

**LE VIRUS  
DE LA RECHERCHE**

**TRANSITION  
ENVIRONNEMENTALE**

**JEAN-LUC JAFFREZO ET GAËLLE UZU**

**ÉTABLIR LES LIENS  
ENTRE EXPOSITION SANITAIRE  
ET POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE,  
UN DÉFI SCIENTIFIQUE**

**PUG**

La série « **Transition environnementale** »  
fait partie de la collection « **LE VIRUS DE LA RECHERCHE** »

**Directrice de la série:** Magali Talandier  
**Directeur de la collection:** Alain Faure  
**Directrice de la publication:** Sylvie Bigot  
**Mise en page:** Catherine Revil

Réalisé en collaboration avec le conseil scientifique « Capitale verte et Transition »  
présidé par Magali Talandier, dans le cadre de Grenoble Capitale Verte  
Européenne 2022 – Plan Climat Air Énergie – Grenoble Alpes Métropole.  
Publié avec le soutien de la Banque des Territoires.

ISBN 978-2-7061-5287-0 (*e-book PDF*)

ISBN 978-2-7061-5288-7 (*e-book ePub*)



© PUG, avril 2022  
15, rue de l'Abbé-Vincent – F-38600 Fontaine  
[www.pug.fr](http://www.pug.fr)

## **TRANSITION ENVIRONNEMENTALE**

### **UNE SÉRIE DE LA COLLECTION « VIRUS DE LA RECHERCHE »**

#### **Face à l'urgence climatique et aux défis environnementaux, les scientifiques se mobilisent !**

Placée sous l'égide du conseil scientifique « Capitale verte et transition », cette nouvelle série d'e-books propose des articles inédits signés par des chercheurs de tous horizons : sciences, sciences de la terre, sciences de l'ingénieur et sciences humaines et sociales.

En lien avec les missions du conseil scientifique – qui rassemble près de 40 chercheurs de toutes les disciplines – ces textes courts visent à faire circuler les connaissances sur la question des transitions environnementales et de leurs impacts.

Tout au long de l'année 2022, les publications de la série viendront ponctuer la réflexion menée dans le cadre de la labellisation « Capitale verte européenne » attribuée par la Commission européenne au territoire grenoblois. Chaque mois, une nouvelle thématique sera traitée – le climat, l'air, l'énergie, les mobilités, l'alimentation, les villes, etc.

Les scientifiques sont des gens passionnés. Leurs textes dévoilent leur savoir et nous éclairent sur les controverses qui nourrissent ces sujets, exposant les ressorts sensibles du métier de chercheur – ses tâtonnements, ses doutes, ses énigmes mais aussi ses espoirs.

Bonne lecture à tous !



# ÉTABLIR LES LIENS ENTRE EXPOSITION SANITAIRE ET POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE, UN DÉFI SCIENTIFIQUE

JEAN-LUC JAFFREZO ET GAËLLE UZU, GÉOCHIMISTES DE L'ATMOSPHÈRE  
(INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT, INSTITUT DES GÉOSCIENCES  
DE L'ENVIRONNEMENT, GRENOBLE)

La question des outils de l'observation de la qualité de l'air est difficile à appréhender dans son ensemble, tant la composition de l'air que nous respirons est vaste et complexe. Or, c'est sur la base des mesures réalisées que peuvent se déterminer les politiques mises en place pour protéger la santé et l'environnement. Sur le seul sujet des particules fines (aussi appelées PM pour *Particulate Matter*), plusieurs métriques d'observation et de quantification de l'exposition sanitaire sont possibles : distribution en taille, espèces chimiques présentes, concentration massique. Mais chacune de ces observations ne prend en compte qu'un type de propriétés physico-chimique des polluants concernés. Ainsi, compte tenu de la grande variété de chimies, de formes, de surfaces réactionnelles, de tailles, etc. des aérosols, on ne peut résumer la toxicité de l'air que l'on respire à sa simple concentration massique. Pourtant, c'est aujourd'hui ce seul indicateur qui détermine les seuils pour la protection de la santé des populations. Or il est évident que respirer un  $\mu\text{g}$  de sable n'aura pas le même impact sur les poumons que respirer un  $\mu\text{g}$  de mercure ou de plomb. Si la mesure des concentrations massiques est l'une des plus simples à automatiser, il est nécessaire de chercher à développer des mesures plus intégratrices des nombreuses propriétés des particules qui rentrent en jeu lors de leur interaction avec le système biologique humain, afin de mieux appréhender les impacts sanitaires qui en découlent.

## Développer de nouveaux indicateurs sanitaires de la qualité de l'air

Les particules atmosphériques ont plusieurs modes d'action sur l'organisme. Après inhalation, une partie des particules fines va se déposer à la surface

des bronchioles et alvéoles où plusieurs mécanismes biologiques vont se mettre en place, et tous ne sont pas encore bien compris. On sait par exemple que les constituants solubles des particules peuvent atteindre la circulation sanguine, ou que certaines particules ultra-fines ont la capacité de traverser directement la membrane pulmonaire ou enfin que les particules déclenchent des réflexes neuronaux à l'origine ensuite de réactions sur les parois vasculaires. Cependant, on estime aujourd'hui que le mécanisme prépondérant de l'action biologique des particules est lié à leur capacité à induire un stress oxydant, à l'origine de nombreuses maladies cardiorespiratoires. En temps normal, nos antioxydants cellulaires savent réduire les oxydants avant qu'ils n'aient des effets délétères sur la santé. Mais au contact de nos poumons, les particules atmosphériques de nature oxydante interagissent avec nos antioxydants naturels et perturbent leur comportement.

Dans un premier temps, les défenses antioxydantes sont mobilisées. Mais si l'oxydation se poursuit, le stock d'antioxydant devient insuffisant, une libération de médiateurs pro-inflammatoires se produit alors dans la circulation, qui engendre une inflammation, puis une cytotoxicité favorisant le développement de maladies. Ces maladies diffèrent régionalement en fonction de la nature des particules (dont la composition est fonction de la source d'émission), de la durée d'exposition, de la susceptibilité personnelle et d'autres facteurs environnementaux auxquels sont soumises les populations.

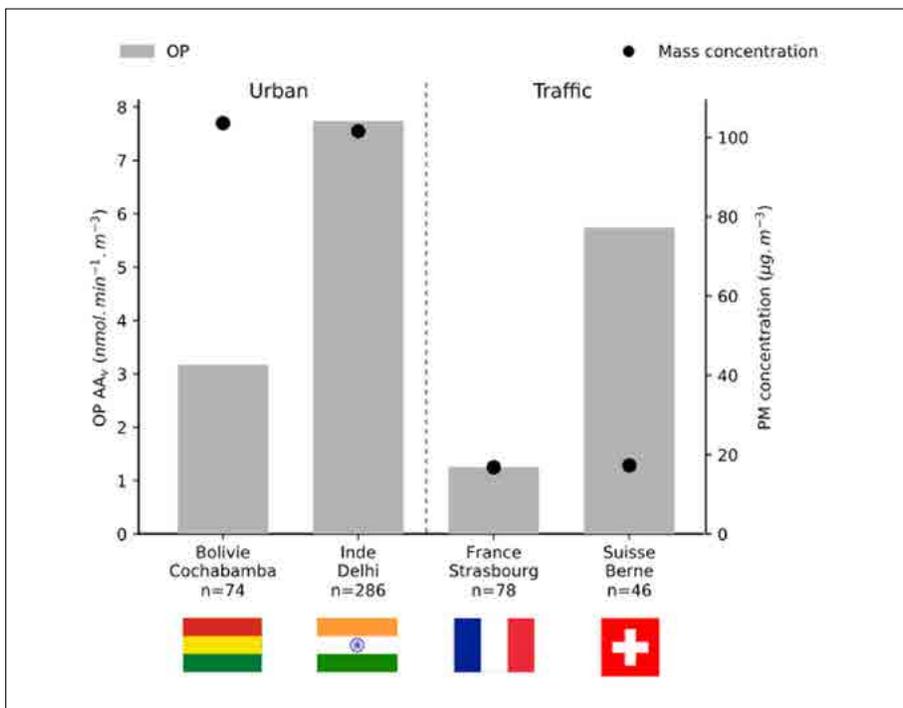
Pour mieux prendre en compte l'exposition sanitaire aux particules, des groupes de géochimie atmosphérique et de toxicologie proposent depuis une quinzaine d'années une nouvelle mesure appelée le *potentiel oxydant*. Cette métrique permet de quantifier les effets de l'inhalation d'aérosols sur les antioxydants pulmonaires, les mêmes qui protègent des dommages oxydatifs liés aux radicaux libres générés par les particules dans le système respiratoire. Il est ainsi possible de considérer l'impact de la chimie et la solubilité des espèces présentes, mais aussi de la taille et de la forme des particules à travers leurs surfaces de réaction, ou bien encore des potentiels « effets cocktails ». Plusieurs tests sont possibles, en utilisant différentes molécules antioxydantes.

Parmi les avantages de cette méthode, on notera son faible coût et sa rapidité, mais aussi son caractère non invasif et réalisable en routine en laboratoire, par comparaison aux tests cellulaires qui nécessitent des prélèvements de tissu et des analyses des protéines marqueuses de l'inflammation.

## Différences entre les métriques

Les tests montrent que le potentiel oxydant et la concentration massique ne sont pas toujours corrélés. À titre d'exemple, voici un graphique sur les moyennes des concentrations massiques analysées à l'IGE pour quatre sites d'étude (Bolivie, Inde, Suisse et France).

**Figure 1.** Comparaison de la métrique de la masse et du PO<sup>AA</sup> (potentiel oxydant mesuré avec la méthode de l'acide ascorbique) des PM, pour deux paires de sites urbains et trafics présentant des concentrations massiques de PM moyennes identiques (haute et basse) mais des PO très différents. Mesures effectuées à l'IGE.



Credits : PSI pour les sites de Berne et Delhi, LCSQA et Atmo GE pour Strasbourg et IGE pour Cochabamba.

Que constate-t-on ? Alors que la concentration massique est identique pour chacun des couples de sites Cochabamba-Delhi (fortes concentrations massiques) et Strasbourg-Berne (faibles concentrations massiques), le potentiel oxydant (PO) varie d'un facteur deux à trois entre ces sites. Si le site de Berne présente des concentrations en PM<sub>10</sub> inférieures au seuil réglementaire et cinq fois plus faibles que le site urbain de Cochabamba, le potentiel oxydant des PM<sub>10</sub> enregistrées à Berne est en réalité deux fois supérieur ! Cela indique que les

PM<sub>10</sub> émises sur le site trafic de Berne ont une activité oxydante beaucoup plus importante qu'à Cochabamba. L'impact sanitaire des PM<sub>10</sub> mesurées à Berne apparaît plus délétère que la métrique de la masse seule ne le laissait penser.

Il existe aussi des lieux de prélèvement où les deux métriques concordent. Sur le site de Delhi, à la fois la masse et le PO des PM<sub>10</sub> sont élevés, et sur le site de Strasbourg, de faibles concentrations massiques sont associées à de faibles potentiels oxydants. Ces différents résultats sont directement dépendants des sources d'émission influençant les sites, c'est-à-dire de la chimie des particules.

On voit bien que la mise en parallèle de ces deux métriques apporte une vision différente de l'exposition aux particules. En ne mesurant qu'une seule quantité, la concentration massique des particules ne capture pas la complexité des propriétés physico-chimiques de l'aérosol.

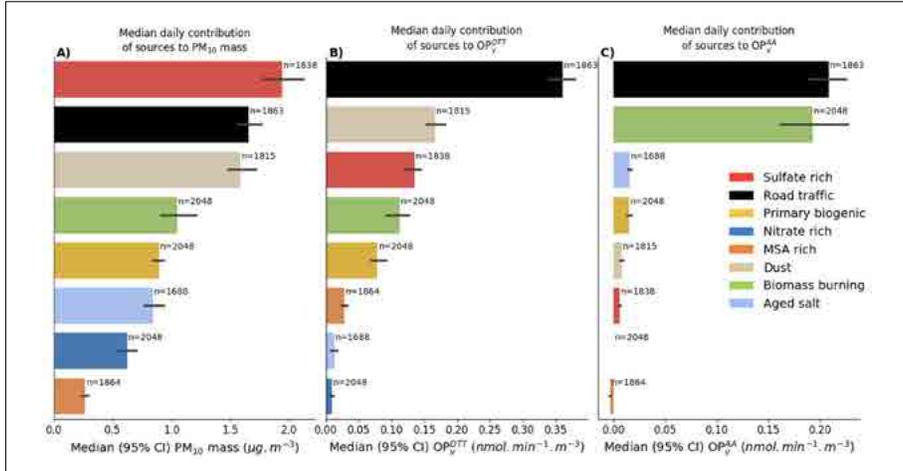
## Une vision nouvelle des sources de particules

Lorsque l'on s'intéresse à l'exposition sanitaire des populations, la vision de l'aérosol à travers la métrique de la concentration massique doit donc être repensée, car les sources contribuant majoritairement à la masse des PM ne sont pas nécessairement celles qui sont le plus oxydantes pour les poumons. Nos travaux permettent aujourd'hui de quantifier la contribution de chaque source de particules dans les potentiels oxydants observés pour un site d'étude.

Au cours des dernières années, les études sur le pouvoir oxydant des particules ont montré la prédominance de deux sources anthropiques majoritaires dans la contribution moyenne au potentiel oxydant : le trafic routier et la combustion de biomasse domestique (voir Weber *et al.*, 2021). Le rôle de la combustion de bois est particulièrement important en période hivernale, où elle combine un PO intrinsèque (par µg de particules issues de cette source) relativement élevé et un niveau important de production. Cette source constitue aujourd'hui un des leviers principaux de la lutte contre la pollution atmosphérique dans les espaces périurbains et ruraux, et en particulier dans les vallées alpines.

Quant à l'exposition chronique (on parle ici de l'exposition médiane journalière tout au long de l'année), la figure 2 montre que, pour 15 sites urbains ou périurbains étudiés en France, c'est le trafic routier qui est la source majoritaire d'émissions contribuant à l'exposition au potentiel oxydant des aérosols. Dans notre étude, ce secteur est la seule source ayant un impact très important aussi bien sur la concentration médiane que moyenne du potentiel oxydant. En effet, les émissions primaires du trafic routier sont certes de plus faibles concentrations massiques, mais elles sont présentes tout au long de l'année.

**Figure 2.** Contribution médiane quotidienne des sources à (A) la masse des PM, (B) l'OP<sup>DTT</sup><sub>v</sub> et (C) l'OP<sup>AA</sup><sub>v</sub>. Les barres représentent la moyenne et les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance à 95 % de la médiane. Figure établie pour 15 sites en France<sup>1</sup>.



Ainsi l'importance des différentes sources d'émissions varie considérablement selon que la métrique d'observation est la concentration massique de PM<sub>10</sub> ou la mesure de leur potentiel oxydant. Si on postule que le potentiel oxydant est un meilleur indicateur de l'impact sanitaire des particules car il intègre un plus grand nombre des propriétés qui font la toxicité des particules, alors, cette figure 2 illustre que la masse serait peu adaptée à l'étude de la qualité de l'air pour ce qui est de l'exposition sanitaire des populations – ce qui demeure l'objectif premier de la réglementation en matière de qualité de l'air.

## Les futures étapes des développements

Ces travaux permettent de répondre en partie à la question de l'exposition générale en Europe de l'Ouest, mais nos mesures de la variabilité temporelle et spatiale du potentiel oxydant se limitent cependant au passé et à des milieux majoritairement urbains et extérieurs. Cette connaissance ne doit pas occulter les particularités locales des différents environnements, et le PO de nombreuses sources ponctuelles et statistiquement peu présentes spatialement et temporellement (industrielles, portuaires, etc.) reste à documenter.

1. Weber, S. *et al.* (2021a) « Source apportionment of atmospheric PM<sub>10</sub> oxidative potential: synthesis of 15 year-round urban datasets in France », *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(14), pp. 11353-11378. [doi:10.5194/acp-21-11353-2021](https://doi.org/10.5194/acp-21-11353-2021)

Même si la mesure du potentiel oxydant est prometteuse parce qu'elle présente une étape importante dans les études croisant qualité de l'air et état de santé, il faut insister sur la diversité des polluants qui restent imparfaitement quantifiés. Par exemple, certains polluants émergents comme les perturbateurs endocriniens ou les pesticides restent invisibles pour cette métrique.

De nombreuses questions restent encore ouvertes dans cette recherche. Ainsi, les liens entre chimie de l'aérosol, toxicologie et impacts sanitaires sont encore mal connus. L'utilisation du potentiel oxydant comme indicateur sanitaire passera nécessairement par une confrontation des différents tests de mesures aux effets délétères de la qualité de l'air. Des études croisées entre cette métrique et des données épidémiologiques sont aujourd'hui en cours à Grenoble (et en prévision dans d'autres villes européennes à court terme). Ceci devrait permettre également de répondre à la question essentielle du meilleur test de potentiel oxydant et de faire converger les protocoles utilisés par les différents laboratoires. Ce champ de recherche en pleine expansion devrait nous permettre d'avoir une vision plus intégrée des dommages de la pollution atmosphérique sur la santé humaine. Ces travaux sont encore très amont, mais ils sont construits et réfléchis pour servir de socle scientifique pour les futures réglementations de la qualité de l'air.