

Augmentation des aérosols dans l'atmosphère

UNE LIMITE PLANÉTAIRE NON QUANTIFIÉE, MAIS AUX ENJEUX CLIMATIQUES ET SANITAIRES MAJEURS

Les aérosols désignent des particules solides ou liquides en suspension dans l'air, dont la taille peut varier de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres (µm). Si la majorité d'entre eux est d'origine naturelle, une quantité croissante est rejetée dans l'atmosphère par les activités humaines depuis l'ère préindustrielle. Cette augmentation des aérosols dans l'atmosphère constitue un enjeu majeur pour le climat et la santé humaine.

Une partie des aérosols atmosphériques est d'origine primaire : les particules sont rejetées directement dans l'air par des sources naturelles (érosion des sols, embruns marins, pollens, cendres volcaniques, etc.) ou par des activités anthropiques (combustion de combustibles fossiles ou de biomasse (*voir glossaire*), activités mécaniques avec création de particules généralement plus grossières issues des labours, moissons, chantiers, etc.). Une autre partie des aérosols est d'origine secondaire : ils ne sont pas émis directement dans l'atmosphère mais se forment par réactions chimiques entre des gaz ou particules déjà présents dans l'air.

Les aérosols sont notamment caractérisés par la taille et la composition chimique des particules qui les constituent. Différentes familles de composés chimiques peuvent être

identifiées dans les particules : une fraction organique d'origine primaire, incluant le carbone suie, issue de combustions incomplètes d'énergies fossiles ou de biomasse ; une fraction organique d'origine secondaire provenant de l'oxydation de composés organiques volatils rejetés par les activités humaines et la végétation ; des espèces inorganiques primaires (sels de mer et poussières minérales) ; des espèces inorganiques secondaires (principalement le nitrate, le sulfate non émis par les embruns marins et l'ammonium).

Dans le cadre des travaux sur les limites planétaires, la variable de contrôle retenue est « l'épaisseur optique d'aérosols » (AOD), c'est-à-dire le degré d'opacité de l'atmosphère due à la concentration d'aérosols. Compte tenu de la variabilité spatio-temporelle des particules, des sources et des impacts, l'identification d'un seuil global n'a pas été possible à ce stade. Partant du cas de la mousson d'Asie du Sud-Est, phénomène particulièrement sensible à la présence d'aérosols dans l'atmosphère, les chercheurs ont proposé une limite locale spécifique à la zone Asie du Sud-Est (Steffen *et al.*, 2015). Le seuil proposé pour l'AOD est de 0,25 (le niveau naturel de l'AOD pour cette région se situe entre 0,15 et 0,4). En 2015, l'épaisseur optique moyenne d'aérosols mesurée en Asie du Sud-Est est estimée à 0,3, ce qui la situe dans la zone d'incertitude définie par les chercheurs (entre 0,25 et 0,5 AOD) - (*tableau 10*).

Tableau 10 : variable de contrôle et limite planétaire pour l'augmentation des aérosols dans l'atmosphère

Variable de contrôle	Seuil et zone d'incertitude	Valeur mondiale
Profondeur ou épaisseur optique d'aérosols (AOD)	Aucun seuil planétaire défini, en l'absence de connaissances suffisantes Zone Asie du Sud-Est : seuil proposé de 0,25 AOD (zone allant de 0,25 à 0,5)	Absence de valeur moyenne, la variabilité étant trop forte dans l'année et sur l'ensemble de la planète. Moyenne annuelle de l'AOD en Asie du Sud-Est : 0,3

Source : d'après Steffen *et al.*, 2015

DES ENJEUX SUR LE CLIMAT ET SUR LA SANTÉ DE L'HOMME ET DES ÉCOSYSTÈMES

Les aérosols ont une influence directe et indirecte sur le climat, en perturbant le bilan radiatif de la Terre. Certaines particules constituées principalement de sulfates ou de nitrates réfléchissent une partie du rayonnement solaire et ont un effet refroidissant. D'autres, comme le carbone suie,

absorbent les rayons du soleil et réchauffent l'atmosphère. De manière indirecte, les aérosols influent également sur le climat en contribuant à la formation des nuages. Malgré l'amélioration des modèles et des mesures de surveillance, il est encore difficile d'estimer l'effet global des aérosols sur le climat. Ils seraient à l'origine de changements dans le régime des précipitations locales, notamment des pluies au Sahel dans les années 1950-1980 et des moussons en Asie³⁵.

³⁵ Selon les dernières conclusions du Giec (rapport 2021) : « La fourchette probable de l'augmentation totale de la température à la surface du globe due à l'activité humaine entre 1850-1900 et 2010-2019 est de 0,8 °C à 1,3 °C, la meilleure estimation étant de 1,07 °C. Il est probable que les GES bien mélangés ont contribué à un réchauffement de 1,0 °C à 2,0 °C, d'autres facteurs humains (principalement les aérosols) ont contribué à un refroidissement de 0,0 °C à 0,8 °C, les facteurs naturels ont changé la température de la surface de la planète de -0,1 °C à +0,5 °C et la variabilité interne l'a modifiée de -0,2 °C à +0,2 °C » (A.1.3).
« Les diminutions des précipitations terrestres de mousson à l'échelle mondiale entre les années 1950 et 1980 sont en partie attribuées aux émissions d'aérosols d'origine humaine dans l'hémisphère Nord, mais les augmentations observées depuis lors résultent de l'augmentation des concentrations de GES et de la variabilité interne décennale à pluri-décennale (confiance moyenne). En Asie du Sud, en Asie de l'Est et en Afrique de l'Ouest, l'augmentation des précipitations de mousson due au réchauffement dû aux émissions de GES a été contrebalancée par une diminution des précipitations de mousson due au refroidissement dû aux émissions d'aérosols d'origine humaine au cours du XX^e siècle (confiance élevée). Les augmentations des précipitations de mousson en Afrique de l'Ouest depuis les années 1980 sont en partie dues à l'influence croissante des GES et à la réduction de l'effet refroidissant des émissions d'aérosols d'origine humaine en Europe et en Amérique du Nord (confiance moyenne) ». (A.3.3)

Les effets sanitaires des aérosols varient selon la taille des particules qui les constituent et selon leur composition chimique. Les particules dites grossières (diamètre compris entre 2,5 et 10 μm) impactent la santé respiratoire et sont retenues dans la région naso-pharyngée. Les particules fines, de diamètre inférieur ou égal à 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$) et en particulier celles inférieures à 1 μm , peuvent pénétrer très profondément dans l'appareil respiratoire et même passer dans la circulation sanguine. Ces particules fines peuvent causer des maladies cardiovasculaires notamment.

Les particules grossières correspondent majoritairement à des particules primaires d'origine naturelle, ainsi qu'à certains types de particules secondaires. Les particules fines sont essentiellement constituées de particules primaires d'origine anthropique et de certaines particules secondaires.

En 2019, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) estime à 4,2 millions le nombre de décès prématurés provoqués par la pollution de l'air extérieur dans les villes et les zones rurales. D'après la dernière estimation publiée en 2021 par Santé publique France, près de 40 000 décès de causes non accidentelles seraient attribuables chaque année à une exposition des personnes âgées de 30 ans et plus aux $\text{PM}_{2,5}$ en France.

Les aérosols ont également des impacts sur le bâti avec l'encrassement des façades, ainsi que sur la productivité des végétaux en entravant la photosynthèse.

LES POLITIQUES ET ACTIONS EN FAVEUR DE LA QUALITÉ DE L'AIR

Même si les effets des aérosols sur le climat sont ambivalents, leur réduction a un effet globalement positif sur le climat, puisque leurs émissions sont liées à des activités anthropiques également émettrices de gaz à effet de serre. D'autre part, leur réduction a un impact positif sur la santé humaine et la santé des écosystèmes.

Au niveau international, l'OMS a publié dès 1987 des lignes directrices relatives à la qualité de l'air. Celles-ci, revues en 2005 et en 2021, définissent des niveaux de concentrations recommandés pour les particules en suspension, comme l'ozone, le dioxyde d'azote et le dioxyde de soufre. Ces valeurs constituent la base scientifique pour protéger la santé des populations des effets de la pollution atmosphérique et contribuer à éliminer ou réduire au maximum les polluants atmosphériques reconnus ou soupçonnés être dangereux pour la santé ou le bien-être de l'homme. Elles sont documentées par les données médicales, épidémiologiques et toxicologiques.

Dans le cadre de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance, le Protocole de Göteborg, relatif à la réduction de l'acidification, de

l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique, fixe dans sa version amendée en 2012 des objectifs de réduction des émissions pour 2020 de cinq polluants, dont les $\text{PM}_{2,5}$. Ce protocole incite les Parties à la Convention à mettre en œuvre en priorité des mesures de réduction des émissions de particules qui diminueraient également les émissions de carbone suie de manière significative.

Au niveau européen, deux directives établissent la législation sur la qualité de l'air :

- la directive 2008/50/CE pour la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe, qui concerne le dioxyde de soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde d'azote (NO_2), les particules de diamètre inférieur ou égal à 10 μm et de diamètre inférieur ou égal à 2,5 μm (PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$), le monoxyde de carbone (CO), le benzène, le plomb et l'ozone ;
- la directive 2004/107/CE concernant l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant.

Ces deux directives assurent un cadre commun pour l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air, ainsi que pour l'information du public. Elles fixent également des concentrations maximales dans l'air pour certaines substances polluantes dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire leurs effets nocifs sur la santé humaine et les écosystèmes. Dans le cadre de la mise en œuvre du Pacte vert, la Commission européenne a lancé des travaux de révision de ces directives, avec la publication d'une proposition de directive en octobre 2022. La Commission propose ainsi de fusionner les directives de 2004 et 2008, et de définir des normes de qualité de l'air plus ambitieuses.

Les émissions de polluants dans l'air sont également réglementées au niveau européen, notamment par la directive 2016/2284. Cette dernière impose aux États membres des objectifs de limitation des rejets dans l'air de certains polluants : des plafonds d'émission sont ainsi fixés à chaque pays pour cinq polluants (SO_2 , NO_x , composés organiques non méthaniques, $\text{PM}_{2,5}$ et ammoniac), à respecter pour 2020 et 2030. Des réglementations sectorielles (émissions industrielles, qualité des carburants, émissions des transports, etc.) sont également élaborées dans ce cadre.

En France, la baisse des émissions, amorcée il y a plusieurs années à la suite de la mise en place de stratégies et plans d'action tels que le plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (PREPA), a permis une amélioration globale de la qualité de l'air. Les concentrations moyennes annuelles de polluants diminuent et les dépassements des seuils réglementaires de qualité de l'air pour la protection de la santé affectent des zones moins étendues et moins nombreuses.

Le PREPA, adopté en décembre 2022, précise la stratégie de l'État pour réduire les émissions de polluants atmosphériques au niveau national et pour répondre aux exigences européennes. Il combine des mesures réglementaires, fiscales et incitatives, ainsi que des outils de planification à destination des collectivités et de sensibilisation des acteurs. Il décline des actions par grand secteur d'activité (industrie, résidentiel tertiaire, transports et agriculture).

Dans le secteur des transports, le PREPA organise notamment la mise en place de zones à faibles émissions dans les agglomérations de plus de 150 000 habitants, obligation inscrite dans la loi Climat et Résilience de 2021. Ces zones à faibles émissions, instaurées par la loi d'orientation des mobilités de 2019, ont pour objectif de réduire la circulation des véhicules les plus polluants, notamment en matière de NO₂. Des zones à faibles émissions ont déjà été mises en place dans une douzaine de pays européens, avec des résultats encourageants : à la suite de l'instauration d'une zone à faibles émissions, des baisses de concentrations de tous les polluants ont été enregistrées, et vont jusqu'à - 29 % pour le NO₂, - 59 % pour le carbone suie, ou - 23 % pour les PM₁₀ (Ademe, 2020).

Les collectivités peuvent également favoriser le développement d'activités non polluantes, notamment à travers l'élaboration de plans de protection de l'atmosphère, qui s'imposent aux agglomérations de plus de 250 000 habitants. Ces plans, qui doivent s'articuler avec les

plans mobilités et les plans climat-air-énergie territoriaux (PCAET), peuvent par exemple permettre aux collectivités de favoriser les déplacements actifs comme le vélo ou la marche, ainsi que les transports en commun.

Les collectivités peuvent également contribuer financièrement au développement d'activités moins polluantes. Ainsi, dans le cadre du « Fonds Air Bois », certaines collectivités, en collaboration avec l'Ademe, fournissent une aide financière aux particuliers souhaitant remplacer un appareil de chauffage au bois non performant par un appareil très performant en matière de rendement et de limitation des particules fines.

POUR ALLER PLUS LOIN

- Ademe, 2020. *Zones à faibles émissions (low emission zones) à travers l'Europe*.
- CGDD, 2022. *Bilan de la qualité de l'air extérieur en France en 2021*. Datalab, octobre 2022, 52 p.
- Giec, 2021. *Changement climatique 2021, Les bases scientifiques physiques*. Résumé à l'intention des décideurs.
- OMS, 2022. *Pollution de l'air ambiant (extérieur)*.
- Steffen, W. et al., 2015. *Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet*. *Science* 347 (6223): 1259855–55.