

Connaissances sur les enjeux environnementaux et climatiques des particules

Knowledge on environmental and climatic issues of atmospheric particles

Isabelle COLL⁽¹⁾

Résumé

Les particules atmosphériques sont un élément central des problématiques environnementales, de par leur impact majeur sur la qualité de l'air et leur forte participation au changement climatique. Ces deux volets de l'évolution de notre environnement étant en outre intimement liés par des jeux d'actions et de rétroactions, les efforts faits pour améliorer la qualité de l'air ne sont pas sans incidence sur le climat, et inversement. En outre, l'impact des aérosols sur le changement climatique est associé à une des incertitudes les plus fortes des projections du climat futur. Il existe donc bien un véritable enjeu à connaître et modéliser finement les processus d'interaction des aérosols avec le système atmosphérique, ainsi que les impacts environnementaux intégrés du contrôle des émissions de particules, avant de mettre en place des politiques environnementales coûteuses, contraignantes et qui touchent à la santé publique.

Mots-clés

Aérosol, changement climatique, qualité de l'air, politiques environnementales.

Introduction : les aérosols atmosphériques

Les phénomènes de combustion, de frottement mécanique, le vent ou encore les végétaux sont responsables de l'émission massive et diffuse de particules sur les continents. Ces émissions, encore mal caractérisées pour une grande part, sont à l'origine d'une surexposition des populations urbaines aux particules atmosphériques, dont les effets sanitaires sont avérés. Les particules sont en effet associées à la survenue ou l'aggravation de maladies cardiovasculaires et respiratoires aiguës, et à des maladies chroniques induisant une réduction de l'espérance de vie.

D'un point de vue physico-chimique, les aérosols atmosphériques sont composés d'une multitude d'éléments d'origine et de nature différentes. Parmi les composants majeurs de l'aérosol participant à sa masse, à ses effets toxiques ou à ses propriétés optiques, on retrouve :

- du carbone de type graphite généralement contenu dans des suies (appelé *Black Carbon* (BC) ou carbone-suie) défini par sa forte absorption du rayonnement solaire ;

- du carbone dit « organique » (OC), mélange complexe et réactif d'espèces organiques, dont les propriétés chimiques, optiques et physiques restent encore pauvrement caractérisées ;
- des composés inorganiques (sulfates, nitrates, ammonium...) formés par réaction chimique dans l'atmosphère suivie de la condensation des produits.

Un aérosol présent dans l'atmosphère peut ainsi contenir du sulfate anthropique et du matériau carboné, recouvrant une particule de poussière naturelle. Cette complexité a depuis les années 1990 poussé les scientifiques à développer de nouveaux systèmes de mesure et de modélisation de l'aérosol. Les observations par satellite ou dans des réseaux de surface, les études numériques et en laboratoire, ainsi que les expériences de terrain ont également été structurées pour former un ensemble cohérent et un cadre intégrateur pour l'évolution des connaissances [Tanré, 2005]. Mais l'aérosol reste un élément hétérogène, complexe, variable, issu d'une multitude de sources anthropiques et naturelles sur lesquelles l'information est incomplète ou hautement incertaine, et qui participe à de multiples interactions avec son environnement. Comprendre et quantifier son effet intégré sur

(1) Docteur en physico-chimie de la pollution atmosphérique – Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques, UMR7583, universités Paris-Est Créteil et Paris-Diderot, 61 avenue du Général de Gaulle 94010 Créteil cedex.

le système atmosphérique reste donc une tâche ardue, et un défi pour les scientifiques et les décideurs politiques.

Enjeux environnementaux des aérosols

Le premier enjeu est celui de la connaissance et de la compréhension du comportement de l'aérosol dans l'atmosphère, ainsi que des interactions entre aérosol, santé et environnement.

Les aérosols impactent le climat au travers d'effets directs et indirects. L'effet direct est le mécanisme par lequel les aérosols dispersent et absorbent le rayonnement aux courtes et grandes longueurs d'onde, modifiant ainsi l'équilibre radiatif du système atmosphérique terrestre. Sur ce plan, les sulfates, les carbones organique et suie d'origine fossile ou liés aux feux de biomasse, ainsi que les particules minérales ont tous été identifiés comme exerçant un forçage radiatif direct significatif (Solomon *et al.*, 2007) :

- Le carbone suie est le principal élément absorbant de la radiation solaire visible dans l'atmosphère. Ses sources anthropiques sont liées à la combustion fossile ou de biomasse, et ses émissions constituent la deuxième plus forte contribution au réchauffement climatique actuel après celles du dioxyde de carbone (V. Ramanathan et G. Carmichael, 2008). L'effet direct est estimé à $+0.20 \pm 0.15 \text{ W.m}^{-2}$.
- Le carbone organique est constitué de centaines de composés différents, ce qui rend ses effets directs et indirects extrêmement difficiles à caractériser. Après l'émission, les propriétés physico-chimiques de ce composant continuent à changer par interaction avec les oxydants en phase gazeuse et *via* une chimie en phase condensée. Les observations et modélisations suggèrent que l'OC issu de combustibles fossiles absorbe relativement faiblement, avec un forçage radiatif direct de -0.05 W.m^{-2} et un écart-type de 0.05 W.m^{-2} (à un niveau de confiance de 90 %).
- Le sulfate particulaire est formé par des réactions en phase aqueuse dans des gouttelettes de nuage, ou *via* l'oxydation du dioxyde de soufre gazeux par les radicaux atmosphériques. Le sulfate est un aérosol majoritairement anthropique et essentiellement diffusant, les calculs issus de modèles climatiques lui attribuant un forçage radiatif moyen de $-0.41 \pm 0.2 \text{ W.m}^{-2}$ avec un niveau de confiance de 90 %.

L'aérosol organique issu de combustibles fossiles, tout comme le sulfate, est invariablement mélangé avec d'autres produits de combustion et notamment de du carbone-suie. Cela aboutit à un état composite en termes d'indices de réfraction, de distribution en taille, d'état physique, de morphologie, d'hygroscopicité et de propriétés optiques (Yu, 2012, Thompson *et al.*, 2012, Ramana *et al.*, 2010). Enfin, la manière dont les particules atmosphériques affectent la température de l'air dépend de l'altitude : permettant la réflexion

du rayonnement incident vers l'espace en altitude, elles refroidissent ainsi la surface de la Terre. Mais les particules de carbone-suie absorbent en même temps une partie de l'énergie solaire incidente ou réfléchie, ce qui a pour conséquence de réchauffer l'atmosphère autour d'elles. Au final, le forçage radiatif direct, sommé sur tous les types d'aérosol et sur l'altitude, est négatif. Mais les aérosols exercent un forçage radiatif supplémentaire, également négatif, du fait des changements qu'ils provoquent dans les propriétés microphysiques des nuages (capacité à nucléer, taille des gouttes...). Cet impact – toujours dépendant de la nature de l'aérosol – est référencé comme l'effet indirect des aérosols sur le climat.

L'incertitude sur le forçage radiatif des aérosols est supérieure à 100 %, et dépasse 200 % pour quelques composants, ce qui rend l'évaluation de la sensibilité climatique difficile (Kulmala *et al.*, 2009). Mais au-delà de ces incertitudes, le carbone-suie semble jouer un rôle important dans le réchauffement climatique, d'intensité comparable au forçage exercé par le CO_2 , bien que présentant de forts gradients spatiaux (Figure 1).

Quantifier l'effet des aérosols sur l'équilibre radiatif de la planète est une tâche urgente pour comprendre et espérer limiter le changement climatique, tout en maintenant une bonne qualité de l'air. De nombreux projets de recherche ont travaillé l'amélioration des connaissances sur les aérosols, le climat et la qualité de l'air. Parmi eux notamment, le projet EUCAARI (European integrated projection aerosol cloud climate air quality interactions, 2007-2010, Kulmala *et al.*, (2011)) a mis en œuvre des moyens d'observation et d'analyse de très grande ampleur pour améliorer notre compréhension des processus physico-chimiques de formation et d'évolution des aérosols dans l'atmosphère, pour réduire les incertitudes associées à leur impact climatique, quantifier les rétroactions qui lient leurs concentrations aux changements climatiques et fournir des outils d'analyse pour les décideurs politiques.

Le second enjeu est celui de la réussite des politiques environnementales.

Des efforts sont entrepris sur l'ensemble des continents pour réduire les émissions anthropiques d'aérosols, parce que l'inhalation de particules fines constitue l'une des menaces environnementales majeures pour la santé humaine. Cependant, retirer des aérosols et leurs précurseurs de l'atmosphère influencera en même temps le climat qui, s'il se réchauffe, aura à son tour des impacts négatifs sur la santé (phénomènes climatiques extrêmes, disponibilité de l'eau potable, sécurité alimentaire...) et sur la qualité de l'air (Isaksen *et al.*, 2009). Quelle est donc la stratégie de réduction d'émissions optimale ?

La réponse se trouve dans des stratégies de réduction compréhensives, intégrant les principales actions et rétroactions du système. Parmi elles, la

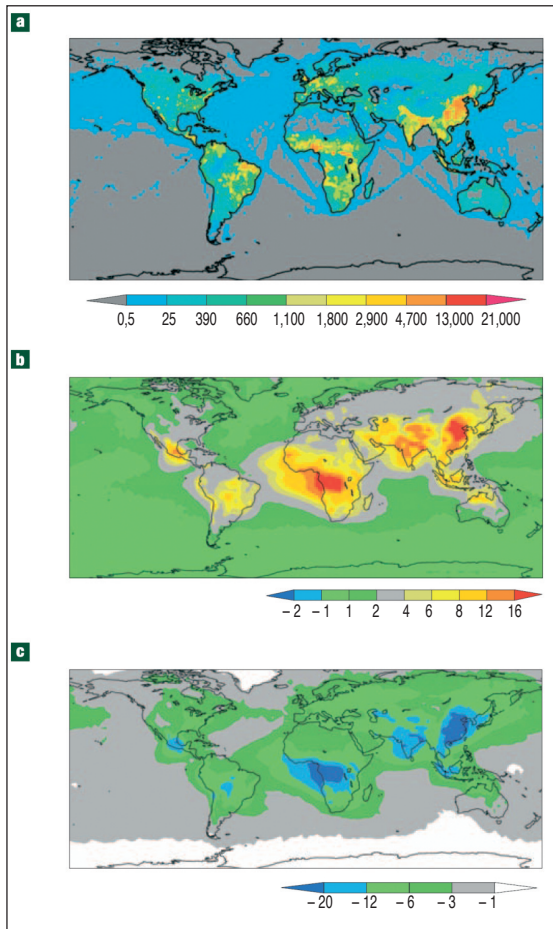


Figure 1. Émissions de BC – unités : T/an (a), forçage radiatif atmosphérique dû au BC – unités : W/m² (b) impact radiatif à la surface des nuages bruns composés d'aérosols en mélange – unités : W/m². (source : De Ramanathan et Carmichael, 2008).

Global distribution of BC sources (T/yr) (a), radiative forcing (W/m²) (b) and surface dimming due to atmospheric brown clouds (W/m²).

réduction radicale et ciblée des émissions de carbone-suie pourrait soulager presque immédiatement le problème climatique, avec d'importants cobénéfices pour la qualité de l'air. Plusieurs études en conditions réelles [Reche, 2011 ; Bahadur, 2011] ont montré que le carbone-suie répondait très bien à une réglementation stricte sur la combustion liée au trafic routier, générant une diminution du rapport BC/non-BC dans l'aérosol et même une décroissance visible du forçage radiatif local (Figure 2). Néanmoins, la dissociation des émissions de carbone-suie et des autres composants de l'aérosol n'est pas toujours possible et le principal risque de ces scénarios est de supprimer la compensation du réchauffement climatique aujourd'hui apportée par les aérosols. Les études théoriques sont en outre souvent dans l'incapacité de dire si la réduction des émissions de certains pans du trafic est bénéfique ou néfaste à court terme pour la santé humaine (Londahl *et al*, 2010). D'autres scénarios, tournant autour des nouvelles énergies, sont également à

l'étude. Des compromis particulièrement pertinents ont été identifiés, par exemple autour de l'utilisation de biocarburants, éléments importants des stratégies de décarbonisation du transport, ou de moteurs diesel plus performants en termes de rejet de CO₂. Mais des réserves fortes subsistent toujours quant à leur mise en application, car leur utilisation dans des conditions mal ou non contrôlées peut mener à l'émission de grandes quantités de polluants atmosphériques, et générer des effets néfastes significatifs sur la santé (Solomon *et al.*, 2007). De plus, de grandes incertitudes subsistent autour de l'impact du cycle de vie des biocarburants, ou encore de la mise en œuvre de nouvelles technologies qui reste conditionnée au développement significatif des infrastructures associées ou à celui de méthodes non polluantes de géné-

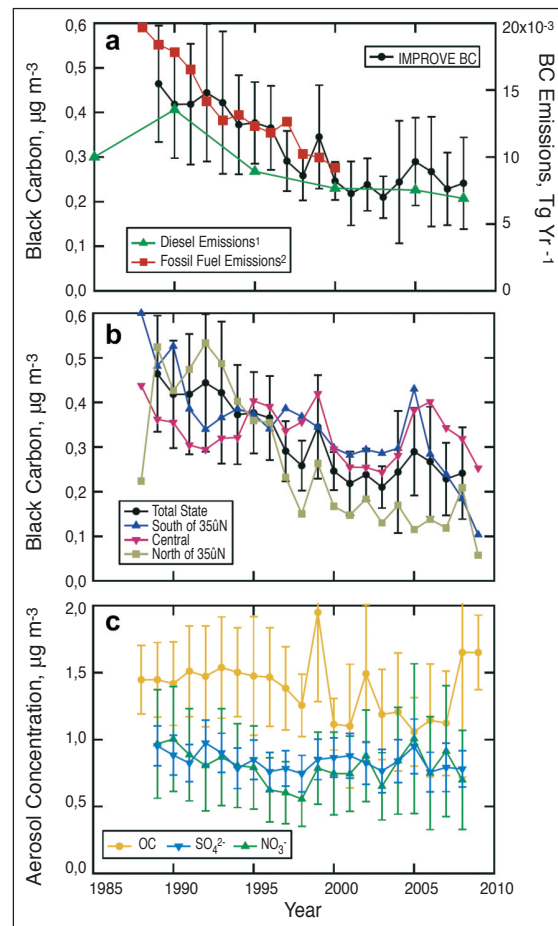


Figure 2.

Moyennes annuelles (a) de BC mesuré (axe de gauche) et des émissions de BC fossile (axe de droite) en Californie de 1985 à 2008 sur le réseau IMPROVE. Les barres d'erreur correspondent à l'écart type entre les stations, (b) de BC sur plusieurs sites de Californie et (c) de sulfate, nitrate et OC sur le réseau IMPROVE (source : De Bahadur *et al.* 2011).
 (a) Annual means of measured Black Carbon (left axis) and BC fossil fuel emissions (right axis) in California from 1985 to 2008. Error bars correspond to standard deviation between measurements at each station. Aerosol measurements from the IMPROVE network. (b) Annual means of BC measured in California (c) Annual means of measured Sulfate, Nitrate, and OC from IMPROVE network.

ration des ressources (par exemple pour la recharge des batteries) (Oxley *et al.*, 2012).

L'imbrication de deux échelles de temps rend le problème encore plus complexe. Le réchauffement climatique résulte en effet en grande partie de l'action du dioxyde de carbone, renforcée ou partiellement contrebalancée par celle d'aérosols atmosphériques de courte durée de vie. Quelle combinaison de sensibilités à ces deux forçages produit l'effet observé ? Selon l'hypothèse retenue, on aboutit à des projections très différentes pour le changement climatique futur. La première complication réside alors dans la difficulté d'estimer l'impact à l'échelle globale d'une espèce éphémère, pauvrement mélangée dans l'atmosphère, avec une chimie non linéaire et de très forts gradients dans son forçage radiatif local (Penner *et al.*, 2010). La seconde complication tient à l'inertie de la réponse du CO₂ à ses réductions d'émission, comparée à la réactivité des aérosols. Ainsi, si des mesures rigoureuses de contrôle de la pollution atmosphérique sont mises en œuvre dans le monde entier, le forçage négatif dû aux aérosols au sommet de l'atmosphère pourrait être réduit de 50 % avant 2030. Le réchauffement climatique serait ensuite piloté par des gaz à effet de serre tel que le CO₂, avant que des aérosols naturels exercent à leur tour une rétroaction positive, de l'ordre de plusieurs Watts par mètre carré localement, du fait de la réduction des précipitations et de l'augmentation des émissions biogéniques avec la température (Kulmala *et al.*, 2011). Ces scénarios sont bien sûr fortement empreints d'incertitudes, car les compétitions entre espèces sont mal connues, *a fortiori* dans une atmosphère changeante. Néanmoins, nous devons garder à l'esprit le fait que, si la diminution des émissions de suie offrait une réelle occasion d'atténuer les effets du réchauffement climatique à court terme, elle

ne pourrait que retarder et non pas empêcher des changements climatiques sans précédent liés aux émissions de dioxyde de carbone.

Conclusion

Un nombre important de paramètres doit être pris en considération dans le calcul de l'efficacité des réglementations futures, pour que les systèmes de gestion de la qualité de l'air garantissent la protection de la santé publique face au changement climatique. Ces paramètres incluent notamment l'évolution des émissions grâce aux nouvelles technologies, les comportements changeants des polluants, les tendances sur les concentrations atmosphériques de fond, ou encore la modification des cycles naturels et de leurs effets sur la qualité de l'air. Des méta-analyses suggèrent que les cobénéfices de politiques cohérentes climat-qualité de l'air pourraient couvrir une large part du coût des réductions d'émissions (Ravishankara *et al.*, 2012). Néanmoins, de nombreuses questions restent à traiter, comme la manière d'inclure les préoccupations de qualité de l'air dans les discussions sur l'adaptation au changement climatique, le problème des échelles temporelles et spatiales concernées, et l'existence de métriques pertinentes pour mesurer les cobénéfices d'une politique concertée sur les problèmes environnementaux.

De par leurs effets néfastes sur la santé humaine, la multiplicité de leurs formes et la variabilité du signe de leur forçage radiatif, les aérosols atmosphériques occupent une place centrale au sein de ce système complexe reliant qualité de l'air et climat. Ils détiennent à la fois les verrous scientifiques majeurs de ce domaine de recherche, et les clés de la réussite des principaux défis environnementaux.

Références

- Tanré D, Kaufman Y, Nakajima T, Ramanathan V. Preface to special section on Global Aerosol System, *J. Geophys. Res.* 2005 ; 110. D10S01, doi:10.1029/2004JD005724.
- Solomon S, Qin D, Manning M, *et al.* Climate Change: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Report, 2007.
- Ramanathan and Carmichael, Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geoscience* 2008 ; 1 (4) : 221-7.
- Thompson JE, Hayes PL, Jimenez JL *et al.* Aerosol optical properties at Pasadena, CA during CalNex 2010, *Atmospheric Environment* 2012 ; 55 : 190-200. ISSN 1352-2310, 10.1016/j.atmosenv.2012.03.011.
- Yu F, Luo G, Ma X. Regional and global modeling of aerosol optical properties with a size, composition, and mixing state resolved particle microphysics model, *Atmos. Chem. Phys.* 2012 ; 12 : 5719-36, doi:10.5194/acp-12-5719-2012.
- Ramana MV, Ramanathan V, Feng Y *et al.* Warming influenced by the ratio of black carbon to sulphate and the black-carbon source, *Nature Geoscience* 2010 : 542-5.
- Kulmala M, Asmi A, Lappalainen HK *et al.* Introduction: European Integrated Project on Aerosol Cloud Climate and Air Quality interactions (EUCAARI) – integrating aerosol research from nano to global scales, *Atmos. Chem. Phys.* 2009 ; 9 : 2825-41, doi:10.5194/acp-9-2825-2009.

- Kulmala M *et al.* General overview: European Integrated project on Aerosol Cloud Climate and Air Quality interactions (EUCAARI) – integrating aerosol research from nano to global scales, *Atmos. Chem. Phys.* 2011 ; 11 : 13061-143, doi:10.5194/acp-11-13061-2011.
- Isaksen IS, Granier C, Myhre G *et al.* Atmospheric composition change: Climate-Chemistry interactions, *Atmospheric Environment* 2009 ; 43 (33) : 5138-92.
- Reche C, Querol X, Alastuey A *et al.*, New considerations for PM, Black Carbon and particle number concentration for air quality monitoring across different European cities, *Atmos. Chem. Phys.* 2011 ; 11 : 6207-27, doi:10.5194/acp-11-6207-2011.
- RanjitBahadur YF, Russell LM, Ramanathan V. Impact of California's air pollution laws on black carbon and their implications for direct radiative forcing, *Atmospheric Environment* 2011; 45 (5) : 1162-67.
- Löndahl J, Swietlicki E, Lindgren E, Loft S. Aerosol exposure versus aerosol cooling of climate: what is the optimal emission reduction strategy for human health? *Atmos. Chem. Phys.* 2010 ; 10 : 9441-9, doi:10.5194/acp-10-9441-2010.
- Oxley T, Elshkaki A, Kwiatkowski L *et al.* Pollution abatement from road transport: cross-sectoral implications, climate co-benefits and behavioural change, *Environmental science & policy* 2012 ; 19-20 : 16-32.
- Penner JE, Prather MJ, Isaksen IS *et al.* Short-lived uncertainty? *Nature Geoscience* 2010 ; 3 (9) : 587-8.
- Ravishankara AR, Dawson JP, Winner DA. New Directions: Adapting air quality management to climate change: A must for planning. *Atmospheric Environment* 2012 ; 50 : 387-9.

