

# Le carbone-suie entre qualité de l'air et impact climatique

(Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement)

## Black Carbon from Air Quality to Climate Change

Paolo LAJ

Le 16 février 2012, la secrétaire d'État américaine annonçait depuis Washington DC le lancement de l'Alliance pour le Climat et la Qualité de l'Air (*Climate and Clean Air Coalition*) pour lutter contre le changement climatique. L'initiative avait de quoi surprendre de la part d'un pays non signataire du protocole de Kyoto. Cette alliance se fonde sur le principe que les gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) ne sont pas les seules substances dans l'atmosphère à agir sur le climat. D'autres espèces, qu'elles soient présentes dans l'atmosphère sous forme gazeuse ou particulaire, peuvent absorber ou réfléchir le rayonnement solaire et, de fait, agir sur le système climatique terrestre. Toutes n'ont pas, comme le  $\text{CO}_2$ , des temps de résidence dans l'atmosphère très longs (une centaine d'années pour le  $\text{CO}_2$ ) ; il s'agit d'espèces à temps de vie court (de quelques jours à quelques années) et qui donc n'agissent sur le climat que pendant un temps limité et qui, jusqu'à récemment, étaient considérées d'importance uniquement dans le cadre des législations pour la qualité de l'air. Ces espèces ont pour nom l'ozone, le méthane ou le carbone-suie.

Le carbone-suie (*Black Carbon* ou *soot* en anglais), également connu sous son abréviation BC, est un produit de la combustion incomplète de combustibles fossiles comme l'essence, le gazole, le fioul domestique, ou le charbon par exemple, ou de la biomasse (bois, végétaux). On le trouve en général présent dans l'atmosphère sous forme d'agglomérats de petites particules dont la taille varie de quelques dizaines à quelques centaines de nm. Il tient son nom bien sûr de sa couleur noirâtre due à la présence importante de carbone dans sa structure. Il est en revanche difficile d'en donner une définition à la fois simple et exacte. Du point de vue de sa nature chimique, le carbone-suie n'est pas composé uniquement de carbone mais contient des quantités variables d'impuretés dans sa structure, principalement des atomes d'hydrogène et d'oxygène. Les rapports entre ces impuretés et la quantité de carbone influenceront d'ailleurs sa couleur. Du point de vue de ses propriétés physiques et chimiques, le carbone-suie est en théorie insoluble

dans l'eau, réfractaire dans l'atmosphère, même à des très hautes températures (plusieurs milliers de Kelvin) et dispose d'une très large bande d'absorption dans le domaine spectral du visible (Ogren et Charlson, 1983 ; Goldberg, 1985). La capacité d'absorption du carbone-suie, c'est-à-dire la capacité à absorber la lumière, est définie par son coefficient massique d'absorption en  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ . Elle va dépendre de plusieurs facteurs, dont justement la présence d'impuretés ou la forme des particules.

Le BC est une espèce très particulière puisqu'il n'existe pas dans l'atmosphère naturelle d'absorbants aussi efficaces de la lumière visible. Les particules de poussières désertiques absorbent, elles aussi, ce rayonnement visible mais de manière beaucoup moins efficace à parité de masse, dans un rapport de 1 à 5, voire de 1 à 10, en faveur du carbone-suie. L'absorption de la lumière visible par le carbone-suie a des répercussions très directes sur le système climatique puisque l'énergie absorbée est alors restituée sous forme de chaleur. Le carbone-suie, comme les gaz à effet de serre mais suivant un processus radicalement différent (1), a le potentiel pour réchauffer l'atmosphère. Dans certaines régions du monde, comme l'Inde, l'impact du carbone-suie sur le réchauffement pourrait être jusqu'à 10 fois supérieur à celui du  $\text{CO}_2$ . Bien sûr, les comparaisons sont difficiles puisque les mécanismes par lesquels les gaz à effet de serre et le carbone-suie influencent le climat sont différents : effets globaux dus à son temps de résidence très long pour le premier, effets régionaux pour le second, dont le temps de résidence est beaucoup plus court. Une réduction des émissions de carbone-suie aurait donc, pour la planète, un effet positif.

Le carbone-suie est une particule submicrométrique. À ce titre, il contribue à la masse des particules fines qui constitue la norme pour la qualité de l'air ( $\text{PM}_{2.5}$  et  $\text{PM}_{10}$ ). Sa contribution est modeste dans les villes françaises et européennes puisqu'elle représente moins de 10 % de cette masse  $\text{PM}_{10}$  (plus généralement entre 5 et 10 %) et entre 7 et 15 % de la masse des  $\text{PM}_{2.5}$ . Ces pourcentages sont générale-

(1) Le carbone-suie absorbe la lumière visible du soleil et la transforme en chaleur, alors que les gaz à effet de serre absorbent et réfléchissent une partie du rayonnement thermique émis par la terre.

ment plus bas dans les zones rurales et en altitude (contribution aux  $PM_{10}$  inférieure à 5 % en masse). En revanche, ils peuvent dans certaines zones extrêmement polluées situées en proximité du trafic routier atteindre presque 20 % de la masse des  $PM_{10}$  et donc plus de 20 % de celle des  $PM_{2,5}$ . Une réduction des émissions de carbone-suie aurait donc un impact limité mais mesurable sur les taux de PM observés dans les villes européennes. La situation serait bien différente dans d'autres villes de pays émergents ou en développement où les concentrations et les proportions de carbone-suie sont en général bien supérieures.

L'impact d'une réduction substantielle des émissions de carbone-suie sur la santé est par contre bien plus complexe à quantifier. Si le carbone-suie contribue bien évidemment aux effets de la pollution particulaire tels qu'ils ont été récemment mis en évidence par l'étude dans 9 villes françaises (APHEKOM), il n'existe que très peu d'études reliant la composition chimique de la pollution particulaire à des impacts sanitaires spécifiques, mis à part pour des molécules bien identifiées. Nous savons depuis les études faites sur les travailleurs exposés dans les mines de charbon que l'inhalation de carbone-suie à des très fortes concentrations (> à la centaine de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) est susceptible de provoquer une hausse significative de la mortalité par cancer des poumons. À concentrations atmosphériques égales, les effets sur la santé des particules dérivées de la combustion est avéré même si les mécanismes par lesquels ils se produisent sont encore débattus dans la communauté scientifique. La taille submicronique, la forme fractale et la composition chimique sont très certainement des facteurs à considérer, au-delà de la simple concentration. Les tests effectués *in vitro* sur des cellules montrent que le carbone-suie induit très efficacement une inflammation des cellules que certaines études ont reliée à la présence de liposaccharides ou à la production de radicaux libres. La forme fractale de ces particules a la particularité d'offrir une vaste surface d'action par unité de masse qui pourrait expliquer la sensibilité accrue de certaines cellules pulmonaires à la présence de carbone-suie. Il reste néanmoins encore des études à mener pour établir et quantifier des relations sur l'impact sanitaire que pourrait avoir une réduction substantielle des émissions de carbone-suie.

Une révision de la directive européenne sur la qualité de l'air devrait être proposée en 2013. Dans le cadre de ces discussions, le rôle du BC et la nécessité de mettre en place un suivi de ses concentrations atmosphériques et d'éventuelles valeurs seuils pour la protection de la santé humaine ont été régulièrement

débattus. Qu'une nouvelle valeur seuil sur le BC intègre ou non la révision de la directive, elle ne pourra avoir lieu qu'après avoir résolu le problème métrologique lié à la mesure des concentrations de carbone-suie. La mesure de ces concentrations en carbone-suie pose en effet un problème métrologique fondamental. Actuellement, plusieurs instruments existent dans le commerce pour la mesure du carbone-suie mais tous ne se basent pas sur les mêmes principes de mesure : certains quantifient BC à partir de ses capacités d'absorption à certaines longueurs d'onde, d'autres à partir de ses propriétés thermiques en atmosphère contrôlée, d'autres encore à partir de ses propriétés d'émission. Chaque instrument se réfère à une des propriétés physique, optique ou chimique du BC, mais jamais à l'ensemble des trois. Or ces propriétés ne sont pas linéairement dépendantes les unes des autres, et les mesures de BC de ces différents instruments ne sont pas comparables entre elles. Il en résulte une réelle difficulté à pouvoir confronter différentes études puisque les concentrations mesurées peuvent varier du simple au double suivant l'instrumentation utilisée et les hypothèses de travail considérées. La difficulté à trouver une substance pouvant servir de référence permettant la comparaison des mesures est un facteur supplémentaire de complexité.

En dépit de ces aspects métrologiques qui font l'objet de discussions dans la communauté scientifique, il est évident qu'une réduction des émissions de carbone-suie serait bénéfique tant pour la qualité de l'air que pour la lutte contre le changement climatique. Même si les taux d'émission sont très difficiles à estimer, les émissions de carbone-suie au niveau mondial restent en augmentation constante (augmentation d'un facteur 5 au moins au cours des 100 dernières années). En cause les émissions d'origine anthropique mais également depuis quelques décennies, l'augmentation des feux de biomasse. En Europe, la situation est différente puisque le carbone-suie accompagne la baisse des émissions de particules, limitée mais réelle depuis une dizaine d'années, suite à des mesures environnementales qui ne ciblaient d'ailleurs pas spécifiquement le carbone-suie.

La réduction des émissions de carbone-suie n'est pas une alternative à celle des émissions de  $\text{CO}_2$  qui reste la priorité pour lutter contre le changement climatique. Elle est néanmoins une voie prometteuse pour, sur le court terme (quelques dizaines d'années), accompagner les mesures structurelles prises dans les plans climat tout en contribuant à un air plus pur pour nos agglomérations.





Photo : La Paz (Alfred Wiedensohler).