

Particules en suspension dans l'air : leurs effets sur la santé

Auteur :

DANEL Vincent, Professeur Émérite, Université Grenoble Alpes (UGA). Médecin praticien hospitalier au CHU de Grenoble (Unité de Toxicologie Clinique).

23-04-2019



Les particules en suspension figurent parmi les principaux polluants de l'air. Leurs effets sur la santé sont maintenant pour la plupart connus depuis de nombreuses années. Leur impact sur la mortalité, la survenue de complications pulmonaires et cardiovasculaires, ont fait l'objet de très nombreuses études. Il a également été montré que les effets à long terme sont plus graves que les effets à court terme. Enfin, le coût socio-économique de cette pollution est considérable et les mesures de prévention encore insuffisantes.

1. Notions générales

Tout le monde a besoin de respirer pour vivre ! Cette vérité élémentaire explique l'intérêt que l'on doit porter à la qualité de l'air. À la différence d'autres expositions, alimentaires par exemple, nul ne peut se soustraire à l'obligation de respirer ! Toute la population est donc concernée, toutes les classes d'âge, que l'on soit en bonne santé ou malade.

Les effets de la pollution de l'air sur la santé ont été étudiés depuis plusieurs décennies. Depuis les premières alertes dans la vallée de la Meuse en Belgique en 1930 et à Londres en décembre 1952 quand un brouillard dense dû à la pollution fut la cause de plusieurs milliers de décès, de nombreux progrès ont été faits dans la compréhension des effets des différents polluants de l'air sur la santé de l'homme.

Parmi les nombreux polluants présents dans l'air, d'origine naturelle ou anthropique (due à l'activité de l'homme), les particules en suspension ont fait l'objet de très nombreux travaux.

1.1. Particules en suspension

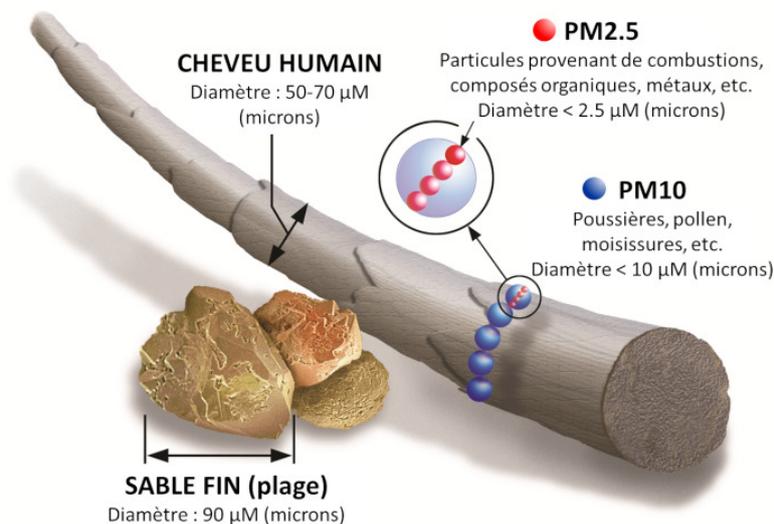


Figure 1. Comparaison de diamètres entre un cheveu, un grain de sable et des particules PM2,5 et PM10. [Source : <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>]

Les particules en suspension dans l'air sont des mélanges complexes de substances organiques et non organiques issues des différentes sources d'émission des particules. Il est encore impossible de faire la part, en routine et de façon précise, entre les différents constituants des particules (Lire [Les particules polluantes de l'air : de quoi s'agit-il ?](#)) ; il est donc impossible d'imputer tel ou tel effet à tel ou tel composant des particules. Sauf en laboratoire et dans des conditions expérimentales rigoureuses. Les effets imputés aux particules à l'échelle de la population sont donc les effets observés de façon globale sans pouvoir être plus précis quant au(x) composant(s) responsable(s) de ces effets.

Les **particules**, notées **PM** pour « **Particulate Matter** » en anglais (matières particulaires ou particules de matière), sont classées en fonction de leur diamètre aérodynamique exprimé en μm . Celles qui sont analysées en routine par les appareils de surveillance de la qualité de l'air sont les particules de diamètre 10 μm ; elles sont notées PM10 ; on les qualifie de particules « grossières » (coarse particles). On parle de **particules fines** à partir d'un diamètre inférieur à 2,5 μm (PM2,5) (Figure 1). Et on s'intéresse depuis quelques années aux particules dites « ultra-fines », de diamètre 0,1 μm (ou 100 nm), les PM0,1. Des nanoparticules donc.

Ces considérations de diamètre sont fondamentales car elles conditionnent la pénétration des particules dans l'appareil trachéo-pulmonaire et dans l'organisme (Figure 2). De façon très schématique, seules les PM2,5 et plus petites vont pénétrer profondément dans les poumons et jusqu'aux alvéoles pulmonaires ; les PM0,1 pénètrent en partie dans l'organisme en franchissant la membrane alvéolo-capillaire, qui sépare l'air du courant sanguin. La réalité chez l'homme *in vivo* est sans doute beaucoup plus complexe et encore en partie méconnue. L'essentiel des connaissances sur le sujet est en effet issu de modèles mathématiques et de quelques expérimentations animales [1].

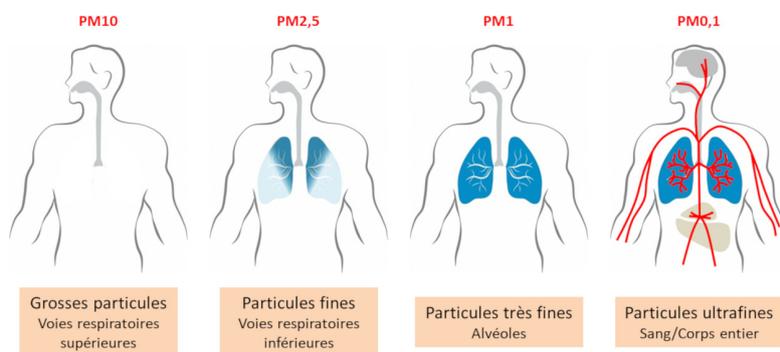


Figure 2. Pénétration pulmonaire des particules. [Source : © Encyclopédie de l'Environnement]

D'autres voies de pénétration des particules ont fait l'objet d'étude, la voie digestive et la voie cutanée. La pénétration digestive des particules a pour origine les aliments et boissons contaminés ainsi que l'ingestion de particules évacuées de l'arbre trachéo-bronchique par un processus de transport le long de l'épithélium bronchique. Il est trop tôt pour établir une relation entre

ingestion de particules et maladies du tube digestif, les résultats des études sont contradictoires [1]. Il en est de même pour la voie cutanée où des études seront encore nécessaires pour en mesurer l'impact et conclure.

Les concentrations de l'air en particules, PM_{10} en routine, sont mesurées près ou à distance de la source d'émission, le plus souvent par des stations fixes d'analyse de la qualité de l'air. Près d'installations industrielles, en zone urbaine, près d'un axe routier, etc. Ou à distance des sources connues, de façon à détecter d'éventuels pics de pollution tout en mesurant le « bruit de fond ». Des stations mobiles (Figure 3) sont également utilisées pour des campagnes d'analyse ponctuelles, en général à distance des sources d'émission. Les particules fines, $PM_{2,5}$ ou $PM_{0,1}$ ne sont pas analysées en routine.



Figure 3. Station mobile de mesure des émissions. [Source : Air Rhône-Alpes [CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)]]

L'amélioration de la qualité de l'air passe en particulier par une diminution des émissions d'origine anthropique. Mais il peut y avoir des différences entre émissions et concentrations dans l'air, ceci peut être source de confusion. Le débat sur l'amélioration de l'air est parfois compliqué par le fait que l'on se réfère tantôt aux émissions de particules (ou de polluants) dans l'atmosphère, tantôt aux concentrations dans l'atmosphère. Quand on parle d'émissions, on est au tout début de la chaîne liant les contaminants à un effet sanitaire éventuel. Celles-ci sont évaluées en kg de polluant émis, sont estimées à partir de données sur l'activité de chaque secteur (ex. transport routier, industrie, chauffage). Elles permettent de donner une idée de la contribution de chaque secteur, alors qu'une particule mesurée dans l'atmosphère n'a pas de signature quant à son origine. En d'autres termes, émissions et concentrations ne recouvrent pas les mêmes notions, c'est ce qui peut expliquer que les tendances temporelles des émissions (estimées) et des concentrations (mesurées) dans l'atmosphère diffèrent parfois assez nettement. A titre d'exemple, en Ile-de-France, les émissions estimées de PM_{10} ont chuté de 41% entre 2000 et 2010, alors que dans la même période leur concentration n'a baissé que de 7%.

Ainsi, faire baisser les émissions est évidemment hautement souhaitable ; ceci ne signifie pas nécessairement que les concentrations de l'air que nous respirons baissent dans les mêmes proportions. Cela permet d'insister sur le transport à longue distance de la pollution, particules fines et ultra-fines en particulier, par les vents et les masses atmosphériques ; et de souligner que l'air de la campagne n'est pas toujours évidemment meilleur que l'air de la ville. Même si c'est souvent le cas.

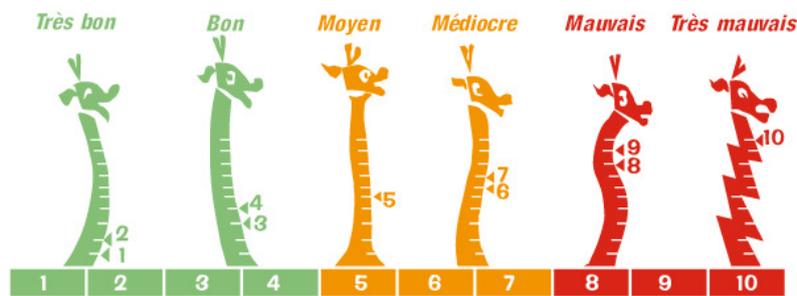


Figure 4. L'indicateur ATMO [Source : <https://www.airparif.asso.fr/reglementation/indice-qualite-air-francais>]

L'indice ATMO (Figure 4) est un indicateur synthétique, noté de 1 à 10, résumé de l'analyse en continu de quatre polluants principaux : oxydes de soufre, oxydes d'azote, ozone, PM₁₀ ; il s'applique à toutes les communes de plus de 100 000 habitants. La note la plus haute correspond à la plus forte concentration de l'un des quatre polluants. Tout citoyen peut consulter sur Internet l'indice ATMO pour sa commune ; les autorités se basent sur l'indice ATMO pour informer et alerter la population. L'indice IQA (Indice de Qualité de l'Air) est un indice ATMO simplifié, calculé pour les agglomérations de moins de 100 000 habitants. Situé sur une échelle de 1 à 10, il peut être calculé à partir d'un nombre réduit de polluants.

L'indice ATMO permet donc de signaler des pics de pollution, aux PM₁₀ par exemple comme c'est souvent le cas en hiver en période anticyclonique, ou à l'ozone en plein été. Il peut être néanmoins la source d'un malentendu. Il peut en effet laisser penser, à la population ou à certaines autorités, que la santé n'est menacée qu'à l'occasion de pics de pollution. Or on sait maintenant que la santé est affectée par une exposition prolongée aux particules en suspension sur le long terme et non pas seulement à l'occasion de pics de pollution. Un pic de pollution n'est donc que la partie émergée de l'iceberg des effets de la pollution de l'air sur la santé !

1.2. Comment étudier les effets des particules sur la santé ?

La **toxicologie** permet d'étudier les effets des polluants sur la santé à partir de modèles mathématiques ou expérimentaux, à l'échelle cellulaire, tissulaire ou parfois chez l'animal. Dans des conditions rigoureuses, on peut ainsi étudier l'effet d'un polluant spécifique sur un organe en particulier et mener ce qu'on appelle une **évaluation de risques**. L'évaluation de risques a pour objectif final de comparer le niveau de risque mesuré en laboratoire avec le niveau de risque auquel on est exposé dans la réalité, en étudiant et en quantifiant les expositions auxquelles nous sommes soumis (scénarios d'exposition). C'est à partir de ces études que les scientifiques proposent aux autorités sanitaires des « normes », c'est-à-dire en général des seuils de concentration à ne pas dépasser.

La « construction » de **normes** est relativement simple quand on a pu détecter en laboratoire un seuil d'apparition des effets ; avec l'application d'un certain nombre de facteurs dits « facteurs d'incertitude », on peut proposer un « seuil », la norme donc, pour l'homme. Les choses se compliquent quand aucun seuil n'a pu être détecté : la substance est toxique dès les plus faibles doses. C'est le cas pour la majorité des polluants atmosphériques dont les particules. Il faut donc bien comprendre qu'en matière de qualité de l'air, les normes « réglementaires » sont des seuils de concentration estimés par modélisation pour un risque dit « acceptable ». Ces normes sont donc toujours à considérer comme provisoires et comme les « moins mauvaises » possibles. Et comme nous devons respirer, le risque nul n'existe donc pas [2].

L'**épidémiologie**, c'est-à-dire l'étude des rapports entre les maladies et les facteurs susceptibles d'exercer une influence sur leur fréquence, leur distribution, leur évolution, évalue les conséquences de la pollution de l'air à l'échelle d'une population, d'une ville, d'une région, d'un pays, etc. [3].

Deux méthodes principales sont utilisées en épidémiologie pour étudier les effets de la pollution de l'air sur la santé, les séries temporelles et les études de cohorte.

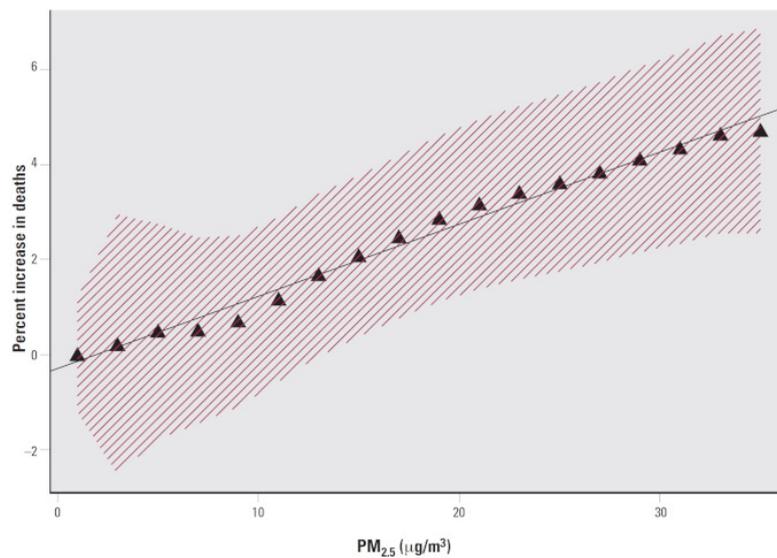


Figure 5. Exemple de série temporelle : relation entre le pourcentage d'augmentation du nombre de décès (en ordonnées) et les concentrations en PM_{2,5} (en abscisses). Une augmentation du nombre de décès est liée à une augmentation de la concentration en PM_{2,5}. [Source : Schwartz J. et al., 2002, *Envir Health Perspect*, 110, 1025-1029), avec la permission de l'auteur]

Les **séries temporelles** cherchent à établir un lien dans le temps, sur un terme assez court, entre la pollution atmosphérique et par exemple le nombre de décès, le nombre d'admissions hospitalières, la consommation de médicaments, la fréquence des pathologies cardio-pulmonaires, etc. (Figure 5). Alors qu'on s'était longtemps concentré sur les pics de pollution, les séries temporelles ont permis à partir des années 1990 d'observer les fluctuations quotidiennes de la pollution et ses effets sur la santé. L'un des intérêts des séries temporelles réside sur le fait que c'est une même population qui est observée sur, ou entre, des périodes assez courtes ; cela permet d'éliminer de fait un certain nombre de biais de confusion [4] comme le tabac, certains statuts médicaux ou socio-économiques inchangés sur la période, etc. Par contre tous les phénomènes à cinétique rapide comme une épidémie de grippe ou un changement météorologique de courte durée doivent être pris en compte évidemment.

Les **études de cohorte** vont permettre d'obtenir des résultats sur le long terme, sur plusieurs années. Une cohorte est une population de sujets qui répondent à une définition donnée précise et qui sont suivis dans le temps. Ces études consistent donc à suivre un grand nombre de personnes, plusieurs milliers, pendant des années, en prenant en compte leurs habitudes, leur environnement privé et professionnel, leur statut médical, etc., et à noter tous les événements survenant pendant l'étude, comme la survenue d'une maladie par exemple. Ce sont des études dites prospectives qui nécessitent un investissement humain et financier important.

D'autres études peuvent être conduites comme les **études cas-témoins** ou les **études de cas croisés**. Il s'agit d'études rétrospectives. Dans l'étude cas-témoins, un groupe de sujets malades est comparé à un groupe de sujets non malades, à la recherche d'un ou plusieurs facteurs expliquant la maladie. Dans l'étude de cas croisés, le sujet est son propre témoin ; on cherche alors à expliquer les changements survenus au cours du temps. En ce qui concerne l'étude de la pollution atmosphérique et compte tenu de la variété des effets observés chez l'homme, ces études n'ont pas la robustesse des études de cohorte et sont moins pratiquées.

L'épidémiologie permet aussi de mesurer ce que l'on appelle le « **risque relatif** ». C'est le rapport entre l'incidence d'une maladie survenue chez les sujets exposés au risque et l'incidence de la maladie chez sujets non exposés au même risque (l'incidence est la fréquence de nouveaux cas d'une maladie sur une période donnée, une année par exemple). On parle de risques forts et de risques faibles. Prenons l'exemple du tabagisme actif : le risque relatif est de 30 environ ; la probabilité d'avoir un cancer du poumon est 30 fois plus élevée quand on fume que quand on ne fume pas. La pollution de l'air est considérée comme un risque « faible », inférieur à 2. Il est important de bien comprendre la signification de ce terme : la probabilité de survenue des effets est plus faible mais les effets sont tout aussi graves quand ils surviennent. Cette plus faible probabilité de survenue des effets explique l'absolue nécessité d'inclure plusieurs milliers de sujets dans une étude pour pouvoir les observer et obtenir des résultats significatifs.

Enfin, la **méthode statistique** est appliquée dans tous les cas et a pour objectif principal d'éliminer tout résultat qui pourrait être dû au seul hasard. À supposer que l'on veuille étudier les effets de la pollution atmosphérique sur l'ensemble des Français. Peut-on conduire une étude de cohortes en suivant pendant des années plus de 66 millions de personnes ? Non, bien sûr. On va donc constituer un échantillon « représentatif » par tirage au sort, en respectant la composition diverse de la population ; la méthode statistique permettra de valider ou non les résultats obtenus. Les tests statistiques permettent d'établir une relation « significative » entre pollution de l'air et effets sur la santé. Mais il faut aussi établir une véritable relation de causalité [5] entre particules et effets sur la santé et non pas seulement une simple corrélation statistique [6] : comme l'avait déjà discuté Dab *et al.*

en 2001 [7], la méthodologie de la majorité des études disponibles permet d'établir cette relation de causalité. Parmi les critères les plus souvent retenus [3] il faut citer la **constance** et la **reproductibilité** – les effets sont constants et reproductibles, la **temporalité** – le délai exposition-apparition des effets est cohérent, un effet dose – réponse (ce point dépend du toxique en cause), et une **plausibilité biologique** – il y a cohérence entre les mécanismes connus de toxicité et les effets observés.

2. Mécanismes d'action

Les études toxicologiques pratiquées au niveau cellulaire et chez l'animal ont contribué à une meilleure compréhension des mécanismes d'action des particules sur l'organisme. Elles ont permis d'expliquer en grande partie les relations démontrées par les études épidémiologiques entre particules et effets sur la santé [8].

Les particules fines et ultrafines sont les particules dites respirables car elles se déposent dans les poumons jusqu'aux alvéoles. Il a été montré que la déposition particulaire dans les poumons est plus importante chez des malades porteurs de pathologies bronchiques obstructives comme l'asthme et la bronchopathie chronique obstructive. La déposition des particules est hétérogène selon les zones du poumon et il existe une grande variabilité interindividuelle. Une petite fraction des particules ultrafines peut passer dans la circulation sanguine et atteindre ainsi secondairement d'autres organes [9].

Une autre voie d'entrée potentielle des particules ultrafines est la voie olfactive ; cette voie d'entrée, connue pour certains virus, pourrait permettre aux particules ultrafines d'atteindre le cerveau [9]. Comme indiqué plus haut, les voies de pénétration digestive et cutanée font encore l'objet d'études aux résultats incomplets ou contradictoires.

La pathogénicité des particules est déterminée par leur taille, leur composition chimique, leur origine, leur solubilité et leur capacité à produire des espèces activées de l'oxygène. La composition chimique des particules, très variable, conditionne en partie leur réactivité biologique. Pour les plus fines, certains composants sont à prendre en compte particulièrement, les hydrocarbures aromatiques polycycliques et les quinones d'une part, les métaux d'autre part. Compte tenu de cette composition complexe des particules, il est encore difficile actuellement d'établir des liens de causalité précis entre tel composant des particules et tel effet sur la santé. Il a été montré que les particules ultrafines présentent une réactivité biologique plus importante que des particules plus grosses. En effet, et bien qu'elles constituent une faible masse des particules, elles sont plus nombreuses et vont représenter, dans un volume donné, une surface réactive plus importante.

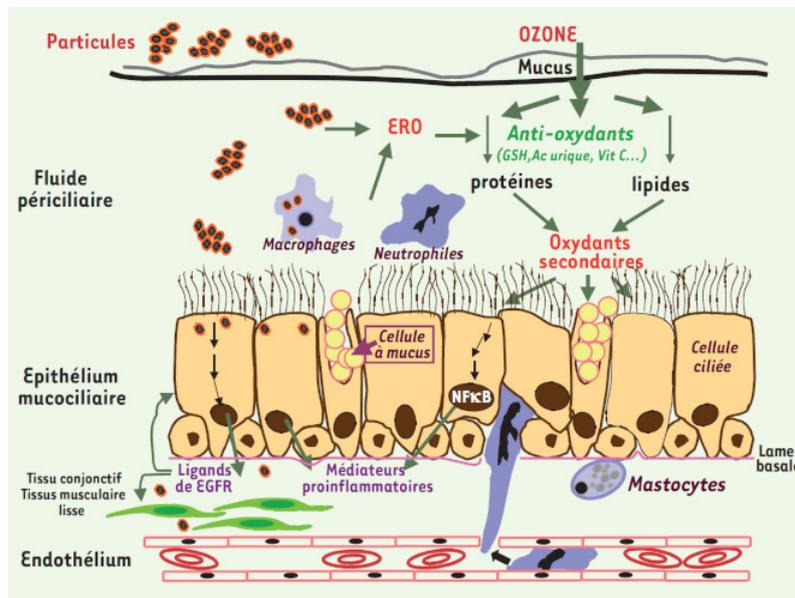


Figure 6. Production d'ERO par les particules et par l'ozone au niveau de l'épithélium bronchique (cf. texte). [Source : Baeza A. ref. [9], Avec la permission de l'auteur, © V.Danel]

Les principaux mécanismes d'action des particules sont le **stress oxydant** [9] et la **réponse inflammatoire** qui en résulte (Figure 6). Le stress oxydant (ou oxydatif), est un type d'agression des constituants de la cellule dû aux espèces réactives de l'oxygène (ERO) et aux espèces réactives oxygénées et azotées oxydantes. Les trois plus connues sont l'anion superoxyde ($O_2^{\bullet-}$), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et le radical hydroxyle (HO^{\bullet}). La production d'ERO est considérée comme un facteur clé des réponses adaptatives ou des événements toxiques induits par les particules fines et ultrafines. Il existe dans l'organisme un équilibre permanent entre substances oxydantes comme les ERO et les mécanismes de défense anti-oxydants. Lorsque les mécanismes de défense sont dépassés des réactions inflammatoires vont apparaître ; au stade ultime, la mort cellulaire peut survenir, par nécrose ou par apoptose (mort programmée). Au niveau cardio-vasculaire, **l'athérosclérose**, processus

inflammatoire au niveau de la paroi des vaisseaux sanguins, va entraîner la formation de plaques d'athérome et de dommages artériels ; on trouve là l'un des mécanismes de survenue de l'infarctus du myocarde et de l'accident vasculaire cérébral.

Comme indiqué plus haut, la composition des particules est l'un des déterminants de leur toxicité. Ainsi, les métaux de transition [10] comme le fer, le cuivre ou le vanadium, peuvent conduire à la production du radical hydroxyle très réactif. Les composés organiques entraînent la production d'ERO dans les macrophages et dans les cellules épithéliales bronchiques par l'intermédiaire des quinones et des hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Un effet « cheval de Troie » a aussi été décrit, quand des particules fixent des molécules biologiques comme des bactéries ou des allergènes.

3. Les effets des particules sur la santé

Les études sont très nombreuses et il serait bien impossible de les citer toutes. Il s'agit le plus souvent d'études incluant des dizaines à des centaines de milliers de sujets.

3.1. Mortalité

Les études de mortalité sont les plus nombreuses. Les données de mortalité pays par pays sont en effet facilement disponibles et le décès est un bon « marqueur » des effets éventuels de l'environnement sur la santé. Toutes les causes de décès, « naturelles » ou non, ont été étudiées en relation avec une exposition aux particules.

Les **études à court terme** ont pu mettre en évidence une augmentation du nombre de décès en relation avec des épisodes de pollution [11],[12],[13],[14]. Les particules les plus étudiées ont été les PM10 et les PM2,5. De grandes études Nord-américaines comme la NMMAPS (*National Morbidity, Mortality and Air Pollution Study*) conduites dans 90 grandes villes entre 1987 et 1994 ont montré une relation, faible mais constante, entre PM10 et taux de décès. En Europe, les études PPHEA et APHEA2 (*Air Pollution and Health Effects, a European Approach*) ont amené les mêmes résultats avec les PM10. L'étude APHENA, en regroupant les résultats Nord-américains et Européens, a confirmé la robustesse des méthodes d'études ainsi que les résultats. Les études sur les effets des particules ultrafines (PM0,1) sont encore peu nombreuses mais vont dans le même sens.

Toutes les études de cohorte ont également montré dès les années 1990 une augmentation de mortalité sur le **long terme** lors de l'exposition à des particules, les PM2,5 en particulier [6], [15]. Toutes causes confondues, avec toutefois une prédominance des causes cardiovasculaires et cardio-pulmonaires. On peut citer l'étude Européenne ESCAPE (*Europe Study of Cohorts for Air Pollution Effects*) qui a inclus 22 études de cohortes et plus de 300 000 sujets [16], [17]. Une autre étude a étudié l'impact à 12 ans sur le taux de décès des principaux polluants atmosphériques, à partir de concentrations mesurées sur l'ensemble du territoire de la France métropolitaine [18]. Cette étude confirme la relation entre pollution et décès à long terme, même pour des concentrations relativement faibles ; les particules (PM10 et PM2,5 dans l'étude) en sont les principales responsables, devant les oxydes d'azote et l'ozone.

Bon nombre d'études ont également montré qu'**une diminution de l'exposition amène une réduction du taux de décès**. Ceci est particulièrement important à souligner puisque on a longtemps pensé que seuls les épisodes aigus de pollution entraînaient un surcroît de risque pour la santé. On sait maintenant que les effets à long terme sont réels et probablement plus importants que les effets à court terme ; cela n'est pas sans conséquences sur les mesures de réduction des émissions et sur les normes sanitaires à adopter. Toutes les études montrent également une relation entre particules et mortalité même chez les personnes en bonne santé ; ce point, qui a fait l'objet de débats entre experts, certains pensant que seules les personnes « fragiles » étaient à risque, fait consensus maintenant. Néanmoins, certains sous-groupes ont pu être identifiés comme encore plus à risques : les diabétiques, les personnes ayant déjà eu un infarctus du myocarde, les personnes âgées et les personnes à faible statut socio-économique.

Une **évaluation quantitative d'impact sanitaire** (EQIS) (Figure 7) récente conduite par Santé Publique France a établi une relation pour la France entre exposition aux PM2,5 et mortalité [19]. Cette étude estime que 48 000 décès par an sont imputables à cette pollution, ce qui correspond à 9% de la mortalité en France. Plus précisément, et « si la pollution aux PM2,5 due aux activités anthropiques était partout la même en France que celle des communes rurales les moins polluées », 48 000 décès seraient évitables chaque année. Il s'agit bien d'une modélisation et il faut prendre ce chiffre comme une estimation du poids de la pollution aux particules sur la mortalité. Dans ce scénario, les personnes âgées de 30 ans gagneraient en moyenne 9 mois d'espérance de vie. Le gain en espérance de vie pourrait même dépasser deux ans dans l'agglomération parisienne.

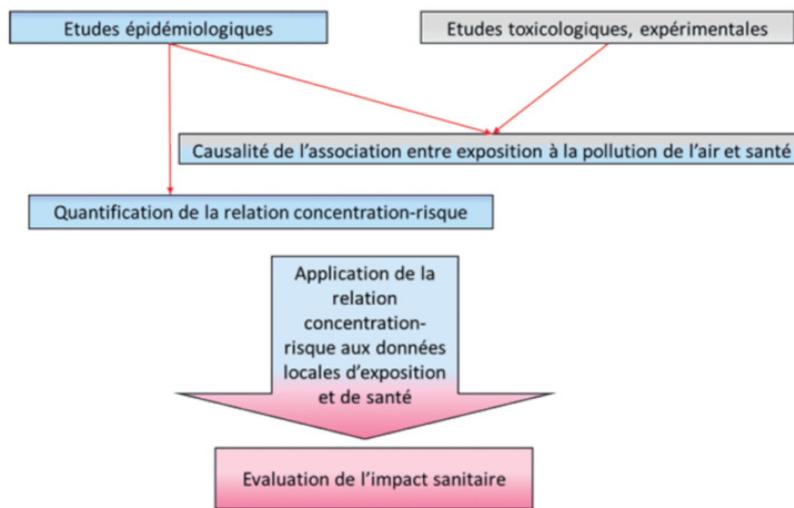


Figure 7. Les différentes étapes d'une évaluation quantitative d'impact sanitaire. [Source : © V.Danel]

Ces résultats sont cohérents avec les **estimations Européennes et internationales**. Ainsi, l'Agence Européenne de l'Environnement a estimé dans son rapport 2018 [20] que 35 800 morts prématurés [21] sont dus chaque année à l'exposition au PM2,5 en France, chiffre beaucoup plus important que l'impact des oxydes d'azote et de l'ozone. Ce chiffre est de 391 000 pour l'ensemble de l'Union Européenne (28 pays). L'OMS estime à 7 millions environ le nombre de personnes qui meurent chaque année dans le monde à cause de l'exposition aux particules fines [22].

En résumé, toutes les études à court et long terme montrent une relation significative de causalité entre exposition aux particules et mortalité.

3.2. Les affections pulmonaires

Compte tenu de la pénétration pulmonaire des particules, leurs effets pulmonaires peuvent apparaître comme intuitivement les plus attendus. Là encore, le nombre d'études sur ce sujet est considérable [6]. La majorité des études prennent en compte les PM10 et les PM2,5 ; peu d'études portent sur les PM 0,1, mais leurs résultats vont dans le même sens.

L'attention des scientifiques a beaucoup porté sur les **jeunes enfants** ; leurs poumons sont encore immatures et leur système de défense immunitaire est encore en évolution. De plus, les enfants ont une ventilation par minute plus élevée que les adultes et sont souvent impliqués dans des activités de plein air. On sait par ailleurs que l'état des poumons du jeune enfant est un bon facteur pronostique de l'état des poumons à l'âge adulte. Malgré des résultats hétérogènes et la mise en évidence de quelques biais d'interprétation, la majorité des études à court terme montre une relation entre une exposition aux PM2,5 et la survenue d'affections pulmonaires et de la maladie asthmatique. Il est admis également que les enfants asthmatiques sont beaucoup plus sensibles aux effets des particules que les enfants en bonne santé. Les études à long terme confirment une relation entre les particules fines et la fonction pulmonaire, le développement des poumons, la survenue de symptômes respiratoires.

Il a été aussi montré chez l'enfant qu'une amélioration de la qualité de l'air entraîne une baisse de la fréquence des admissions hospitalières et des pathologies respiratoires. Les études chez **l'adulte** sont moins nombreuses mais toutes montrent la survenue d'effets pulmonaires en relation avec une exposition aux particules, avec en particulier le développement de bronchopathies chroniques obstructives.

La survenue de **cancers du poumon** en lien avec la pollution de l'air, et les particules fines en particulier, fait maintenant l'objet d'un consensus scientifique. Le caractère cancérigène pour l'homme de la pollution de l'air, et des particules, a été acté par le *Centre International de Recherche sur le Cancer* (CIRC) de l'OMS en 2013 [23].

3.3. Les affections cardiovasculaires

De façon peut être inattendue, c'est le système cardio-vasculaire qui semble être le plus menacé face à la pollution de l'air et aux particules fines. Toutes les sociétés savantes de cardiologie mettent régulièrement en garde contre le surcroît de risques cardiaques lié à la pollution. Un bon nombre d'études à court terme ont ainsi montré une relation très significative entre exposition aux particules, PM10 et PM2,5 et fréquence des hospitalisations pour raisons cardio-vasculaires.

Les études à long terme ont porté en particulier sur la survenue d'une **insuffisance cardiaque** ou d'un **infarctus du myocarde**. D'autres études ont porté sur des modifications plus modestes de la physiologie cardiaque, comme des modifications du rythme cardiaque ou la survenue d'une ischémie myocardique transitoire ; ces atteintes sont néanmoins souvent annonciatrices de

complications plus sévères. Compte tenu de leurs difficultés de mise en œuvre, ces études apportent toutefois des résultats assez hétérogènes, aucune étude ne permettant de conclure de façon définitive. Toutes convergent cependant clairement vers l'existence d'effets délétères des particules sur le système cardio-vasculaire.

Comme on l'a vu précédemment, l'un des mécanismes d'action des particules est l'inflammation. Cet effet est très probablement à l'origine d'une vasoconstriction vasculaire et de la survenue possible d'une hypertension artérielle. Mais les résultats des études portant sur hypertension artérielle et particules sont pour la plupart peu significatifs et parfois contradictoires ; là aussi l'étude « définitive », celle qui permettrait de conclure, n'existe pas.

En ce qui concerne les particules ultra-fines, et même si la majorité des experts sont en faveur d'une relation PM_{0,1} et effets cardio-vasculaires, trop peu d'études sont actuellement disponibles pour conclure.

3.4. Les affections neurologiques

Quelques études à court terme ont montré une relation entre particules fines et survenue d'un **accident vasculaire cérébral**, ischémique en particulier, après un épisode aigu de pollution. Trop peu d'études à long terme sont disponibles pour conclure sur ce sujet.

Un petit nombre d'études ont porté sur la survenue **d'affections neurodégénératives** et de **troubles cognitifs** à long terme. On sait en effet que des processus inflammatoires jouent un rôle important dans la survenue de la maladie d'Alzheimer ou de Parkinson. Les toutes premières études ont porté sur un modèle animal de chiens sauvages vivant en milieu particulièrement pollué au Mexique ; des lésions cérébrales d'origine inflammatoire ont été mises en évidence chez ces chiens. Même si certaines études chez l'homme vont dans le même sens d'une relation entre exposition aux particules et affections neurodégénératives, il est encore tôt pour conclure définitivement.

3.5. Troubles de la reproduction, troubles périnataux

En 2005, l'OMS avait déjà attiré l'attention sur les effets de la pollution de l'air sur le déroulement de la grossesse et le fœtus. La responsabilité de la pollution de l'air, et des particules en particulier, sur la survenue de **naissances prématurées, de faibles poids de naissance, d'anomalies fœtales, de la mortalité infantile** a été montré par quelques études. Mais on sait que la sensibilité du fœtus varie en fonction de la période de la grossesse et ceci rend la comparaison des études difficiles. D'autres biais d'interprétation comme le statut socio-économique ont été discutés. Il est également difficile de conclure à de possibles effets sur le long terme d'une exposition du fœtus pendant la grossesse. Même si un faisceau d'arguments rend les particules responsables d'effets délétères, il est actuellement impossible de conclure définitivement.

3.6. Marqueurs biologiques

De nombreuses études à court terme ont tenté d'établir une relation entre certains paramètres biologiques sanguins, marqueurs de l'inflammation et de la coagulation en particulier, et l'exposition aux particules fines. On peut citer pour les plus connus la CRP (C-reactive-protéine, marqueur de l'inflammation), le taux de leucocytes (globules blancs), le nombre de globules rouges et le taux d'hémoglobine, le taux de fibrinogène, etc. Il est tentant en effet d'essayer de trouver LE marqueur sanguin facilement mesurable qui témoignerait d'une exposition aux particules. Même si certains marqueurs de l'inflammation semblent être en relation avec une exposition aux particules, les résultats sont trop parcellaires et hétérogènes pour conclure.

En résumé, le marqueur biologique d'une exposition aux particules, s'il existe, n'a pas encore été mis en évidence actuellement. Les études continuent et les progrès des techniques analytiques permettront sans doute d'avancer sur ce sujet dans les années à venir.

4. Normes sanitaires

Les **normes sanitaires** sont, comme indiquées au début de cet article, le résultat d'estimations et de modélisations. Elles ne sont pas les mêmes partout dans le monde, mais on peut citer les principales en ce qui nous concerne, celles de l'OMS et celles de l'Union Européenne [24].

	Normes Européennes (valeurs limites)	Va
PM _{2,5}	<ul style="list-style-type: none"> ● Moyenne annuelle : 25 µg/m³ 	<ul style="list-style-type: none"> ● Moyenn ● Moyenn
PM ₁₀	<ul style="list-style-type: none"> ● Moyenne annuelle : 40 µg/m³ ● Moyenne/24 h : 50 µg/m³ ● À ne pas dépasser plus de 35 jours/an 	<ul style="list-style-type: none"> ● Moyenn ● Moyenn

On peut remarquer que les **valeurs guides** de l'OMS sont beaucoup plus protectrices que les normes Européennes. De nombreuses agglomérations dépassent régulièrement en France les normes Européennes de qualité de l'air. Un rapport assez sévère de la cour des comptes Européenne a pointé l'insuffisance des mesures de réduction de la pollution et le non-respect dans plusieurs pays, dont la France, des normes sanitaires [\[25\]](#).

Des **seuils d'information et de recommandation** [\[26\]](#), ainsi qu'un seuil d'alerte [\[27\]](#), existent en France pour les PM10 ; respectivement de 50 µg/m³ et 80 µg/m³. Il a été estimé en 2017 que si toutes les communes de France respectaient la valeur guide de l'OMS pour les PM2,5, environ 17 712 décès seraient évités et le bénéfice économique associé serait de l'ordre de 53 milliards d'euros [\[28\]](#).

5. Coût socio-économique

Une commission d'enquête sénatoriale sur le **coût économique et financier** de la pollution de l'air l'a estimé en 2015 au total entre 70 et 100 milliards d'euros [\[29\]](#). Le seul coût de la pollution de l'air pour le système de santé Français est évalué chaque année entre 1 à 2 milliards d'euros, auquel s'ajoutent les dépenses relatives aux rentes versées au titre des maladies professionnelles d'un montant d'un milliard d'euros. Les dépenses liées à la perte de bien-être pour la société, engendrées par les pathologies et les décès prématurés, sont plus difficiles à chiffrer précisément ; la fourchette d'estimation est assez large allant jusqu'à un maximum de 100 milliards d'euros.

En 2018, le groupe de travail sénatorial sur la pollution de l'air a rappelé que la pollution atmosphérique constituait une urgence sanitaire et un enjeu socio-économique majeur.

La plupart des spécialistes s'accordent à dire que les dépenses qui seraient engendrées par la mise en œuvre de mesures drastiques de réduction de la pollution seraient très inférieures au coût socio-économique engendré par cette même pollution. On peut citer à ce sujet Janez Potocnik, ancien commissaire Européen à l'Environnement (2009-2014) et fervent avocat de mesures de diminution de la pollution : « Si vous pensez que l'économie est plus importante que l'environnement, essayez de retenir votre souffle pendant que vous comptez l'argent »⁹.

6. Messages à retenir

Personne ne conteste les effets de la pollution de l'air sur la santé

Parmi les différents polluants de l'air, les particules fines en suspension sont les principales responsables des effets de la pollution sur la santé.

On a longtemps insisté sur les effets délétères des pics de pollution. On sait maintenant que la pollution à long terme est probablement encore plus grave que les pics de pollution.

La relation de causalité entre exposition aux particules et mortalité a été établie de façon formelle par de très nombreuses études. Il en est de même pour les effets pulmonaires et cardio-vasculaires.

Les effets neurologiques, les effets sur la grossesse et la reproduction, font encore l'objet de nombreuses études. Quelques études indiquent déjà un effet probable des particules, sans pouvoir encore conclure définitivement.

Les particules PM10 et PM2,5 ont été les plus étudiées. Un champ de recherche considérable est ouvert pour étudier les effets des nanoparticules PM0,1.

Le coût socio-économique de la pollution de l'air est considérable.

Trop de pays, dont la France, ne respectent pas les actuelles normes Européennes de la qualité de l'air.

Références et notes

Image de couverture. [Source : © Renée Grillot]

[1] Thompson JE (2018). *Airborne particulate matter. Human exposure and health effects*. Journal of Occupational and Environmental Medicine, 60, 5 : 392-416.

[2] [www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

[3] Ledrans M (2008). *L'épidémiologie, un outil pour la veille et la décision en santé environnementale*. Environnement, Risques & Santé, 7, 21-26.

[4] Biais de confusion : un ou plusieurs autres phénomènes que le seul phénomène étudié peuvent expliquer la maladie. Ce biais doit être pris en compte dans l'étude.

[5] Causalité : l'exposition aux particules fines entraîne bien des effets sur la santé

[6] Corrélation : deux phénomènes évoluent de façon parallèle mais sans pouvoir formellement établir que l'un entraîne l'autre

[7] Dab W. et al. (2001) *Pollution atmosphérique et santé : corrélation ou causalité ? Le cas de la relation entre l'exposition aux particules et la mortalité cardio-pulmonaire*. Journal of the Air & Waste Management Association, 51, 2013-218.

[8] Marano F. (2012). *Mécanismes d'action des particules atmosphériques fines et ultrafines*. Pollution atmosphérique (numéro spécial), 20-22.

[9] Baeza A (2007). *Pollution atmosphérique et maladies respiratoires, un rôle central pour le stress oxydant*. Médecine Sciences, 23, 497-501.

[10] https://fr.wikipedia.org/wiki/Métal_de_transition

[11] Ruckerl R. et al. (2011) *Health effects of particulate air pollution : a review of epidemiological evidence*. Inhalation Toxicology, 23 (10), 555-592.

[12] Kim K.-H. et al. (2015). *A review on the human health impact of airborne particulate matter*. Environment International, 74, 136-143.

[13] Kelly FJ et al. (2015). *Air pollution and public health : emerging hazards and improved understanding of risk*. Environ Geochem Health, 75, 631-649.

[14] Atkinson RW et al. (2014) *Epidemiological time series studies of PM2,5 and daily mortality and hospital admissions : a systematic review and meta-analysis*. Thorax, 69, 660-665.

[15] Burnett R et al. (2018) *Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 115 (38), 9592-9597.

[16] Beelen R et al. (2014) *Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality : an analysis of 22 European*

[17] Mannucci PM *et al.* (2015) *Effects on health of air pollution : a narrative review*. *Internal Emergency Medicine*, 10(6), 657-662

[18] Sanyal S *et al.* (2018) *Long-term effect of outdoor air pollution on mortality and morbidity : a 12-year follow-up study for metropolitan France*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15 (2487), 1-8

[19] Pascal M *et al.* (2016) *Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de réduction de la pollution atmosphérique*. Saint-Maurice : Santé publique France ; 158 p.

[20] <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2018>

[21] Mort prématurée : le décès survient avant l'âge attendu du décès compte tenu de l'espérance de vie du pays concerné. Décès qui peut être évité si sa cause est supprimée.

[22]

<https://www.who.int/fr/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking>

[23] CIRC monographie (2013) *The carcinogenicity of outdoor air pollution*. *Lancet*, 14, 1262-1263

[24] Annesi-Maesano I (2017) *The air of Europe : where are we going ?* *European Respiratory Review*, 26, 1-5

[25] Rapport spécial n° 23/2018: Pollution de l'air: notre santé n'est toujours pas suffisamment protégée. Cour des comptes Européenne. <https://www.eea.europa.eu/fr/Pages/DocItem.aspx?did=46723>

[26] Seuil d'information et de recommandation : un niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine des groupes particulièrement sensibles de la population rendant nécessaires des informations immédiates et adéquates

[27] Seuil d'alerte : un niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé de l'ensemble de la population ou de dégradation de l'environnement justifiant l'intervention de mesures d'urgence

[28] www.amse-aixmarseille.fr/actualite/pollution-de-lair

[29] Sénat 2015 « *Pollution de l'air : le coût de l'inaction* ». Rapport n° 610 (2014-2015) de Mme Leila AÏCHI, fait au nom de la CE coût économique et financier de la pollution de l'air, déposé le 8 juillet 2015.

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteur** : DANIEL Vincent (2019), Particules en suspension dans l'air : leurs effets sur la santé, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : <http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=9222>

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.
