

ÉTUDES et RÉSULTATS

janvier 2024
n° 1292

Plus exposés à la pollution de l'air, les jeunes enfants des ménages modestes, plus fragiles, sont les plus affectés

En France métropolitaine, ce sont les jeunes enfants vivant dans les ménages les plus aisés et les ménages les plus modestes qui sont les plus exposés à la pollution de l'air due aux particules fines de moins de 2,5 micromètres. En effet, les plus aisés résident plus souvent dans les grandes aires urbaines, où se concentre la pollution atmosphérique, et les moins aisés dans les communes les plus polluées, au sein de ces aires. Néanmoins, au-delà des différences d'exposition, les fortes disparités de vulnérabilité vis-à-vis de la pollution de l'air doivent être prises en compte, notamment en fonction de l'état de santé, lié également au niveau de vie des parents : les enfants des ménages les plus modestes sont en moins bon état de santé général à la naissance que ceux des ménages les plus aisés. En termes de recours au système de santé pour cause de maladies respiratoires, sur la période 2008-2017, environ 28 000 enfants de chaque génération sont hospitalisés en urgence pour bronchiolite avant leurs 2 ans et 11 000 pour asthme avant leurs 3 ans. Si l'exposition moyenne annuelle aux principaux polluants atmosphériques diminuait d'environ 1 % sur les 365 premiers jours de vie, ce qui reviendrait par exemple à préserver les enfants de moins de 1 an d'une quinzaine de jours d'augmentation ponctuelle importante de leur exposition à ces polluants, de l'ordre de 2 000 cas hospitalisés en urgence pour bronchiolite, 1 800 cas hospitalisés en urgence pour asthme et 6 100 enfants pris en charge avec des délivrances de médicaments anti-asthmiques seraient évités. L'effet de la pollution de l'air masque en réalité de fortes disparités : 10 % des enfants concentrent l'essentiel des effets détectables statistiquement lors d'une augmentation de l'exposition avant leur premier anniversaire et sont donc en ce sens les plus affectés. Ces enfants sont caractérisés par un certain nombre de facteurs de risques, comme la prématurité, mais aussi par un niveau de vie plus faible : parmi ces enfants les plus affectés, le dixième le plus modeste est 1,6 fois plus représenté que le dixième le plus aisé.

Milena Suarez Castillo (DREES), avec la collaboration de Vianney Costemalle (DREES), David Benatia (CREST) et Christine le Thi (Insee)

La qualité de l'air que l'on respire est un enjeu majeur pour la santé, et plus particulièrement pour celle des jeunes enfants. Que ce soit par le biais des différences d'exposition ou des différences de vulnérabilité, la pollution atmosphérique pourrait contribuer aux inégalités sociales de santé (Deguen, 2013), ce dès le plus jeune âge (Paciencia, *et al.*, 2022). En Europe, une proportion significative de l'asthme chez les enfants serait attribuable à la pollution atmosphérique

et serait en partie évitable si les normes de qualité de l'air de l'OMS étaient respectées (Khreis, 2019). Chez les enfants de moins de 3 ans, l'asthme se définit comme la répétition de trois épisodes aigus de gêne respiratoire, quelle qu'en soit la cause (HAS, 2009). Le tableau clinique des épisodes aigus se superpose à celui de la bronchiolite classique, dont l'origine est virale, mais dont le développement peut aussi être favorisé par la pollution de l'air.



Retrouvez toutes nos données sur [data.drees](https://data.drees.fr)

●● L'exposition à la pollution de l'air est plus élevée chez les enfants les plus aisés et les plus modestes

Les particules fines de moins de 2,5 micromètres ($PM_{2,5}$), émises notamment par le chauffage au bois résidentiel ou le trafic routier, seraient responsables d'un nombre important de décès prématurés chaque année en France (40 000 décès par an en moyenne entre 2016 et 2019 [Santé publique France, 2021]) et dans le monde. Bien que les $PM_{2,5}$ ne soient pas les seuls polluants atmosphériques nocifs dans l'air urbain, cette étude se concentre sur ces dernières.

Plusieurs sources disponibles en données ouvertes (*open data*) permettent aujourd'hui d'estimer l'exposition aux $PM_{2,5}$ sur plusieurs années au niveau des communes de résidence (**encadré 1**). Si l'exposition en niveau diffère sensiblement selon les sources, celles-ci s'accordent globalement sur les inégalités d'exposition : ce sont les jeunes enfants vivant dans les ménages les plus aisés, puis les plus modestes, qui sont les plus exposés à la pollution de l'air en France métropolitaine (**graphique 1a**). La surexposition des enfants des ménages plus aisés à ces particules s'explique principalement par leur surreprésentation dans les plus grandes aires urbaines françaises¹, qui tendent à être plus polluées que les espaces moins denses. En

revanche, au sein des grandes aires urbaines, ce sont les enfants des ménages les plus modestes qui sont les plus exposés du fait de leur localisation (**graphique 1b**). Ainsi, dans les aires de 700 000 habitants ou plus (à l'exception de l'aire de Paris), les 10 % d'enfants les plus modestes ont, l'année de leur naissance, une exposition moyenne aux $PM_{2,5}$ supérieure de 0,5 microgramme par mètre cube ($\mu g/m^3$) à celle des 10 % d'enfants les plus aisés. À titre de référence, l'indicateur d'exposition moyenne aux $PM_{2,5}$ de la population urbaine² était de 12,1 $\mu g/m^3$ entre 2015 et 2017. Bien qu'ils ne soient pas particulièrement surreprésentés dans les plus grandes aires d'attraction des villes françaises, les enfants des ménages les plus modestes se situent dans les communes les plus polluées au sein de ces aires.

Par ailleurs, la vulnérabilité à la pollution de l'air est vraisemblablement hétérogène et plus marquée chez les personnes à l'état de santé fragile (Deguen, et al., 2013). Une étude américaine a montré que, chez les Américains de 65 ans ou plus, la mortalité induite par l'exposition aux particules fines, à court terme, est concentrée chez environ un quart de cette population, qui présente une espérance de vie en moyenne nettement plus faible et une prévalence plus élevée de maladies chroniques respiratoires, cardio-vasculaires

Encadré 1 Sources et données

Les données de cette étude sont issues de l'EDP-Santé, une base de données qui croise l'échantillon démographique permanent (EDP) de l'Insee aux données de consommation de soins et d'hospitalisation issues du Système national des données de santé (SNDS) [Dubost, Leduc, 2020]. Il s'agit d'un échantillon qui couvre environ 4,4 % de la population résidant en France. Les données de l'EDP-Santé couplées à des données spatialisées sur la concentration en particules fines permettent une analyse de l'exposition et du recours au soin d'un échantillon de 336 169 enfants nés entre 2008 et 2017, représentatif des enfants résidant en France métropolitaine au cours de cette période. Le niveau de vie du ménage accueillant l'enfant est issu de la base d'étude de l'EDP 2017, ou reconstitué en suivant la méthode de Blanpain (2016) pour les années 2010 à 2016 (années de revenus disponibles). Un dixième de niveau de vie est ainsi déduit pour 275 051 enfants nés entre 2008 et 2016, soit 82 % de l'échantillon initial, chaque groupe représentant un dixième de l'échantillon. Les données du programme de médicalisation des systèmes d'information (PMSI) relatives aux séjours de naissance des enfants de l'échantillon EDP nés entre 2008 et 2017 permettent enfin, pour 287 516 enfants, soit 86 % de l'échantillon initial, de construire des indicateurs de santé périnatale, au travers de leur prise en charge hospitalière.

Les séjours de naissance ainsi que les hospitalisations avec passage aux urgences ont été identifiés dans les bases MCO (médecine, chirurgie, obstétrique et odontologie) du PMSI. Les séjours de naissance sont identifiés dans le PMSI à partir des séjours des nouveau-nés en suivant les critères de repérage des indicateurs de périnatalité de la plateforme de restitution de données des établissements de santé ScanSanté. Un indicateur d'état de santé général est proposé en s'appuyant d'abord sur les diagnostics principaux des unités médicales associées au séjour de l'enfant. Un second indicateur est proposé en s'appuyant sur les groupes homogènes de malades, une nomenclature médico-économique qui permet de décrire et de facturer à l'Assurance maladie la prise en charge des patients. Les nouveau-nés « sans problème significatif » sont classés ainsi par défaut, en cas d'absence de problème de sévérité supérieure ayant entraîné un autre classement. Dans cette approche, les enfants sont considérés comme en bonne santé à la naissance quand il s'agit de « nouveau-nés de 3 300 g et âge gestationnel de 40 semaines d'aménorrhée (SA) et assimilés, sans problème significatif » et de « nouveau-nés de 2 400 g et âge gestationnel de 38 SA et assimilés, sans problème significatif ».

Les admissions avec passage par les urgences pour asthme ou bronchiolite sont repérées à l'aide des diagnostics principaux des séjours

ayant pour mode d'entrée « domicile » et une provenance « avec passage par les urgences ». Les délivrances de médicaments contre l'asthme correspondent à la délivrance par une pharmacie d'un médicament pour les maladies obstructives des voies respiratoires. Dans la perspective d'une estimation d'un impact sanitaire, une limite de cet indicateur est qu'il suppose une prise en charge, elle-même sujette à des différences d'accès, d'observance et de recours au soin. De plus, pour en tirer des conclusions en termes de consommation accrue de médicaments, il suppose que les délivrances sont consommées par le bénéficiaire. Enfin, cet indicateur recouvre des situations très diverses, de l'asthme intermittent ou persistant à des pathologies aiguës des voies respiratoires.

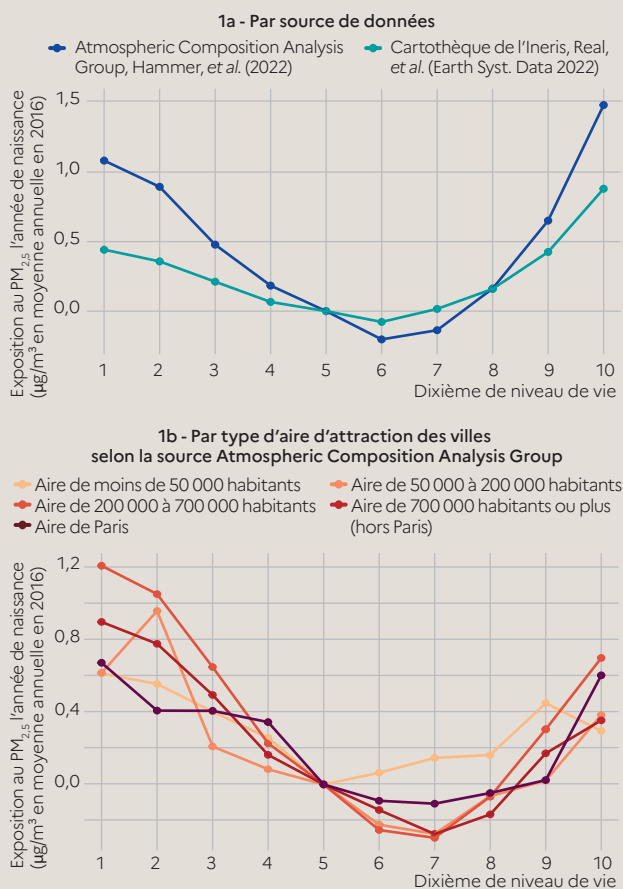
Les données d'exposition à la pollution aux particules fines sont issues de deux sources. L'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) produit désormais des données historiques (2009-2019) en moyenne annuelle au niveau des communes de France métropolitaine (Cartothèque de l'Ineris ; Real, et al., 2022), en s'appuyant sur un rapprochement statistique des observations des stations de mesures et des concentrations simulées par un modèle numérique de qualité de l'air. L'Atmospheric Composition Analysis Group (ACAG) propose, quant à lui, des données en moyenne annuelle, au niveau du territoire européen sur une grille d'un kilomètre en s'appuyant sur des observations satellitaires (Hammer, et al., 2022 ; V4EU03, 2001-2018).

Les données météorologiques, en particulier celles sur les inversions thermiques, sont issues du modèle européen de réanalyse de l'atmosphère et de la surface UERRA, qui estime à un niveau horaire, sur plusieurs couches de l'atmosphère et avec une résolution au sol de 11 km x 11 km, des variables météorologiques telles que la température, l'humidité ou les vents. Ces données sont ouvertes et disponibles sur le site du programme Copernicus, dans le Climate Data Store. Quand la différence entre les températures moyennes journalières à 500 mètres et 15 mètres est positive, le jour est considéré comme étant avec une inversion thermique ; la somme de ces jours est décomptée sur la première année de vie de l'enfant. Les variables météorologiques de contrôle utilisées sont les suivantes : nombre de jours dans l'année dans 20 intervalles de température, dans 12 intervalles de vitesse du vent (suivant l'échelle de Beaufort), ainsi que l'humidité moyenne annuelle et la pression moyenne annuelle. Ni la Commission européenne, ni le centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF) ne sont responsables de l'utilisation qui est ici faite des données Copernicus.

1. Plus précisément, il s'agit ici des aires d'attraction des villes, c'est-à-dire un ensemble de communes, d'un seul tenant et sans enclave, constitué d'un pôle de population et d'emploi, et d'une couronne qui regroupe les communes dont au moins 15 % des actifs travaillent dans le pôle.

2. Pour calculer en particulier l'objectif national de réduction de l'exposition (directive 2008/50/CE concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe).

Graphique 1 Écart d'exposition aux particules fines de moins de 2,5 micromètres des enfants nés en 2016 selon le niveau de vie, par rapport au niveau de vie médian



Lecture > Selon les données de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), en 2016, les enfants les plus modestes nés cette année-là (premier dixième de niveau de vie des enfants de l'échantillon) ont une exposition aux $PM_{2.5}$ de $0,44 \mu g/m^3$ plus élevée que ceux de niveau de vie médian (cinquième dixième) en moyenne, et de $1,08 \mu g/m^3$ plus élevée selon les données de l'Atmospheric Composition Analysis Group. Dans les aires de 200 000 à 700 000 habitants, cet écart est de $1,20 \mu g/m^3$ en moyenne. Selon la source Atmospheric Composition Analysis Group, en 2016 les enfants nés cette année-là sont exposés en moyenne à une concentration en $PM_{2.5}$ de $9,8 \mu g/m^3$ et à $11,5 \mu g/m^3$ selon la source Ineris.

Champ > Enfants nés en 2016, résidant en France métropolitaine ; exposition l'année de leur naissance à la commune de résidence.

Sources > EDP-Santé 2017 ; Atmospheric Composition Analysis Group, Hammer, et al. (2022) V4EU03 ; Cartothèque de l'Ineris, Real, et al. (Earth Syst. Data 2022) ; calculs DREES.

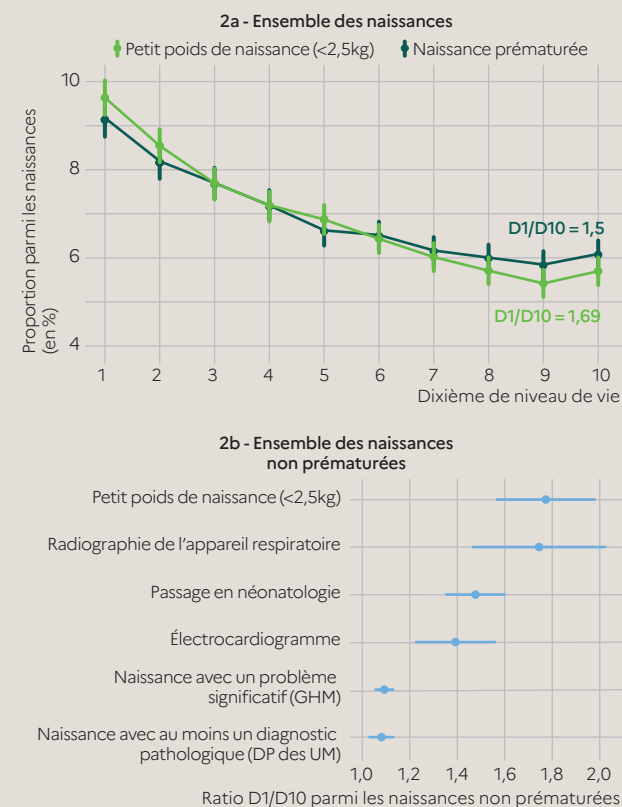
> Études et Résultats n° 1292 © DREES

ou neurodégénératives (Deryugina, et al., 2019). Ainsi, des inégalités sociales de santé déjà perceptibles à la naissance pourraient être accentuées par une vulnérabilité différenciée à la pollution atmosphérique selon le niveau de vie.

Les enfants modestes, plus fragiles à la naissance et plus souvent hospitalisés en urgence pour asthme et bronchiolite

Alors que les enfants nés prématurément représentent 9,1 % des naissances parmi les 10 % les plus modestes de la cohorte étudiée, ils représentent 6,1 % des enfants parmi les 10 % les plus aisés³. Ainsi, les enfants les plus modestes ont un risque 1,5 fois plus élevé de

Graphique 2 Caractéristiques des séjours de naissance selon le niveau de vie



Note > Pour les naissances avec un problème significatif, fondé sur le groupe homogène de maladie des séjours de naissance qui a évolué en 2012, seules les années 2012 à 2016 sont considérées.

Lecture > 9,1 % des naissances parmi les 10 % d'enfants les plus modestes de la cohorte étudiée sont des naissances prématurées, contre 6,1 % des naissances parmi les 10 % d'enfants les plus aisés. Pour les enfants non nés prématurés, les enfants les 10 % les plus modestes ont 1,77 fois plus de chances que les enfants les 10 % les plus aisés d'avoir un petit poids à la naissance.

Champ > Naissances de 2008 à 2016, France métropolitaine.

Source > EDP-Santé 2017.

> Études et Résultats n° 1292 © DREES

naître prématurément que les plus aisés (**graphique 2a**). Ces inégalités marquées se constatent également vis-à-vis du risque de faible poids à la naissance, souvent lié à la prématurité. Parmi les enfants nés non prématurés⁴, les plus modestes nécessitent plus de soins hospitaliers que les plus aisés lors de leur séjour de naissance (**graphique 2b**). Les naissances en bonne santé sont légèrement plus fréquentes chez les enfants aux niveaux de vie les plus élevés (**encadré 1**). Les écarts sont nettement plus marqués dès lors que les prises en charge lors du séjour de naissance suggèrent des risques plus rares et plus sévères : les enfants des ménages les plus modestes ont un risque 1,2 fois plus élevé que ceux des ménages les plus aisés d'avoir un séjour hospitalier plus long à la naissance⁵ (six jours ou plus), leur risque de passer dans un service de néonatalogie étant 1,5 fois plus élevé et celui d'avoir une radiographie pulmonaire 1,8 fois plus élevé.

Avant leur troisième anniversaire, 1,4 % des enfants sont admis à l'hôpital en urgence pour asthme sur la période étudiée (2008-2017). Cela représente environ 11 000 enfants nés chaque

³. Chaque dixième regroupe le même nombre d'enfants : ainsi, les bornes délimitant ces dixièmes sont plus basses que les dixièmes de niveaux de vie dans la population générale, car les parents de jeunes enfants ont un niveau de vie plus faible. Ainsi, en 2018, le niveau de vie moyen des enfants de moins de 18 ans correspond à 89,9 % du niveau de vie moyen de l'ensemble de la population et le taux de pauvreté des enfants de moins de 3 ans est de 20,3 %, contre 14,8 % dans l'ensemble de la population (Insee, 2021).

⁴. À partir de 37 semaines d'aménorrhée.

⁵. Longueur du séjour qui peut néanmoins être liée à l'état de santé de la mère comme à celui de l'enfant.

année qui seront touchés avant 3 ans. En ce qui concerne les enfants les plus modestes, ils sont 1,9 % à être admis à l'hôpital en urgence pour asthme avant leur troisième anniversaire, contre 1,2 % des plus aisés, soit un risque multiplié par 1,6. Pour les hospitalisations en urgence pour bronchiolite avant le deuxième anniversaire, qui concernent 3,6 % des enfants et de l'ordre de 28 000 enfants nés chaque année, les différences sont encore plus marquées, avec un risque doublé pour les plus modestes par rapport aux plus aisés (5,0 % contre 2,4 %) [graphique 3a]. En revanche, les délivrances de médicaments contre l'asthme en pharmacie de ville, qui concernent 26,3 % des enfants, sont bien moins fréquentes chez les plus modestes que chez les enfants de niveau de vie intermédiaire (graphique 3b). Plusieurs études montrent que la prise en charge de l'asthme est probablement insuffisante pour la population dans son ensemble (Afrite, et al., 2008 ; Com-Ruelle, et al., 2010), alors même qu'une prise en charge adaptée permettrait d'éviter en grande partie les épisodes aigus les plus graves. Ainsi, une partie de l'excès d'hospitalisation pour asthme observé chez les plus modestes pourrait probablement être évité. En l'absence de mesure directe de l'état de santé respiratoire, la consommation des médicaments contre l'asthme peut être interprétée à la fois comme le marqueur d'une pathologie respiratoire, aiguë ou chronique, mais également comme un indicateur de la qualité de sa prise en charge, puisqu'il existe des différences d'accès, de recours et d'observance des traitements.

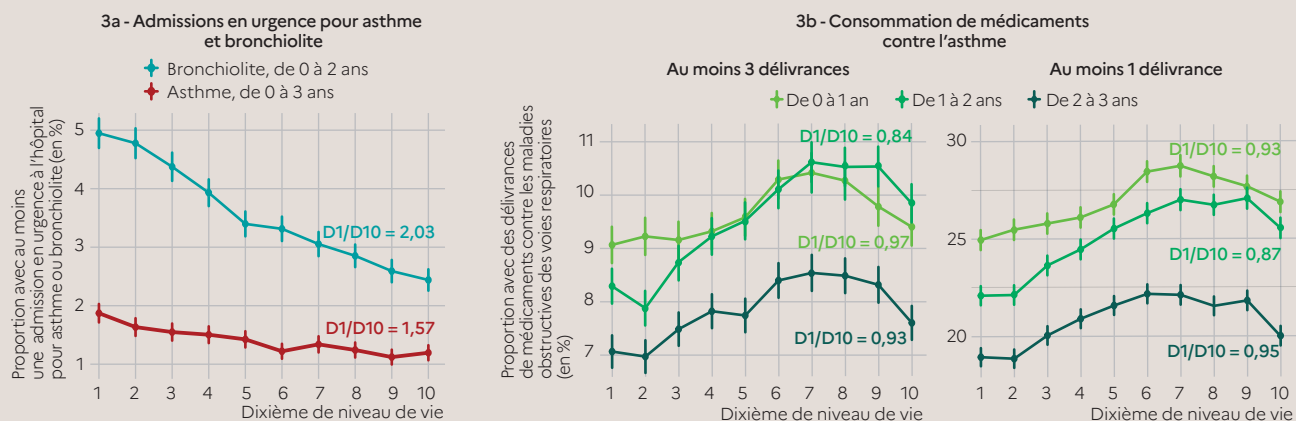
Des recours aux soins respiratoires plus fréquents chez les enfants surexposés à la pollution dans leur première année de vie

La simple comparaison d'enfants plus exposés à la pollution de l'air que les autres sur des données observationnelles établit une association. Afin de donner une interprétation causale aux estimations de l'effet d'une surexposition à la pollution atmosphérique, deux groupes de jeunes enfants sont ici comparés, qualifiés pour l'un d'« exposé » et l'autre de « non exposé ». L'assignation des enfants au groupe « exposé » repose sur leur exposition dans leur première année de vie à un nombre plus important de jours avec une inversion thermique qu'habituellement dans leur commune de résidence, phénomène météorologique ayant pour conséquence l'accumulation des polluants atmosphériques,

notamment, mais pas seulement, les $PM_{2,5}$. Ainsi, l'assignation à un groupe ou à l'autre n'est pas liée aux caractéristiques propres des enfants, qui peuvent influencer sur leur état de santé et biaiser, si elles ne sont pas correctement contrôlées, les estimations. L'information sur l'exposition aux inversions thermiques permet alors de définir une exposition pseudo-aléatoire au regard de toutes les autres caractéristiques des enfants, si bien que l'écart d'exposition à la pollution atmosphérique pourra être considéré comme la seule cause possible des différences d'état de santé respiratoire constatées. En termes techniques, il s'agit d'une analyse par variable instrumentale (Arceo-Gomez, et al., 2016 ; Deryugina, et al. 2019 ; Godzinski, Suarez Castillo, 2021), en forme réduite puisqu'elle ne cherche pas à attribuer à un polluant unique les effets observés (encadré 2). Enfin, du fait des spécificités de cette méthode, l'exposition différentielle du groupe « exposé » par rapport au groupe « non exposé », estimée en moyenne annuelle faute de données journalières exhaustives sur le territoire, s'interprète plus aisément comme un nombre de jours d'exposition aux $PM_{2,5}$ nettement plus important (soit plus de 20 % à 30 %), mais aussi sur d'autres polluants comme le monoxyde de carbone ou le dioxyde d'azote (Godzinski, Suarez Castillo, 2021) avant le premier anniversaire que comme une augmentation faible (soit 1 %) mais portant sur l'ensemble de la première année de l'enfant.

Ces deux groupes d'enfants ainsi définis diffèrent bien par l'exposition aux particules fines dans leur première année de vie (tableau 1) : suivant les sources utilisées pour mesurer cette composante de la pollution atmosphérique, le groupe « exposé » réside dans une commune où la concentration en particules fines $PM_{2,5}$ estimée est plus élevée de 0,12 $\mu g/m^3$ (intervalle de confiance [IC] à 95 % : 0,02 ; 0,22) qu'habituellement en moyenne annuelle, selon les données de Hammer, et al. (2020), ou plus élevée de 0,24 $\mu g/m^3$ (IC 95 % : 0,12 ; 0,37) qu'habituellement en moyenne annuelle, selon les données de Real, et al. (2022). Les deux groupes sont proches en termes d'état de santé à la naissance et de caractéristiques sociodémographiques (encadré 2), à la manière d'une expérimentation où l'on aurait attribué aléatoirement un traitement à un groupe et pas à un autre, ce dernier servant donc de groupe de contrôle, ce qui est difficile en pratique : on parle ainsi de quasi-expérience. Les caractéristiques des enfants sont encore plus proches en contrôlant la commune et l'année de naissance dans

Graphique 3 Recours aux soins en lien avec les maladies des voies respiratoires, selon le niveau de vie



Lecture > 1,87 % des enfants du dixième le plus modeste ont une admission en urgence pour asthme avant leur troisième anniversaire, contre 1,2 % des enfants du dixième le plus aisé. 9,06 % des enfants du dixième le plus modeste ont une délivrance de médicaments contre l'asthme avant leur troisième anniversaire, contre 10,41 % des enfants du septième dixième le plus aisé.

Champ > Naissances de 2008 à 2016, France métropolitaine.

Source > EDP-Santé 2017.

> Études et Résultats n° 1292 © DREES

les estimations, ce qui soutient l'hypothèse d'exposition pseudo-aléatoire et donc l'interprétation causale.

Les enfants exposés dans leur première année de vie ont un risque plus élevé d'être hospitalisés en urgence pour bronchiolite avant leur deuxième anniversaire (*odds-ratio* [OR] : 1,08 [IC 95 % : 1,00 ; 1,17]). Ils ont aussi un risque plus élevé d'être hospitalisés en urgence pour asthme avant leur troisième anniversaire (OR : 1,19 [IC 95 % : 1,01 ; 1,40]). Ces enfants consomment plus de médicaments contre l'asthme avant leur premier anniversaire, avec un nombre de délivrances par enfant accru de 0,025 en moyenne pour les plus exposés, soit +3 % par rapport aux enfants non exposés. Il est

possible de considérer un surcroît d'exposition plus important en augmentant les contrastes d'exposition entre le groupe exposé et le non exposé. Dès lors, le risque de consommer des médicaments anti-asthmatiques avant le premier anniversaire est également significativement accru, suggérant un effet où la dose d'exposition accroît les conséquences ; en revanche, pour les admissions en urgence, les coefficients sont similaires, ce qui suggère que les conséquences sont observées dès un surcroît relativement mineur d'exposition (Suarez Castillo, *et al.*, à paraître).

Ainsi, si les enfants de moins de 1 an pouvaient être préservés d'une quinzaine de jours d'augmentation importante (plus de 30 %) de leur exposition aux principaux polluants atmosphériques, jusqu'à diminuer leur exposition moyenne annuelle d'environ 1 % sur leurs 365 premiers jours⁶, de l'ordre de 2 000 cas hospitalisés de bronchiolites, 1 800 cas hospitalisés pour asthme et 6 100 enfants pris en charge avec des délivrances de médicaments anti-asthmatiques seraient évités⁷.

Encadré 2 Méthode d'estimation causale de l'effet de la pollution de l'air sur le recours aux soins

De très nombreuses études observationnelles dans des contextes très variés ont apporté des éléments sur l'association entre pollution de l'air et mortalité, pathologies respiratoires et cardiovasculaires notamment. Sans remettre en cause le consensus scientifique sur la relation causale entre effets néfastes sur la santé et pollution de l'air, un consensus croissant émerge dans plusieurs disciplines : les approches par régression ou association peuvent être peu fiables dans certains contextes, en tout cas très sensibles au modèle statistique ou aux variables de contrôles retenues (Dominici, *et al.*, 2014). L'approche quasi expérimentale est une des approches statistiques alternatives qui a émergé pour dépasser ces limites. Elle vise à établir une causalité, que ce soit en épidémiologie (Schwartz, *et al.*, 2017 ; Dominici, *et al.*, 2014 ; Bind, 2019) comme en économie (Deryugina, *et al.*, 2019 ; Arceo, *et al.*, 2016 ; Jans, *et al.*, 2018 ; Godzinski, Suarez Castillo, 2021) et a conforté dans ce cadre d'analyse les études observationnelles.

Cette étude repose sur la quasi-expérience suivante : certains enfants connaissent, dans leur première année de vie, une exposition plus importante à la pollution de l'air que des enfants comparables nés dans la même commune à un autre moment, du fait d'un nombre d'inversions thermiques plus important. Une inversion thermique est une inversion du gradient de température avec l'altitude (i.e. la température est temporairement plus élevée en altitude qu'au niveau du sol) favorisant l'accumulation de la pollution de l'air au sol. Ce phénomène n'est pas spécifique aux particules fines de moins de 2,5 micromètres et impacte également la concentration d'autres polluants de l'air par le même mécanisme. Ainsi, les effets estimés ici s'interprètent plutôt comme une réponse à un surcroît de pollution de l'air induite par une inversion thermique (PM_{2,5}, mais aussi d'autres polluants comme les oxydes d'azote ou le monoxyde de carbone) que la réponse à un surcroît d'un seul polluant (Godzinski, Suarez Castillo, 2021). Contrairement à l'exposition à la pollution aux particules fines, qui est très liée aux caractéristiques des enfants (leur lieu de vie en particulier, qui se trouve très corrélé à d'autres variables socio-économiques), l'exposition à un surcroît d'inversion thermique permet de séparer des groupes d'enfants plus comparables au vu de leurs caractéristiques, mais qui sont plus exposés à la pollution atmosphérique, du fait d'un nombre plus élevé d'inversion thermique. L'échantillon est ainsi séparé entre un groupe d'enfant « exposé », représentant environ 14 % de l'échantillon, les autres représentant le groupe « non exposé ».

La comparaison des hospitalisations en urgence et de la consommation de médicaments de ces groupes comparables, en tenant compte dans une équation économétrique d'un effet « commune de naissance », d'un effet « annuel » ainsi que de variables de contrôles pour les conditions météorologiques, permet de mettre en évidence, sous l'hypothèse crédible que les inversions thermiques n'affectent pas directement la santé, un effet causal de la pollution de l'air sur la santé respiratoire des enfants (Suarez Castillo, *et al.* à paraître).

Tableau 1 Comparaison des groupes d'enfants exposés et non exposés à un surcroît inhabituel de pollution atmosphérique

	Groupe exposé - Groupe non exposé	
Exposition aux particules fines avant le premier anniversaire dans la commune de naissance (différences de moyennes, en µg/m³)		
PM _{2,5} (source : Ineris) ¹	+ 0,12 [0,02 ; 0,22]	
PM _{2,5} (source : ACAG) ¹	+ 0,24 [0,12 ; 0,37]	
Nombre de jours avec une inversion thermique en plus par rapport au groupe non exposé	+ 10,79 [10,48 ; 11,11]	
	Odds ratio	Différences de moyennes
Délivrances de médicaments contre l'asthme		
Risque de consommation avant le premier anniversaire de l'enfant	1,02 [0,99 ; 1,05]	0,003 [-0,003 ; 0,009]
Nombre de délivrances avant le premier anniversaire de l'enfant		0,025 [-0,001 ; 0,051]
Hospitalisations en urgence		
Pour bronchiolite (avant le deuxième anniversaire)	1,08 [1,00 ; 1,17]	+ 0,003 [0,000 ; 0,006]
Pour asthme (avant le troisième anniversaire)	1,19 [1,01 ; 1,40]	+ 0,002 [0,000 ; 0,005]

1. Seuls les enfants nés en janvier sont considérés pour l'estimation d'exposition aux PM_{2,5}, ces données n'étant disponibles qu'en année calendaire.

Note > Sont présentées ici les estimations obtenues par des modèles de régression linéaire (pour les différences de moyennes notamment) et de régression logistique (pour les *odds ratio*), qui contrôlent de la commune de naissance, de l'année de naissance et des conditions météorologiques de l'année de naissance.

Lecture > Les enfants du groupe exposé sont plus exposés que les autres aux PM_{2,5} de +0,24 µg/m³ (source Ineris) en moyenne annuelle avant leur premier anniversaire. Les intervalles de confiance à 95 % sont présentés, et tiennent compte des corrélations spatiales dans l'assignation de l'exposition (clusterisation sur l'unité de mesure des inversions thermiques).

Champ > Enfants nés entre 2008 et 2017, résidant en France métropolitaine.
Sources > EDP-Santé 2017 ; UERRA-Programme Copernicus ; Atmospheric Composition Analysis Group, Hammer, *et al.* (2022) V4EU03 ; Carthèque de l'Ineris, Real, *et al.* (Earth Syst. Data 2022).

6. Exposition évitée à la baisse similaire à celle utilisée pour comparer le groupe « exposé » et le groupe « non exposé », qu'il est difficile d'extrapoler à de plus fortes variations d'exposition non envisagées dans l'estimation.

7. Ces ordres de grandeur traduisent les estimations précédentes, qui ont pour objectif d'estimer une élasticité causale, mais ne doivent pas faire oublier les incertitudes statistiques (taille des intervalles de confiance notamment) ainsi que les limites spécifiques à la stratégie empirique adoptée ici (variable instrumentale non spécifique à un polluant donné, et instrumentant par nature des chocs de pollution atmosphérique de court plutôt que de long terme).

Les enfants les plus affectés par un surcroît de pollution de l'air sont plus souvent parmi les plus modestes

La vulnérabilité à la pollution de l'air, c'est-à-dire le risque de développer des complications de santé pour une exposition à une pollution donnée, est vraisemblablement variable d'un enfant à l'autre, ce qu'occultent les comparaisons moyennes présentées dans le [tableau 1](#). Il est cependant possible d'identifier des groupes pour lesquels l'impact de la pollution de l'air est plus ou moins important, de quantifier la part d'individus significativement affectés – au sens d'un impact positif et significatif de la pollution de l'air sur un type de recours aux soins – et de les caractériser. Quatre groupes d'enfants sont ainsi définis suivant un indice de vulnérabilité à la pollution de l'air fondé sur un apprentissage statistique (*machine learning*) parmi un grand nombre de facteurs de risque potentiels : en classant *via* cet indice l'ensemble des enfants, on définit ainsi les 50 % les moins affectés, les 10 % les plus affectés, et deux groupes intermédiaires. L'effet moyen de la pollution de l'air sur l'état de santé est estimé pour chacun de ces groupes ([encadré 3](#)), par type de recours aux soins en lien avec les maladies respiratoires.

Concernant les hospitalisations en urgence pour bronchiolite et la délivrance de médicaments contre l'asthme, les effets importants seraient concentrés dans un groupe représentant 10 % des enfants, le groupe des enfants les plus affectés par la pollution de l'air. Pour ces derniers, l'accroissement du risque de bronchiolite avant 2 ans est de 1,7 point de pourcentage en cas d'exposition, soit un risque multiplié par 1,5, celui du risque de délivrance de médicaments anti-asthmiques avant 1 an de 2,3 points de pourcentage, soit un risque multiplié par 1,1 ([tableau complémentaire A⁸](#)). En ce qui concerne les hospitalisations en urgence pour asthme, bien que les analyses indiquent la présence d'hétérogénéité de l'effet de la pollution de l'air, elles peinent à mettre en évidence des effets

différenciés d'un groupe à l'autre à partir des variables disponibles. Que ce soit en termes d'hospitalisation en urgence pour bronchiolite ou de délivrance de médicaments anti-asthmiques, les enfants les 10 % les plus affectés présentent plus souvent un état de santé défavorable à la naissance et font également plus souvent partie des plus modestes. Les plus aisés sont aussi surreprésentés parmi les enfants les plus affectés, mais dans une bien moindre mesure.

Pour ce qui est de la bronchiolite, les enfants les plus affectés par un surcroît de pollution de l'air dans leur première année sont avant tout des enfants dont l'état de santé à la naissance est moins favorable ([tableau 2](#)) : 18,7 % sont nés prématurément, contre 5,9 % parmi les 50 % les moins affectés. Par rapport à ces derniers, les 10 % les plus affectés ont 2,8 fois plus de risque d'être passés par un service de néonatalogie à leur naissance et 3,3 fois plus de risque d'avoir un petit poids de naissance (inférieur ou égal à 2,5 kilos). Ces enfants appartiennent aussi 1,9 fois plus souvent au dixième de niveau de vie le plus modeste, qui représente 17,4 % des enfants les plus affectés. Les 10 % les plus aisés sont également surreprésentés parmi les enfants les plus affectés, mais dans une moindre mesure. Une interprétation possible de ce résultat serait que la surexposition de fond à laquelle font face les plus aisés fragilise les voies respiratoires sur le long terme et les rend plus sensibles à des variations de pollution de l'air à plus court terme. Les conséquences de la pollution de l'air sur les admissions aux urgences pour bronchiolite semblent particulièrement toucher les enfants de l'aire urbaine de Paris. D'ailleurs, dans une étude sur l'Île-de-France, l'effet moyen de la pollution de l'air sur le recours aux urgences pour asthme et bronchiolite a déjà été constaté à très court terme (ORS Île-de-France, 2013). Cependant, le groupe des enfants les plus affectés par un surcroît de pollution de l'air comprend également près de 30 % d'enfants vivant dans des aires d'attraction des villes de moins de 200 000 habitants, ce qui suggère que même dans des zones où les niveaux d'exposition sont

Encadré 3 Méthode d'estimation du groupe le plus affecté

L'approche retenue consiste à classer l'ensemble des enfants selon la sensibilité de leur état de santé respiratoire aux chocs de pollution, puis à décrire les caractéristiques des enfants associées à leur position dans ce classement (Chernozhukov, *et al.*, 2018). Elle suppose que les effets moyens d'une exposition peuvent être influencés par de très nombreux facteurs et elle se traduit par une estimation en grande dimension en termes de nombre de variables caractérisant les individus, ainsi que des interactions potentielles entre elles.

Des algorithmes capables d'explorer de telles combinaisons complexes des variables à disposition (par exemple, les forêts aléatoires ou tout modèle de d'apprentissage automatique [*machine learning*] performant en prédiction) sont d'abord entraînés sur la moitié de l'échantillon pour prédire, en fonction des caractéristiques individuelles, l'état de santé respiratoire dans chaque groupe, exposé ou non exposé (à un surcroît d'inversions de température) ([encadré 2](#)). La vulnérabilité est alors définie, pour chaque enfant, comme la différence entre les deux prédictions, qui traduit l'effet prédit d'un surcroît d'exposition sur l'état de santé pour un enfant avec de telles caractéristiques (soit, en termes techniques, un *proxy* du *conditional average treatment effect*). L'effet moyen de la pollution de l'air par groupe de vulnérabilité « supposée » (les 10 % les plus vulnérables *a priori*, les 50 % les moins vulnérables *a priori*, ainsi que deux groupes intermédiaires) est ensuite mesuré sur l'autre moitié de l'échantillon qui n'a pas été utilisé pour entraîner les modèles. Avant l'estimation des effets moyens par groupe, les groupes ainsi formés ne sont pas nécessairement pertinents, puisque la prédiction peut se tromper (pas de garantie de convergence vers le vrai *conditional average treatment effect*) : c'est la mobilisation d'une inférence classique sur le deuxième échantillon qui permet de confirmer que les groupes ainsi

formés par prédiction sont pertinents (c'est-à-dire que les enfants du groupe le plus vulnérable *ex-ante* sont effectivement affectés *ex-post*, c'est-à-dire que l'effet moyen du traitement estimé sur ce groupe est significativement positif, et plus fort que pour les autres groupes). Ainsi, c'est l'estimation sur le deuxième échantillon qui permet de confirmer l'existence d'un groupe des 10 % les plus affectés et des 50 % les moins affectés, en lien avec l'effet moyen estimé sur chacun de ces groupes. En effet, si les effets moyens sur chacun de ces groupes d'impact sont croissants, avec un effet plus faible que l'effet moyen pour le groupe des moins affectés à un effet plus fort que la moyenne pour le groupe des plus affectés, ces groupes s'avèrent pertinents. Les contrastes d'effet moyen mis au jour, en ayant recours à un apprentissage sur les groupes d'impact, sont en général plus forts que ceux qui auraient été obtenus par un choix *ex-ante* pour séparer les groupes (*i.e.* les plus modestes *versus* les plus aisés, ou encore les enfants prématurés *versus* les enfants non prématurés). Ces groupes peuvent ensuite être très simplement caractérisés en comparant les moyennes des variables à disposition ([tableau 2](#)).

Pour les admissions en urgence pour asthme avant l'âge de 3 ans, bien que certains individus soient plus affectés que d'autres (au sens du test d'hétérogénéité), les groupes mis en évidence à partir des variables à disposition ne se distinguent pas suffisamment les uns des autres. En revanche, pour les admissions pour bronchiolite ou la délivrance de médicament contre l'asthme ([tableau complémentaire A](#)), alors que les 90 % des enfants les moins vulnérables ne sont pas significativement affectés (premier à troisième groupe), le groupe représentant les 10 % des enfants les plus affectés (quatrième groupe) affiche des effets presque 6 à 8 fois plus forts que ceux estimés en moyenne sur l'ensemble de la population.

8. Les tableaux complémentaires sont disponibles avec les données associées à cette étude (lien en fin de publication).

Tableau 2 Enfants les 10 % les plus affectés par un surcroît d'exposition « moyen » à la pollution atmosphérique, comparés aux enfants les 50 % les moins affectés

		Les 10 % les plus affectés et 50 % les moins affectés par un surcroît d'exposition à la pollution atmosphérique			
		Hospitalisation en urgence pour bronchiolite avant le deuxième anniversaire		Délivrances de médicaments contre l'asthme avant le premier anniversaire	
Part de filles	10 % les plus affectés	0,459	- 0,017 (p=0,001)	0,424	-0,065 (p=0,000)
	50 % les moins affectés	0,477		0,49	
Part d'enfants					
Nés prématurés	10 % les plus affectés	0,187	0,127 (p=0,000)	0,095	0,026 (p=0,000)
	50 % les moins affectés	0,059		0,069	
De petit poids de naissance	10 % les plus affectés	0,189	0,133 (p=0,000)	0,086	0,016 (p=0,000)
	50 % les moins affectés	0,056		0,07	
Avec un séjour en néonatalogie	10 % les plus affectés	0,228	0,145 (p=0,000)	0,115	0,021 (p=0,000)
	50 % les moins affectés	0,082		0,095	
Sans problème significatif lors du séjour de naissance	10 % les plus affectés	0,581	- 0,160 (p=0,000)	0,689	-0,043 (p=0,000)
	50 % les moins affectés	0,741		0,731	
Sans diagnostic pathologique lors du séjour de naissance	10 % les plus affectés	0,693	- 0,136 (p=0,000)	0,800	-0,020 (p=0,000)
	50 % les moins affectés	0,831		0,821	
Avec une radiographie de l'appareil respiratoire lors du séjour de naissance	10 % les plus affectés	0,087	0,057 (p=0,000)	0,044	0,011 (p=0,000)
	50 % les moins affectés	0,03		0,033	
Âge de la mère de l'enfant	10 % les plus affectés	30,34	- 0,276 (p=0,000)	30,20	-0,595 (p=0,000)
	50 % les moins affectés	30,64		30,79	
Percentile moyen de niveau de vie	10 % les plus affectés	43,56	- 5,813 (p=0,000)	49,38	-0,499 (p=0,088)
	50 % les moins affectés	49,74		49,84	
Part d'enfants parmi les 10 % les plus modestes	10 % les plus affectés	0,174	0,083 (p=0,000)	0,111	0,018 (p=0,000)
	50 % les moins affectés	0,09		0,094	
Part d'enfants parmi les 10 % les plus aisés	10 % les plus affectés	0,111	0,026 (p=0,000)	0,098	-0,001 (p=0,786)
	50 % les moins affectés	0,083		0,099	
Part d'enfants bénéficiant de la CMU-C avant leur premier anniversaire	10 % les plus affectés	0,171	0,036 (p=0,000)	0,121	-0,010 (p=0,005)
	50 % les moins affectés	0,133		0,13	
Aire d'attraction de Paris	10 % les plus affectés	0,361	0,146 (p=0,000)	0,239	0,006 (p=0,186)
	50 % les moins affectés	0,216		0,233	
Aire 700 000 habitants ou plus (hors Paris)	10 % les plus affectés	0,166	-0,039 (p=0,000)	0,211	0,004 (p=0,287)
	50 % les moins affectés	0,207		0,206	
Aire de 200 000 à moins de 700 000 habitants	10 % les plus affectés	0,176	-0,054 (p=0,000)	0,203	-0,023 (p=0,000)
	50 % les moins affectés	0,231		0,225	
Aire de 50 000 à moins de 200 000 habitants	10 % les plus affectés	0,138	-0,046 (p=0,000)	0,179	0,008 (p=0,027)
	50 % les moins affectés	0,182		0,171	
Aire de moins de 50 000 habitants	10 % les plus affectés	0,094	-0,018 (p=0,000)	0,112	0,004 (p=0,128)
	50 % les moins affectés	0,112		0,108	
Communes hors aires d'attraction des villes	10 % les plus affectés	0,064	0,014 (p=0,000)	0,056	-0,000 (p=0,867)
	50 % les moins affectés	0,052		0,055	
Exposition habituelle au PM _{2,5} en moyenne annuelle à la commune de résidence, µg/m³ – Hammer, et al. (2022)	10 % les plus affectés	13,38	1,74 (p=0,000)	12,13	0,270 (p=0,000)
	50 % les moins affectés	11,66		11,86	

Lecture > Les enfants les 10 % les plus affectés en termes d'admissions aux urgences pour bronchiolite par un surcroît d'exposition de l'ordre de +0,12 µg/m³ [0,022 ; 0,22] (source Ineris) en moyenne annuelle avant leur premier anniversaire (effets du surcroît d'exposition de +0,017 sur leurs admissions aux urgences) sont 18,7 % à être nés prématurés, contre 5,9 % parmi les enfants les 50 % les moins affectés (effets du surcroît d'exposition non significatif sur leurs admissions aux urgences), avec une différence significative de 12,7 points de pourcentage.

Champ > Enfants nés en entre 2008 et 2017, résidant en France métropolitaine, avec une exposition estimée en leur commune de résidence et avant leur premier anniversaire, avec les variables présentées dans cette table renseignée dans l'EDP.

Sources > EDP-Santé 2017 ; UERRA-Programme Copernicus ; Atmospheric Composition Analysis Group, Hammer, et al. (2022) V4EU03 ; Cartothèque de l'Ineris, Real, et al. (Earth Syst. Data 2022).

plus faibles, les variations positives de pollution de l'air engendrent aussi des effets néfastes.

Les enfants les plus affectés par un surcroît de pollution de l'air au regard de la délivrance de médicaments contre l'asthme⁹ avant le premier anniversaire ont, eux aussi, des indicateurs de santé à la naissance plutôt défavorables, mais dans une bien moindre mesure que les enfants les plus affectés en termes d'hospitalisations en

urgence. Les 10 % les plus affectés en termes de délivrance de médicaments sont 9,5 % à être nés prématurés, contre 6,9 % chez les 50 % les moins affectés. Ces deux groupes ont une répartition entre les différentes aires d'attraction des villes similaire. Les garçons sont plus nombreux que les filles (57,6 %) parmi les 10 % les plus affectés. Les différences entre les niveaux de vie sont moins marquées que pour la bronchiolite, puisque le dixième le plus modeste n'est

9. Plus précisément, il s'agit des médicaments contre les maladies obstructives des voies respiratoires qui comprennent les médicaments indiqués dans les traitements des épisodes aigus de l'asthme ainsi que pour son traitement de fond, mais aussi pour des pathologies aiguës telles que les bronchites ou les bronchiolites. Ces médicaments peuvent également être prescrits pour la broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO), une pathologie rare voire mal définie chez l'enfant, qui peut se confondre avec l'asthme.

que modérément surreprésenté (+1,8 point, contre 8,3 points pour les admissions en urgence pour bronchiolite). Néanmoins, une partie des inégalités mesurées à travers la consommation de soins, et en particulier la délivrance de médicaments, pourraient être gommées par une moindre prise en charge des symptômes chez les plus modestes. En effet, l'observation d'une délivrance de médicaments indiqués contre l'asthme suppose une ordonnance, donc une prise en charge préalable : l'absence de délivrance ne signifie pas nécessairement l'absence de symptôme asthmatique, et un même nombre de délivrances peut refléter des états de santé allant de l'asthme léger à grave. Ainsi, les inégalités portant sur les symptômes asthmatiques, quel que soit leur niveau de prise en charge, sont probablement plus importantes que celles mesurées par le prisme des consommations de médicaments contre l'asthme.

Dans le cas des asthmes légers, le non-recours aux soins (par exemple pour raison financière) peut conduire à une moindre prescription de médicaments contre l'asthme et donc à une sous-estimation des inégalités d'état de santé liées au niveau de vie. En revanche, pour les états nécessitant une prise en charge hospitalière en urgence des jeunes enfants du fait de la gravité des symptômes, les comportements de non-recours sont vraisemblablement peu fréquents. Les différences de prise en charge en urgence à l'hôpital observées, qui reflètent les cas les plus graves, traduisent donc plus directement des inégalités sociales de santé sous-jacentes à la prise en charge, induites par l'exposition à la pollution. ●



Télécharger les données associées à l'étude

Mots clés : Jeune enfant Pollution de l'air Inégalités sociales de santé Disparités et inégalités territoriales Médicament
Recours aux soins Urgences Santé et environnement

Pour en savoir plus

- > Arceo, E., Hanna, R., Oliva, P. (2016, mars). Does the effect of pollution on infant mortality differ between developing and developed countries? Evidence from Mexico City. *The Economic Journal*, 126(591), pp. 257-280.
- > Afrite, A., et al. (2008, décembre). L'asthme en France en 2006 : prévalence et contrôle des symptômes. Irdes, *Questions d'économie de la santé*, 138.
- > Bind, M.A. (2019, avril). Causal modeling in environmental health. *Annu Rev Public Health*, 40, pp. 23-43.
- > Chatignoux, E., Host, S. (2013). *Expositions à la pollution atmosphérique et recours aux urgences pour pathologies respiratoires chez les enfants en Île-de-France*. Observatoire régional de santé Île-de-France.
- > Chernozhukov, V., et al. (2018). *Generic machine learning inference on heterogeneous treatment effects in randomized experiments, with an application to immunization in India* (No. w24678). National Bureau of Economic Research.
- > Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store (2019). *Complete UERRA regional reanalysis for Europe from 1961 to 2019*.
- > Com-Ruelle, L., Da Poian, M.T., Le Guen, N. (2010, mars). Les dépenses médicales de ville des asthmatiques en 2006. Irdes, *Questions d'économie de la santé*, 152.
- > Delmas, M.-C., Fuhrman, C. (2012). *Corrélations entre asthme déclaré et remboursements de médicaments dans l'enquête ESPS 2006 : peut-on proposer des indicateurs de suivi de la prise en charge de l'asthme basés sur les remboursements de médicaments ?* Institut de veille sanitaire.
- > Deguen, S. (2013, janvier). Exposition à la pollution atmosphérique et inégalités sociales de santé. *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, 1-2, pp. 18-20.
- > Deryugina, T., et al. (2019, décembre). The mortality and medical costs of air pollution: Evidence from changes in wind direction. *American Economic Review*, 109(12), pp. 4178-4219.
- > Dominici, F., Greenstone, M., Sunstein, C.R. (2014, avril). Particulate matter matters. *Science*, 344(6181), pp. 257-259.
- > Dubost, C.-L., Leduc, A. (2020). L'EDP-Santé : un appariement des données socio-économiques de l'échantillon démographique permanent au Système national des données de santé. DREES, *Les Dossiers de la DREES*, 66.
- > Godzinski, A., Suarez Castillo, M. (2021, juillet). Selon les polluants atmosphériques, les effets immédiats sur les admissions aux urgences et sur la mortalité diffèrent. Insee, *Insee Analyses*, 67.
- > Godzinski, A., Suarez Castillo, M. (2021, septembre). Disentangling the effects of air pollutants with many instruments. *Journal of Environmental Economics and Management*, 109.
- > Hammer, M.S., et al. (2020). Global estimates and long-term trends of fine particulate matter concentrations (1998-2018). *Environmental Science & Technology*, 54(13), pp. 7879-7890.
- > HAS (2009, mars). *Asthme de l'enfant de moins de 36 mois : diagnostic, prise en charge et traitement en dehors des épisodes aigus*. Société Pédiatrique de Pneumologie et d'allergologie, *Recommandations professionnelles*.
- > Insee (2021, mai). *Revenus et patrimoine des ménages – Édition 2021*. Paris, France : Insee, coll. Insee Références.
- > Jans, J., Johansson, P., Nilsson, J.P. (2018). Economic status, air quality, and child health: Evidence from inversion episodes. *Journal of Health Economics*, 61, pp. 220-232.
- > Jusot, F. (2013). Les inégalités de recours aux soins : bilan et évolution. *Revue d'épidémiologie et de santé publique*, 61, pp. 163-169.
- > Khreis, H., Kelly, C., Tate, J. (2016, novembre). Exposure to traffic-related air pollution and risk of development of childhood asthma: a systematic review and meta-analysis. *Environ Int*, 100, pp. 1-31.
- > Medina, S., et al. (2021, avril). *Impact de la pollution de l'air ambiant sur la mortalité en France métropolitaine*. Santé publique France.
- > Paciência, I., Cavaleiro Rufo, J., Moreira, A. (2022, juin). Environmental inequality: air pollution and asthma in children. *Pediatric Allergy and Immunology*, 33(6).
- > Real, E., et al. (2022). Historical reconstruction of background air pollution over France for 2000-2015. *Earth System Science Data*, 14(5), pp. 2419-2443.
- > Suarez Castillo, M., et al. (à paraître). Air pollution and children's health inequalities. Insee, *Document de Travail*.
- > Schwartz, J., Bind, M.A., Koutrakis, P. (2017, janvier). Estimating causal effects of local air pollution on daily deaths: effect of low levels. *Environmental Health Perspectives*, 125(1), pp. 23-29.
- > Welz, M., et al. (2022, juin). *GenericML: Generic Machine Learning Inference*. R package version 0,2,3.

> **Publications**
drees.solidarites-sante.gouv.fr

> **Open Data**
data.drees.solidarites-sante.gouv.fr

> **Nous contacter**
DREES-INFO@santer.gouv.fr

> **Contact presse**
DREES-PRESSE@santer.gouv.fr

Directeur de la publication : Fabrice Lenglar

Responsable d'édition : Valérie Bauer-Eubriet

Chargée d'édition : Élisabeth Castaing

Composition et mise en pages : Julie Eneau

Conception graphique : DREES

Reproduction autorisée sous réserve de la mention des sources

ISSN électronique 1146-9129 • AIP 0001384

Les destinataires de cette publication sont informés de l'existence à la DREES d'un traitement de données à caractère personnel les concernant. Ce traitement, sous la responsabilité du directeur de la publication, a pour objet la diffusion de la publication de la DREES. Les données utilisées sont l'identité, la profession, l'adresse postale personnelle ou professionnelle. Conformément aux dispositions de la loi du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés, les destinataires disposent d'un droit d'accès et de rectification aux données les concernant ainsi qu'un droit d'opposition à figurer dans ce traitement. Ils peuvent exercer ces droits en écrivant à : DREES - Bureau des Publications et de la Communication - 14 avenue Duquesne - 75 350 Paris 07 SP ou en envoyant un courriel à : drees-infos@santer.gouv.fr