

# Le carbone suie : enjeu présent et futur

## CONTEXTE

Souvent cité, jamais décortiqué, le carbone suie est aujourd'hui au coeur de nombreux thèmes de recherches.

page 2

## DOSSIERS

**Impact sur la santé** : réponses d'une spécialiste à nos questions.

**Tracer la pollution locale** : les programmes mis en place par Airparif.

page 4 & 6

## PERSPECTIVES

Pollution atmosphérique et changement climatique : deux enjeux liés par le carbone suie.

page 10

# Le carbone suie : qu'est-ce-que c'est ?

Depuis quelques années, le carbone suie a fait son apparition dans le débat scientifique, tandis que son suivi expérimental a été mis en place dans plusieurs réseaux de mesures de la qualité de l'air. Mais le carbone suie, quésaco ?

Le carbone suie appartient à la grande famille des particules, groupe de nature chimique hétérogène, composé d'espèces ioniques (sels), de poussières minérales ou d'espèces carbonées. Deux propriétés principales le caractérisent : c'est un composé constitué de carbone (C) dont la couleur noire absorbe le rayonnement lumineux. Le carbone suie mesuré est un type de particules, produit par les combustions incomplètes de combustibles d'origine fossile et biomassique, débarrassé de sa fraction organique. Ses principales sources sont les moteurs à combustion (diesel essentiellement), la combustion résidentielle de bois et de charbon, les centrales électriques, l'utilisation de fioul lourd ou du charbon, la combustion de déchets agricoles, ainsi que les incendies de forêt et de végétation. Il appartient aux particules fines PM2,5 (diamètre inférieur à 2,5 µm), mais se retrouve principalement dans la partie la plus petite de celles-ci, les PM1, dont le diamètre est égal ou inférieur à 1 µm (plus petite qu'une bactérie). Par ces deux caractéristiques, chimiques et physiques, le carbone suie permet de mieux comprendre les comportements de la pollution particulaire liée aux sources de combustion. Également présent dans la littérature scientifique sous la dénomination *Elementary Carbon* (EC) ou *Black Carbon* (BC),

ces deux appellations recouvrent en fait la même espèce chimique et ne se distinguent que par la méthode de mesure : thermique pour la première, optique pour la seconde (illustration 1). Le distinguo opéré entre les deux reste donc

« C'est un composé constitué de carbone (C) dont la couleur noire absorbe le rayonnement lumineux. »

annexe par rapport aux nombreuses pistes de recherches que suscite le carbone suie. Car les enseignements tirés du EC et du BC sont finalement les mêmes et seules leurs valeurs absolues changent. Définition plus précise de la composition particulaire et de leurs effets sanitaires (page 4), meilleur traçage des sources de polluants (page 6) et lien entre pollution de l'air et changement climatique (page 10) figurent ainsi parmi les nombreux débouchés attendus. Atteindre ces objectifs passe par l'intégration du carbone suie dans le dispositif de surveillance via le développement de sa mesure et de sa modélisation. Cette publication se propose de dresser un panorama de ces différents travaux de recherche pour lequel on retiendra le mot carbone suie.

ZOOM

## Le carbone suie au regard des fumées noires

Issues de la combustion comme le carbone suie, la question du lien entre les fumées noires et le carbone suie s'est rapidement posée. Ces deux termes font référence à des composés très similaires et leurs principales différences s'illustrent à travers deux critères. Dans les deux cas, la mesure s'effectue par une mesure optique d'absorption de la lumière par les particules carbonées prélevées sur un filtre. Mais la conversion de cette absorption en concentration s'effectue selon des facteurs de conversion différents. Il existe également une différence historique sur les stratégies de surveillance mises en place en Île-de-France : les fumées noires ont été principalement mesurées en fond (pollution ambiante), alors que le carbone suie est lui essentiellement évalué en proximité au trafic routier. Ces données sont donc complémentaires et permettent d'attester que les niveaux de suie ont été divisés par 50 depuis le milieu du siècle dernier. Les fumées noires, au même titre que le carbone suie, sont également un bon indicateur de santé. Beaucoup d'épidémiologistes travaillent en effet sur ce polluant lorsqu'il s'agit de produire des séries temporelles très longues, soit plusieurs décennies. L'historique de la mesure s'avère alors précieux.

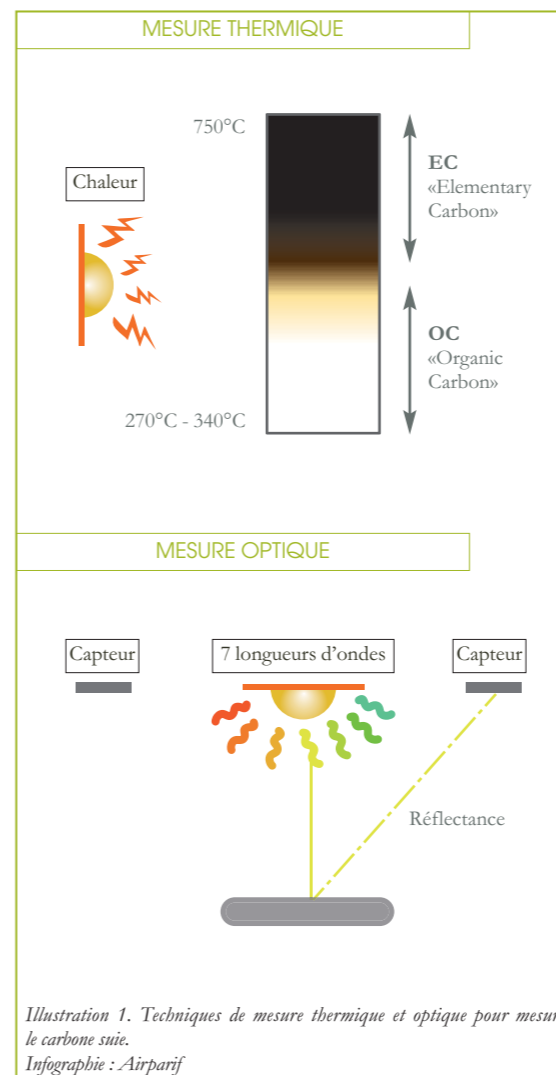


Illustration 1. Techniques de mesure thermique et optique pour mesurer le carbone suie. Infographie : Airparif

ENCADRÉ

## Des niveaux de particules trop élevés pour plusieurs millions de Franciliens

Le carbone suie appartient aux particules fines PM2,5, qui font elles-mêmes partie des PM10, particules inférieures à 10 µm de diamètre. La concentration dans l'air des particules est réglementée au niveau européen depuis 1999 pour les PM10 et depuis 2008 pour les PM2,5 avec des valeurs limites à ne pas dépasser. Pour les PM2,5, la valeur limite est dépassée à proximité de certains axes majeurs de la région. L'ensemble des Franciliens sont ainsi soumis à un dépassement de la valeur recommandée par l'Organisation mondiale de la santé. Pour les PM10, les dépassements de la valeur limite concernent 1,4 million à 4 millions d'habitants en fonction des années et des conditions météorologiques, essentiellement dans le cœur de l'agglomération et à proximité des principaux axes routiers. C'est ainsi près de 30 % du réseau routier régional qui est concerné par le dépassement du seuil de 50 µg/m<sup>3</sup> plus de 35 jours par an.

**FICHE DE SIGNALEMENT**

**SUIE**

**TABULE :** généralement dans la fraction PM2.5

**COMPOSANTE :** carbone      **MORPHOLOGIE :** agrégat

**CARACTERE :** réfractaire      **ASSOCIES :** HAP...

**RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE :** effet mais plus limité que le CO2

**EFFET SUR LA SANTE :** bon indicateur des composés toxiques des PM issus de la combustion (OMS-2012)

**ORIGINE :** locale 2/3 import 1/3      **COULEUR :** brun foncé

un bon traceur de la part locale des PM à noir

# Impact sur la santé



## Entretien avec Armelle Baeza

Professeur à l'Université Paris Diderot - UMR CNRS 8251

### Le carbone suie a-t-il un effet sur la santé ?

Le carbone suie est la composante carbonée élémentaire de nature particulaire produite par les processus de combustion. De par ses faibles dimensions, il présente les mêmes capacités que les particules fines et ultrafines à pénétrer profondément dans l'appareil respiratoire et à s'y déposer. La clairance pulmonaire, à savoir la capacité d'épuration par les macrophages des alvéoles pulmonaires, est moins efficace pour les particules de petite taille. Cela déclenche une inflammation dont la persistance, lors d'expositions chroniques, peut conduire à une restructuration des tissus pulmonaires et à la sécrétion de mucosités qui peuvent provoquer un essoufflement par rétrécissement du calibre des conduits respiratoires. La taille de ces particules est également favorable à leur passage dans le sang à travers la paroi alvéolaire, favorisant les risques cardio-vasculaires.

Mais si le carbone suie pose problème par ses propriétés physiques qui lui permettent l'accès au poumon profond, ce sont surtout les propriétés chimiques des fractions organique et métallique associées à celui-ci qui posent question. Lorsqu'on mesure le carbone suie, ces fractions ne sont en effet pas prise en compte (cf. contexte page 2) ; or à la présence de carbone suie s'associe toujours celle de carbone organique produit lors des

« Mais si le carbone suie pose problème par ses propriétés physiques qui lui permettent l'accès au poumon profond, ce sont surtout les propriétés chimiques des fractions organique et métallique associées à celui-ci qui posent question. »

processus de combustion incomplète. La composante organique s'avère particulièrement délétère pour la santé comme l'ont montré de nombreuses études toxicologiques. En effet, cette composante contient des

Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et des quinones à la toxicité reconnue. Le carbone suie peut également être le vecteur de métaux lourds et de métaux de transition (fer, cuivre...) qui sont susceptibles de générer des radicaux libres. Ces molécules chimiques très instables et réactives provoquent des dommages aux macromolécules biologiques avec des conséquences sur certaines fonctions métaboliques du corps humain.

### Est-il un traceur pertinent de l'impact sanitaire des particules ?

De nombreuses études épidémiologiques ont montré l'impact sur la santé des particules. La synthèse réalisée en 2012 par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) intitulée « Health effects of black carbon » (voir encadré page 5) rapporte des associations entre les variations journalières en carbone suie et des effets sanitaires à court terme, ce qui reste cependant moins évident sur le long terme. Comme nous l'avons évoqué, le carbone suie, compte-tenu de son origine, n'est jamais seul et est toujours associé à des composés organiques qui contribuent aux effets biologiques. D'un point de vue toxicologique, la fraction organique est beaucoup plus néfaste que la fraction insoluble du carbone élémentaire servant essentiellement de vecteur pour une pénétration respiratoire profonde de ces composés organiques ; d'autres vont s'y associer lors du vieillissement des particules dans l'atmosphère comme des métaux et des composés biologiques (allergènes, endotoxines...). Le carbone suie est donc un traceur intéressant mais vraisemblablement pas suffisant. La toxicité particulaire résulte de la réactivité biologique des composantes organique et métallique. Le carbone suie est donc le témoin de la phase organique générée lors de la combustion, mais ne permet pas de prendre en considération les composés associés lors de l'évolution de l'aérosol dans l'atmosphère. Il sera ainsi un excellent traceur en milieu impacté par les particules issues de processus de combustion, mais beaucoup moins au sein d'environnements industriels ou professionnels où la composante métallique peut être plus importante.

### Est-ce envisageable de fixer des valeurs guides pour la santé sur le carbone suie ?

Les valeurs guides actuelles reposent sur la masse des particules qui ne tient pas compte de leur composition dont la toxicité dépend. Fixer des valeurs guides à partir de cet indicateur est intéressant mais pas totalement satisfaisant, car elles ne seront pas valables dans tous les contextes. En ne ciblant qu'une composante de la toxicité, celle provenant du lien entre le carbone suie et le carbone organique issu de la combustion, on laisse de côté les autres composés associés provenant d'autres sources. L'OMS proposait, en conclusion de son rapport, de conserver ce traceur qui, à défaut de se substituer à d'autres paramètres, rajoute un élément d'analyse.

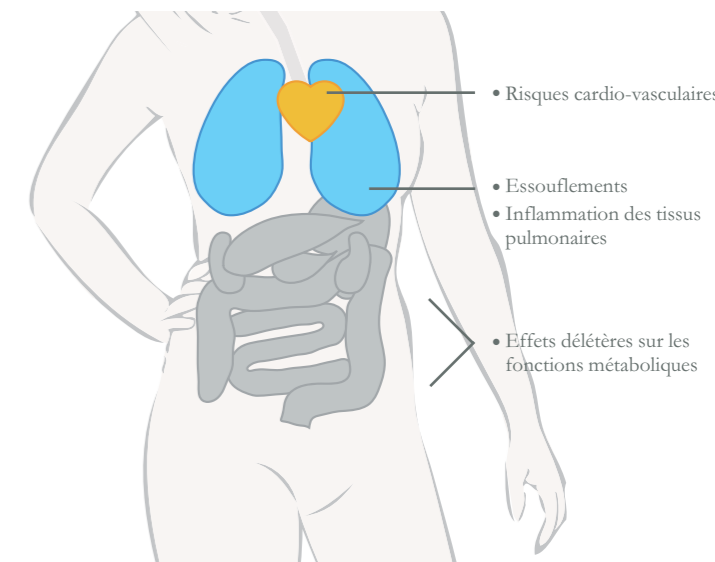


Illustration 2. Les effets du carbone suie sur la santé sont nombreux.  
Infographie : Airparif

## L'Organisation mondiale de la santé s'empare du sujet

Dès 2010, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) s'est penchée sur la question du carbone suie. Un groupe de travail (Task Force) a été mis en place suite à une décision de la Convention de Genève sur la pollution atmosphérique transfrontalière longue distance pour évaluer les effets du carbone suie en tant que composant majeur des particules fines PM<sub>2,5</sub>. Publié en 2012, ce rapport intitulé « Health effects of black carbon » met l'accent sur la nécessité de standardiser les méthodes de mesure entre *Black Carbon* (BC) et *Elementary Carbon* (EC) (cf. contexte page 2) pour faciliter les comparaisons entre les résultats des études existantes. De par ses propriétés révélées dans le champ optique et/ou thermique, le carbone suie est un indicateur particulaire universel de la grande variété des sources de combustion. Mesuré dans l'atmosphère, il est d'ailleurs toujours associé à d'autres substances provenant également de la combustion de matériaux, tels que des composés organiques. Et bien que des incertitudes méthodologiques demeurent sur l'estimation des risques associés, l'exposition au carbone suie est aujourd'hui bien évaluée.

L'examen systématique d'un panel d'études et de cohortes démontre ainsi une association entre les variations de concentrations de carbone suie à court et long terme et ses effets immédiats sur la santé : hausse de la morbidité et de la mortalité cardio-vasculaire, nombre d'admissions plus important dans les services cardiopulmonaires hospitaliers... Si les impacts sanitaires associés à l'exposition aux particules fines (PM<sub>10</sub> et 2,5) sont généralement aussi liés au carbone suie, les effets estimés de ce dernier seraient en revanche plus délétères. Le carbone suie serait donc un meilleur indicateur des substances particulières nocives issues de la combustion que les PM massiques indifférenciées, notamment pour le trafic routier.

Ce rapport de l'OMS tempore cependant ce constat. Il conclue sur le nombre insuffisant d'études cliniques ou toxicologiques permettant une évaluation qualitative de la différences entre les effets sur la santé de l'exposition au carbone suie ou aux PM massiques. Le carbone suie semble néanmoins fonctionner comme le transporteur d'une grande variété de constituants chimiques plus ou moins toxiques issus de la combustion. L'OMS préconise donc la réduction de l'exposition aux particules PM<sub>2,5</sub>, cible pertinente pour réduire les effets sanitaires associés aux PM et quantifier les bénéfices induits par la baisse de celles-ci. En parallèle, l'utilisation du carbone suie offre un indicateur supplémentaire pour évaluer les actions locales de réduction des particules issues de la combustion, en particulier pour le trafic.

## Le carbone suie : un enjeu de recherche majeur pour tracer la pollution locale

Airparif s'est engagée depuis plusieurs années dans différents programmes de recherche autour de la pollution particulaire. L'étude Particules a ainsi permis d'interroger la pollution francilienne au regard des particules et de leurs précurseurs gazeux, tandis que les projets PREQUALIF puis REBECCA cherchaient notamment à mieux évaluer les mesures visant à diminuer le trafic. En toile de fond : une meilleure connaissance des sources de polluant local, et notamment du carbone suie.

### Des projets précurseurs

Financés par différents programmes (PREQUALIF avec Primequal, REBECCA avec l'ADEME) et en partenariat avec le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), ces projets répondent à plusieurs objectifs. Dès 2009, l'étude Particules visait à mieux caractériser la pollution particulaire. La meilleure détermination des niveaux, de la variabilité et des sources de particules fines permettait ainsi d'améliorer la modélisation de ces polluants et d'affiner l'acuité des prévisions. Car l'étude Particules présidait à la volonté de mieux interroger les polluants particuliers en milieu urbain, c'est-à-dire là où se situe la majorité de la population exposée à la pollution de l'air. Grâce à la stratégie expérimentale mise en œuvre sur ce projet, certains objectifs non listés au début se sont rajoutés par la suite, comme une meilleure connaissance des sources proches et lointaines du carbone suie en Île-de-France.

En parallèle, le programme PREQUALIF a démarré en septembre 2011. La mise en place future des désormais

**« Le carbone suie est une émission 100 % primaire, inerte et essentiellement locale qui permet de voir nettement l'amplification du signal trafic. »**

révolues Zones d'action prioritaire pour l'air (ZAPA) engageait une évaluation de l'air, un « état 0 », pour mieux cerner la portée de cette mesure et lui adjoindre une méthodologie pertinente pour en évaluer les effets. Bien que le carbone suie ne soit pas seul concerné par cette étude, ce composé chimique apparut rapidement comme le meilleur traceur de la pollution locale. Le dioxyde d'azote, les PM10 et les PM2,5 prennent part à de nombreuses

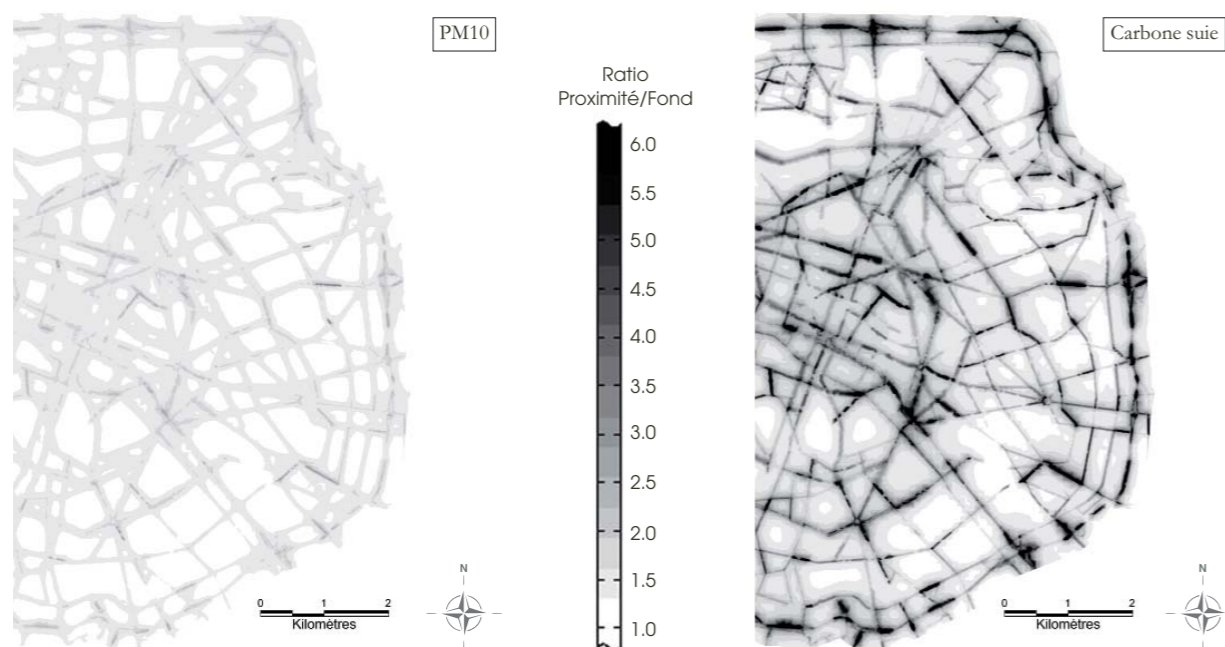


Illustration 3. En prenant une échelle similaire pour les PM10 et le carbone suie, on voit que le ratio proximité/fond est largement amplifié sur les grands axes pour le carbone suie.  
Source : Airparif

réactions chimiques dans l'atmosphère qui rendent difficile la quantification précise des impacts directement attribuables aux mesures sur le trafic routier. A cela s'ajoute, pour les PM10 et les PM2,5, une grande diversité des sources et des phénomènes d'imports. A l'inverse, le carbone suie est une émission 100 % primaire, inerte et essentiellement locale qui permet de voir nettement l'amplification du signal trafic. Il fut donc privilégié pour cette étude. Par son intérêt sanitaire supérieur au dioxyde d'azote, le carbone suie apparut là aussi comme un indicateur pertinent.

Pour répondre à ces objectifs, un réseau dense de mesures du carbone suie a été installé en Île-de-France. Une quinzaine d'appareils ont donc été répartis dans le cadre du projet PREQUALIF. Le programme REBECCA, qui prolonge l'année de mesure réalisée dans le cadre de PREQUALIF en se focalisant sur le carbone suie, permet de poursuivre les recherches sur ce composé en maintenant des instruments sur une dizaine de sites. Ces 18 mois de mesures supplémentaires ont conforté les travaux menés dans le cadre de PREQUALIF. REBECCA devrait ainsi permettre d'affiner l'évaluation de la contribution de chacune des sources de carbone suie, qu'elles soient liées au trafic ou au chauffage au bois. Les premiers résultats montrent d'ailleurs qu'une part non négligeable du carbone suie, mesuré en fond parisien, n'a pas seulement pour origine le trafic routier mais pourrait provenir de sources additionnelles (chauffage bois en hiver par exemple).

### La modélisation de proximité : des premiers essais aux premiers résultats

En complément du réseau de mesure, la modélisation permet de représenter de façon continue tout le territoire étudié. La meilleure cartographie possible est obtenue en intégrant au modèle les résultats de mesures aux stations. Ceux-ci permettent en effet de tendre vers la modélisation la plus juste possible. Ce travail dessine ainsi l'idée de faire progresser la modélisation de proximité du carbone suie pour améliorer la finesse des calculs et des outils opérationnels. A terme, Airparif ambitionne d'améliorer l'intégration du carbone suie à ses outils afin d'alimenter le modèle interrégional de prévisions de la qualité de l'air ESERALDA et les modèles de proximité du trafic routier. L'inventaire francilien 2012 des émissions de polluants atmosphériques verra ainsi le carbone suie être ajouté à la liste des espèces chimiques inventoriées pour sa parution en 2014. Les émissions y

seront calculées à partir d'une spéciation chimique des émissions de PM2,5.

De véritables progrès en matière de modélisation des niveaux de particules en Île-de-France sont donc à l'actif

**« L'utilisation de carbone suie constitue un excellent indicateur, d'une part, des sources locales de polluant et, d'autre part, des effets sur la santé selon les niveaux de concentration en particules fines. »**

de ces programmes, qui posent les fondations d'une meilleure connaissance de la complexité et de l'hétérogénéité des particules fines. Face à cette complexité, l'utilisation de carbone suie constitue un excellent indicateur, d'une part, des sources locales de polluants et, d'autre part, des effets sur la santé selon les niveaux de concentration en particules fines. La modélisation de cet indicateur permettra d'évaluer et de suivre l'impact des actions locales comme celles sur le trafic routier. Une meilleure modélisation permettra ainsi de mieux cerner ces niveaux, et en creux de mieux comprendre les coûts sanitaires de la part locale des émissions polluantes.

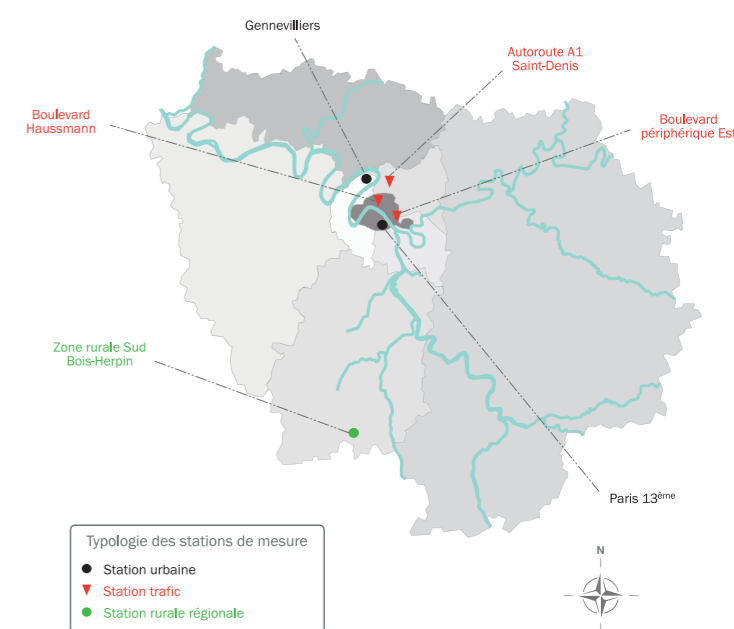


Illustration 4. Carte illustrant les stations de mesure automatiques du carbone suie d'Airparif au 01/01/2015.  
Source : Airparif

**Un marqueur des sources locales dans les épisodes de pollution**

On estime que plus de 80 % du carbone suie mesuré à proximité immédiate du Boulevard périphérique parisien provient du trafic - véhicules diesel essentiellement. On le trouve principalement dans les particules fines (PM2,5) issues de multiples sources directes et indirectes. L'étude sur l'origine des particules, menée entre 2009 et 2011 par Airparif et le LSCE, a permis de quantifier la part de ces différentes sources près d'un axe routier, dans le cœur de l'agglomération et à l'échelle francilienne. On apprend

carbone suie représente de l'ordre de 25 % des PM2,5 mesurées près du trafic et 10 % en site urbain de fond. Amplifiant le signal lié au trafic ou à la biomasse, le carbone suie apparaît aujourd'hui comme le meilleur témoin des sources de pollution locale. Grâce aux mesures optiques, il devient ainsi possible de tracer l'origine de la particule et donc de mieux comprendre la photographie d'un épisode de pollution. Les illustrations ci-contre montrent ainsi la part de chaque source pour les épisodes de décembre 2013, mars 2014 et septembre 2014.

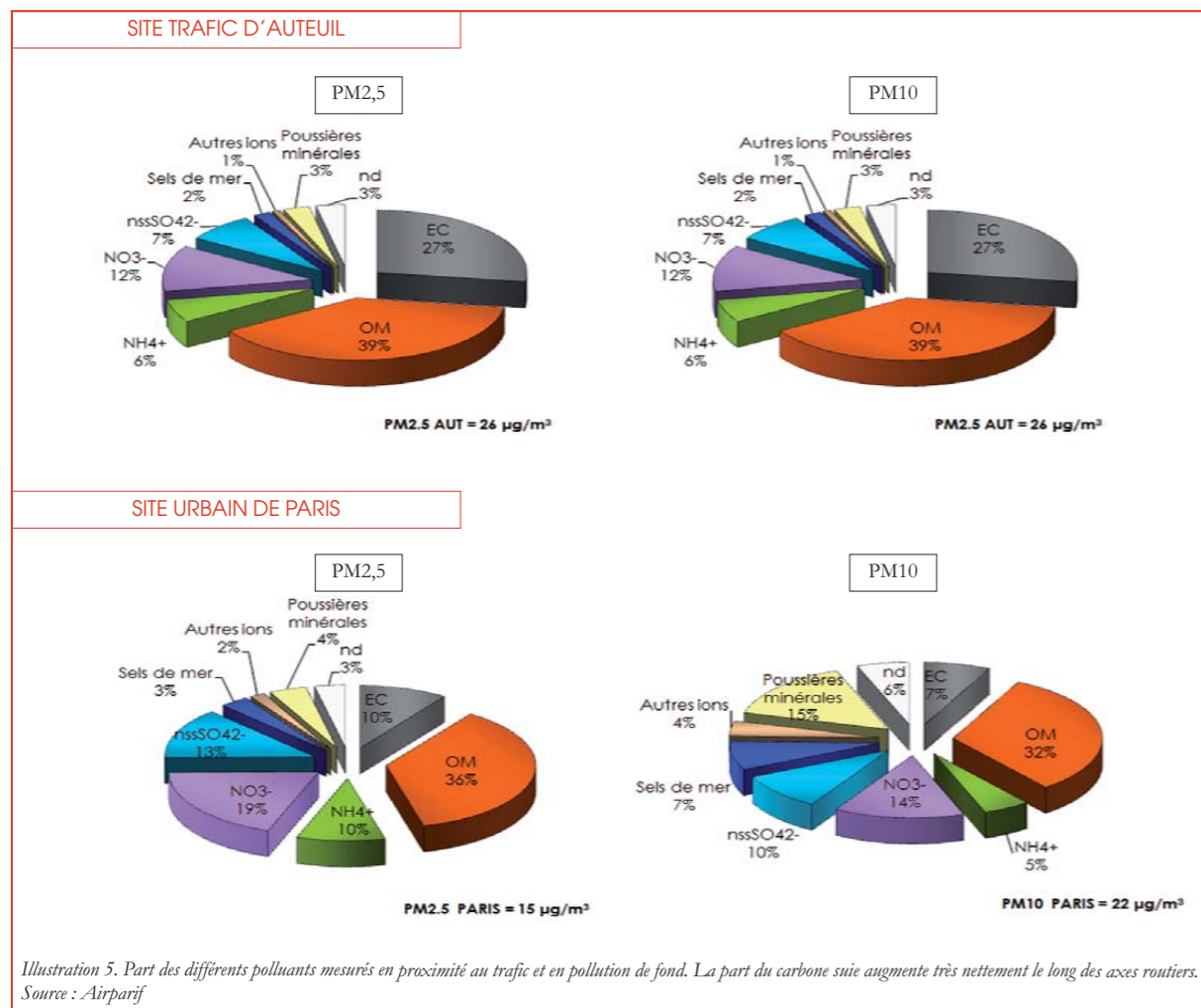
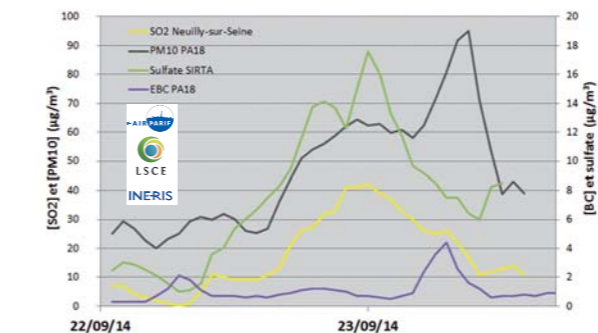
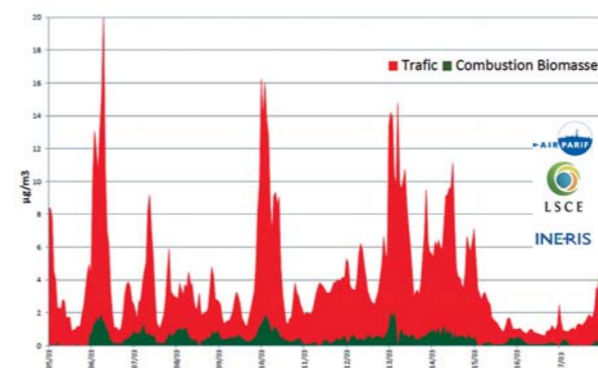
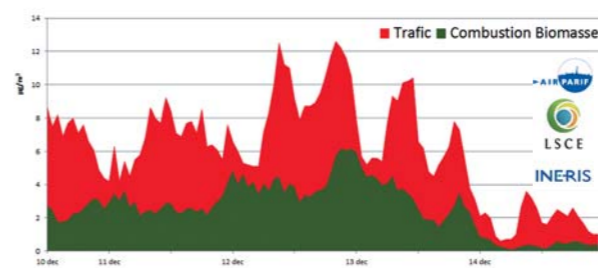


Illustration 5. Part des différents polluants mesurés en proximité au trafic et en pollution de fond. La part du carbone suie augmente très nettement le long des axes routiers. Source : Airparif

ainsi que le trafic est à l'origine de 45 % des PM2,5 en bordure d'un axe routier, tandis que sa part dans l'agglomération devient comparable à celle du chauffage au bois (environ 7 %). Ces mesures ont permis d'estimer que le carbone suie représente de l'ordre de 20% des PM10 mesurées au niveau du trafic et 7 % en site urbain de fond ; pour les particules PM2,5, le constat est encore plus éloquent, puisque le

« Le carbone suie représente de l'ordre de 20 % des PM10 près du trafic et 7 % en site urbain de fond ; pour les PM2,5, il représente environ 25 % du trafic et 10 % du fond urbain. »



Lors de l'épisode de pollution du mois de décembre 2013, les mesures enregistrées sur le réseau de fond parisien ont permis d'identifier les causes de la pollution particulière. Si le trafic reste majoritaire, le fort épisode hivernal a contribué à faire monter la part de la combustion de biomasse à 43 % en moyenne de la concentration en carbone suie.

L'épisode de mars 2014 offre lui un profil de nature différente. Les conditions météorologiques relativement clémentes du mois de mars ont entraîné un recours moindre au chauffage au bois (biomasse). La contribution du trafic représente en moyenne 85 % de la concentration totale en carbone suie.

L'épisode de septembre 2014 montre quant à lui que le carbone suie, complété par les autres composés chimiques, permet véritablement de distinguer les sources et les responsabilités lors d'épisodes complexes. Si le sulfate (en vert), issu du dioxyde de soufre émis par le volcan, font la pollution lors des premiers jours, c'est un pic de carbone suie (en violet) lié au trafic routier qui prolonge l'épisode de pollution.

**Comment va évoluer la réglementation européenne ?**

Le carbone suie n'est aujourd'hui pas réglementé dans l'Union européenne, ni dans aucun autre pays. La Directive de 2008 (2008/50/EC), qui a tracé les derniers grands objectifs européens sur la qualité de l'air, est révisée tous les cinq ans. Fin 2013, la dernière Directive a fixé des plafonds d'émissions plus contraignants pour lesquels le carbone suie a été évoqué ; à défaut de l'inscrire dans le champ réglementaire, cette Directive a instauré un suivi du polluant à travers le *National Emission Ceilings* (NEC).

Cette problématique a également été abordée par le *Air Quality Reference Laboratories* (Aquila), équivalent européen du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA), ainsi que par le *Air Quality Committee*, lors des modifications de la Directive, preuve que le carbone suie est un vrai sujet pour les décideurs européens. Le manque de recul actuel les conduit à la prudence, d'où un compromis autour de la définition de valeurs guides, plutôt qu'autour de valeurs limites. Pour remplir ce dernier objectif, le programme *European Monitoring and Evaluation Programme* (EMEP) a mis en place un suivi temporel des concentrations du carbone suie sur des sites de fond afin d'améliorer les capacités d'inventaire. Dans le même temps, un groupe de travail s'est constitué pour la mise en place d'une norme pour la mesure des aérosols carbonés, avec un chapitre spécifique dédié au carbone suie, sous l'égide du Comité européen de normalisation (CEN). Tous ces travaux conduisent raisonnablement à envisager des premières mesures contraignantes à l'horizon 2017 - 2018.

## Le double effet du carbone suie

Pollution atmosphérique et réchauffement climatique sont deux thèmes imbriqués, car les particules sont aussi des polluants climatiques. Le carbone suie a en effet un pouvoir réchauffant, contrairement à ses particules sœurs plutôt refroidissantes. Les climatologues s'y intéressent donc de près.



### Interview de Hervé Le Treut

Membre du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur le climat) et directeur de l'IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace des sciences de l'environnement)

#### Le premier volet du 5ème rapport du Giec sur les éléments physiques du climat a été diffusé fin 2013. Que faut-il en retenir ?

Un mot : l'urgence. Tout ce qui est prévu depuis le premier rapport du Giec, il y a 23 ans, est confirmé, avec une grande continuité dans le diagnostic. On continue néanmoins à émettre de plus en plus de gaz à effet de serre ! Les émissions de CO<sub>2</sub> s'élevaient à moins de 2 milliards de tonnes dans les années 1950, entre 3 et 4 milliards dans les années 1970 (ce qui représente le seuil à ne pas dépasser en termes de sécurité climatique), puis 6-7 milliards à la fin du siècle dernier, pour atteindre presque 10 milliards de nos jours. La croissance est donc

**« Les particules ont un effet complexe : la plupart refroidissent l'atmosphère et certaines, comme le carbone suie, le réchauffent. »**

forte et rapide, malgré les appels à la réduction. Ainsi, la question n'est plus de savoir si l'humanité va devoir s'adapter au changement climatique. La question est de trouver les solutions pour s'y adapter vite.

#### Le rapport se penche principalement sur les gaz à effet de serre qui ont une longue durée de vie. Comment sont pris en compte les composés à courte durée de vie comme les polluants atmosphériques ?

Le Giec a porté une attention plus grande sur les polluants atmosphériques, gaz et particules. Leur durée de vie n'est que de quelques semaines, ils ne sont donc pas dominants par rapport aux gaz à effet de serre qui se propagent une centaine d'années. Mais leur impact est loin d'être négligeable sur le climat. Les particules ont par exemple un effet complexe : la plupart refroidissent l'atmosphère, et

certaines, comme le carbone suie, le réchauffent. Or on ne connaît pas encore assez bien les subtilités de leur bilan radiatif.

#### Pouvez-vous nous en dire plus sur les incertitudes liées aux particules ?

Les particules sont un caillou dans la chaussure des climatologues, notamment pour définir la sensibilité du climat. Les agents climatiques induisent un forçage radiatif : ils reçoivent de l'énergie et ils en émettent, souvent plus. La réponse en température de l'atmosphère définit cette sensibilité du climat. Concrètement, on considère que la température de la planète va augmenter de 2 à 5° en cas de doublement des niveaux de CO<sub>2</sub> (en 2100 ou plus). Cette hausse peut être due à un forçage radiatif, auquel cas le réchauffement serait beaucoup plus sensible.

Les incertitudes qui pèsent sur le forçage radiatif des particules se répercutent donc sur l'évaluation de la sensibilité. On constate aujourd'hui dans la communauté scientifique une impatience grandissante sur la connaissance des particules. Elles sont au centre du jeu climatique.

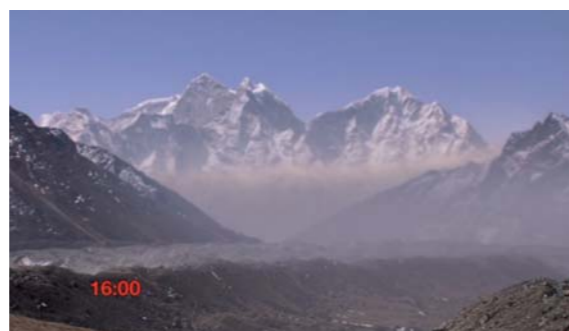


Illustration 6. Extrait du film d'Agnès Moreau «Un nuage sur le toit du monde» qui parle pour la première fois de la pollution aux particules de suie dans les sommets himalayens.  
Source : CNRS/Le Miroir



### Interview de Paolo Laj

Directeur du Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, et pionnier des mesures de carbone suie en haute altitude.

#### Qu'est-ce qui motive le développement des mesures de particules à des fins climatiques ?

On a plus de cinquante ans de recul sur les observations de dioxyde de carbone. La mesure des particules est plus récente, les premières observations datant d'il y a vingt ans. Or leur impact climatique ne fait plus débat et les modèles de calcul ont besoin de s'appuyer sur des mesures. On a donc une trentaine d'années de retard à rattraper pour gagner du recul.

#### Comment les mesures de carbone suie ont-elles commencé en France, puis dans les autres stations que vous gérez ?

Tout a débuté pour moi par l'installation de mesures climatiques au Puy-de-Dôme en 1999 avec, entre autres, quelques mesures d'ozone et de particules. Pour le carbone suie, nous avons utilisé les appareils alors disponibles, avec des résultats plutôt qualitatifs. Les mesures sont ensuite devenues plus robustes en 2005 avec l'utilisation d'un MAAP. Puis nous avons bénéficié d'une opportunité pour effectuer des mesures dans la chaîne himalayenne en 2006. Nous nous sommes raccordés avec le même type d'appareils sur une station d'analyse du mal des montagnes gérée par le Centre national de recherche italien. Enfin, depuis 2011, nous avons une station de mesure en Bolivie, le seul site d'observation climatique d'Amérique du sud. L'objectif à chaque fois est de s'éloigner des sources de pollution pour mesurer l'atmosphère à large échelle.

#### Quels sont les résultats ?

Je m'attendais à des résultats très faibles avec des sites aussi isolés, ce qui est loin d'être le cas. Nous observons des variations journalières importantes, avec des concentrations minimales la nuit et de fortes augmentations en journée. Notamment au Népal où les pics de carbone suie peuvent atteindre 15 µg/m<sup>3</sup>, soit des maximums comparables à ceux mesurés par Airparif dans l'air ambiant parisien !

Dans ces pays émergents, de nombreuses industries de petite taille se développent sans aucun contrôle de leurs rejets. Le bois est toujours utilisé comme combustible par une grande partie de la population et le brûlage des

cultures fait partie des pratiques agricoles régulières. Enfin, les villes connaissent une véritable explosion démographique, avec une augmentation du trafic routier en conséquence, et donc le rejet de nombreux polluants dont le carbone suie.

#### Le carbone suie est-il un levier d'action dans la lutte contre le changement climatique ?

On voit que le carbone suie se retrouve partout à des concentrations non négligeables, avec un rôle global sur le climat susceptible d'être conséquent. Son pouvoir de réchauffement est équivalent à celui du méthane. Déposé sur les surfaces enneigées, il pourrait en accélérer la fonte. Enfin, comme pour les autres types de particules, il agit sur la formation des nuages. Il pourrait ainsi paraître plus simple et plus économique pour les décideurs d'agir sur la limitation des émissions de carbone suie plutôt que sur celles du CO<sub>2</sub>.

Mais les choses sont plus compliquées qu'elles en ont l'air, car le carbone suie n'est jamais émis seul, mais avec d'autres particules ou d'autres gaz, qui une fois dans l'atmosphère formeront de nouvelles particules. Ces particules, à l'inverse du carbone suie, ont en général un effet refroidissant car elles réfléchissent la lumière plus qu'elles ne l'absorbent. Le trafic routier par exemple, qui est un des plus importants contributeurs de carbone suie, rejette aussi des particules refroidissantes. On peut donc difficilement savoir si une réduction du carbone suie aura un effet positif ou négatif sur les températures. Cette réserve vaut surtout pour les pays développés où les concentrations de carbone suie observées sont plutôt faibles et la marge de réduction réduite. Pour certains pays émergents, les niveaux de carbone suie sont tellement élevés qu'une réduction en vue de la lutte contre le réchauffement climatique a plus de sens.

La baisse des émissions de carbone suie n'est donc pas une alternative à la baisse des émissions de CO<sub>2</sub>. Il est par contre évident qu'une telle mesure serait bénéfique du point de vue de la qualité de l'air. Dans nos pays, améliorer la santé des populations reste à mon sens l'argument principal pour diminuer les niveaux des particules.

## La mise en place d'un réseau de mesure du dioxyde de carbone : une piste complémentaire étudiée par Airparif

Les enjeux entre changement climatique et pollution de l'air trouvent de nombreuses synergies. A cet égard, la lutte contre le changement climatique impose, comme pour la pollution de l'air, d'agir en premier lieu à la source pour contrôler les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Les débats actuels, notamment au travers des Conférences des Parties (COP), dont la 21<sup>ème</sup> édition se déroulera à Paris - Le Bourget (Paris Climat 2015), visent à réduire les rejets anthropiques de CO<sub>2</sub> de façon mesurée et vérifiable. Les grandes métropoles participent de manière importante aux émissions de CO<sub>2</sub> compte-tenu de la densité de leur population (consommation énergétique, besoin en transports et concentration des activités économiques). L'Île-de-France contribue ainsi à hauteur de 11 % des émissions nationales de CO<sub>2</sub> pour un territoire couvrant seulement 0,2 % de la France métropolitaine.

L'évaluation précise des émissions sur ce territoire est donc essentielle afin d'évaluer l'influence des politiques menées pour la réduction des rejets de CO<sub>2</sub>. Une option consisterait à proposer un réseau dense de capteurs à bas coût, miniatures, autonomes et communicants avec une sensibilité très compétitive. Un consortium, composé d'Airparif, d'entreprises et d'établissements publics de recherche, a été constitué afin de proposer une expertise qui s'inscrit dans cette démarche novatrice pour calculer les émissions de CO<sub>2</sub> via des mesures in situ couplées à de la modélisation inverse (qui permet de remonter aux sources d'émissions). Une zone test sera vraisemblablement lancée courant 2015, pour un déploiement général qui n'est pas envisagé avant 2 ou 3 ans.

## L'AIR DE RIEN

- Lors de l'épisode de mars 2014, la circulation alternée a été mise en place pour la première fois depuis 1997. Si elle a impacté notre quotidien, elle n'en demeure pas moins une mesure parmi de nombreuses autres. Une étude d'Airparif sera bientôt publiée sur cette mesure.
- Une nouvelle procédure d'information et d'alerte est opérationnelle depuis le mois de septembre. Elle est désormais enclenchée dès que 100 km<sup>2</sup> de la superficie de la région et/ou 10 % de la population d'un département francilien sont concernés par un dépassement des seuils fixés par les autorités.
- La dernière enquête de perception de la qualité de l'air par les Franciliens commandée par Airparif a permis de mieux comprendre les attentes et enjeux que soulèvent cette question. Elle est intégralement consultable sur notre site.

## LE CHIFFRE

**LE FAIT D'HABITER À PROXIMITÉ DU TRAFIC ROUTIER POURRAIT ÊTRE RESPONSABLE D'ENVIRON 15% DES ASTHMES DE L'ENFANT**

#AIRPARIF - source Apekom

Association type loi de 1901 à but non lucratif

7 rue Crillon 75004 PARIS  
01.44.59.47.64  
demande@airparif.asso.fr



Directeur de la publication : J.F. Bernard

[www.airparif.fr](http://www.airparif.fr)

Ont collaboré à ce numéro :  
Armelle Baeza, Stéphane Bonneau, Christophe Debert, Arthur De Pas,  
Olivier Favez, Patrick Garnoussi, Véronique Ghersi, Fabrice Joly,  
Anne Kauffmann, Paolo Laj, Hervé Le Treut, Frédéric Mahé, Pierre Pernot

Rédaction/coordination éditoriale & graphique :  
Pierre-Emmanuel Burg, Stéphanie Fraincart, Karine Léger

Crédits photo de couverture :  
« Pilsen and Pollution » par Señor Codo sous licence CC BY 2.0

Le financement d'AIRPARIF est assuré par des subventions de l'État, des collectivités territoriales, des industriels au titre de la TGAP et des missions d'expertise.