

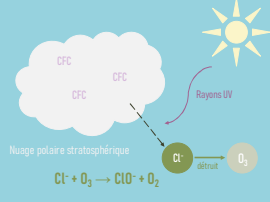
Vous avez dit aérosol?

Attention ! Les aérosols, ce ne sont pas les bouteilles de déodorant ou tout autre pulvérisateur de la vie quotidienne (abus de langage)...

Les aérosols, ce sont :

- Particules en suspension dans l'air qui présentent une vitesse de chute négligeable.
- Solides (poussières) ou liquides (embruns).
- Plus ou moins grosses (de quelques dixièmes de nanomètre à une centaine de micromètres).

Remarque : les nuages sont classés à part par commodité, et les flocons de neige sont trop gros pour être des aérosols (4 à 5mm de diamètre).



La couche d'ozone, située à environ 20km d'altitude, absorbe les rayonnements ultraviolets du soleil qui sont nocifs à la faune et la flore sur Terre.

A propos des aérosols comme on l'entend en langage courant...

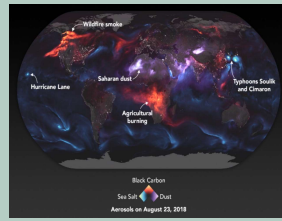
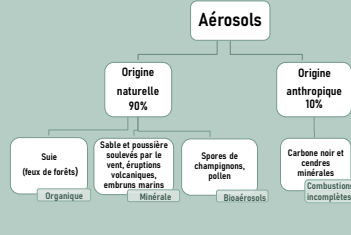
Les chlorofluorocarbones (CFC), qui étaient utilisés comme gaz propulseurs dans les bombes aérosols se sont avérés être en partie responsables de la destruction de la couche d'ozone. A cause de leur durée de vie très longue, ces gaz pouvaient atteindre la stratosphère où ils entrent en contact avec des rayonnements ultraviolets formant des espèces chlorées qui vont ensuite réagir avec l'ozone pour le détruire (et un seul atome de chlore peut détruire plusieurs centaines de milliers de molécules d'ozone).

Interdits en 1987, ils sont remplacés, pour de nombreuses applications, par les hydrofluorocarbones (HFC) qui sont eux de puissants gaz à effet de serre...

D'où viennent-ils ?

Les aérosols primaires : émis directement dans l'atmosphère sous forme liquide ou solide depuis les sources d'émission, il s'agit donc en général d'aérosols d'origine naturelle (embruns, volcans, etc).

Les aérosols secondaires : générés directement dans l'atmosphère et issus de la condensation de vapeurs ou passés par une conversion gaz-particules. Ce dernier mode est initié par des oxydants atmosphériques (dont l'ozone) et nécessite des oxydes d'azote (NOx, puissants gaz à effet de serre issus de la combustion d'énergies fossiles). Les sulfates et aérosols organiques sont représentatifs de cette catégorie.



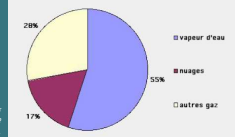
Credit: NASA/Joshua Stevens/Adam Weiland

L'effet de serre

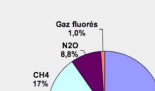
« La Terre reçoit de l'énergie de la part du Soleil sous forme de lumière visible qui est absorbée et réchauffe la Terre. « La Terre étant un corps noir, elle réémet un rayonnement IR. « Ce rayonnement est en partie absorbé et redirigé par des gaz présents dans l'atmosphère (GES).



L'effet de serre naturel a contribué à la vie sur Terre : il a permis à la température moyenne de passer de -10° C à 15° C !



Répartition des contributions à l'effet de serre « naturel » des différents gaz. Notons que la part de « l'autre gaz » est essentiellement du CO2.



Répartition des émissions humaines de gaz à effet de serre par gaz en 2014, en pourcentage du total.

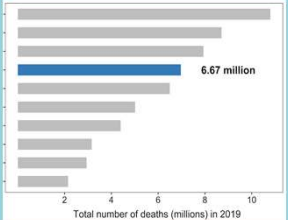
Le problème de l'effet de serre est arrivé dès lors que l'homme a commencé à rejeter de grandes quantités de GES dans l'atmosphère, ce qui a modifié l'équilibre préexistant.

Deci à pour conséquence une élévation de la température moyenne à la surface de la Terre, qui a de nombreux impacts : augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes, fonte des glaces, diminution des rendements agricoles et bien d'autres encore.

Source : Jancovici, JM (2007), Quels sont les gaz à effet de serre ? Jean-Marc Jancovici, <http://jancovici.com/changement-climatique/gaz-a-effet-de-serre-et-cycle-du-carbone/queles-sont-les-gaz-a-effet-de-serre-que-sont-leurs-contributions-a-l-effet-de-serre>

Un impact sur la santé non négligeable

Présents autour de nous, les aérosols viennent atteindre particulièrement l'appareil respiratoire, mais peuvent également être à l'origine d'accidents vasculaires cérébraux ou de pathologies cardiaques, faisant de l'exposition à la pollution atmosphérique particulière constituée la 4e cause de mortalité précoce dans le monde devant notamment l'alcool, une mauvaise alimentation et le manque d'activité physique, provoquant la mort de 4,1 millions de personnes par an.



1. High systolic blood pressure
2. Tobacco
3. Dietary risks
4. Air pollution
5. High fasting plasma glucose
6. High body-mass index
7. High LDL
8. Kidney dysfunction
9. Malnutrition
10. Alcohol use

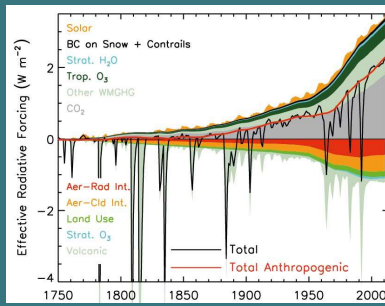
Global ranking of risk factors by total deaths from all causes in 2019. Source : (2020) Global Health Impacts of Air Pollution Site of Global Air. <https://www.who.int/global-air-pollution/global-health-impacts>

Quels modes d'action ?

Les aérosols peuvent contribuer à la modification du bilan radiatif via deux phénomènes opposés :

La diffusion du rayonnement solaire dans toutes les directions, y compris vers le haut, ce qui rend la planète plus réfléchissante vue de l'espace et entraîne un forçage radiatif local négatif (c'est-à-dire un refroidissement).

L'absorption du rayonnement solaire qui absorbit la planète et induit un forçage radiatif local positif après redistribution de l'énergie thermique dû au brassage atmosphérique.



Source : Boucher, O (2010). Comment les aérosols atmosphériques modifient-ils le climat ? Le climat en questions. <https://www.climat-en-questions.fr/reponses/mecanismes-evolution/aerosols-climat-par-olivier-boucher>

Diffusant ou absorbant ?

Pour les aérosols de façon générale :

→ Tous les aérosols diffusent et absorbent dans des proportions variables selon leurs propriétés optiques et les conditions environnementales, mais tendent généralement vers un forçage radiatif négatif.

→ Etude difficile du fait de leur distribution inhomogène, leur courte durée de vie et la variabilité du climat et des processus mis en jeu.

Autres effets indésirables liés aux aérosols :

- Un exemple problématique sont les traînées d'avions qui libèrent de la vapeur d'eau et du CO2 coincés entre atmosphère et stratosphère (deux GES notables). Mais ces traînées libèrent aussi des aérosols qui agissent comme noyaux de condensation pour la formation de gouttelettes d'eau et donnent ainsi naissance à des cirrus artificiels qui contribuent grandement, mais par des processus encore mal connus, au réchauffement de la planète.
- Certains aérosols (en particuliers les aérosols sulfatés, soufrés ou azotés) participent au trou dans la couche d'ozone en jouant le rôle de catalyseur pour la réaction globale suivante :



Source : La chimie de l'ozone stratosphérique Météo France. <http://education.meteo.fr/ressources/thematiques/l-evolution-du-climat/les-effets-de-la-couche-d-ozone/les-effets#>

- Les aérosols absorbants ont aussi comme effet de réchauffer les nuages par diffusion de chaleur. Ceci favorise l'évaporation, plutôt que la condensation de l'eau dans les nuages. La durée de vie des nuages diminue, d'où un effet de réchauffement global sur le climat.

Source : Owenille Guyot, Caractérisation des propriétés microphysiques des nuages et de l'interaction aérosol-nuage en Arctique Sciences de la Terre. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2016.

Aérosols absorbants

L'aérosol absorbant principal est le carbone suie, émis lors de combustions (essence, chauffage, usines de production électrique...). De plus, il peut se déposer sur la neige ce qui l'assombrit et diminue donc l'albédo tout en accélérant la fonte des glaciers.

Distinction entre suie (Carbon Black) et carbone noir (Black Carbon) : la suie est plus épaisse, plus hétérogène, et souvent grasse et est formée par une combustion incomplète dans des conditions non contrôlées.

Organic Carbon : Charbon provenant de la décomposition ou l'incinération de matière organique. Il n'est pas comptabilisé dans le bilan carbone car considéré comme un « cycle court », ce qui est émis a été absorbé par la matière au préalable, sur une échelle de temps court.

Source : (2010). Noir de carbone Academia https://fr-academic.com/dic.nsf/frwiki/2292834#combustions_possibles.554.50

L'albédo

Part du rayonnement solaire renvoyé vers l'atmosphère par une surface. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus une surface est réfléchissante plus l'albédo est élevé (par ex il vaut 0,9 pour de la neige fraîche)

Source : Escudé-Jaffres, C (2019). Albédo Géoconfluences. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/albedo>

Aérosols diffusants

Exemples : poussières minérales (érosion), sulfates (éruptions volcaniques), nitrates (combustion), carbone organique.

Interaction avec les nuages servent de noyaux de condensation ou de glaciation pour la formation de gouttelettes d'eau nuageuse et de cristaux de glace. Donc, plus il y a d'aérosols dans l'atmosphère, plus il peut se créer de nuages qui réfléchissent la lumière vers l'espace et plus il fait froid au sol.

Modélisation à une variable d'une éruption volcanique

On note ϕ le flux de rayonnement solaire reçu en moyenne par unité de surface par la Terre, il vaut typiquement $\phi_0 = 220 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. On considère qu'une fraction $A \in [0, 1]$ de cette énergie est immédiatement réfléchi, appelée albédo. On considère ensuite qu'une fraction $S \in [0, 1]$ de l'énergie émise par la Terre n'est pas rayonnée vers l'espace, du fait de l'effet de serre.

$$\sigma T^4 (1 - S) = (1 - A)$$

On considère fixés A et S, on prend $A_0 = 0.3$ et $S_0 = 0.4$ et on pose

$$K = \left(\frac{1 - A_0}{\sigma(1 - S_0)} \right)^{1/4}$$

On obtient alors l'expression de $T(\phi)$:

$$T = K \cdot \phi^{1/4}$$

En particulier on a :

$$\frac{dT}{d\phi} = \frac{K}{4} \cdot \phi^{-3/4}$$

On estime dans la littérature que pour une éruption volcanique, la variation de flux solaire vaut au maximum :

$$\delta\phi \approx -5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

On peut alors calculer la variation de température engendrée par une telle éruption :

$$\delta_v T = \frac{dT}{d\phi}(\phi_0) \cdot \delta\phi \approx -0.29 \text{ K}$$

En réalité, la présence des aérosols dus à l'éruption n'excède pas 2-3 ans, ce qui limite le forçage radiatif négatif réel d'un tel phénomène.

Des aérosols pour ralentir le réchauffement climatique?

Un bouclier de particules dans la stratosphère pour « protéger » la Terre des rayonnements solaires et éventuellement faire baisser la température à la surface de la Terre ? C'est ce qui est envisagé par certains chercheurs de l'université d'Harvard. Le concept de ce que l'on appelle la géoingénierie solaire est le suivant : envoyer des avions dans la stratosphère pour y répandre des aérosols ayant un albédo élevé pour renvoyer les rayonnements solaires vers l'espace et ainsi diminuer la température à la surface de la Terre (par exemple le carbonate de calcium qui a également l'avantage d'interagir avec certains gaz à effet de serre ou participant à la destruction de la couche d'ozone).

Pour ces chercheurs, réduire à zéro les émissions de carbone est utopique et ne suffira pas pour limiter le réchauffement à 1.5C. Cependant, même si la géoingénierie se trouvait être un succès (il faut pour cela gérer les difficultés liées aux effets indésirables), le problème ne sera pas réglé tant que l'on n'adresse pas les causes.

Source : Gibbs, A. (2019). An umbrella to combat warming. The Harvard Gazette. <https://news.harvard.edu/gazette/story/2019/09/harvard-groups-research-planet-cooling-aerosols/>

