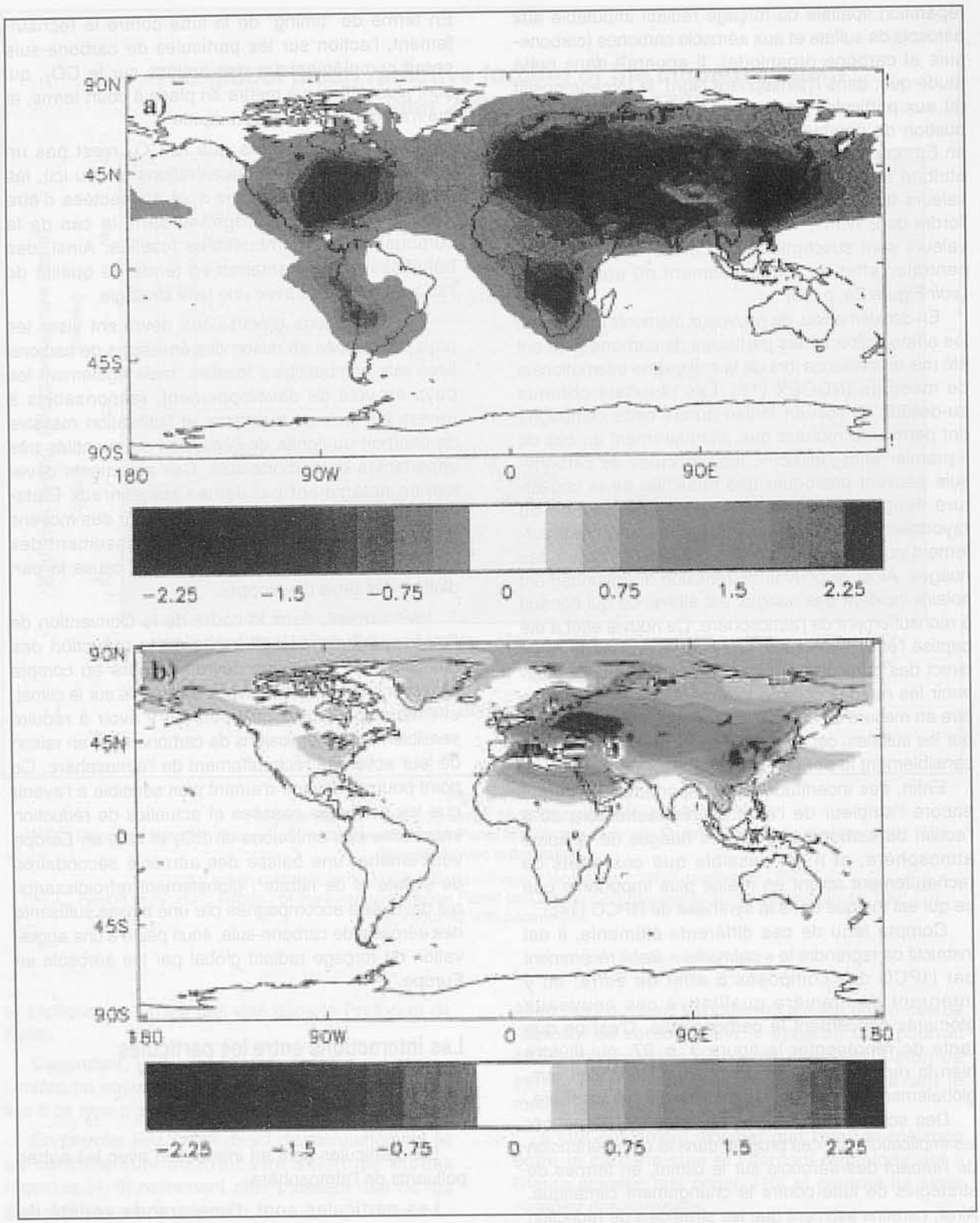


Figure 2.
a) Forçage par effet direct dû aux sulfates.
b) Résultante du forçage par effet direct du carbone-suie et du carbone organique émis par combustion de combustibles fossiles.
(D'après Haywood J, Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols. A review 2000. Reviews of Geophysics 2000 ; 38 (4) : 513-43 [8], publié par l'American Geophysical Union).

a) Direct forcing by sulphate aerosol.
b) Global forcing by direct effect of black carbon and fossil-fuel combustion organic carbon.
(From Haywood J, Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols. A review 2000. Reviews of Geophysics 2000 ; 38 (4) : 513-43 [8], published by the American Geophysical Union).

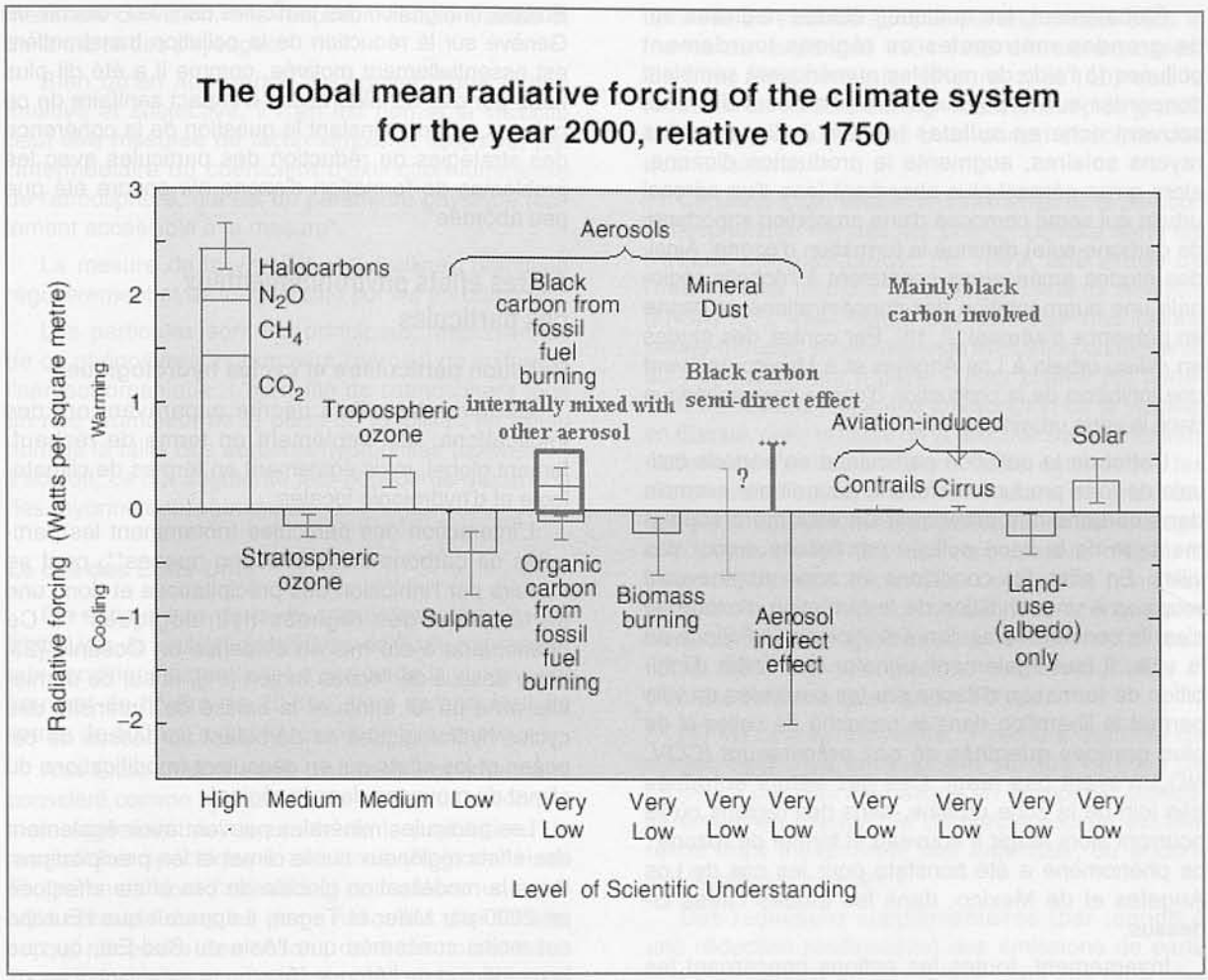


Figure 3.
Forçage radiatif global : incertitudes liées au carbone-suie.
(IPCC, Report of Working Group I of the Intergovermental Panel on Climate Change, Summary for Policymakers, 2001 [7]).
Reproduit avec autorisation.

Global radiative forcing : uncertainties linked to black carbon.
(IPCC, Report of Working Group I of the Intergovermental Panel on Climate Change, Summary for Policymakers, 2001 [7]).
Reproduced with permission.

Bien que les frontières tracées ci-après soient un peu arbitraires, on pourrait envisager les différentes interactions selon le classement suivant (l'ordre d'apparition des interactions ne préjuge pas ici de leur importance, qui varie spatialement et temporellement) :

1. Les particules ont un impact sur les réactions photo-oxydantes entre composés atmosphériques, donc sur la formation d'ozone. En effet, leurs propriétés d'absorption (carbone-suie) ou au contraire de dispersion des rayons UV peuvent influencer directement le taux de photolyse et donc les cinétiques des réactions photochimiques dans l'atmosphère.

2. La formation des particules secondaires et la chimie de l'ozone sont des processus qui possèdent de nombreux points de rencontre. En premier lieu, les gaz SO_2, NO_x, et NH_3 sont à des degrés divers des précurseurs des particules secondaires minérales (sulfate d'ammonium et nitrate d'ammonium). En second lieu, les particules secondaires organiques sont formées à partir des COV, en présence d'agents oxydants, parmi lesquels les oxydes d'azote et l'ozone lui-même [16].

3. Des phénomènes de chimie hétérogène, c'est-à-dire des réactions chimiques intervenant à la surface des particules agissant comme des catalyseurs, interviennent dans le cycle de l'ozone. (Pour une revue complète sur les phénomènes de chimie hétérogène impliquant les particules, *voir* [17]). Les aérosols peuvent notamment stocker et relarguer des espèces gazeuses, dont celles intervenant dans la formation d'ozone. Dans ce domaine, des effets d'inhibition de la formation d'ozone ont été mis en évidence (en utilisant la simulation numérique), pouvant aller jusqu'à - 25 % en terme de concentration [17].

4. Enfin, des effets des particules en terme de modification de l'hydrologie locale (voir p. 98) ont eux-mêmes des rétroactions sur la chimie de l'atmosphère, et sur les dépôts humides et les dépôts secs.

Globalement, les quelques études réalisées sur de grandes métropoles ou régions lourdement polluées (à l'aide de modèles numériques) semblent concorder sur le point suivant : l'aérosol de fond, souvent riche en sulfates tendant à disperser les rayons solaires, augmente la production d'ozone, alors qu'un aérosol plus absorbant (cas d'un aérosol urbain qui serait composé d'une proportion importante de carbone-suie) diminue la formation d'ozone. Ainsi, des études américaines constatent à l'échelle régionale une augmentation des concentrations en ozone en présence d'aérosol [2, 18]. Par contre, des études en milieu urbain à Los Angeles et à Mexico, relèvent une inhibition de la production d'ozone troposphérique dans la zone urbaine [1, 19].

L'effet de la pollution particulaire en période estivale de forte production d'ozone pourrait par exemple dans certains cas provoquer un étalement supplémentaire de la zone polluée par l'ozone autour des villes. En effet, les conditions en zone urbaine sont propices à une inhibition de la formation d'ozone, et c'est le contraire lorsqu'on s'éloigne de l'influence de la ville. Il faut également signaler que l'effet d'inhibition de formation d'ozone par les particules en ville permet la libération dans le panache de celles-ci de plus grandes quantités de gaz précurseurs (COV, NO_x) n'ayant pas réagi. Ces gaz seront entraînés très loin de la zone urbaine, dans des régions où ils pourront alors réagir à nouveau et former de l'ozone : ce phénomène a été constaté pour les cas de Los Angeles et de Mexico, dans les études citées ci-dessus.

Inversement, toutes les actions concernant les précurseurs de formation de l'ozone vont manifestement avoir des répercussions sur les niveaux et la composition des particules, notamment en milieu urbain. Il y a, au moins théoriquement, plusieurs réponses possibles de l'aérosol à ces baisses d'émissions de précurseurs, dont certaines peuvent être contre-productives. Les réponses théoriques sont rencontrées concrètement dans des études locales aux États-Unis. Ainsi, on a pu montrer dans ce pays qu'une réduction de NO_x peut entraîner régionalement une augmentation des aérosols de sulfate, car les réductions de NO_x modifient les cycles photochimiques dans lesquels est impliquée l'oxydation du dioxyde de soufre [20]. On a également mis en évidence, à une échelle plus locale (toujours aux États-Unis, Treasure Valley, Idaho et San Joaquin Valley, Californie), que des réductions d'émission de NO_x peuvent conduire à une augmentation de l'aérosol de nitrate d'ammonium [21, 22].

En Europe, et en particulier en France, peu d'études sont réalisées sur cette interaction entre la pollution particulaire et l'ozone troposphérique au niveau urbain.

Les liens étroits qui unissent manifestement pollution particulaire et formation d'ozone ont conduit à intégrer complètement les deux stratégies, dans le cadre de la Stratégie nord-américaine pour l'ozone troposphérique (NARSTO, *voir* Note **, p. 91). En Europe, l'intégration des particules dans le Protocole de Genève sur la réduction de la pollution transfrontière est essentiellement motivée, comme il a été dit plus haut, par des considérations d'impact sanitaire de ce polluant, et pour l'instant la question de la cohérence des stratégies de réduction des particules avec les problèmes de formation d'ozone n'a encore été que peu abordée*.

Autres effets environnementaux des particules

Pollution particulaire et cycles hydrologiques

Certains des effets décrits auparavant ont des implications, non seulement en terme de réchauffement global, mais également en termes de climatologie et d'hydrologie locales.

L'interaction des particules (notamment les particules de carbone-suie) avec les nuages**, peut se traduire par l'inhibition des précipitations et donc une perturbation des régimes hydrologiques***. Ce phénomène a été mis en évidence en Océanie [23] et au dessus de l'océan Indien [24], et sur ce dernier site on a pu lui attribuer la baisse de l'intensité des cycles hydrologiques se déroulant au-dessus de cet océan et les effets qui en découlent (modifications du climat de mousson dans la région).

Les particules minérales peuvent avoir également des effets régionaux sur le climat et les précipitations. Dans la modélisation globale de ces effets effectuée en 2000 par Miller et Tegen, il apparaît que l'Europe est moins concernée que l'Asie du Sud-Est, ou que la moitié sud de l'Afrique [5].

Enfin, les particules de carbone-suie peuvent avoir un effet d'accélération de la fonte des neiges, en raison de leur capacités d'absorption des rayonnements solaires [9].

Les effets des particules en terme de visibilité****

La réduction de la visibilité est une conséquence perceptible par l'œil humain des brouillards de pollution régionaux. Elle est due à la réduction de la distance

** Il faut reconnaître que le modèle EMEP (Co-operative programme for monitoring and evaluation of the long-range transmissions of air pollutants in Europe) devrait permettre dans ses prochaines versions de traiter de façon couplée l'ozone et les particules. Cependant, au niveau de la stratégie, de la modélisation intégrée, le terme « intégration » ne porte pas pour l'instant sur un traitement intégré de ces deux problématiques.*

*** Soit les effets indirects déjà décrits dans la première partie de cet article.*

**** L'inhibition de la pluie par du carbone-suie empêche donc également le dépôt humide de ces particules (ou d'autres polluants), et les rend plus longtemps disponibles pour être transportées à longue distance (et aussi exercer leur effet radiatif). Elle peut donc avoir elle-même des conséquences néfastes en terme de qualité de l'air.*

***** Nous n'aborderons que la perte de visibilité diurne, par opposition à la perte de visibilité nocturne, due à l'éclairage public et aggravée par la présence de particules, et qui perturbe notamment les observations des astronomes.*

maximale de vision, à la réduction des contrastes et de la clarté des paysages.

Bien qu'en apparence il s'agisse d'une notion intuitive et subjective, il n'en est rien et la visibilité peut être mesurée de façon simple et objective, par l'intermédiaire du coefficient d'extinction lumineuse de l'atmosphère, qui est un paramètre physique facilement accessible à la mesure*.

La mesure de la visibilité est d'ailleurs pratiquée régulièrement et de longue date sur les aérodromes.

Les particules sont les principaux responsables de ce phénomène, notamment l'aérosol de sulfate et l'aérosol organique. L'humidité de l'atmosphère joue un rôle promoteur de la perte de visibilité : en milieu humide la taille des aérosols hydrophiles (sulfates...) s'accroît, ce qui augmente leur pouvoir de dispersion des rayonnements lumineux.

Le cas des États-Unis

On estime que dans de nombreuses zones des États-Unis, la visibilité est réduite de 70 % par rapport aux conditions naturelles. La portée de la vision y est souvent de l'ordre de 20 km, alors qu'elle était de l'ordre de 100 km avant la révolution industrielle.

Aux États-Unis, il s'agit d'un problème important, considéré comme portant atteinte aux parcs nationaux, mais également à l'ensemble de la population. Un programme spécifique a été lancé (Regional Haze Programme), dont l'objectif est de restaurer une visibilité naturelle dans les parcs nationaux d'ici 60 ans, ce qui nécessite des actions dans de nombreuses zones industrielles et urbaines du pays, assez éloignées de ces parcs. Un chiffre extrait d'un rapport d'évaluation du Clean Air Act par le Sénat [25] permet de démontrer l'importance attachée à cette question outre-Atlantique : les bénéfices estimés du Clean Air Act sont deux fois plus importants pour la réduction de la visibilité que pour la réduction des dommages aux cultures par l'ozone troposphérique.

Le cas de l'Europe

On dispose de peu de données sur la perception de cette question par les populations, et aucun pays d'Europe ne semble engager une politique en la matière. Pourtant, une étude récente permettrait de conclure que le problème se pose, en termes de phénomènes physiques, au moins autant en Europe qu'aux États-Unis [26]. Dans cette étude, des données de visibilité quotidienne disponibles dans le monde sur la période 1994-1998 ont été exploitées. On peut ainsi constater (Figure 4, p. 100) que la réduction de visibilité est significativement plus grande en Europe qu'aux États-Unis durant chacune des quatre saisons.

Cependant, cet effet environnemental de la pollution atmosphérique n'a pas été pris en compte dans les travaux internationaux. En 1999, une étude de l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) [27], avait utilisé des données américaines issues d'études économiques d'évaluation contingente du « consentement à payer » pour chiffrer les bénéfices monétaires liés à une amélioration de la visibilité en Europe, dans le cadre de la directive sur les Plafonds nationaux d'émission. Dans cette estimation, les bénéfices demeurent du même ordre de grandeur que ceux liés aux moindres pertes de rendement agricole, et plus élevés que ceux concernant la forêt ou la détérioration des matériaux. Le rapport concluait cependant, que l'adoption de données économiques nord-américaines sur cette question n'était pas fiable, étant donné le manque de préoccupation et d'études sur cette question en Europe.

Au vu de ces éléments, il semble légitime de s'interroger plus longuement sur les raisons de l'absence de cette thématique en Europe, et particulièrement en France : la demande sociale est-elle réelle mais inexprimée, mal entendue, ou encore inexistante sur ce point ?

Des réductions supplémentaires (par rapport à une réduction tendancielle) des émissions de particules primaires vont se traduire, sauf cas particulier local qu'il faudrait être d'ailleurs en mesure d'apprécier, par une amélioration de la visibilité en Europe. Plutôt que de continuer à ignorer ces bénéfices dans le cadre des analyses économiques (et donc leur attribuer un peu arbitrairement une valeur économique nulle), il est nécessaire de disposer d'études européennes pour évaluer l'importance économique de cet effet positif, quitte à ne pas en tenir compte s'il s'avère négligeable.

Conclusion

Au terme de cette revue des effets environnementaux des particules, il ne semble pas inutile, au prix d'une certaine simplification, de mettre un peu d'ordre dans les effets des différents types de particules. Il est en fait nécessaire d'englober les gaz polluants traditionnels dans une telle analyse (SO_2, NO_x, COV, NH_3), car ils sont très liés aux particules dans toutes les problématiques envisagées dans cet article.

Un tel travail a été réalisé dans le cadre de NARSTO (*voir* Note **, p. 91) en Amérique du Nord en 2003, et le tableau, p. 101, en propose une traduction adaptée.

Au vu de cette synthèse il est clair que la seule façon d'obtenir des politiques globalement positives

** En fait plusieurs solutions sont possibles pour caractériser la visibilité. On retient en général le « visual range » (portée de la vision) V, exprimé en km, qui est la distance maximale jusqu'à laquelle un individu moyen peut distinguer un objet idéalement noir se détachant sur l'horizon. V est relié de façon simple au coefficient d'extinction de l'atmosphère, qui est un paramètre mesurable, par la relation V = 3,912/b. On emploie parfois, notamment aux États-Unis, un indice logarithmique (« haziness ») dérivé du coefficient d'extinction, qui est l'analogue du décibel en termes de visibilité : cet indice vaut zéro pour un air non pollué, et augmente lorsque la visibilité se dégrade.*

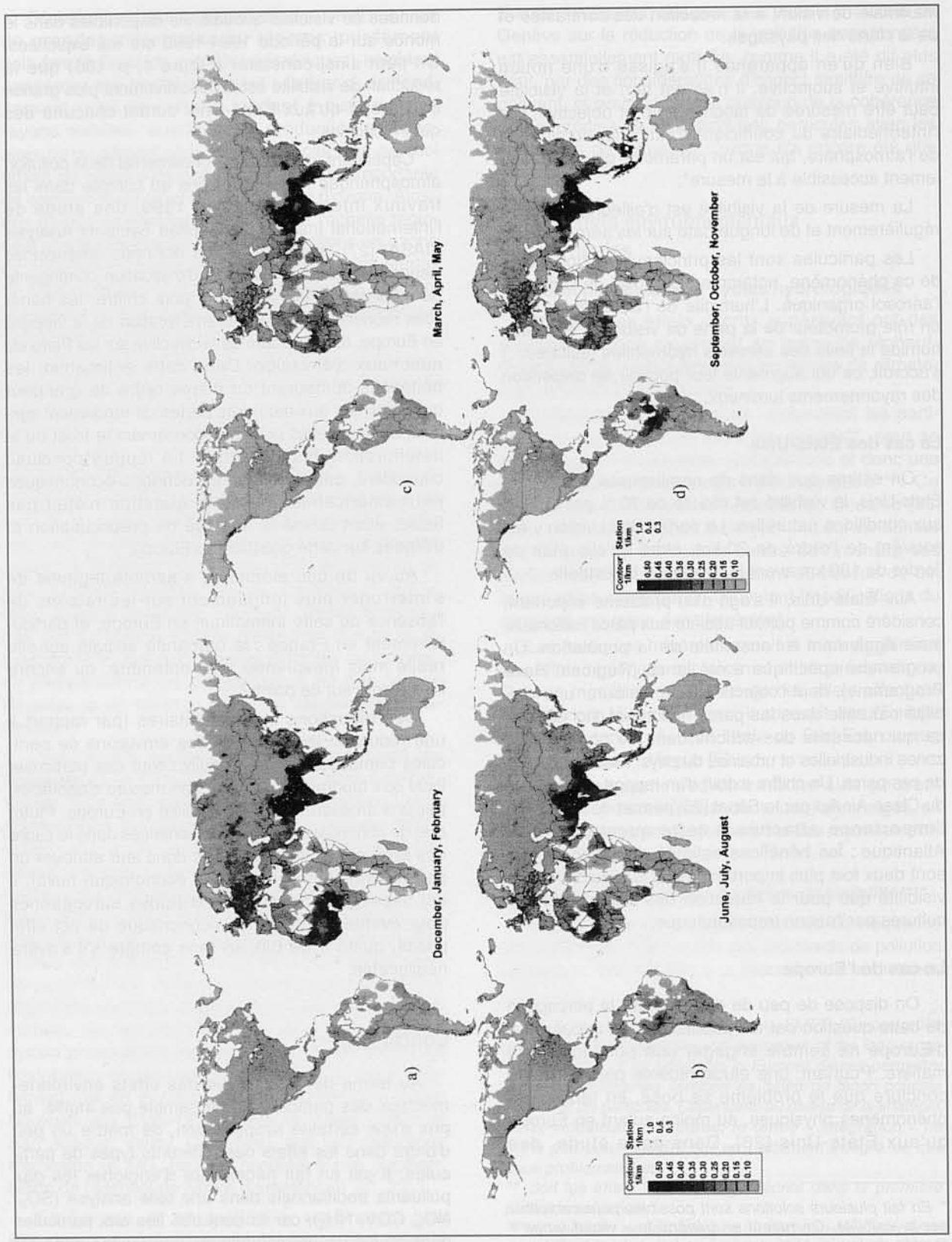


Figure 4.
Réduction de la visibilité dans le monde sur la période 1994-1998
(un gris plus sombre indique une réduction plus importante).
(Husar RB, et al. Distribution of continental surface aerosol extinction based on visual range data.
Atmos Environ 2000 ; 34 : 5067-78 [26]).
Reproduit avec autorisation des éditions Elsevier.

Visibility impairment in the world during 1994-1998 (darker grey level denote a more intense impairment).
(Reprinted from Husar RB, et al. Distribution of continental surface aerosol extinction based on visual range data.
Atmos Environ 2000 ; 34 : 5067-78 [26], with permission from Elsevier).

Impact de réductions d'émissions de différents polluants sur divers problèmes environnementaux régionaux et globaux.
(Adapté de NARSTO. Particulate Matter Science for Policy Makers : Synthesis 2003 [28].
Publié avec autorisation).

Impact of emissions reductions of atmospheric pollutants on different global and regional environmental problems.
(Adapted from NARSTO. Particulate Matter Science for Policy Makers : Synthesis 2003 [28].
Published with permission).

Le texte en gras indique un changement significatif, celui en italique un changement modéré,
celui en caractère standard un changement faible ou très mal connu, et les cases vides une réponse négligeable.

Text in bold denotes a significant change, text in italics a moderate change, and the regular one indicates a slight or poorly understood change. Empty cells denote a negligible response.

Polluant dont on réduit les émissions	**Changement attendu dans la concentration ambiante des autres polluants, ou dans des problèmes d'environnement régionaux ou globaux.**						
	Ozone	**Composants des particules**			**Visibilité**	**Dépôts acides**	**Changement climatique (effets directs)**
		Sulfates	**Nitrates**	**Matière organique**			
SO_2		**Baisse**	*Hausse possible*		**Amélioration**	**Baisse**	**Réchauffement**
NO_x	**Baisse** ou *hausse possible*	*Possible légère baisse ou légère hausse*	**Baisse** *(sauf cas particulier)*	*Possible légère baisse ou légère hausse*	**Possible amélioration** *ou légère dégradation*	**Possible baisse,** *ou légère hausse*	**Possible réchauffement,** *ou léger refroidissement*
COV	**Baisse**	*Possible légère baisse ou légère hausse*	**Possible baisse,** *ou légère hausse*	**Baisse (de la matière organique secondaire)**	**Possible amélioration** *ou légère dégradation*	**Possible baisse** *ou légère hausse*	**Possible réchauffement** *ou léger refroidissement*
NH_3		Possible légère baisse	*Baisse*		*Amélioration*	*Hausse**	*Réchauffement*
Carbone-suie	Possible légère hausse			*Possible légère baisse*	**Baisse**		**Refroidissement**
PM organique primaire	Possible légère hausse			**Baisse**	**Baisse**		**Réchauffement**
Autres particules primaires	Possible légère hausse				**Baisse**	*Hausse*	**Réchauffement**

* Hausse des dépôts acidifiants, mais non du potentiel d'acidification des écosystèmes.

pour l'ensemble des effets pris en considération, est de rechercher une baisse continue et simultanée des émissions de l'ensemble des polluants.

Le changement climatique semble réclamer une attention spéciale, car il s'agit du seul effet pour lequel des conséquences contraires d'importance comparable se manifestent lors d'une baisse généralisée des émissions.

Des réductions d'émissions de carbone-suie vont dans le sens positif d'un refroidissement de l'atmosphère, alors que des réductions d'émissions des autres polluants atmosphériques considérés (notamment SO_2, NH_3, PM primaires) ont un effet de réchauffement.

Par conséquent, il sera important de veiller à ce que les mesures de réduction des émissions de polluants atmosphériques hors gaz à effet de serre prises dans le futur prennent en compte le carbone-suie, faute de quoi il y a un risque qu'elles aient un effet globalement contre-productif en termes de lutte contre le réchauffement global.

Références

1. Jacobson MZ. Studying the effects of aerosols on vertical photolysis rate coefficient and temperature profiles over an urban airshed. Journal of Geophysical Research 1998 ; 103 (D9) : 10593-604.
2. Dickerson RR, Kondragunta S, Stenchikov G, et al. The impact of aerosols on solar ultraviolet radiation and photochemical smog. Science 1997 ; 278 : 827-30.
3. Jacobson MC, et al. Organic atmospheric aerosols : review and state of the science. Reviews of Geophysics 2000 ; 38 (2) : 267-94.
4. Jacobson MZ. Strong radiative forcing heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. Nature 2001 ; 409 : 695-7.
5. Miller RL, Tegen I. Climate response to soil dust aerosols. J Climate 1998 ; 11 : 3247-67.
6. Facchini MC. Organics coumpounds in clouds : present knowledge and future perspectives. IGAC Newsletter, Issue No 23, April 2001.
7. IPCC, Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Summary for Policymakers, 2001.
8. Haywood J, Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols. A review 2000. Reviews of Geophysics 2000 ; 38 (4) : 513-43.
9. Ten Brink H. Aerosols : a matter of cooling or warming, Change n° 59/October-November 2001.
10. Liousse C, Cachier H, Guelle T, et al. Radiative impact of carbonaceous aerosols. J Aerosols Sci 1998 ; 29 : S1303-4.
11. Penner JE, Chuang CC, Grant K, et al. Climate forcing by carbonaceous and sulphate aerosols. Climate Dynamics 1998 ; 14 : 839-51.
12. Ackerman AS, Toon OB, Stevens DE, et al. Reduction of Tropical cloudiness by soot. Science 2000 ; 288 : 1042-7.
13. Lohmann U, Feichter J. Can the direct and semi-direct aerosol effect compete with the indirect effect on a global scale ? Geophysical Research Letters 2001 ; 28 (1) : 159-61.
14. Noone K. The indirect radiative effect of aerosols. IGAC Newsletter, Issue No 23, April 2001.
15. Hansen J, et al. Global warming in the twenty-first century : An alternative scenario. Proceedings of National Academy of Science 2000 ; 97 : 9875-80.
16. Dusek U. Secondary Organic Aerosol : formation mechanisms and source contributions in Europe, 2000, IIASA.
17. Jacob. Heterogeneous chemistry and tropospheric ozone. Atmos Environ 2000 ; 34 (12-14) : 2131-59.
18. He S, Carmichael GR. Sensitivity of photolysis rates and ozone production in the troposphere to aerosol properties. Journal of the Geophysical Research 1999 ; 104 : 26307-24.
19. Castro T, Madronich S, Rivale S, et al. The influence of aerosols on photochemical smog in Mexico City. Atmos Environ 2001 ; 35 : 1765-72.
20. Dennis RL. A modelling study of the influence of oxidant and acid rain controls on fine particle concentrations in eastern North America. NARSTO Technical Symposium on Aerosol Science, Queretaro, Mexico 2000.
21. Kuhns H. Modelling the formation of wintertime ammonium nitrate aerosol in the Treasure Valley, Idaho. NARSTO Technical Symposium on Aerosol Science, Queretaro, Mexico 2000.
22. Pun BK, Seigneur C. Sensitivity of particulate matter nitrate formation to precursor emissions in the California San Joaquin Valley, Environmental Science and Technology, ASAP publication 2001.
23. Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. Science 2000 ; 287 : 1793-6.
24. Sateesh SK, Ramanathan V. Large differences in tropical aerosol forcing at the top of the atmosphere and Earth's surface. Nature 2000 ; 405 : 60-3.
25. Croote. Cost-benefit analysis of EPA regulations : an overview, the National Council for Science and the Environment, 1999 (Disponible à l'adresse : http://www.cnie.org/nle/rsk-42.html).
26. Husar RB, et al. Distribution of continental surface aerosol extinction based on visual range data. Atmos Environ 2000 ; 34 : 5067-78.
27. Holland M, King K. Economic evaluation of a Directive on National Emission Ceilings for certain atmospheric pollutants, Part B benefit analysis, Final report, IIASA and AEAT, 1999.
28. NARSTO. Particulate Matter Science for Policy Makers : Synthesis 2003.