



BULLETIN DE L'OMM SUR LES AÉROSOLS

OBSERVATIONS INTÉGRÉES SUR LES AÉROSOLS ATMOSPHÉRIQUES

Le carbone noir dans la recherche sur l'atmosphère et le climat

Beijing, Paris et d'autres grandes villes ont subi récemment des épisodes de smog épais où l'atmosphère brumeuse empêchait la lumière de parvenir jusqu'au sol. De violents incendies obscurcissent régulièrement le ciel de la Californie en été. Des tempêtes de poussière balayent de vastes étendues en Afrique et en Australie, affectant la santé d'un grand nombre de personnes. La couche grisâtre qui recouvre les glaciers accélère la fonte.

De petites particules en suspension dans l'air, appelées aérosols, sont les principaux responsables de tous ces phénomènes. Les aérosols diffusent et absorbent le rayonnement solaire dans une proportion qui varie selon leurs propriétés physiques et optiques. Ils modifient ainsi le bilan radiatif de la Terre et le cycle de la couche de neige et de glace en surface. En

règle générale, les aérosols tendent à refroidir le climat, ce qui compense en partie l'effet de réchauffement dû aux gaz à effet de serre. Dans certains cas, toutefois, ils élèvent la température de l'atmosphère.

Les grandes rencontres internationales, telle la Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques (COP 21) tenue à Paris en novembre 2015, s'intéressent uniquement aux émissions de gaz à effet de serre, le CO₂ par exemple; toutefois, les aérosols qui absorbent la lumière suscitent un intérêt croissant en raison de leur effet de réchauffement sur le climat. La COP 21 a d'ailleurs été l'occasion d'examiner un Plan d'action mondial pour un fret respectueux de l'environnement, qui entend diminuer les rejets de fines particules polluantes par le secteur des transports.

Parmi les particules qui absorbent la lumière, les aérosols essentiellement formés de matière carbonée, comme le carbone noir, sont la deuxième source de forçage du climat après le CO₂ et l'un des principaux facteurs de forçage à courte durée de vie. Ils sont aussi l'un des thèmes privilégiés des études visant à cerner l'impact des aérosols sur le climat et à élaborer des stratégies d'atténuation.

Le dernier rapport du GIEC (IPCC, 2013) présente la contribution des grandes catégories d'aérosols au forçage radiatif induit par l'interaction des aérosols avec le rayonnement; voir la figure 1. Un forçage positif, et donc un réchauffement potentiel à l'échelle du globe, est associé au carbone noir résultant de la combustion incomplète des combustibles fossiles (BC FF) et des biocarburants, aux aérosols organiques primaires émanant des combustibles fossiles (POA FF) et des biocarburants, aux aérosols dégagés par la combustion de biomasse (BB), aux aérosols organiques secondaires (SOA) et à la poussière minérale.

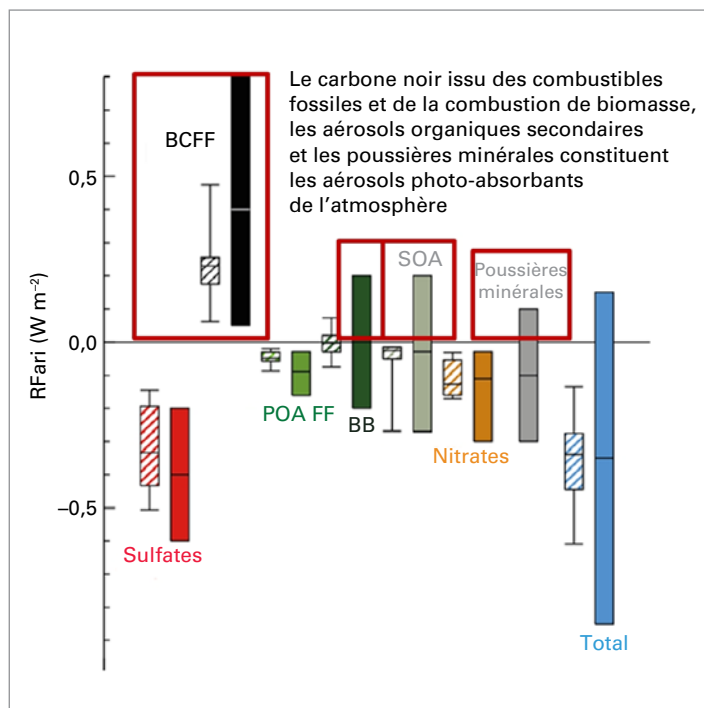


Figure 1. Moyenne annuelle du forçage radiatif au sommet de l'atmosphère induit par l'interaction des aérosols avec le rayonnement (R_{fari}), en $W m^{-2}$, selon la catégorie d'aérosols d'origine anthropique, au cours de la période 1750–2010 (IPCC 2013, chapitre 7).

Le carbone noir dans l'Arctique

L'Arctique présente un intérêt particulier pour analyser les tendances à long terme des concentrations massiques de carbone noir, car son environnement subit les répercussions les plus marquées de l'évolution du climat à l'échelle planétaire. Il n'existe que des sources mineures de carbone noir à l'intérieur de la région et, pourtant, le dépôt sur la neige ou la glace de particules qui absorbent la lumière risque d'avoir des conséquences considérables. La surveillance à long terme

est cruciale pour connaître l'origine de ces particules et les voies par lesquelles elles parviennent dans l'Arctique, ainsi que pour réunir les informations indispensables à l'élaboration et à l'application de stratégies d'atténuation.

Le Programme de la Veille de l'atmosphère globale (VAG) de l'OMM exploite un réseau de stations de mesure, dont trois se trouvent en bordure de l'océan Arctique: Alert (Nunavut, Canada), Barrow (Alaska, États-Unis d'Amérique) et Ny-Ålesund (Svalbard, Norvège). Les deux premières détiennent des relevés qui remontent à 1989, ce qui permet de dégager des tendances fiables. À Ny-Ålesund, la mesure régulière des concentrations massiques de carbone noir n'a commencé qu'en 1998 et les tendances qui y sont observées ne peuvent être comparées directement à celles des deux autres sites. Toutefois, entre 2002 et 2012, les concentrations quotidiennes moyennes à Ny-Ålesund étaient similaires aux valeurs de Barrow et d'Alert malgré la distance géographique, confirmant l'omniprésence du carbone noir aux hautes latitudes de l'Arctique.

Globalement, la masse de carbone noir a diminué de 55 % à Alert et de 45 % à Barrow entre les périodes 1990–1993 et 2009–2012; voir la figure 2. Ces baisses s'expliquent par le recul des émissions qui a suivi l'effondrement économique de l'empire soviétique au début des années 1990 (Sharma *et al.*, 2013; Quinn *et al.*, 2008; Hirdman *et al.*, 2010).

La charge mesurée en Arctique n'a pas augmenté depuis 2000, malgré la hausse des émissions de carbone noir dues aux combustibles fossiles dans les régions sources (Sharma *et al.*, 2013), en particulier l'Asie de l'Est. Il serait bon d'étudier plus avant l'apport de l'Asie de l'Est à la charge observée dans la basse atmosphère de l'Arctique, vu l'augmentation des rejets imputables à la combustion de combustibles fossiles et de biomasse dans cette partie du globe.

Plusieurs modèles mondiaux de transport atmosphérique ont étudié les voies de transport jusqu'à la basse atmosphère de l'Arctique. Les résultats ont confirmé que les émissions d'Europe et de l'ex-Union soviétique représentaient jusqu'à 85 % des valeurs mesurées aux trois stations (Sharma *et al.*, 2013; Hirdman *et al.*, 2010), tandis que le carbone noir provenant d'Asie de l'Est ne comptait que pour une faible part du dépôt total en Arctique, car il est acheminé à des altitudes plus élevées (Sharma *et al.*, 2013).

Outre le transport à grande distance du carbone noir et des particules fines qui sont rejetés par les régions industrialisées de l'hémisphère Nord, les spécialistes suivent de près l'incidence croissante des sources qui se situent dans l'Arctique même, telles la navigation et la combustion en torchère.

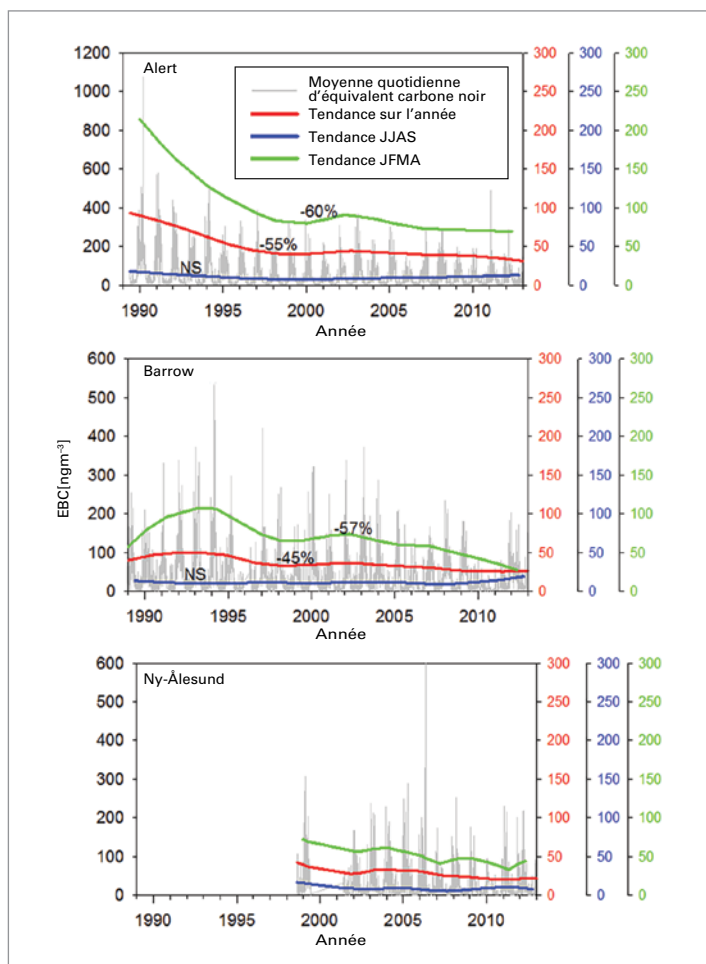


Figure 2. Moyenne quotidienne d'équivalent carbone noir (eBC) en surface à Alert et Barrow. La courbe rouge représente l'ensemble des données eBC, la courbe verte la moyenne de janvier à avril (JFMA) et la courbe bleue la moyenne de juin à septembre (JJAS). La variation en pourcentage des valeurs, entre 1990–1993 et 2009–2012, est notée pour chaque courbe de tendance à Alert et Barrow. Aucun changement significatif (NS) n'apparaît à ces sites en été. Publié dans Arctic Report Card 2013.

La mesure du carbone noir dans le réseau de la VAG

La majorité des réseaux d'observation, où qu'ils se trouvent dans le monde, recourent à des méthodes optiques pour mesurer l'absorption de lumière par les aérosols et la concentration d'équivalent carbone noir. Dans l'Arctique, les plus longs relevés de concentration de masse ont été établis au moyen d'un instrument optique à filtre appelé aethalomètre. Cet appareil, comme le photomètre d'absorption multi-angle, est d'un usage courant dans les réseaux de surveillance en raison de sa simplicité et de sa robustesse.

Toute méthode optique mesure principalement le coefficient d'absorption de lumière par les aérosols, noté σ_{abs} , qui indique la quantité de lumière qui est supprimée du rayonnement solaire descendant, à cause de la capacité d'absorption des aérosols, par unité de longueur de la colonne atmosphérique traversée. Cette valeur est convertie en concentration massique d'équivalent carbone noir (eBC) au moyen de la formule $\text{eBC} = \sigma_{\text{abs}} / \text{MAC}$. La section efficace d'absorption massique (MAC) dépend fortement des propriétés des particules en cause (composition chimique, taille, etc.) et varie d'un site d'observation et d'une saison à l'autre. On considérait jusqu'à récemment qu'une variation de la transmission optique était uniquement due au carbone noir. Aujourd'hui, la nécessité de corriger les données afin de tenir compte des autres types d'aérosols est largement admise et plusieurs techniques ont été mises au point dans ce but.

Bien que la mesure de l'absorption de lumière par les aérosols soit bien établie, les milieux scientifiques ne s'entendent pas sur une méthode normalisée de détermination des valeurs MAC. En Europe, la valeur de fond pour la région a été fixée à $10,8 \pm 3,0 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (longueur d'onde de 637 nm; Zanatta *et al.* (2016)) à partir de longs relevés provenant de dix grands sites européens, dont la fourchette allait de 6 à $16 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ selon l'emplacement, l'origine des masses d'air ou la saison; voir la figure 3. Les valeurs MAC sont des paramètres cruciaux car chaque équipe de recherche les détermine à sa façon, ce qui produit de grands écarts dans les concentrations massiques de carbone noir.

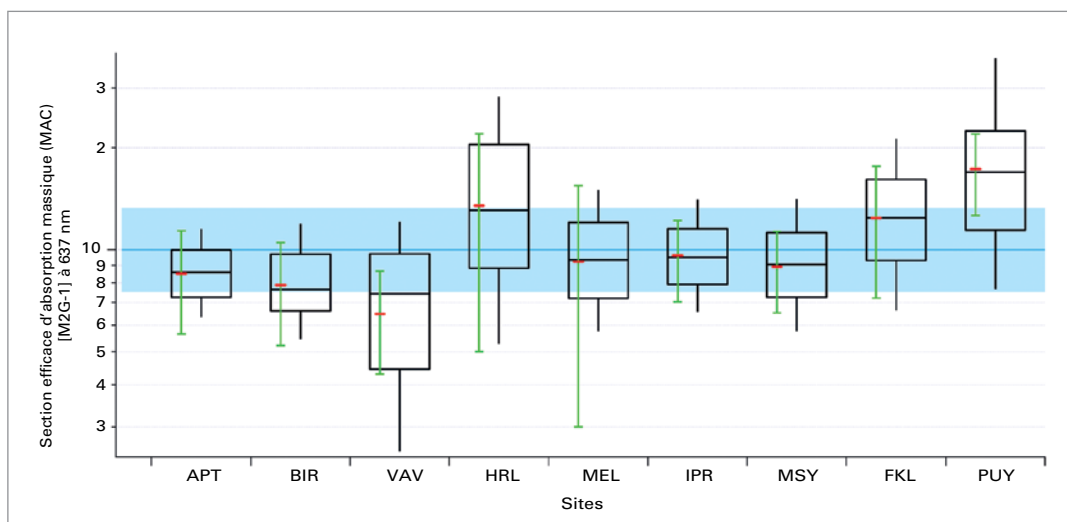


Figure 3. Section efficace d'absorption massique (MAC) à neuf grands sites européens. Les marges d'erreur (en vert) indiquent l'incertitude à 1 écart type de la moyenne géométrique, qui dépend de la technique de mesure employée. La ligne et l'ombrage bleus indiquent la moyenne géométrique \pm l'écart type géométrique des valeurs MAC selon l'ensemble des sites (Zanatta et al., 2016).

La communication des observations

Malgré leur importance indéniable pour l'étude du climat mondial, les estimations du forçage radiatif exercé dans la haute atmosphère par les facteurs à courte durée de vie restent incertaines, en raison notamment de l'absence de définition homogène des substances qui composent les aérosols carbonés et des méthodes de mesure correspondantes.

Les matières carbonées qui sont principalement formées d'atomes de carbone et qui sont structurées comme le graphite (carbone élémentaire) absorbent énormément de lumière, ce qui explique leur couleur (carbone noir), tout en présentant une forte réfractivité thermique. Celles qui renferment des composés complexes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène (carbone organique) présentent une réfractivité thermique moindre et ont un aspect transparent ou brunâtre. Ces propriétés différentes (voir la figure 4) sont liées à la structure moléculaire sous-jacente des composants et donnent lieu à des techniques de mesure très diverses.

La recherche atmosphérique devrait disposer d'une définition univoque du carbone noir et d'une terminologie claire pour communiquer les observations dans les réseaux mondiaux. De plus, le recensement systématique des sources et des puits de particules qui absorbent la lumière est indispensable pour

réduire la plage des estimations actuelles concernant l'effet des aérosols carbonés sur le climat.

Les principales difficultés que soulève la mesure du carbone noir sont dues aux facteurs suivants:

- Les matières carbonées ne sont pas présentes à l'état pur dans les aérosols atmosphériques;
- Les mesures peuvent renvoyer aux mêmes grandeurs d'aérosols carbonés, mais en les désignant différemment, par exemple carbone noir ou carbone élémentaire;
- Les mesures de différentes grandeurs peuvent être désignées par le même terme;
- Les méthodes actuelles correspondent à différentes propriétés du carbone noir;
- Les corrélations entre différentes méthodes de mesure du carbone noir sont souvent fortes, mais les relations varient selon le site, la saison et la catégorie d'aérosol.

Le Groupe consultatif scientifique pour les aérosols a entrepris d'harmoniser la terminologie et de clarifier la communication des données sur le carbone noir dans les réseaux mondiaux

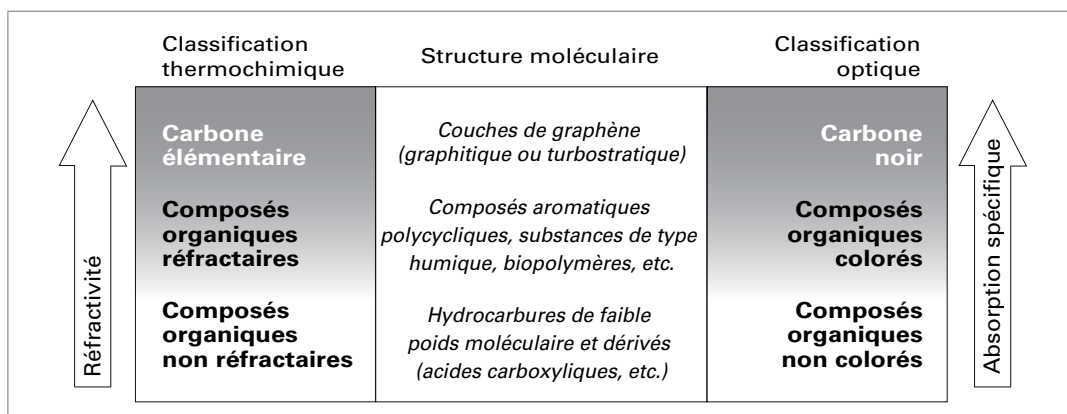


Figure 4. Classification des matières entrant dans les aérosols carbonés (Pöschl, 2003).

de surveillance. Les méthodes qui se prêtent à l'observation courante des aérosols carbonés peuvent être regroupées dans trois grandes «familles»:

Les méthodes de mesure du carbone dégagé combinent les techniques thermiques et analytiques pour analyser les produits de gazéification dégagés par un échantillon sur filtre chauffé et utilisent la résistivité thermique de la fraction de «carbone élémentaire»;

Les méthodes par absorption de lumière considèrent la section efficace volumique d'absorption, couramment appelée coefficient d'absorption de la lumière (σ_{abs}), comme la technique optique décrite plus haut;

Les méthodes à incandescence induite par laser détectent les particules qui renferment du carbone par absorption d'une énergie rayonnante intense qui est transformée en chaleur et provoque la réémission du rayonnement thermique.

Par ailleurs, de nombreuses techniques font appel à la microscopie Raman ou électronique et à la spectrométrie de masse; voir Petzold *et al.* (2013) pour plus de détails.

Terminologie recommandée

Le Groupe consultatif scientifique pour les aérosols suggère l'emploi systématique de la terminologie ciaprès, fondée sur les propriétés ciblées:

- Masse de carbone total, pour décrire la masse de toutes les matières carbonées présentes dans des particules en suspension dans l'air;
- Carbone noir, pour décrire de manière qualitative les substances présentes dans les aérosols qui renferment du

carbone et qui absorbent la lumière. Pour les applications quantitatives, le terme exige des précisions;

- Équivalent carbone noir, au lieu de carbone noir, pour les données issues des méthodes par absorption optique, accompagné d'une valeur MAC appropriée pour convertir l'absorption de lumière en concentration de masse;
- Carbone élémentaire, au lieu de carbone noir, pour les données issues des méthodes qui visent expressément la teneur en carbone des matières carbonées;
- Carbone noir réfractaire, au lieu de carbone noir, pour les données issues des méthodes à incandescence;
- Suie, pour qualifier les particules carbonées dues à une combustion incomplète.

Quelques références bibliographiques

Hirdman D. *et al.*, 2010: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 669-693.

IPCC, 2013: *The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, et New York, États-Unis d'Amérique, 1355 p.

Petzold, A. *et al.*, 2013: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 8365-8379.

Pöschl, U., 2003: *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 375, 30-32.

Quinn, P.K. *et al.*, 2008: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 1732-1735.

Sharma, S. *et al.*, 2013: *Journal of Geophysical Research*, 118, D017774.

Zanatta, M. *et al.*, 2016: *Atmospheric Environment* (sous presse).

Qu'est-ce que le Bulletin sur les aérosols?	Cette publication présente des informations d'ordre général sur le volet de la VAG qui s'intéresse aux aérosols et cible des composantes et des applications précises de la mesure des aérosols au sein de la VAG.
Comment faire partie du réseau de la VAG?	La marche à suivre est décrite sur le site: http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/join_GAW.html
Comment obtenir des données?	Des données <i>in situ</i> au sol, des observations par lidar et des valeurs de l'épaisseur optique des aérosols figurent sur le site: http://www.gaw-wdca.org/ ; pour les données provenant de satellites, voir le site: http://wdc.dlr.de/data_products/AEROSOLS/ .
Comment effectuer les mesures?	Les directives de mesure et les procédures normalisées d'exploitation se trouvent sur les sites: ftp://ftp.wmo.int/Documents/PublicWeb/arep/gaw/gaw153.pdf et http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/FINAL_GAW_200_web.pdf .
Où trouver de plus amples informations?	Pour en savoir davantage sur la VAG, voir le site: http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/gaw_home_en.html , sur le Système d'information sur les stations de la VAG, voir le site: http://gaw.empa.ch/gawsis/ et sur le Groupe consultatif scientifique pour les aérosols, voir le site: http://gaw.tropos.de/index.html . Pour toute question concernant le contenu du Bulletin, communiquer avec Silvina Carou (courriel: scarou@wmo.int).

Organisation météorologique mondiale

Division de la recherche sur l'environnement atmosphérique, Département de la recherche, Genève

Courriel: AREP-MAIL@wmo.int | Site Web: <http://public.wmo.int/gaw>