

Amélioration de la qualité de l'air et évolution du risque à court terme sur la mortalité en lien avec l'indice de fumée noire, entre 1992 et 2010, dans l'agglomération parisienne

Short term effects of black smoke index on mortality between 1992 and 2010 in Paris: air quality improvement and influence on health risk

Sabine Host¹, Édouard Chatignoux²

Résumé

Depuis les années 1990, le programme Erpurs fournit régulièrement des estimations du risque sanitaire engendré par les expositions de la population francilienne aux polluants de l'atmosphère urbaine. L'évolution de la nature de la pollution résultant de la modification de l'intensité et de la nature des sources d'émission est susceptible de modifier le risque sanitaire. Or, du fait de la variation de certains paramètres, ces analyses répétées ne permettent pas de documenter l'évolution proprement dite de ce risque au cours des dernières décennies. Ainsi, cette nouvelle étude du programme Erpurs a pour objectif, à partir de modélisations de séries temporelles, de relier le niveau moyen journalier de l'indice de Fumée Noire (FN) aux nombres quotidiens de décès non accidentels survenus sur la période allant de 1992 à 2010, à Paris et en proche couronne, et de tester si cette relation a évolué au cours des années. Des analyses de séries temporelles ont été utilisées. La tendance à long et moyen termes des indicateurs et les facteurs météorologiques ont été pris en compte dans l'analyse en tant que cofacteurs. Quatre modèles ont été testés. Les analyses confirment l'existence d'un lien positif et significatif entre les particules ainsi mesurées et la mortalité totale non accidentelle. Une hausse de 10 µg/m³ des niveaux moyens de l'indice de fumée noire s'accompagne d'une augmentation de l'ordre de 0,4 % du nombre quotidien de décès. En ce qui concerne l'évolution du risque sur la période, les différents modèles mis en œuvre n'ont pas permis de détecter une (éventuelle) modification du risque avec le temps, malgré un changement de la composition de la pollution atmosphérique.

Mots-clés

fumées noires, mortalité, modification des risques, séries temporelles, agglomération parisienne.

Abstract

Since the 1990's, air quality considerably improved in Greater Paris. Air pollution sources and level evolution may modify health risk. The aim of the study is to follow the evolution of the short term relationship between daily levels of black smoke (BS) and mortality in Greater Paris throughout the years 1992 to 2010. Time-series analyses were used. The daily numbers of total deaths were adjusted for time trends, seasonal factors, day of the week and weather. Four models were tested. BS levels have decayed since the beginning of the study period, from 34.1 to 10.8 µg/m³. Results confirm a significant risk increase between BS exposure and total non-accidental mortality. A mean increase of 0,4% was estimated for a 10 µg/m³ increase in BS level. No significant risk modification throughout the period was estimated by the models.

Keywords

black smoke, mortality, risk modification, time series, greater Paris.

(1) Observatoire régional de santé Ile-de-France - sabine.host@ors-idf.org

(2) Santé publique France

Depuis les années 1990, le programme Erpurs¹ s'attache à fournir régulièrement des estimations du risque sanitaire engendré par les expositions de la population francilienne aux polluants de l'atmosphère urbaine (Host et Karusisi, 2014). La répétition de ces études épidémiologiques a permis de documenter les effets à court terme de la pollution de l'air dans la région en mesurant les associations entre différents indicateurs d'expositions (NO₂, particules PM₁₀, PM_{2,5}, PM_{2,5-10}, indice de fumée noire, ozone) et la manifestation de divers problèmes de santé (mortalité, hospitalisations, visites médicales à domicile, absentéisme, passages aux services d'urgences...). Ce faisant, le programme Erpurs s'est constitué en un véritable système de surveillance des effets sanitaires de la pollution de l'air en Ile-de-France. Ce système a confirmé que les impacts sanitaires de la pollution de l'air révélés par la première étude publiée en 1994 sont toujours d'actualité, et que la pollution de l'air reste un problème

majeur de santé publique dans la région. Toutefois, ces analyses ont fait intervenir des paramètres variables, dont la signification a pu se modifier dans le temps ; ainsi, les risques estimés sur des périodes d'étude actualisées ne sont pas directement comparables. Or la force des associations (voire la nature des effets sanitaires) a pu évoluer. Elle dépend en effet de plusieurs paramètres qui se sont modifiés dans le temps.

En premier lieu, depuis que cette surveillance a été initiée, les niveaux de pollution ont fortement diminué (cf. encadré 1), et la composition de cette pollution s'est modifiée du fait de l'évolution de la nature des rejets et de la contribution relative des différentes sources. Or cette composition détermine la toxicité intrinsèque de la pollution atmosphérique. Il est donc intéressant de s'interroger sur l'évolution de la nocivité de la pollution atmosphérique : est-elle aujourd'hui plus ou moins nocive que celle d'il y a 20 ans ?

Encadré 1 : La qualité de l'air en France s'est nettement améliorée

Air quality in France drastically improved

Les premières alertes à la pollution atmosphérique, avec des conséquences visibles sur la santé, ont été observées lors de la première moitié du XX^e siècle dans les zones fortement industrialisées et urbanisées telles que la vallée de la Meuse en 1915 et en 1930 (Mage et Batta, 1932) ou à Donora aux États-Unis en 1948 (Ashe, 1952). Mais c'est surtout à la suite du dramatique épisode de smog londonien de décembre 1952 (4 000 morts) puis de celui de 1956 qu'une prise de conscience accrue des pouvoirs publics sur les effets sanitaires de la pollution atmosphérique est apparue. Cette prise de conscience a conduit à l'élaboration de législations spécifiques pour lutter contre la pollution atmosphérique : Clean Air Act (1956) au Royaume-Uni, Air Pollution Control Act (1955) puis Clean Air Act (1963, étendu en 1970) aux États-Unis et, en France, loi du 2 août 1961 relative à la lutte contre les pollutions atmosphériques et les odeurs. L'impact de ces législations a été net et a conduit à une réduction considérable des émissions de sources fixes dans la majorité des pays industrialisés. Mais, à partir des années 1960, la croissance exponentielle du parc et du trafic automobile a contribué à dégrader la qualité de l'air. Les travaux du Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) montrent que, depuis que les premiers inventaires d'émissions à peu près fiables ont été établis, dans les années 1950-1960, c'est au cours de la période 1960-1990 que les émissions des principaux polluants de l'air (dioxyde de soufre, oxydes d'azote, particules en suspension, monoxyde de carbone, métaux, etc.) ont, en France, atteint les valeurs les plus importantes. Depuis cette période, les rejets sont en diminution constante, notamment pour les installations fixes (Elichegaray, Bouallala, Maitre et Ba, 2009). La médiatisation sans précédent des récents épisodes de pointe de pollution auxquels la revue *Pollution atmosphérique* a consacré un numéro spécial (APPA, 2015) peut laisser à penser que la qualité de l'air se dégrade ; or les bilans indiquent qu'elle s'améliore. Les progrès résultent notamment de l'amélioration des technologies et des procédés, et de réglementations nationales ou européennes de plus en plus sévères en matière de qualité des combustibles (limitation du contenu en soufre et suppression du plomb dans l'essence, etc.) et de normes à l'émission, en particulier dans les secteurs de l'industrie, du traitement des déchets et de l'automobile. La baisse des émissions se traduit par une amélioration de la qualité de l'air, bien que, compte-tenu des processus complexes intervenant dans l'atmosphère, l'évolution favorable des émissions d'un polluant donné ne se répercute pas de façon aussi marquée sur les concentrations atmosphériques. Ainsi, par exemple, pour la période 2000-2014, les émissions de NO_x ont diminué de 42 % et la concentration en NO₂ a baissé de 28 % (Le Moullec, 2015). Si les niveaux observés à l'heure actuelle provoquent encore un lourd impact sur la santé publique, il faut néanmoins reconnaître les progrès réalisés et les bénéfiques qui s'ensuivent.

(1) Évaluation des risques de la pollution urbaine sur la santé.

À côté de la nocivité intrinsèque de la pollution atmosphérique, se pose la question de la sensibilité de la population à cette pollution. Certaines catégories de population sont plus vulnérables à une altération de la qualité de l'air : il s'agit notamment des enfants, des personnes âgées ou encore des personnes déjà fragilisées par des pathologies préexistantes (Bell, Zanobetti et Dominici, 2013). Ainsi, à l'échelle de l'agglomération parisienne, la structure de la population, par exemple en lien avec le vieillissement, peut avoir évolué et rendre la population dans son ensemble plus sensible aux effets de la pollution de l'air. D'autres facteurs tels que les avancées thérapeutiques, l'accès aux soins peuvent aussi avoir une influence dans un sens ou dans l'autre. La modification de la sensibilité de la population constitue également un facteur de modification du risque.

Les politiques de gestion de la qualité de l'air ont pour objectif de diminuer les concentrations massiques de polluants en agissant sur certaines sources. De ce fait, la composition de l'atmosphère se modifie ; ainsi, il apparaît utile de renseigner la manière dont évolue le risque sanitaire. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette nouvelle étude du programme Erpurs (Host, Pontin et Chatignoux, 2017).

Ce travail vise, à partir de modélisations de séries temporelles, à relier le niveau moyen journalier de l'indice de fumée noire aux nombres quotidiens de décès non accidentels survenus à Paris et en proche couronne, sur la période allant de 1992 à 2010, à tester l'évolution de cette relation au court du temps, et donc la modification éventuelle du risque sanitaire à court terme. Mesuré quotidiennement depuis les années 1950, l'indice de fumée noire constitue le seul indicateur pour lequel on dispose d'un historique de données aussi important. Il offre ainsi une relative constance sur la période d'étude considérée.

1. Matériel et méthode

1.1. Zone et période d'étude

La zone d'étude est composée de Paris et des trois départements de la proche couronne : Hauts-de-Seine (92), Seine-Saint-Denis (93), Val-de-Marne (94) et englobe une population de plus de 6,6 millions d'habitants. Elle correspond à une zone géographique dans laquelle réside une population dont l'exposition à la pollution atmosphérique de fond est relativement homogène. L'exposition de la population est considérée comme homogène dès lors que les niveaux enregistrés par les stations de mesures sont suffisamment corrélés entre eux et que ces niveaux sont proches en moyenne.

L'analyse a porté sur la période comprise entre le 1^{er} janvier 1992 et le 31 décembre 2010. L'ensemble des données est disponible sur cette période ; cependant le mois d'août 2003 a été exclu de l'analyse en raison des conditions extraordinaires de mortalité, de température et de pollution qui ont été observées lors de l'épisode de canicule.

1.2. Indicateurs d'exposition

La pollution particulaire est quantifiée par le mesurage de différents polluants considérés comme des indicateurs de pollution. Les indicateurs utilisés dans cette étude sont les niveaux de l'indice de fumée noire, de particules fines en suspension d'un diamètre aérodynamique médian inférieur respectivement à 10 et 2,5 μm (PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$). Les données de pollution atmosphérique ont été obtenues auprès d'Airparif qui gère le réseau de mesures de la qualité de l'air en Ile-de-France.

Seuls les niveaux mesurés par les stations de fond situées dans la zone d'étude ont été retenus. Les stations mesurant l'indice de fumée noire ainsi que les niveaux de PM fournissent des données journalières (valeurs intégrées sur 24 heures). La construction d'un indicateur d'exposition unique pour l'ensemble de la zone d'étude à partir de ces mesures suppose que les variations d'un jour à l'autre des niveaux mesurés par ces stations sont représentatives des variations d'un jour à l'autre de la moyenne des expositions individuelles au sein de la zone étudiée.

L'indice de fumée noire constitue le premier indicateur de la pollution particulaire utilisé pour la surveillance de la qualité de l'air. La méthode de mesure est normalisée pour des prélèvements de 24 heures. Le prélèvement s'effectue à bas débit (2 m^3 par jour) et sans coupure granulométrique précise (probablement proche de 5 μm) (Festy, Ségala et Le Moullec, 2006). Cet indice fournit une indication de l'empoussièrement par des particules fortement carbonées (couleur noire) issues de phénomènes de combustion. La méthode se fonde sur la réflectance du dépôt de particules recueillies lors du passage de l'air échantillonné à travers un papier filtre. La valeur de la réflectance est transformée en indice de fumée noire exprimé en masse de particules, selon une courbe d'étalonnage normalisée obtenue de manière empirique. Ainsi, le principe de mesure de l'indice de fumée noire est totalement différent de celui des PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$ qui, lui, est basé sur des mesurages gravimétriques (détermination de la masse d'échantillon prélevé par pesée), après une sélection granulométrique. Il en résulte que la nature des particules mesurées se distingue de celles estimées par les indicateurs de concentration massique.

Il est à noter que les associations mises en évidence entre ces indicateurs de pollution et les indicateurs

sanitaires par le biais des analyses de séries temporelles sont susceptibles de refléter l'effet propre du polluant indicateur étudié comme celui d'autres composantes de la pollution de l'air auxquelles il est fortement corrélé². L'étude des tendances d'évolution des risques associés à différents indicateurs peut fournir des clés d'interprétation. C'est pourquoi, à des fins de comparaisons, les risques sont également estimés à partir des indicateurs $PM_{2,5}$ et PM_{10} (construits à partir des niveaux mesurés par les stations de fond, selon une méthode similaire), sur la période 2000-2006 où ces données étaient également disponibles.

1.3. Indicateurs sanitaires

Les données concernant le nombre journalier de décès ont été obtenues auprès du CépiDC (Inserm). La zone géographique de recueil des données de mortalité est la même que celle de mesure des polluants.

1.4. Modélisation

L'étude des relations à court terme entre des indicateurs de pollution atmosphérique et des indicateurs de santé fait appel aux méthodes de modélisation de séries temporelles, dont le principe est de relier les variations d'un jour à l'autre de l'indicateur de l'état de santé d'une population aux variations d'un jour à l'autre des niveaux de pollution.

L'événement sanitaire modélisé est un nombre de cas supposé suivre un processus non stationnaire de Poisson surdispersé.

Le nombre de décès Y_t suit une loi de quasi-Poisson dont l'espérance μ_t est modélisée par le modèle linéaire généralisé :

$$Y_t \sim qP(\mu_t)$$

$$\log(\mu_t) = FN_t \gamma(t) + S(t) + X_t \beta$$

Les variations saisonnières et tendanciennes $S(t)$ de mortalité sont prises en compte en utilisant une *spline* naturelle. Les modèles sont par ailleurs ajustés sur un ensemble de covariables X_t susceptibles de confondre la relation entre la mortalité et les expositions aux polluants (Touloumi *et al.*, 2006).

S'agissant des indicateurs météorologiques, la température moyenne du jour (retard 0) et la moyenne des températures moyennes de la veille et des trois jours précédents (retards 1-3) étaient introduites à l'aide de

(2) Les polluants étudiés dans les études épidémiologiques ne sont que des indicateurs, ou traceurs, de la pollution atmosphérique, dont les niveaux reflètent la pollution globale et les différentes sources de pollution rencontrées.

*splines*³ naturelles à six degrés de liberté. Les températures moyennes journalières (en degrés Celsius, °C) ont été recueillies par Météo-France à la station du parc Montsouris (Paris XIV^e).

Le coefficient $\gamma(t)$ associé au polluant a été modélisé selon quatre modèles, afin de tester quatre hypothèses d'évolution du risque :

(M-1), pas de variation dans le temps : $\gamma(t) = \gamma_0$;

(M-2), une interaction linéaire avec le temps : $\gamma(t) = \gamma_0 + \gamma_1 t$;

(M-3), une interaction avec 4 sous-périodes des années analysées (1992-1996, 1997-2001, 2002-2005 et 2006-2010) :

$$\gamma(t) = \gamma_1 \mathbf{1}_{1992-1996}(t) + \gamma_2 \mathbf{1}_{1997-2001}(t) + \gamma_3 \mathbf{1}_{2002-2005}(t) + \gamma_4 \mathbf{1}_{2006-2010}(t) ;$$

(M-4), une interaction avec le temps sous forme de *spline* de régression pénalisée : $\gamma(t) = s(t)$.

L'ensemble des analyses a été réalisé au moyen du logiciel R (version 3.2.3) et des *packages* *mgcv* (1.8.11) et *splines* (3.2.3).

Une comparaison des effets à court terme des expositions aux particules en suspension telles que mesurées par l'indice de fumée noire et les indicateurs de particules PM_{10} et $PM_{2,5}$ a par ailleurs été réalisée en utilisant le modèle principal d'analyse, avec un effet du polluant ne variant pas dans le temps. Les modèles ont été évalués sur la période 2000-2006, pour laquelle les trois indicateurs étaient disponibles.

2. Résultats

En moyenne, sur la période d'étude, 114 décès quotidiens ont été enregistrés.

Le niveau moyen de l'indice de fumée noire était de 18,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le tableau 1 présente la distribution des niveaux quotidiens de l'indice de fumée noire.

Pour la période allant de 1990 à aujourd'hui, les niveaux de l'indice de fumée noire dans l'agglomération parisienne ont globalement diminué de moitié (figure 1). Les teneurs moyennes pour les dernières années de la période sont de 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, les plus faibles historiquement observées.

L'analyse des liens entre le nombre de décès et l'indice de fumée noire confirme l'existence d'un lien positif et significatif entre les particules ainsi mesurées et la mortalité totale non accidentelle (figure 2).

(3) Fonction de lissage.

Tableau 1. Distribution du niveau de l'indice de fumée noire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) à Paris et proche couronne pendant la période d'étude 1992-2010.

Black smoke levels distribution pattern between 1992 and 2010 in Paris.

	Minimum	P5	Moyenne	Médiane	P95	Maximum	Ecart-type
Hiver	3,8	6,8	21,8	17,3	54,5	154,0	16,8
Été	3,1	6,0	14,4	12,0	31,3	94,7	8,6
Année entière	3,1	6,3	18,1	13,7	44,7	154,0	13,9

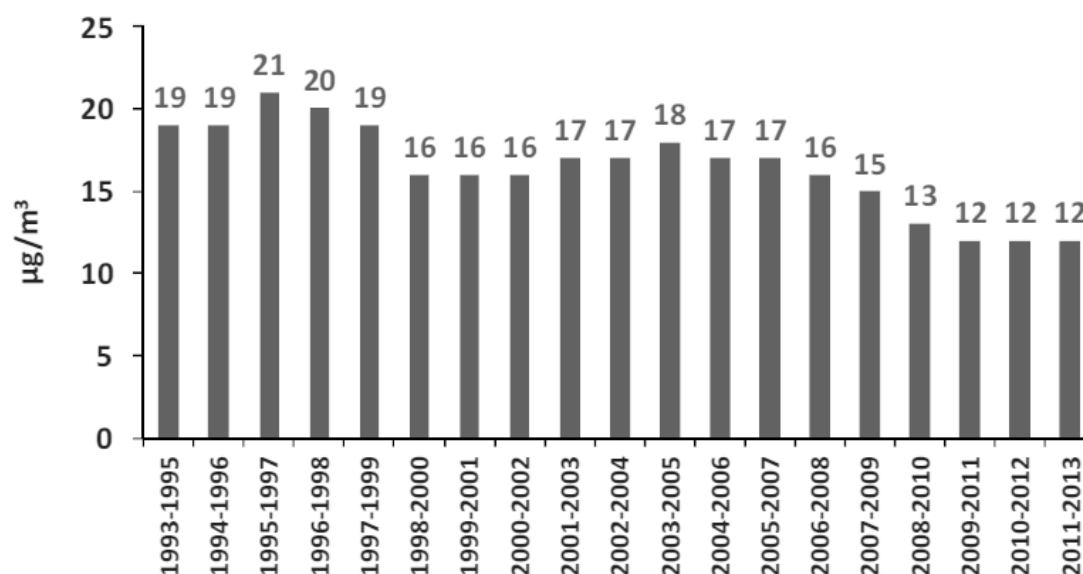


Figure 1. Évolution des concentrations moyennes sur trois ans de l'indice de fumée noire dans l'agglomération parisienne de 1993 à 2013 (source : Airparif).

Evolution of black smoke levels in Paris between 1993 and 2013.

Ainsi, sur la période 1992-2010, une hausse de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ des niveaux moyens de l'indice de fumée noire s'accompagne d'une augmentation de l'ordre de 0,4 % du nombre quotidien de décès.

En ce qui concerne l'évolution du risque sur la période, aucun des modèles cherchant à prendre en compte une modification du risque avec le temps ne permet de conclure. Les résultats des tests LRT (Likelihood Ratio Test) de comparaison des modèles sont présentés dans le tableau 2. Le modèle à effet constant est comparé au modèle nul (sans aucun effet du polluant), et les autres modèles sont comparés au modèle constant. Aucune différence significative n'est observée pour les modèles concernant un effet linéaire, interaction ou *spline*, avec des p-values supérieures à 0,05.

Les pourcentages d'augmentation du nombre de décès quotidiens associé à l'exposition aux particules (pour un accroissement de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mesurée par l'indice de fumée noire et les indicateurs $\text{PM}_{2,5}$ et PM_{10} sur la période 2000-2006, ont été estimés respectivement à 0,6 %, 1 % et 0,8 % (figure 3). Ces pourcen-

tages ne sont pas significativement différents entre les trois indicateurs. Afin de représenter les risques pour une variation des niveaux journaliers de polluants plus proche des variations quotidiennes observées durant la période d'étude, les résultats ont également été exprimés pour une élévation de l'intervalle interquartile des niveaux de polluants (soit $10,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les niveaux de l'indice de fumée noire et respectivement 7,4 et $10,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les niveaux de $\text{PM}_{2,5}$ et PM_{10}). Les niveaux de risque obtenus apparaissent très proches (figure 3).

3. Discussion

Les objectifs de cette étude étaient de mesurer et d'expliquer l'évolution du risque de décès lié aux expositions aux particules au cours d'une période de près de 20 ans – de 1992 à 2010 – en Ile-de-France.

Cette étude confirme l'existence d'un lien à court terme positif et significatif entre l'exposition aux particules carbonées (indice de fumée noire) et la mortalité totale non accidentelle. L'intensité de ces liens

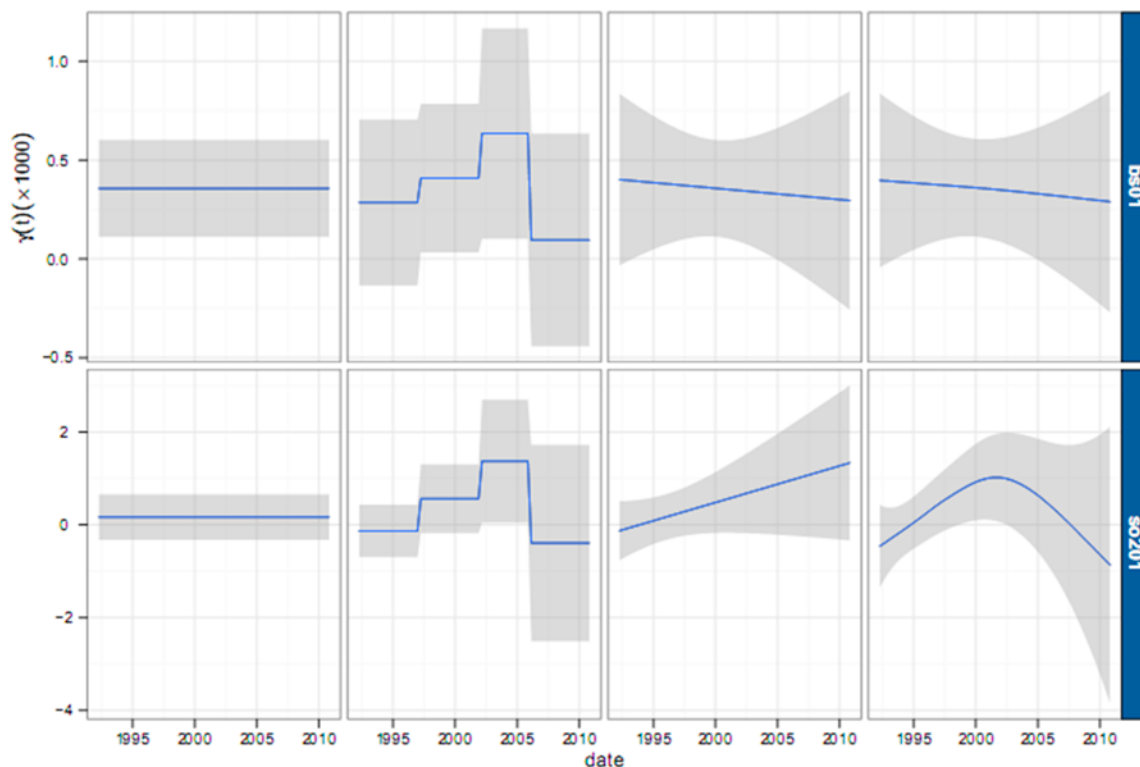


Figure 2. Coefficients des modèles M-1 à M-4 associés à une augmentation de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de l'indice de fumée noire, appliqués à la mortalité totale non accidentelle à Paris et dans la proche couronne, pour 1992-2010.

Four models coefficients mortality risk associated with an increase of $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ of black smoke in Paris between 1992 and 2010.

Tableau 2. Résultats des tests de comparaison de modèles LRT (Likelihood Ratio Test).
Comparison of Likelihood Ratio Test models results.

	Modèle Constant	Linéaire	Interaction	Spline
BS	<0,05	0,81	0,52	0,76

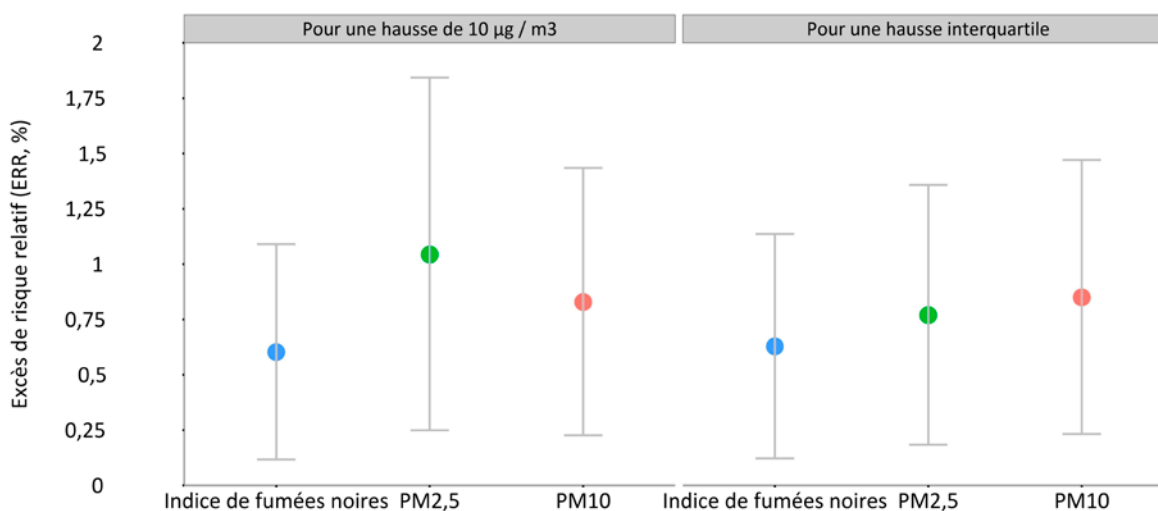


Figure 3. Augmentation du nombre quotidien de décès (en %) pour une hausse de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ou d'un intervalle interquartile des niveaux de particules mesurés par l'indice de fumée noire et les indicateurs $\text{PM}_{2,5}$ et PM_{10} , pour la période 2000-2006.

Percentage increase in risk associated with an elevation of $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ or interquartile range of particulate matter levels estimated through BS, $\text{PM}_{2,5}$ or PM_{10} between 2000 and 2006.

apparaît du même ordre de grandeur que ceux estimés lors des précédentes études Erpurs (Campagna, Lefranc, Nunes-Odasso *et al.*, 2003). Les risques estimés sur une même période d'étude (2000-2006) pour l'indice de fumée noire et pour les particules PM_{2,5} et PM₁₀ n'apparaissent pas significativement différents. Ces résultats ne permettent pas de conclure sur la différence de nocivité des différents constituants particulaires. Les fumées noires apparaissent, au même titre que les PM, comme un indicateur d'intérêt pour l'étude des effets sanitaires de la pollution particulaire.

En ce qui concerne l'évolution du risque pour la période considérée, les différents modèles mis en œuvre n'ont pas permis de détecter une éventuelle modification du risque avec le temps.

Jusqu'à présent, peu de travaux ont examiné l'impact des législations visant à réduire les niveaux de pollution atmosphérique sur le risque sanitaire à court terme lié à l'exposition aux polluants atmosphériques. En 2007, Dominici *et al.* notent le manque de puissance pour détecter l'évolution de l'excès de risque de décès en lien avec les particules PM_{2,5} et PM₁₀ entre 1987 et 2000 à partir des données de NMMAPS (National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study) mais soulignent l'importance de poursuivre ces recherches (Dominici, Peng, Zeger *et al.*, 2007). En effet, ces travaux peuvent permettre de mieux appréhender les risques sanitaires et d'évaluer les politiques d'amélioration de la qualité de l'air en matière de bénéfices sanitaires. Cela intéresse au premier plan les décideurs et les agences publiques qui ont en charge la surveillance de la qualité de l'air et la mise en place ou la promotion de politiques visant à réduire la pollution de l'air. Par ailleurs, il faut s'assurer que les mesures mises en œuvre, si elles ciblent la diminution de concentration des polluants réglementaires, n'entraînent pas l'émission d'autres polluants préjudiciables à la santé.

Dans le cadre de notre analyse, un certain nombre de facteurs peuvent laisser penser que les risques sanitaires ont pu évoluer.

Tout d'abord, l'évolution des caractéristiques de la population. À Paris, entre 1990 et 2007, les gains d'espérance de vie sont de 6 ans pour les hommes et 4 ans pour les femmes, et sont plus importants que pour la France métropolitaine. Les gains d'espérance de vie depuis 1995 sont pour l'essentiel des années de vie en bonne santé. En effet, pour la France, on constate que le nombre d'années de vie gagnées en bonne santé et le nombre « global » d'années de vie gagnées entre 1995 et 2007 sont presque équivalents (respectivement 3,6 et 3,1 pour les hommes et 2,4 et 1,8 pour les femmes) (source : Insee et Eurostat). Même si l'agglomération parisienne subit un taux de vieillissement inférieur à celui observé pour la France

entière, le nombre de personnes âgées a tout de même augmenté pour atteindre en 2007 un Parisien sur cinq. Malgré les tendances qui se dessinent, les caractéristiques de la population de la zone d'étude sur la période considérée apparaissent cependant relativement stables. Ce paramètre semble donc peu à même de modifier le risque sanitaire en lien avec la pollution particulaire dans cette population.

Ensuite, les niveaux et la composition de l'aérosol particulaire ont fortement évolué ces 50 dernières années. D'une moyenne voisine de 100 µg/m³ dans le milieu des années 1950, l'indice de fumée noire à Paris a progressivement baissé pour atteindre moins de 20 µg/m³ à la fin des années 1990, soit des teneurs divisées par cinq en 40 ans (laboratoire central de la préfecture de police et laboratoire d'hygiène de la ville de Paris, 2001). Aujourd'hui, les émissions de particules sont principalement dues au secteur résidentiel et tertiaire, notamment émises par le chauffage au bois, ainsi qu'au trafic routier et notamment les véhicules Diesel, alors que les particules étaient émises il y a 50 ans par les industries et les centrales thermiques. Cette évolution des sources d'émissions s'est accompagnée d'une évolution de sa composition granulométrique et chimique, et laisse supposer que les particules émises en région parisienne sont de plus en plus fines. Néanmoins, l'essentiel des évolutions a eu lieu dans les années 1950 à 1980 (période caractérisée par des émissions de pollution importantes, puis en 1970 par une prise de conscience environnementale), que ne couvre pas notre période d'étude, ce qui en limite la portée. L'analyse rétrospective sur la période antérieure aurait présenté un intérêt certain. En effet, sur cette période, la diminution des niveaux de pollution était plus brutale, en lien avec une action importante sur les sources fixes. On peut faire l'hypothèse d'une modification de la composition de la pollution de l'air plus marquée, avec une influence plus forte sur une éventuelle modification de la nocivité de l'aérosol particulaire, tandis que les actions menées plus récemment concernent essentiellement les sources diffuses et sont caractérisées par une prise d'effet plus progressive. En conséquence, une éventuelle modification du risque serait susceptible d'être plus importante pour la période antérieure et donc plus facile à mettre en évidence à partir des modèles implémentés dans le cadre de cette première analyse.

Toutefois, une étude des effets à court terme de la pollution atmosphérique sur la mortalité journalière parisienne sur la période 1968 et 1973 (Le Barbier, 2007) avait montré une élévation du risque de mortalité (totale non accidentelle) de l'ordre de + 1 % en lien avec une augmentation de 10 µg/m³ du niveau de l'indice de fumée noire, soit du même ordre de grandeur que l'estimation faite sur la période plus actuelle. La pollution atmosphérique y était de nature et d'intensité dif-

férentes par rapport à celle faisant l'objet de la présente étude. Des niveaux moyens de l'indice de fumée noire de 64,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ étaient alors observés (contre 18,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre 1991 et 2010). Ce travail avait conclu que les associations mises en évidence permettaient de vérifier l'hypothèse d'une relation linéaire entre la mortalité et les indicateurs de la pollution acide et particulaire pour les fortes concentrations retrouvées dans les années 1970 comme les plus faibles rencontrées aujourd'hui, la force de cette association étant du même ordre de grandeur.

Toutefois, la question de la constance du mesurage de l'indice de fumée noire doit se poser de manière plus prégnante si l'on considère une période plus longue. Cet indice se caractérise par une incertitude granulométrique. La noirceur du filtre n'est pas seulement influencée par les concentrations massiques en particules mais également par le pouvoir couvrant des particules, plus important s'agissant des particules les plus fines. Ainsi, la signification de la mesure réflectométrique est à mettre en regard avec son étalonnage.

Les résultats de notre évaluation ne permettent pas de mettre en évidence une modification du risque sur la période étudiée. Malgré la modification de la nature de l'aérosol particulaire, le risque sanitaire a pu rester constant, ou du moins la modification n'est pas détectable. En effet, on peut se questionner sur la capacité des modèles de séries temporelles de données écologiques à détecter une telle modification. Ce manque de puissance avait déjà été soulevé dans la littérature, dans le contexte de l'analyse multi-villes NMMAPS⁴ (Samet *et al.*, 2000) et dans une étude réalisée en Allemagne lors d'une période d'amélioration significative de la qualité de l'air (Breitner *et al.*, 2009), mais qui portait sur un nombre moyen d'événements sanitaires bien plus faible que dans notre étude. Dans une étude de mortalité au Pays-Bas, les risques relatifs pour les fumées noires entre 1972 et 2006 n'ont pas montré d'évolution significative, alors que les niveaux de l'indice accusaient une baisse importante sur la période d'étude (Fischer *et al.*, 2009). Une autre étude du même auteur a porté sur la période 1992-2006 et

a évalué l'évolution du risque de décès pour différentes causes pour quatre polluants mais n'a décelé aucune tendance claire (Fischer *et al.*, 2011). Dans le cadre du projet européen APHEKOM, l'impact des politiques de réduction des teneurs en soufre des carburants sur la relation exposition-risque en lien avec une exposition au SO_2 a été examiné (Le Tertre *et al.*, 2014). Aucune modification du risque n'a pu être mise en évidence.

Ce travail soulève la question de la complexité d'évaluer la nocivité des différentes composantes de la pollution particulaire. L'analyse individuelle des différentes composantes des particules se heurte à une difficulté d'interprétation, du fait des corrélations importantes entre les divers composés émis par les mêmes sources. Ainsi, il s'avère difficile de distinguer l'effet propre de chaque constituant. Les particules, quelle que soit leur nature, peuvent transporter des aéroallergènes ou des composés toxiques, majorant leur effet potentiel intrinsèque. Ainsi, les résultats de la littérature suggèrent un impact combiné plus important sur la santé humaine que ce qui serait attendu des entités distinctes. Plus la taille des particules est faible, plus cet effet adjuvant s'avèrerait important (WHO, 2013). Des développements statistiques seraient à envisager afin de favoriser des approches multipolluants, en vue de mieux appréhender ces effets synergiques et mieux comprendre l'évolution de la nocivité de l'aérosol particulaire.

Malgré ces limites, cette évaluation permet de rendre compte de liens positifs et significatifs entre les niveaux de l'indice de fumée noire mesurés entre 1990 et 2010 et le nombre quotidien de décès. Les analyses n'ont en revanche pas permis de détecter une éventuelle modification du risque sanitaire. Ce risque a été traduit en impact sanitaire afin de rendre compte des bénéfices sanitaires à court terme engendrés par la diminution du niveau de l'indice de fumées noires sur la période. Cette amélioration a permis de diminuer de près de deux tiers le pourcentage de décès attribuables à l'exposition aux particules carbonées. Le nombre de décès non accidentels ainsi évités représente 5 % de la baisse de la mortalité enregistrée sur la période.

Références bibliographiques

APPA, 2015 : Les épisodes de forte pollution des années 2013 et 2014 : un retour d'expérience, *Pollution atmosphérique. Climat, santé, société*, n° spécial.

http://www.appa.asso.fr/_docs/1/fckeditor/file/Revues/PollutionAtmospherique/HS_pointes/Numero_v1.pdf

Ashe WF, 1952 : Acute effects of air pollution in Donora, Pennsylvania, *Air Pollution*, New York, McGraw-Hill, 455-458.

(4) National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study.

Bell ML, Zanobetti A, Dominici F, 2013: Evidence on vulnerability and susceptibility to health risks associated with short-term exposure to particulate matter: a systematic review and meta-analysis. *Am J Epidemiol*, 178, 865-876, <https://doi.org/10.1093/aje/kwt090>

Breitner S, Stolzel M, Cyrus J. *et al.*, 2009: Short-term mortality rates during a decade of improved air quality in Erfurt, Germany. *Environ Health Perspect*, 117(3), 448-454, <https://doi.org/10.1289/ehp.11711>

Campagna D, Lefranc A, Nunes-Odasso C. *et al.*, 2003 : Évaluation des risques de la pollution urbaine sur la santé (Erpurs) : résultats 1987-2000, 201.

Dominici F, Peng RD, Zeger SL *et al.*, 2007: Particulate air pollution and mortality in the United States: Did the risks change from 1987 to 2000? *Am J Epidemiol*, 166(8), 880-888, <https://doi.org/10.1093/aje/kwm222>

Elichegaray C, Bouallala S, Maitre A. *et al.*, 2009 : État et évolution de la pollution atmosphérique. *Rev Mal Respir*, 26(2), 191-206.

Festy B, Ségala C, Le Moulec Y, 2006 : La pollution atmosphérique particulaire : les données épidémiologiques actuelles peuvent-elles aider aux choix météorologiques en termes de surveillance de la qualité de l'air ?, 141.

Fischer P, Ameling C, Marra M. *et al.*, 2009: Absence of trends in relative risk estimates for the association between Black Smoke and daily mortality over a 34 years period in The Netherlands. *Atmospheric Environment*, 43, 481-485, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.036>

Fischer PH, Marra M, Ameling CB *et al.*, 2011: Trends in relative risk estimates for the association between air pollution and mortality in The Netherlands, 1992-2006, *Environ Res*, 111, 94-100, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2010.09.010>

Host S, Pontin F, Chatignoux E, 2017 : Pollution particulaire et mortalité en Ile-de-France. Évolution des risques à court terme entre 1992 et 2010. Résultats du programme Erpurs, Paris, Observatoire régional de santé Ile-de-France, 54 p. Disponible sur : http://www.ors-idf.org/dmdocuments/2017/2017_pollution_particulaire_mortalitewebRapport.pdf

Host S, Karusisi N, 2014 : Erpurs : 20 ans de surveillance et d'évaluation des risques de la pollution urbaine sur la santé, Bilan et perspectives, 82.

Laboratoire central de la préfecture de police et Laboratoire d'hygiène de la ville de Paris, 2001 : Évolution de la qualité de l'air à Paris en 2000. Conseil départemental d'hygiène de Paris, séance du 23 mars 2001, 40.

Le Barbier M, 2007 : Évaluation de l'impact à court terme de la pollution urbaine sur la mortalité, exploration de la différence de sensibilité à la pollution atmosphérique acido-particulaire.

Le Moulec A, 2015 : La qualité de l'air continue de s'améliorer en 2014, mais des progrès restent à faire, Le point sur vol. 211 : Commissariat général au développement durable.

Le Tertre A, Henschel S, Atkinson RW *et al.*, 2014: Impact of legislative changes to reduce the sulphur content in fuels in Europe on daily mortality in 20 European cities: an analysis of data from the Aphekom project. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 7, 83-91. <https://doi.org/10.1007/s11869-013-0215-x>

Mage J, Batta G, 1932 : Résultats de l'expertise judiciaire sur la cause des accidents survenus dans la vallée de la Meuse pendant les brouillards de décembre 1930. *Chim Ind*, 27, 961-975.

Samet JM, Zeger SL, Dominici F *et al.*, 2000: The national morbidity, mortality, and air pollution study. Part II: Morbidity and mortality from air pollution in the United States. *Res Rep Health Eff Inst*, 94, Pt 2, 5-70; discussion 71-79.

Touloumi G, Samoli E, Pipikou M. *et al.*, 2006: Seasonal confounding in air pollution and health time-series studies: effect on air pollution effect estimates. *Stat Med*, 25(24), 4164-4178. <https://doi.org/10.1002/sim.2681>

WHO, 2013: Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project.