

Selon les polluants atmosphériques, les effets immédiats sur les admissions aux urgences et sur la mortalité diffèrent

Insee Analyses • n° 67 • Juillet 2021



Mesurer l'effet sur la santé des différents polluants atmosphériques et séparer leurs effets respectifs est difficile. Pollution de l'air et indicateurs sanitaires peuvent être corrélés pour de nombreuses raisons liées aux activités humaines, et différents polluants sont usuellement présents simultanément dans l'air. Utiliser les conditions météorologiques d'altitude pour prédire la concentration d'un polluant spécifiquement permet d'isoler son effet. En effet, elles influencent de façon distincte les polluants atmosphériques sans affecter directement la santé de la population.

Les polluants atmosphériques ont des effets sur les admissions aux urgences et sur la mortalité le jour même. Ces effets sont distincts selon les polluants. Une hausse de l'ozone ou du dioxyde de soufre induit une hausse des admissions aux urgences pour motif respiratoire, en particulier chez les plus jeunes et les personnes âgées. Une augmentation du monoxyde de carbone entraîne, quant à elle, une hausse des admissions aux urgences pour motif cardiovasculaire, en particulier chez les plus âgés. Enfin, une hausse des particules fines ou du dioxyde de soufre provoque une hausse de la mortalité, liée respectivement à une cause cardiovasculaire ou respiratoire.

D'après l'Organisation mondiale de la santé, la pollution de l'air a des effets néfastes sur la santé. De nombreuses études documentent ses effets sanitaires de court et long termes sur la morbidité et la mortalité [OMS, 2013 ; OMS, 2006a ; OMS 2006b ; Santé Publique France, 2021].

Identifier l'effet causal d'un polluant de l'air sur la santé représente un défi méthodologique

La pollution de l'air est corrélée de diverses manières aux activités humaines et à la santé. La concomitance entre niveau de pollution de l'air et niveau d'admissions aux urgences ou niveau de mortalité ne signifie donc pas en soi que la pollution de l'air a un effet causal sur la santé. Par exemple, en hiver, les organismes humains sont davantage mis à l'épreuve par la baisse de la luminosité et de la température, tandis que les systèmes de chauffage, source de pollution de l'air pour certains d'entre eux, sont davantage utilisés. Autre exemple, pendant les vacances, dans les grandes aires urbaines, la population présente décroît : le système de santé est ainsi moins sollicité alors que la moindre activité humaine réduit la pollution dans l'air.

De plus, différents polluants se trouvent dans l'air ambiant. Leurs concentrations dans l'air sont corrélées entre elles ► **encadré 1**, car les mécanismes qui les déterminent, comme les activités économiques ou naturelles, les réactions entre polluants dans l'air ou les conditions météorologiques, affectent souvent plusieurs polluants.

Du fait des liens multiples entre pollution de l'air et santé, et également de la présence de plusieurs polluants dans l'air, identifier l'effet causal d'un polluant spécifique de l'air sur un indicateur de santé représente un défi méthodologique.

Cette étude identifie, pour cinq polluants atmosphériques majeurs (les particules fines de moins de 2,5 micromètres, l'ozone, le monoxyde de carbone, le dioxyde d'azote et le dioxyde de soufre), leurs effets éventuels le jour même sur les admissions aux urgences ou les décès et, le cas échéant, l'amplitude de ces effets. Pour les particules fines de moins de 2,5 micromètres, un effet causal sur la mortalité le jour même est identifié. Pour l'ozone et le monoxyde de carbone, un effet causal sur les admissions aux urgences le jour même est mis en évidence. Pour le dioxyde de soufre, un effet causal à la fois sur les admissions aux

urgences et la mortalité le jour même est mis en lumière.

L'analyse porte sur les habitants des dix plus grandes aires urbaines françaises (Paris, Lyon, Marseille - Aix-en-Provence, Toulouse, Bordeaux, Lille, Nice, Nantes, Strasbourg et Rennes) entre 2010 et 2015. Trois catégories de causes d'admissions aux urgences et de décès sont distinguées : les causes respiratoires, les causes cardiovasculaires et les causes digestives. Cette dernière catégorie est utilisée à des fins de détection de faux résultats positifs, dans la mesure où la pollution de l'air n'a pas d'effet de court terme connu sur les pathologies digestives d'après la littérature médicale.

L'utilisation des conditions météorologiques d'altitude permet d'isoler l'effet causal d'un polluant

Les conditions météorologiques d'altitude induisent des variations des concentrations en polluants dans l'air près du sol qui sont différenciées par polluant. Dans la mesure où elles n'ont pas d'effet direct sur la santé conditionnellement aux conditions météorologiques près du sol, elles représentent de bons « instruments » pour étudier les effets

causaux des différents polluants sur la santé ► **encadré 2**. Même si seuls des effets linéaires sont étudiés ici ► **sources** ► **méthodes**, cette séparation des effets causaux sur données observationnelles est une avancée par rapport à la littérature scientifique existante sur le sujet (par exemple *Arceo et al. (2016)* ou *Deryugina et al. (2019)*).

Par exemple, lorsque la hauteur de la **couche limite planétaire** augmente, les concentrations en polluants diminuent, par dilution et par dispersion, sauf pour l'ozone dont la concentration est négativement corrélée à celle des autres polluants. Autre exemple, la présence d'**inversion thermique** augmente la concentration en polluants, sauf pour l'ozone pour les mêmes raisons, et selon la plage horaire de la journée à laquelle l'inversion thermique a lieu, les polluants impactés ne sont pas les mêmes. Les conditions météorologiques d'altitude qui sont les plus déterminantes ne sont ainsi pas les mêmes suivant les polluants.

Par ailleurs, les conditions météorologiques d'altitude, conditionnellement aux conditions météorologiques au sol, n'ont pas d'effet direct sur la santé : usuellement, les habitants sont affectés par les conditions météorologiques qui les entourent, mais pas par les conditions météorologiques d'altitude, car ils ne les perçoivent pas.

Un surcroît d'ozone ou de dioxyde de soufre dans l'air cause une hausse des admissions pour motif respiratoire le jour même

Dix microgrammes supplémentaires d'ozone par mètre cube dans l'air ambiant entraînent le jour même 5,6 admissions aux urgences supplémentaires pour motif respiratoire pour 10 millions d'habitants ► **figure 1**. Un microgramme supplémentaire de dioxyde de soufre par mètre cube entraîne, quant à lui, 9,6 admissions aux urgences supplémentaires pour motif respiratoire pour 10 millions d'habitants. Exprimées en **écarts-types** interjournaliers des concentrations journalières moyennes à des fins de comparaison entre polluants, des hausses d'un écart-type de l'ozone et du dioxyde de soufre causent respectivement 13,3 et 14,3 admissions supplémentaires ► **figure 2**.

En termes relatifs, une hausse de 10 % de la concentration en ozone induit une hausse de 2,1 % des admissions aux urgences pour motif respiratoire. Une hausse de 10 % de la concentration en dioxyde de soufre induit une hausse

► Encadré 1. Différents polluants dans l'air

Des polluants de nature physico-chimique différente peuvent se trouver dans l'air. Il peut s'agir de particules solides ou liquides en suspension dans l'air ou de gaz. Leur origine peut être naturelle ou liée aux activités humaines.

Les concentrations moyennes de la plupart des polluants sont orientées à la baisse en France sur la période 2000-2019 [SDES, 2020]. L'ozone est une exception notable : sa concentration est plutôt stable, avec une légère hausse en fin de période.

Une activité humaine donnée (transports, chauffage, agriculture, industrie, etc.) émet un ou couramment plusieurs polluants, dits « **polluants primaires** ». En conséquence, les niveaux de concentrations en polluants sont corrélés temporellement entre eux pour deux raisons. Premièrement, ces polluants restent un certain temps dans l'air. Deuxièmement, les activités humaines sont corrélées temporellement entre elles. Les niveaux de concentration ont des composantes cycliques, de périodes journalières, hebdomadaires et annuelles, selon les cycles des activités humaines à l'origine des émissions. À cette corrélation temporelle s'ajoute une corrélation spatiale, car les activités humaines sont également corrélées spatialement entre elles. Par ailleurs, les polluants peuvent réagir entre eux pour donner de nouveaux polluants, selon les conditions météorologiques ; on parle alors de « **polluants secondaires** ». Les corrélations spatiales et temporelles des concentrations en polluants primaires et des conditions météorologiques induisent alors des corrélations spatiales et temporelles des concentrations en polluants secondaires. L'ozone est par exemple un polluant secondaire qui se forme à partir de polluants primaires comme les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone ou les composés organiques volatiles, en présence de rayonnement ultraviolet. Plus généralement, les conditions météorologiques, qui sont corrélées entre elles spatialement et temporellement, influent sur la vitesse de retombée au sol de certains polluants, sur la dilution, sur la dispersion, sur l'activation de certaines réactions chimiques dans l'air, ainsi que sur certaines activités humaines, comme le chauffage. Pour toutes ces raisons, les concentrations des différents polluants dans l'air ambiant sont corrélées entre elles, spatialement et temporellement.

Les coefficients de corrélation entre les différents polluants considérés dans l'étude ► **figure** mesurent à la fois des phénomènes de corrélations spatiales et temporelles. Ils sont presque tous positifs : en moyenne, quand la concentration en l'un des polluants est élevée, la concentration en un autre polluant l'est aussi, et inversement. L'ozone est une exception, sa corrélation avec les autres polluants est négative, car étant un polluant secondaire sa formation consomme les autres polluants (primaires).

► Corrélations entre les concentrations des différents polluants dans l'air ambiant

	Particules fines de moins de 2,5 µm	Monoxyde de carbone	Dioxyde d'azote	Ozone	Dioxyde de soufre
Particules fines de moins de 2,5 µm	1,00	0,46	0,41	- 0,32	0,27
Monoxyde de carbone	0,46	1,00	0,69	- 0,39	0,22
Dioxyde d'azote	0,41	0,69	1,00	- 0,22	0,24
Ozone	- 0,32	- 0,39	- 0,22	1,00	- 0,08
Dioxyde de soufre	0,27	0,22	0,24	- 0,08	1,00

µm : micromètre.

Lecture : la corrélation entre les concentrations en particules fines de moins de 2,5 micromètres et en dioxyde d'azote dans l'air ambiant est positive et vaut 0,41.

Champ : 10 plus grandes aires urbaines françaises (Paris, Lyon, Marseille - Aix-en-Provence, Toulouse, Bordeaux, Lille, Nice, Nantes, Strasbourg et Rennes) entre 2010 et 2015.

Source : AASQA ; calculs des auteurs.

de 0,7 % des admissions aux urgences pour ce même motif. Les jeunes enfants et les personnes âgées sont les plus touchés par ces hausses de la morbidité respiratoire.

Un surcroît de monoxyde de carbone dans l'air augmente le nombre d'admissions pour motif cardiovasculaire le jour même

Cent microgrammes supplémentaires de monoxyde de carbone par mètre cube dans l'air ambiant

entraînent 6,8 admissions aux urgences supplémentaires pour motif cardiovasculaire pour 10 millions d'habitants le même jour. Un écart-type supplémentaire de monoxyde de carbone cause, quant à lui, 14,7 admissions supplémentaires.

En termes relatifs, une hausse de 10 % de la concentration en monoxyde de carbone induit une hausse de 1,7 % des admissions aux urgences pour motif cardiovasculaire. Les personnes âgées sont les plus touchées par cette hausse de la morbidité cardiovasculaire.

► 1. Effet d'une hausse de 1 microgramme par mètre cube de la concentration en polluants dans l'air ambiant sur les admissions aux urgences et la mortalité le jour même

pour 10 millions d'habitants

	Admissions aux urgences			Mortalité		
	Respiratoire	Cardiovasculaire	Digestive	Respiratoire	Cardiovasculaire	Digestive
Particules fines de moins de 2,5 µm	0,087 (0,235)	0,084 (0,206)	- 0,356 (0,182)	0,186 (0,112)	0,420** (0,161)	0,102 (0,068)
Monoxyde de carbone	0,022 (0,028)	0,068** (0,026)	- 0,007 (0,021)	0,008 (0,013)	0,014 (0,018)	- 0,002 (0,008)
Dioxyde d'azote	0,256 (0,268)	- 0,282 (0,263)	0,103 (0,208)	0,040 (0,142)	0,073 (0,189)	- 0,067 (0,075)
Ozone	0,560** (0,194)	0,198 (0,184)	- 0,259 (0,173)	- 0,066 (0,100)	0,124 (0,146)	0,061 (0,057)
Dioxyde de soufre	9,571** (3,498)	- 2,501 (3,416)	- 0,488 (2,962)	3,807* (1,588)	1,965 (2,375)	- 0,200 (1,091)
Nombre d'observations	6 135	6 135	6 135	6 135	6 135	6 135
Nombre d'instruments utilisés	35	35	35	35	35	35

µm : micromètre.

Note : * effet significatif au seuil de 10 %, ** effet significatif au seuil de 5 % (la méthode de Bonferroni-Holm pour tenir compte des tests multiples est utilisée). Les écarts-types associés aux estimations des effets sont entre parenthèses. La colonne « digestive » est ajoutée à des fins de détection de faux résultats positifs, car aucun effet n'est attendu d'après la littérature médicale.

Lecture : un surcroît de concentration en ozone de 1 microgramme par mètre cube induit un surcroît de 0,56 admission aux urgences pour cause respiratoire pour 10 millions d'habitants le jour de cette hausse. Ce surcroît est significatif au seuil de 5 %.

Champ : 10 plus grandes aires urbaines françaises (Paris, Lyon, Marseille - Aix-en-Provence, Toulouse, Bordeaux, Lille, Nice, Nantes, Strasbourg et Rennes) entre 2010 et 2015.

Sources : AASQA, ATIH, CépIdC-Inserm, LMD, Météo France ; calculs des auteurs.

► 2. Effet d'une hausse d'un écart-type interjournalier de la concentration en polluants dans l'air ambiant sur les admissions aux urgences et la mortalité le jour même



► Encadré 2. Estimer l'effet causal de plusieurs polluants de l'air

Sans précaution particulière, une régression entre polluants et indicateurs sanitaires met en évidence des corrélations dont l'interprétation causale peut être sujette à caution. Les niveaux de pollution dépendant aussi des activités humaines, ces corrélations pourraient refléter d'autres mécanismes que l'effet de la pollution sur la santé. Pour aller au-delà de l'étude des corrélations et donner une interprétation causale aux estimations, cette étude utilise la méthode des variables instrumentales. Dans le cas de l'effet de la pollution de l'air sur la santé, un instrument est une variable qui affecte la pollution de l'air, mais dont l'influence sur la santé ne transite que *via* la pollution de l'air. Par exemple, [Deryugina et al. \(2019\)](#) utilise les variations du sens du vent comme instruments pour les particules fines, sur données américaines. Dans des travaux dont la méthodologie est proche de l'instrumentation, [Arceo-Gomez et al. \(2016\)](#) utilise les inversions thermiques comme source de variation du monoxyde de carbone, sur données mexicaines.

Dans cette étude, les conditions météorologiques en altitude (vents, pressions, températures et humidités, hauteur de la couche limite planétaire, inversions thermiques, etc.) issues d'un modèle de circulation générale atmosphérique, le LMDZ, servent d'instruments. Ces variables sont nombreuses dans les données disponibles, entraînant un risque, si on les utilise toutes, de mauvaises propriétés statistiques des résultats (problème « d'instruments faibles »). De plus, pour séparer l'effet des polluants, il est important de disposer de variables instrumentales pour prédire chaque polluant séparément et spécifiquement. Ainsi, seuls les instruments les plus prédictifs de chaque polluant sont retenus, avec une méthode dite de Lasso [[Belloni et al., 2012](#)]. Parmi les 328 conditions météorologiques d'altitude disponibles, 35 sont retenues pour être utilisées comme instruments. Chacun des cinq polluants est ainsi instrumenté par des instruments forts et spécifiques [[Godzinski, Suarez Castillo, 2021](#)].

Un surcroît de particules fines ou de dioxyde de soufre entraîne un surcroît de mortalité le jour même

Dix microgrammes supplémentaires de particules fines de moins de 2,5 micromètres par mètre cube dans l'air ambiant entraînent 4,2 décès supplémentaires avec une cause cardiovasculaire pour 10 millions d'habitants le même jour. Un microgramme supplémentaire de dioxyde de soufre entraîne, quant à lui, 3,8 décès supplémentaires avec une cause respiratoire pour 10 millions d'habitants le même jour. Un écart-type supplémentaire de particules fines de moins

de 2,5 micromètres a pour conséquence 4,5 décès supplémentaires avec une cause cardiovasculaire, un écart-type supplémentaire de dioxyde de soufre 5,7 décès supplémentaires avec une cause respiratoire.

En termes relatifs, une hausse de 10 % de la concentration en particules fines induit une hausse de 0,8 % de la mortalité avec une cause cardiovasculaire. Une hausse de 10 % de la concentration en dioxyde de soufre provoque, quant à elle, une hausse de 0,8 %

de la mortalité avec une cause respiratoire. Les personnes âgées sont les plus touchées par cette hausse de la mortalité. ●

**Alexandre Godzinski (CGDD),
Milena Suarez Castillo (Insee)**

► Sources

Cette évaluation mobilise plusieurs bases de données, avec au moins une donnée par jour et par aire urbaine (Paris, Lyon, Marseille - Aix-en-Provence, Toulouse, Bordeaux, Lille, Nice, Nantes, Strasbourg et Rennes). Les données de comptage sur les admissions aux urgences par motif et classe d'âge proviennent de l'Agence technique de l'information sur l'hospitalisation (ATIH). Les données de comptage sur la mortalité par cause viennent du Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès - Institut national de la santé et de la recherche médicale (CépiDc-Inserm). Tous les décès pour lesquels la cause étudiée est mentionnée au moins une fois sur le certificat de décès sont comptabilisés. Les causes correspondent à la nomenclature CIM-10 (chapitre 9 pour les causes respiratoires, chapitre 10 pour les causes cardiovasculaires et chapitre 11 pour les causes digestives). Les données de comptage sur la mortalité toutes causes confondues par classe d'âge viennent, quant à elles, de l'Insee. Les concentrations en polluants dans l'air ambiant ont été fournies par la fédération ATMO France, à partir des mesures réalisées par les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA). Les conditions météorologiques d'altitude proviennent du modèle de circulation générale atmosphérique LMDZ du laboratoire de météorologie dynamique (LMD). Les conditions météorologiques proviennent de mesures réalisées par Météo France. Les estimations ont été réalisées sur un périmètre constant de 6 135 observations (jour x aire urbaine) déterminé selon les disponibilités des mesures sur les polluants dans le champ considéré.



Retrouvez les données en téléchargement sur www.insee.fr

► Méthodes

L'étude ne s'intéresse qu'aux effets sanitaires de la concentration en polluants dans l'air un jour donné sur les admissions aux urgences et la mortalité de ce jour-là. Les effets au-delà de ce premier jour ne sont pas étudiés, ce qui pourrait expliquer le caractère non conclusif de l'étude en ce qui concerne le dioxyde d'azote notamment. Par ailleurs, les variations identifiées pourraient être portées, en priorité, par les populations les plus fragilisées, dont l'état de santé est davantage susceptible d'être modifié par la pollution de l'air. Enfin, pour garder des instruments suffisamment forts pour chaque polluant et n'ayant pas de bons instruments pour leurs interactions, la forme fonctionnelle du modèle économétrique postule un lien linéaire entre concentrations en chaque polluant et indicateurs de santé. Cette forme fonctionnelle permet une interprétation de l'effet d'une hausse ou d'une baisse de la concentration d'un polluant par multiplication par une constante. Toutefois, trois conséquences en découlent. Les potentiels « effets de cocktail » (effet de la présence simultanée de différents polluants ne se résumant pas à la somme des effets des polluants considérés indépendamment) ne sont pas étudiés. Les potentiels « effets de seuils » (intensité du lien différente sur la plage de concentration) non plus. Le lien est robuste dans les plages de concentrations usuellement observées, mais peut être remis en question en dehors.

► Définitions

Un **polluant primaire** est un polluant de l'air directement émis par une source.

Un **polluant secondaire** est un polluant de l'air qui n'est pas émis directement par une source, mais qui est formé à partir d'autres polluants.

La **couche limite planétaire** est la partie basse de l'atmosphère, dont le comportement est directement influencé par la surface terrestre. Au-dessus de la couche limite planétaire se trouve l'atmosphère libre. La hauteur de la couche limite planétaire est comprise usuellement entre 100 mètres et 2 kilomètres, avec des variations selon le lieu et dans le temps. Les caractéristiques de la couche limite planétaire (comme sa hauteur, ainsi que les vents, pressions, températures et humidités aux différentes altitudes) sont des déterminants de la concentration en polluants au sol, car elles influent sur la dilution et la dispersion des polluants. Par exemple, pour la plupart des polluants, leur concentration tend à décroître lorsque la hauteur de la couche limite planétaire augmente.

Une **inversion thermique** est une inversion du gradient de température avec l'altitude. Usuellement, l'air le plus chaud se trouve au niveau du sol, et la température de l'air décroît au fur et à mesure que l'altitude augmente. Lors d'une inversion thermique, une couche d'air plus chaud se situe au-dessus d'une couche d'air plus froid. Cette couche d'air chaud agit comme un « couvercle », bloque la diffusion verticale de l'air et favorise l'accumulation de la pollution de l'air au sol.

L'**écart-type** sert à mesurer la dispersion, ou l'étalement, d'un ensemble de valeurs autour de leur moyenne. Plus l'écart-type est faible, plus les valeurs sont homogènes.

► Pour en savoir plus

- **Godzinski A., Suarez Castillo M.**, "Disentangling the effects of air pollutants with many instruments", *Journal of Environmental Economics and Management*, 2021.
- **Santé Publique France**, *Impact de pollution de l'air ambiant sur la mortalité en France métropolitaine. Réduction en lien avec le confinement du printemps 2020 et nouvelles données sur le poids total pour la période 2016-2019*, avril 2021.
- **SDES**, *Bilan de la qualité de l'air extérieur en France en 2019*, septembre 2020.
- **Deryugina T., Heutel G., Miller N.-H., Molitor D., Reif J.**, "The mortality and medical costs of air pollution: Evidence from changes in wind direction", *American Economic Review*, 109(12):4178-4219, 2019.
- **Arceo E., Hanna R., Oliva P.**, "Does the effect of pollution on infant mortality differ between developing and developed countries? Evidence from Mexico City", *The Economic Journal*, 126(591):257-280, 2015.
- **Belloni A., Chen D., Chernozhukov V., Hansen C.**, "Sparse models and methods for optimal instruments with an application to eminent domain", *Econometrica*, 80(6), 2369-2429, 2015.
- **OMS**, *Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP project: final technical report*, 2013.
- **OMS**, *Air Quality Guidelines - Global Update 2005 - Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*, 2006a.
- **OMS**, *Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air : particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre - Mise à jour mondiale 2005 - Synthèse de l'évaluation des risques*, 2006b.

Direction générale :
88 avenue Verdier
92541 Montrouge Cedex

Directeur de la publication :
Jean-Luc Tavernier

Rédactrices en chef :
A. Goin, S. Pujol

Rédacteurs :
L. Grivet,
P. Glénat

Maquette :
B. Rols

Code Sage : IA2167
ISSN 2416-7851
© Insee 2021
www.insee.fr

@InseeFr

