

Chapitre 6

Les Différents Types de Pollutions

6.1 Introduction

L'atmosphère de la terre est un mélange de gaz. La composition de l'air jusqu'à une hauteur de 75 km est homogène. L'air est composé d'environ 78% de nitrogen et 21% d'oxygène. Le 1% restant est composé de plusieurs gaz, dont le CO₂ et le méthane(CH₄) sont les plus importants. la vapeur d'eau est aussi présente avec un quantité qui varie largement. Elle est de l'ordre de 0% dans les régions désertiques et de l'ordre de 4% dans les régions tropicales humides. Le dioxyde de carbone (CO₂) compose 0.003% de volume atmosphérique seulement, environ 300 parts pour chaque million de partie de l'atmosphère, alors que le méthane ne présente que 0.00017% du volume atmosphérique. On parle souvent de ces valeurs comme part par million par volume. Ce sont des concentrations très faibles, mais ces gaz, les traces d'autres gaz et la vapeur de l'eau interagissent fortement avec les radiations et leur effet est très important sur le climat. Ce sont les gaz à effet de serre. Les gaz à effet de serre sont les gaz qui absorbent les radiations à température relativement faible comme la température de la terre et de son atmosphère, mais n'absorbent pas les radiations à haute température comme les radiations issues du soleil.

Les concentrations atmosphériques des gaz dits à effet de serre (comportant le CO₂ et le CH₄) ont connu une augmentation importante pendant les 150 dernières années.

En 1955, des mesures de la concentration du CO₂ ont été commencées par Charles D. Keeling à Hawaii et le pôle sud. Ces mesures ont montré une augmentation de 315 ppmv en 1958 à plus de 366 ppmv en 1980. The IPCC Fourth indique une valeur de 379 ppmv en 2005. Avant ces mesures on connaît à partir de l'air piégé dans la glace polaire que le niveau du CO₂ est resté approximativement constant à environ 280 ppmv de 1000 à 1800.

Plusieurs scientifiques ont constaté que la présence du CO₂ et de la vapeur dans l'atmosphère contribue à l'augmentation de la température de la terre en permettant la pénétration des radiations solaires à l'atmosphère et en empêchant les radiations de

faible températures réfléchies par la terre. En 1824, le mathématicien français Joseph Fourier a décrit l'effet de serre de l'atmosphère de la terre en le comparant à une glace couvrant un container.

6.2 Définition de la pollution

La pollution est une dégradation de l'environnement par l'introduction dans l'air, l'eau ou le sol de matières n'étant pas présentes naturellement dans le milieu. Elle entraîne une perturbation de l'écosystème dont les conséquences peuvent aller jusqu'à la migration ou l'extinction de certaines espèces incapables de s'adapter au changement.

Souvent anthropique, c'est à dire due directement ou indirectement à l'activité humaine, la pollution peut cependant résulter de phénomènes naturels tels qu'une éruption volcanique ou solaire.

Globalement, trois principales causes de pollution peuvent être définies :

- La production d'énergie est la source de pollution qui va de pair avec la civilisation industrielle moderne. En effet, que ce soit l'usage des combustibles fossiles, ou l'exploitation de l'énergie nucléaire, l'activité de production d'énergie est fatalement liée à la production d'agents polluants : de l'extraction de la ressource (pétrolière ou nucléaire) à la consommation, ou encore à l'élimination des déchets secondaires.
- Les activités industrielles, en particulier métallurgiques et chimiques sont la deuxième cause de pollution de l'eau et une fois encore tant au niveau de la production que de la consommation. De nos jours, 120000 espèces chimiques différentes sont commercialisées, et ce chiffre s'accroît d'un millier par an. Toutes ces substances, d'une manière ou d'une autre, influent sur l'environnement et bien souvent il est difficile d'identifier leur mode d'action à l'avance.
- L'agriculture moderne est devenue une cause essentielle de la pollution des eaux et des sols (il est impératif de retenir que la pollution des sols entraîne forcément la pollution des eaux par des phénomènes de ruissellement). En effet, l'usage d'engrais chimiques et de pesticides à fortes doses peut être clairement apparenté aux armes chimiques. Les pollutions agricoles sont d'autant plus sournoises qu'elles sont diffuses dans les milieux et sont souvent répandues sur de vastes surfaces.

On distingue plusieurs types de pollutions :

- La pollution atmosphérique, provoquée par des polluants dits atmosphériques: rejet de pots d'échappement, des usines...
 - La pollution aquatique qui peut résulter de la contamination des eaux usées, des rejets de produits (les produits phyto-sanitaires, ceux présents dans les engrais, les hydrocarbures...
-

- La pollution du sol souvent d'origine industrielle ou agricole: utilisation d'engrais, de pesticides ...
- La pollution par type ou agents polluants: pollution industrielle, radioactive, électromagnétique, thermique, lumineuse, spatiale, etc.
- La pollution sonore due aux bruits générés par certaines activités et peut causer une perte d'audition, de l'hypertension, du stress et des troubles du sommeil.

Depuis la fin de la seconde guerre mondiale, l'homme prend peu à peu conscience de l'impact de ses actions polluantes et, de plus en plus, les gouvernements adoptent des mesures pour essayer de limiter l'empreinte écologique des activités humaines.

Les industries sont particulièrement touchées par ces mesures. Pour limiter la pollution dont elles sont responsables, elles tentent de réduire leurs émanations toxiques, d'utiliser des moyens de transports moins polluants et des fournisseurs moins éloignés, etc.

La principale cause de la pollution que les humains génèrent est l'utilisation des énergies fossiles dans les centrales électriques, l'industrie ou les transports. Dans les villes des pays industrialisés, ce sont cependant les transports qui sont la première cause de la pollution.

6.3 Pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique est définie comme l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels et à provoquer des nuisances olfactives. Valeurs limites des polluants dans l'air recommandées par l'Organisation Mondiale de la Santé :

- Dioxyde de soufre (SO_2) : moyenne annuelle $< 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$; moyenne journalière $< 125 \mu\text{g}/\text{m}^3$; moyenne 10 minutes $< 500 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
 - Dioxyde d'azote (NO_2) : moyenne annuelle $< 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$; moyenne horaire $< 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
 - Ozone (O_3) : moyenne 8 heures $< 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
 - Poussière en Suspension (PS) : moyenne journalière $< 70 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
 - Monoxyde de carbone (CO) : moyenne 8 heures $< 10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$; moyenne horaire $< 30.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$; moyenne demi-horaire $< 60.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$; moyenne quart-horaire $< \mu\text{g}/\text{m}^3$.
 - Fumées noires (FS) : moyenne année civile $< 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$; moyenne journalière $< \mu\text{g}/\text{m}^3$.
 - Plomb(Pb) : moyenne année civile $< 0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
-

La figure 6.1 montre le ciel de la ville de Paris lors d'un épisode de pollution.



FIGURE 6.1 – Vue du ciel Parisien lors d'un épisode de pollution

6.3.1 Les polluants primaires

Ce sont les substances présentes dans l'atmosphère telles qu'elles ont été remises. Parmi ces polluants, les substances suivantes, certaines ont une importance particulière:

- Le
 - Le dioxyde de soufre (SO_2): émis par certains procédés industriels (notamment dans la papeterie ou le raffinage) et surtout par l'utilisation de combustibles fossiles soufrés. Il est l'un des principaux responsables des retombées acides en raison de sa transformation, dans l'atmosphère, en acide sulfurique (H_2SO_4);
 - Les oxydes d'azote (NO_x), et notamment de dioxyde d'azote (NO_2), dont l'émission résulte essentiellement de la combustion de combustibles fossiles, en particulier par les véhicules et qui ont notamment pour effet de contribuer à la formation d'ozone dans l'atmosphère;
 - Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), émis par la combustion incomplète des fiouls ou des charbons et qui se présentent généralement dans l'air, liés aux particules. Certains d'entre eux sont reconnus comme très cancérigènes;
 - Les composés organiques volatils (COV), qui comprennent notamment des hydrocarbures (dont le benzène, le toluène et les xylènes). Ils sont émis par de très nombreuses sources, notamment par divers procédés industriels ainsi que par les véhicules. Le méthane, qui est un gaz à effet de serre dont la concentration s'accroît rapidement dans l'atmosphère, est un composé organique volatil.
 - Les métaux lourds(plomb, mercure, Arsenic, cadmium,nickel, ...): proviennent de la
-

combustion du charbons, pétrole, ordures ménagères mais aussi de certains procédés industriels.

6.3.2 Les polluants secondaires

Ce sont des substances dont la présence dans l'atmosphère résulte de transformations chimiques liées à l'interaction de composés dits précurseurs.

L'ozone est le principal polluant secondaire. Sa transformation résulte d'un processus photochimique en présence de certains polluants primaires (monoxyde de carbone, oxydes d'azote et composés organiques volatils). Il s'agit d'un gaz naturellement présent dans l'atmosphère à des concentrations faibles et à une altitude élevée. A plus basse altitude, en revanche, l'évolution de sa concentration résulte essentiellement des activités humaines. L'acide sulfurique et l'acide nitrique qui se forment dans l'atmosphère sous l'action de l'humidité à partir, respectivement, de dioxyde de soufre et d'oxyde d'azote.

6.3.3 Les polluants solides

Les particules fines, d'un point de vue sanitaire, sont susceptibles de servir de vecteurs à d'autres substances, tels par exemple les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) cancérigènes, ce qui est particulièrement préoccupant compte tenu de la capacité des particules les plus fines (inférieur à 1 micromètre) à se développer dans les alvéoles pulmonaires, voire à pénétrer dans le sang.

Les solutions efficaces destinées à lutter contre cette pollution particulaire sont maintenant bien connues: la synthèse des principales normes et recommandations recensées à ce jour dans le tertiaire oriente clairement vers des niveaux de filtration bien supérieurs aux exigences du code de travail.

La pollution d'origine humaine peut avoir un impact très important sur la santé et dans la biosphère comme en témoigne l'exposition aux polluants et le réchauffement climatique qui transforme le climat de la Terre et son écosystème, en entraînant l'apparition de maladies inconnues jusqu'alors dans certaines zones géographiques, des migrations de certaines espèces, voire leur extinction si elles ne peuvent s'adapter à leur nouvel environnement biophysique.

C'est après la seconde guerre mondiale qu'une prise de conscience des répercussions des activités humaines sur l'environnement voit le jour, parallèlement à la naissance de l'écologisme et de l'écologie. Les préoccupations environnementales conduisent les gouvernements à prendre des mesures pour limiter l'empreinte écologique des populations humaines et pour contrer des activités humaines contaminantes.

Globalement, d'après l'OMS, plus de 7 millions de morts sont attribuables en 2012

aux effets des pollutions de l'air extérieure et domestique, et les régions de l'Asie et du Pacifique sont les plus touchées.

6.4 Les polluants réglementés

Les polluants atmosphériques sont trop nombreux pour être surveillés en totalité. Certains d'entre eux sont choisis parce qu'ils sont caractéristique d'un type de pollution (industrielle, automobile ou résidentielle), et leurs effets nuisibles pour l'environnement et la santé sont déterminés et que l'on dispose d'appareils de mesure adaptés à leur suivi régulier. Ce sont les indicateurs de pollution atmosphérique, ils font l'objet de réglementations. Les principaux polluants réglementés sont :

6.4.1 Le dioxyde de soufre (SO_2)

Le dioxyde de soufre, autrefois également appelé anhydride sulfureux, est un composé chimique de formule SO_2 . Il s'agit d'un gaz incolore, dense et toxique, dont l'inhalation est fortement irritante. Il est libéré dans l'atmosphère terrestre par les volcans et par de nombreux procédés industriels, ainsi que par la combustion de certains charbons, pétroles et gaz naturels non désulfurés. L'oxydation du dioxyde de soufre, le plus souvent en présence de catalyseurs tels que le dioxyde d'azote NO_2 , conduit au trioxyde de soufre SO_3 et à l'acide sulfurique H_2SO_4 , d'où la formation de pluies acides.

Le dioxyde de soufre est utilisé comme désinfectant, antiseptique, antibactérien, gaz réfrigérant, agent de blanchiment et comme conservateur de produits alimentaires, notamment pour les fruits secs, dans la production de boissons alcoolisées et dans l'élaboration du vin.

Dans l'industrie, le dioxyde de soufre sert surtout pour la production d'acide sulfurique. L'acide sulfurique possède d'innombrables applications et il est le produit chimique le plus utilisé. Le dioxyde de soufre est obtenu par combustion de soufre ou de pyrites, puis transformé en trioxyde de soufre (SO_3) très pur par oxydation avec de l'air, catalysée par le platine ou du pentoxyde de vanadium. Le SO_3 ainsi obtenu permet la fabrication directe d'acide sulfurique très concentré par simple hydratation.

La pollution atmosphérique en dioxyde de soufre issue de l'industrie provient principalement de la consommation de combustibles fossiles. En effet, du soufre est naturellement contenu dans ces combustibles, et leur combustion génère du SO_2 . Il peut aussi provenir de l'industrie métallurgique, des procédés de fabrication d'acide sulfurique, de la conversion de la pulpe de bois en papier, de l'incinération des ordures et de la production de soufre élémentaire.

La combustion du charbon est la source synthétique la plus importante et représente environ 50 % des émissions globales annuelles. Celle du pétrole représente encore 25 à 30 %. Les rejets industriels de dioxyde de soufre peuvent être réduits grâce à la mise en place de procédés de désulfuration.

Le SO₂ est produit par les volcans et divers procédés industriels. La houille de mauvaise qualité et le pétrole contiennent des composés de soufre et génèrent du dioxyde de soufre lors de leur combustion. Le dioxyde de soufre peut jouer un rôle refroidissant pour la planète, car il sert de noyau de nucléation à des aérosols dont l'albédo est assez élevé, c'est-à-dire réfléchissant les rayons du soleil sans les absorber. Pour certains scientifiques, une solution pour enrayer le réchauffement climatique global serait de *climatiser* la planète avec du dioxyde de soufre. Mais cela pourrait aussi avoir des conséquences dramatiques, car lorsqu'il se combine avec l'eau et l'oxygène atmosphérique, le dioxyde de soufre est avec le dioxyde d'azote l'une des principales causes des pluies acides, perturbant, voire détruisant des écosystèmes fragiles. De plus, le SO₂ entraîne l'acidification des océans, ce qui met ainsi l'existence des planctons, animaux à coquille calcaire et récifs coralliens en péril. Les planctons produisent la moitié de l'oxygène terrestre. En tuant ces producteurs d'oxygène, on réduit considérablement la quantité d'oxygène sur la terre, un fait alarmant. La Chine est devenue le premier émetteur de dioxyde de soufre dans le monde.

Il est largement utilisé dans l'agroalimentaire et l'agro-industrie et il est principalement présent dans:

- les vins (dépend de la volonté du vigneron de l'utiliser ou non);
- les vinaigres;
- les fruits secs;
- les viandes, les gelées utilisées en charcuterie, les bières et autres boissons fermentées;
- confiserie, confitures, fruits confits, gelées, marmelade.

Effet sur la santé

Le dioxyde de soufre ou E220 provoquerait un danger pour la santé dans les cas suivants:

- lors de son inhalation;
- lors de son ingestion;
- lors du contact avec la peau et les muqueuses.

Au cours de son ingestion, les organes présentant des activités sulfites oxydases les plus élevées sont plus susceptibles de le détoxifier par voie urinaire. La persistance des dérivés du SO₂ peut être envisagée par un apport excessif. Pour l'utilisateur, les sulfites sont des nucléophiles très puissants qui ne donnent aucune toxicité aiguë mais peuvent provoquer de fortes ou sévères allergies. Il détruit la vitamine B1 (ou thiamine) vers pH = 6, peut

provoquer des irritations gastriques, à éviter chez les malades des reins. Ainsi, la DJA (Dose Journalière Admissible) établie par l'OMS est de 0.7 mg/kg de poids par jour.

Dans la plupart des observations, les symptômes apparaissent quelques minutes après l'ingestion d'aliments contenant des sulfites. La pollution atmosphérique par le SO₂ jouerait aussi un rôle dans l'apparition de ces réactions d'intolérance. De plus, les sujets asthmatiques sont beaucoup plus sensibles que la moyenne des gens.

La réglementation européenne oblige maintenant les producteurs à indiquer la mention *Contiennent des sulfites* s'il est à concentration de plus de 100 mg/l. Au Canada, la limite la concentration à 50 ppm l'anhydride sulfureux à l'état libre et à 300 ppm l'anhydride sulfureux à l'état combiné.

Dans le contexte actuel où le respect de l'environnement et les aliments à caractère biologique sont de plus en plus prônés, les viticulteurs et même les consommateurs tendent à se tourner maintenant vers les vins biologiques dont les teneurs en SO₂ sont moindres mais pour lesquels l'utilisation du SO₂ reste autorisée. Notons que, comparativement aux autres pays du monde (le Canada, la Suisse ou les Etats-Unis), les règles d'incorporation du SO₂ au cours de la vinification sont beaucoup plus restrictives, voire plus sévères en Europe. Les producteurs de vins naturels se donnent pour objectif de réduire au maximum l'ajout de dioxyde de soufre.

- Moyenne annuelle maximum admissible pour l'OMS: 50 µg/m³.
- Moyenne annuelle maximum admissible pour la CEE: 40-60 µg/m³.

6.4.2 Le monoxyde de carbone (CO)

Le monoxyde de carbone est le plus simple des oxydes du carbone. La molécule est composée d'un atome de carbone et d'un atome d'oxygène. Ce corps composé est à l'état gazeux dans les conditions normales de pression et de température.

Gaz inodore, incolore et inflammable, le monoxyde de carbone CO se forme lors de la combustion incomplète de matières organiques (gaz, charbon, fioul ou bois, carburants).

La source principale est le trafic automobile. Des taux importants de CO peuvent être rencontrés quand un moteur tourne au ralenti dans un espace clos ou en cas d'embouteillages dans des espaces couverts, ainsi qu'en cas de mauvais fonctionnement d'un appareil de chauffage domestique.

Le CO participe aux mécanismes de formation de l'ozone troposphérique. Dans l'atmosphère, il se transforme en dioxyde de carbone CO₂ et contribue à l'effet de serre.

le monoxyde de carbone a un effet toxique à partir d'une concentration en volume supérieure à 0.1%, en exposition prolongée. Le CO se fixe sur l'hémoglobine pour former une molécule stable, la carboxyhémoglobine. L'hémoglobine s'associe préférentiellement avec le CO plutôt qu'avec l'oxygène, et cette fixation est irréversible. Pour une concentration

de 800 ppm de CO dans l'air, 50% de l'hémoglobine se bloque sous forme de carboxyhémoglobine. Il en résulte une diminution de l'oxygénation cellulaire, nocive en particulier pour le système nerveux central. Le CO est responsable de 300 à 400 décès par an en France, en milieux clos, et de plus de 5000 hospitalisations. Les causes en sont:

- le manque d'aération dans des locaux chauffés par une combustion,
- le mauvais réglage des appareils entretenant une combustion,
- l'obstruction du conduit de cheminée, provoquant le refoulement des gaz brûlés,
- la mauvaise conception de certaines cheminées, empêchant l'évacuation des gaz brûlés.

Le seuil maximal admissible pour l'OMS: 10 mg/m³ de moyenne horaire sur 8 heures, 30 mg/m³ sur 1 heure.

6.4.3 Le dioxyde d'azote (NO₂)

Le dioxyde d'azote (NO₂) se forme dans l'atmosphère à partir du monoxyde d'azote (NO) qui se dégage essentiellement lors de la combustion de combustibles fossiles, dans la circulation routière, par exemple. Le dioxyde d'azote se transforme dans l'atmosphère en acide nitrique, qui retombe au sol et sur la végétation. Cet acide contribue, en association avec d'autres polluants, à l'acidification des milieux naturels. Les concentrations de NO et de NO₂ augmentent en règle générale dans les villes aux heures de pointe. D'après l'Organisation mondiale de la santé (OMS), le NO₂ a des effets néfastes sur la santé: une exposition à long terme peut altérer la fonction pulmonaire et augmenter les risques de troubles respiratoires. Le dioxyde d'azote pénètre dans les voies respiratoires profondes, où il fragilise la muqueuse pulmonaire face aux agressions infectieuses, notamment chez les enfants. Aux concentrations rencontrées habituellement le dioxyde d'azote provoque une hyperréactivité bronchique chez les asthmatiques. Les concentrations de dioxyde d'azote (NO₂) ont baissé dans la plupart des agglomérations d'environ 20 % en six ans. Les concentrations de monoxyde d'azote (NO) mesurées par les capteurs proches du trafic automobile ont baissé d'environ 30 % dans la plupart des agglomérations. Ces évolutions sont à mettre en relation avec les modifications apportées aux véhicules (principalement la généralisation du pot catalytique), principaux émetteurs de ces polluants.

- Effets sur la santé: le dioxyde d'azote est irritant pour les bronches. Il entraîne la peroxydation des lipides des membranes cellulaires et induit la libération de radicaux libres très puissants.
 - Effets sur les végétaux: le NO₂ participe aux phénomènes de pluies acides. Les effets négatifs des oxydes d'azote sur les végétaux sont la réduction de la croissance, de la production et de la résistance aux pesticides.
 - Effets sur les matériaux : les oxydes d'azote accroissent les phénomènes de corrosion.
-

6.4.4 L'ozone (O₃)

Il s'agit d'une variété gazeuse allotropique de l'oxygène (O), plus lourde que l'air. On parle du *bon* c'est-à-dire ozone stratosphérique et du *mauvais* c'est-à-dire ozone à la surface de la terre, également appelé ozone troposphérique. L'ozone stratosphérique ou *bon ozone* est retrouvé à assez haute concentration dans la stratosphère terrestre, essentiellement à une altitude comprise entre 15 et 20 km. Cet ozone absorbant fortement les rayons ultraviolets, protège les organismes vivants de radiations U.V. Il est détruit par des aérosols, notamment issus de l'activité humaine, parmi lesquels les CFC, entraînant ainsi un trou dans la couche d'ozone.

L'ozone troposphérique ou *mauvais ozone* est engendré par la pollution près de la surface de la terre. Initialement, on pensait que l'ozone troposphérique était de l'ozone stratosphérique qui serait descendu, étant donné que l'ozone est beaucoup plus lourd que l'air. Or, il est reconnu aujourd'hui que, si le phénomène de descente d'une partie de l'ozone de la stratosphère vers la troposphère existe bien, il n'est responsable que d'une petite partie de l'ozone troposphérique. L'ozone des basses couches de l'atmosphère est un gaz extrêmement irritant et incolore qui se forme juste au-dessus de la surface de la terre.

L'ozone troposphérique est formé par une réaction chimique impliquant le dioxyde d'azote avec l'oxygène de l'air. Or, pour former du dioxyde d'azote (NO₂), il faut du monoxyde d'azote (NO) directement rejeté par les automobiles, combiné à des composés organiques volatils (COV) provenant principalement des industries.

On l'appelle donc polluant secondaire parce qu'il est produit lorsque deux polluants primaires réagissent au soleil et à l'air stagnant. Ces deux polluants primaires sont les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COV).

L'ozone troposphérique contribue à l'effet de serre et aux pluies acides (altération des végétaux et des forêts). C'est un facteur de dégradation des matériaux dont le caoutchouc (problème fréquent au niveau des pneumatiques). Chez l'homme ou l'animal, il est à l'origine d'irritation des muqueuses oculaires et respiratoires, de crises d'asthme chez les sujets sensibles.

Les pics d'ozone se produisent toujours en cours d'après-midi, selon le même cycle journalier que celui de la température: minimum vers 8h et maximum vers 17h. La pollution par l'ozone augmente régulièrement depuis le début du siècle dans l'atmosphère de l'hémisphère nord.

- Effets sur la santé : l'ozone est un oxydant puissant. Il altère les fonctions cellulaires aux points d'impact que constituent les muqueuses (oculaires et pulmonaires en particulier). Il perturbe, dans certaines conditions, la fonction respiratoire non seulement chez les asthmatiques, mais chez les adultes sains et les enfants. Des
-

études ont montré qu'il peut entraîner une irritation des yeux et des voies aériennes supérieures, provoquant toux et maux de tête.

- Effets aigus : diminution de la fonction respiratoire observée chez des enfants et des adultes, rhumes, maux de tête possibles, irritation des yeux, déclenchement de crises d'asthme et symptômes respiratoires. La réaction la plus forte se produit au bout de 2 jours d'épisode. Après 4 ou 5 jours d'exposition, la réaction n'est plus perçue (l'organisme a réagi pour se protéger). Il existe une synergie additive pour les effets sur la santé entre NO_2 , O_3 et d'autres polluants.
- Effets sur les végétaux : les grands processus physiologiques de la plante (photosynthèse, respiration) sont altérés par l'ozone et la production des cultures agricoles peut être significativement réduite.
- Effets sur les matériaux : l'ozone altère les caoutchoucs et certains polymères. La résistance à l'ozone d'un polymère est considérée comme un paramètre essentiel dans les applications où il se trouve exposé sous tension au vieillissement atmosphérique.

L'ozone est un gaz à effet de serre, tout comme le dioxyde de carbone. Il est susceptible de bloquer une partie du rayonnement tellurique et de le renvoyer vers le sol. On estime actuellement que la part relative de l'ozone dans l'effet de serre additionnel pourrait être comprise entre 10 et 20 %.

6.4.5 Le benzène (C_6H_6)

Le benzène est un composé organique de formule brute C_6H_6 . Il appartient à la famille des hydrocarbures aromatiques monocycliques, car le cycle formé par les six atomes de carbone est plan et comporte six électrons délocalisés. Dans les conditions usuelles, le benzène est un liquide incolore, d'odeur caractéristique, volatil, très inflammable et cancérigène.

C'est un précurseur important pour la synthèse de nombreux composés organiques: matières plastiques, caoutchoucs, solvants, plastifiants, détergents, parfums, colorants, additifs alimentaires, médicaments, pesticides, explosifs, etc. Il est également utilisé comme solvant dans différentes industries, et comme additif antidétonant dans l'essence. Il est produit par l'industrie pétrochimique essentiellement par reformage catalytique, hydrodésalkylation du toluène et vapocraquage.

Le benzène est désormais reconnu comme cancérigène; en raison de ses propriétés d'agent intercalant, sa structure parfaitement plane lui permettant de se glisser entre les bases azotées de l'ADN, provoquant des erreurs de transcription et/ou de réplication. L'ingestion provoque des troubles digestifs (douleurs abdominales, nausées, vomissements) et neurologiques (vertiges, ivresse, céphalées, somnolence, coma, convulsions). L'inhalation provoque les mêmes symptômes neurologiques, pouvant entraîner la mort (à titre indicatif,

la mort intervient en cinq à quinze minutes d'exposition à une concentration de 2 %). En application cutanée, le benzène est irritant.

L'intoxication chronique par le benzène et ses homologues (toluène, xylène et styrène essentiellement), appelée benzolisme ou benzénisme, est reconnue comme maladie professionnelle depuis 1931. Le benzène est classé comme cancérogène depuis 1982, et il a été intégré en 1987 dans la liste des cancérogènes de catégorie 1 (cancérogènes avérés pour l'Homme). Il est également classé cancérogène par l'Union européenne et par l'Agence américaine de protection de l'environnement.

Les principaux effets d'une exposition chronique concernent les cellules sanguines et la moelle osseuse. L'exposition prolongée au benzène provoque des hémopathies bénignes (thrombopénie, leucopénie, hyperleucocytose, anémie, polyglobulie, aplasie médullaire), puis des hémopathies malignes (syndromes myéloprolifératifs, myélomes, leucémies, lymphomes). L'exposition chronique à de faibles doses, telles que celles qu'on peut respirer à proximité d'une station-service ou d'un garage automobile, augmenterait significativement le risque de leucémie aiguë chez l'enfant. Des études décrivent également des effets sur le système immunitaire: augmentation de la susceptibilité aux allergies, diminution des taux d'IgA et IgG, leucopénie.

Le benzène est produit lorsque des composés riches en carbone subissent une combustion incomplète. Par exemple, il est produit naturellement dans les volcans ou les feux de forêt. Les principales voies d'exposition de la population au benzène sont les vapeurs d'essence, les gaz d'échappement, les émanations industrielles, la fumée de cigarette ainsi que la combustion du bois.

La principale source d'exposition chronique au benzène est liée au milieu professionnel:

- industrie pétrochimique (raffinage, transport);
- industrie chimique (utilisation du benzène comme réactif ou comme solvant);
- parfumerie (solvant);
- industrie électronique (dégraissant);
- laboratoires de chimie (solvant);
- garages automobiles (dégraissant et émanations de carburant);
- stations-service, postes de péage de parkings, d'autoroutes (émanations de carburants).

Afin de diminuer les émissions de composés organiques volatils, dont le benzène, au niveau des stations-service, la récupération des vapeurs d'essence lors du remplissage des réservoirs des véhicules et de la livraison d'essence des terminaux est obligatoire dans de nombreuses régions, dont l'Europe et la Grande-Bretagne.

En Europe, la valeur moyenne d'exposition professionnelle (VME) dans l'Union européenne est fixée par la réglementation à 1 ppm soit 3,5 mg/m³ sur huit heures. La teneur

en benzène des eaux destinées à la consommation humaine ne doit pas dépasser 1 microgramme/l (à l'exception des eaux minérales).

6.4.6 Les particules PM10

Les PM 10 sont des particules en suspension dans l'air dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres, d'où leur nom anglais de particulate matter 10, ou PM 10 en abrégé.

D'origine naturelle ou anthropique, ces particules demeurent plus ou moins longtemps dans l'atmosphère. Les plus grossières (supérieures à 2,5 micromètres) retombent assez vite, tandis que les plus fines peuvent rester plusieurs jours en suspension et parcourir des milliers de kilomètres.

Les particules d'origine naturelle proviennent principalement d'éruptions volcaniques et de l'érosion éolienne naturelle ou issues de l'avancée des déserts (parfois d'origine anthropique), les incendies et feux de végétation. Les activités humaines, telles que le chauffage (notamment au bois), la combustion de combustibles fossiles dans les véhicules, les centrales thermiques et de nombreux procédés industriels en génèrent également d'importantes quantités. Elles sont en augmentation nette depuis deux siècles.

Les particules fines pénètrent en profondeur dans les poumons. Elles peuvent être à l'origine d'inflammations, et de l'aggravation de l'état de santé des personnes atteintes de maladies cardiaques et pulmonaires. De plus, elles peuvent transporter des composés cancérogènes absorbés sur leur surface jusque dans les poumons. Actuellement, les particules en suspension (ou matières particulaires) et l'ozone constituent un risque sanitaire grave dans de nombreuses villes des pays développés et en développement.

étant donné que plus les particules sont fines et plus elles sont dangereuses pour la santé, les PM 10 sont subdivisées en catégories de particules plus petites:

- les PM 2,5 (particules fines inférieures à 2,5 microns);
- les PM 1 (particules très fines inférieures à 1 micron);
- les PM 0,1 (particules ultrafines inférieures à 0,1 micron) ou nanoparticules.

Ces particules sont de plus en plus prises en compte par les politiques de santé publique et les réglementations, au fur et à mesure que leur toxicité est révélée (amiante, hydrocarbures aromatiques polycycliques,...) et que les moyens de mesures se perfectionnent.

Les sources de particules ou *aérosols* sont nombreuses et variées d'autant qu'il existe différents processus de formation. Les méthodes de classification des sources sont basées sur les origines (anthropiques, marine, biogéniques, volcaniques) ou sur les modes de formation. Deux types d'aérosols peuvent ainsi être distingués:

- les aérosols primaires: émis directement dans l'atmosphère sous forme solide ou liquide. Les particules liées à l'activité humaine proviennent majoritairement de la

combustion de combustibles (production et transformation de l'énergie, chauffage des particuliers principalement biomasse...), du transport automobile (échappement, usure, frottements...) ainsi que des activités agricoles (labourage des terres...) et industrielles très diverses (fonderies, verreries, silos céréaliers, incinération, exploitation de carrières, BTP...). Leur taille et leur composition sont très variables.

- les aérosols secondaires: directement formés dans l'atmosphère par des processus de transformation des gaz en particules par exemple sulfates (transformation du dioxyde de soufre) et nitrates. La majorité des particules organiques sont des aérosols secondaires.

Les PM10 représentent la catégorie de particules dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres (fraction inhalable). Les PM2,5, ou très fines particules, ont un diamètre inférieur à 2,5 micromètres progressent plus profondément dans l'appareil respiratoire.

Selon leur taille (granulométrie), les particules pénètrent plus ou moins profondément dans l'arbre pulmonaire. Les particules les plus fines peuvent, à des concentrations relativement basses, irriter les voies respiratoires inférieures et altérer la fonction respiratoire dans son ensemble. Certaines particules ont des propriétés mutagènes et cancérigènes.

Les effets de salissure des bâtiments et des monuments sont les atteintes à l'environnement les plus évidentes.

Les particules sont solides ou liquides et résultent essentiellement de composés solides du carbone, des hydrocarbures non brûlés, mais aussi de l'usure des pneus et des métaux lourds. Leur taille est donc réduite et les place à une échelle microscopique. Dans la littérature, on emploie bien souvent indistinctement différents termes pour définir ce type de pollution. Parmi eux :

les aérosols sont formés de particules solides ou liquides de dimension inférieure à 100 micromètre. La définition stricte est la "suspension, dans un milieu gazeux, de particules solides ou liquides présentant une vitesse de chute négligeable." On peut également parler de particules insédimentables. Les aérosols correspondent donc aux plus fines particules les "fumées noires" (qualifiées comme telles d'après la méthode de prélèvement associée) sont des particules carbonées de diamètre inférieur à 5 μm jusqu'à 0,1 μm environ les poussières qui sont faites de particules solides inférieures à 75 μm , les plus grosses retombant près de la source d'émission Le terme de "particules" englobe en fait l'ensemble des définitions précédentes indifféremment des propriétés physico-chimiques de chacune d'elle. C'est l'expression générique. Ce composant atmosphérique peut-être soit d'origine naturelle ou lié aux émissions anthropiques de polluants.

Les émetteurs de particules sont multiples. Les travaux domestiques d'intérieur nous exposent à près de 45% des rejets totaux de particules par an. L'automobile n'en constituant qu'environ 7%. Cela explique l'apparition d'études quantifiant les particules inhalées

par une personne dans ses déplacements et dans son habitation. Dans une ville industrielle, l'air peut contenir plus de 3 millions de particules par cm^3 , dans une ville aux activités plus tertiaires de 10 000 à 50 000 (soit $100 \mu\text{g}/\text{cm}^3$) alors qu'au-dessus de l'océan ou en montagne il n'y en a que quelques milliers, et dans un endroit exempt d'émission seulement 100 à 20 particules par cm^3 .

Cette pollution est dite par voie sèche afin de se démarquer de celle par voie humide caractérisée notamment par les pluies acides. Nous distinguerons les grosses particules des plus fines d'après leurs propriétés et leur genèse. Ainsi, les particules sont produites par divers processus comme :

- la transformation des gaz en particules;
- l'altération éolienne;
- la coalescence et croissance des particules;
- les émissions directes;
- les bris des vagues des océans : des sels marins sont injectés dans l'atmosphère sous l'effet d'un pétilllement résultant de l'éclatement de bulles à la surface de l'eau des océans;
- les météorites (matière extra-terrestre)

Pour les particules naturelles, leur origine est : volcanique, saline (cristaux salins : NaCl; 2240 millions de tonnes par an), feux de végétation (170 millions de tonnes par an), organique: formes vivantes microscopiques (bactéries, acariens, moisissures...), graines aigrettées, pollen (de 30 à 40 μm), fibres végétales (champignons...) ou animales..., tellurique : argiles (inférieur à 2 μm), limons (de 2 à 50 μm), sables fins (de 50 à 200 μm).

Si elles sont anthropiques (poussières chimiques et minérales), elles résultent :

- de la combustion industrielle (hauts fourneaux et fours);
- du chauffage;
- des incinérateurs à grilles ou à lit fluidisé;
- des transports (notamment routier), celles-ci sont généralement constituées de: charbon (carbone si la combustion est incomplète);
- d'oxydes métalliques : fer, aluminium...
- de ciment;
- de calcaire;
- de silice;
- de goudron.

Chaque année, les activités humaines produisent environ 300 millions de tonnes de poussières !.

Valeurs limites pour la protection de la santé humaine pour les PM10 (applicables aux concentrations non liées à des événements naturels):

- 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière, à ne pas dépasser plus de 35 jours par an;
- 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle.

Pour les PM_{2,5}, il n'y a pas de réglementation. L'Union européenne a fixé son objectif de qualité à 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne sur l'année. L'Organisation Mondiale de la Santé recommande, elle, une valeur de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

6.4.7 Le plomb (Pb)

Le plomb est l'élément chimique de numéro atomique 82, de symbole Pb. C'est un membre du groupe des cristallogènes. Le mot et le symbole viennent du latin plumbum. Le plomb est un métal gris bleuâtre, blanchissant lentement en s'oxydant, malléable. C'est un élément toxique, mutagène, et reprotoxique, sans valeur connue d'oligoélément. Il a en effet été classé comme potentiellement cancérigène en 1980. Deux sels de plomb, le chromate et l'arséniate, sont considérés comme carcinogènes certains.

Le plomb est un contaminant de l'environnement, toxique et écotoxique dès les faibles doses. Les maladies et symptômes qu'il provoque chez l'homme ou l'animal sont regroupées sous le nom de *saturnisme*. Le plomb - relativement abondant dans la croûte terrestre - est l'un des métaux les plus anciennement connus. On en a trouvé dans des pigments recouvrant des tombes ou dépouilles préhistoriques (40 000 ans avant J.-C.), mais aussi des objets.

En dépit de sa haute toxicité, et grâce probablement à sa facilité d'extraction, à sa grande malléabilité et à son bas point de fusion, il a été fréquemment utilisé lors de l'âge du bronze, durci par de l'antimoine et de l'arsenic trouvés sur les mêmes sites miniers. Il est mentionné dans les écritures cunéiformes sumériennes il y a près de 5 000 ans, ou encore dans l'Exode, rédigé il y a environ 2 500 ans. C'est souvent aussi un sous-produit de mines d'argent.

A travers les âges, de nombreux écrits relatent sa présence dans des objets ou à travers les cultures. Les Sumériens, Egyptiens, Grecs, Hébreux ou encore Romains savaient l'extraire. Ils l'utilisaient pour colorer et émailler des céramiques, lester des hameçons, sceller des amphores, produire des fards, du khôl ou produire des objets usuels (de 4 000 à 2 000 ans avant notre ère). On trouve aussi des tuyaux de plomb sur les sites antiques romains.

Au moyen âge, les alchimistes croyaient que le plomb était le métal le plus ancien (et le plus froid) et l'associaient à la planète Saturne. C'est pourquoi l'intoxication au plomb est dite *saturnisme*.

Sa toxicité était connue des médecins et mineurs (esclaves et prisonniers souvent) de l'antiquité. Les Romains l'utilisaient sous forme d'acétate de plomb pour conserver et sucrer leur vin, et s'étaient rendu compte que les gros buveurs, donc de la classe

aristocratique, souffraient d'intoxication.

Plus tard, des symptômes spécifiques ont été décrits, associés à des métiers tels que les mineurs, fondeurs, peintres ou artisans fabricants de vitraux. Le plomb a ainsi été interdit pour la confection des tuyaux de distribution d'eau potable en Suisse dès 1914, mais bien plus tardivement dans les autres pays (exemple: les peintures au plomb ont été interdites en 1948 en France mais l'interdiction totale pour les canalisations ne date que de 1995).

Depuis l'antiquité, l'homme a extrait du plomb des minerais et introduit dans la biosphère et tous les milieux, une quantité croissante de plomb, sous diverses formes. Depuis la révolution industrielle, la pollution routière et industrielle ainsi que la chasse, la pêche et les guerres (cf. munitions à base de plomb) sont à l'origine d'apports de plomb parfois considérables.

Les personnes les plus vulnérables sont les enfants et les femmes enceintes, puis les personnes âgées. Les enfants sont souvent les plus touchés car leur organisme absorbe proportionnellement plus de plomb que celui des adultes. En vieillissant l'organisme élimine moins bien le plomb, et le plomb peut en désorber avec l'ostéoporose.

Il n'existe pas vraiment de seuil de tolérance au plomb pour cette catégorie de personnes. En effet, les enfants possèdent un système nerveux en plein développement et une absorption digestive 3 fois plus élevée que celle des adultes ce qui les rend beaucoup plus sensibles vis-à-vis de l'exposition au plomb. L'intoxication chez les enfants se fait sans symptômes, c'est lors de leur développement (durant la scolarisation) que des effets comme la baisse du QI (Quotient Intellectuel), l'anémie, des troubles du comportement, des problèmes de rein, des pertes auditives, se feront ressentir.

Les risques d'intoxication au plomb pour les enfants sont grands lorsque ceux-ci jouent dehors car ils peuvent être en contact avec des poussières ou encore des écailles de peinture à base de plomb et portent souvent les doigts à la bouche.

6.5 Pollution due à la combustion des fossiles

6.5.1 Le dioxyde de carbone (CO₂)

Le dioxyde de carbone, aussi appelé gaz carbonique ou anhydride carbonique, est un composé inorganique dont la formule chimique est CO₂. L'air extérieur contient aujourd'hui environ 0,04 % de CO₂.

Alors que le dioxyde de carbone n'est pas toxique en soi, qu'il est même essentiel à la croissance des plantes qui le captent et utilisent son carbone pour constituer leur structure (voir le mécanisme de photosynthèse), les environmentalistes ont mis en évidence dans les années 1990 une théorie selon laquelle l'excès de dioxyde de carbone serait une forme de pollution, en raison de son action dans le processus de réchauffement climatique. C'est

notamment pourquoi le protocole de Kyoto, entré en vigueur en 2005, a établi un calendrier de réduction des émissions de ce gaz.

Le CO₂ est un des principaux gaz A effet de serre. Il est responsable de plus de 55% de l'effet de serre additionnel anthropique. La durée de séjour approximative du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, c'est A dire le temps qui est nécessaire A ce que le gaz en surplus commence A s'évacuer de l'atmosphère, est de 100 ans. La réalité du réchauffement climatique observé A l'échelle planétaire depuis le siècle dernier n'est aujourd'hui plus guère contestée d'un point de vue scientifique, mais la part exacte de responsabilité du dioxyde de carbone dans ce processus (par rapport au méthane notamment) doit encore être précisée, grâce aux enregistrements fossiles des paléoclimats notamment. Une réduction des émissions anthropiques est visée par le protocole de Kyoto; sa séquestration géologique A long terme fait l'objet de recherches mais est une solution controversée quand il s'agit simplement d'injecter du CO₂ dans les couches géologiques.

Le dioxyde de carbone étant un gaz incolore et lourd s'accumulant en nappes, il est difficilement détectable par une personne non expérimentée.

A partir d'une certaine concentration dans l'air, ce gaz s'avère dangereux voire mortel A cause du risque d'asphyxie par privation d'oxygène, bien que le CO₂ ne soit pas chimiquement toxique. La valeur limite d'exposition est de 3 % sur une durée de quinze minutes. Cette valeur ne doit jamais être dépassée. Au-delA, les effets sur la santé sont d'autant plus graves que la teneur en CO₂ augmente. Ainsi, A 2 % de CO₂ dans l'air, l'amplitude respiratoire augmente. A 4 %, la fréquence respiratoire s'accélère. A 10 %, peuvent apparaître des troubles visuels, des tremblements et des sueurs. A 15 %, c'est la perte de connaissance brutale. A 25 %, un arrêt respiratoire entraîne le décès.

L'inhalation de dioxyde de carbone concentré entraîne un blocage de la ventilation, parfois décrit comme une violente sensation d'étranglement, un souffle coupé, une détresse respiratoire ou encore une oppression thoracique, pouvant rapidement mener au décès si l'exposition est prolongée.

Le CO₂ d'origine naturelle: Le CO₂ est naturellement émis par la respiration des êtres vivants (animaux, végétaux, organismes du sol). Les feux de forêts et les éruptions volcaniques sont aussi sources de dioxyde de carbone.

Les émissions d'origine anthropique: Les émissions anthropiques sont liées A la combustion de produit contenant principalement du carbone (pétrole, gaz naturel, charbon,...). Ces combustions permettent la production d'énergie pour la chaleur, la lumière et les transports. Le secteur transport et le secteur résidentiel et tertiaire (principalement les installations de chauffage) sont donc les principales sources du composé.

Une partie des émissions de dioxyde de carbone est absorbé par des réservoirs naturels ou

artificiels qu'on appelle puits. Les principaux puits actuels sont les océans et la végétation (photosynthèse). Selon le CEA (Commissariat A l'Energie Atomique), environ 40 % du CO₂ reste dans l'atmosphère, le reste étant absorbé par les puits de carbone: 30 % par les océans et 30 % par la végétation. Mais cette répartition change, les rouages du cycle du carbone étant eux-mêmes sous l'influence des changements climatiques.

6.5.2 Les oxydes de soufre (SO_x)

Les oxydes de soufre sont des gaz aux conditions normales de température et de pression, les molécules sont constituées d'atomes de soufre (S) et d'oxygène (O), (par exemple, le dioxyde de soufre SO₂, le trioxyde de soufre SO₃).

Les oxydes de soufre proviennent de plusieurs sources:

- Naturelles: Lors des éruptions volcaniques, le magma est propulsé vers la surface par du gaz contenant du dioxyde de soufre. Les eaux chaudes des sources contiennent du dioxyde de soufre.
- Anthropique : La combustion des combustibles fossiles engendre la production de 55% des dioxydes de soufre présents dans l'atmosphère. L'industrie chimique; certaines industries engendrent la production d'oxyde de soufre qui n'est pas récupérée en totalité. 25% des oxydes de soufre présents dans l'atmosphère sont produits de cette façon.

6.5.3 Les oxydes d'azote(NO_x)

Un oxyde d'azote est un composé chimique formé d'oxygène et d'azote. NO_x est le terme générique qui englobe un groupe de gaz hautement réactifs, tous contenant de l'azote et de l'oxygène dans des quantités différentes. A titre d'exemple, pour les chaudières à biomasse, on regroupe en pratique sous le terme NO_x le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO₂) et le protoxyde d'azote (N₂O), ce dernier étant formé dans des foyers opérant à des températures inférieures à 950 C.

Le NO se forme lors de réactions de combustion à haute température, par combinaison du diazote (N₂) et de l'oxygène atmosphérique (O₂). Il est ensuite oxydé en dioxyde d'azote (NO₂). Les sources principales sont les transports (routiers, maritime et fluvial), l'industrie, l'agriculture. Les NO_x sont émis également à l'intérieur des locaux où fonctionnent des appareils au gaz tels que cuisinières, chauffe-eau,...

La majeure partie des émissions est répartie entre le secteur industriel (45%) et le secteur des transports (44%). Les émissions liées au transport maritime représentent 8% des émissions du secteur transport.

Le NO_2 est un gaz irritant pour les bronches. Chez les asthmatiques, il augmente la fréquence et la gravité des crises. Chez l'enfant, il favorise les infections pulmonaires.

Le NO_2 participe aux phénomènes des pluies acides, à la formation de l'ozone troposphérique, dont il est l'un des précurseurs, à l'atteinte de la couche d'ozone stratosphérique et à l'effet de serre.

En revanche, le pentaoxyde de diazote (N_2O_5), à l'état solide dans les conditions normales de température et de pression, n'appartient pas à la famille des NO_x .

Les oxydes NO et NO_2 sont des polluants atmosphériques réglementés. Ils sont également regroupés sous le terme NO_x . Ils sont une source croissante de la pollution de l'air : ils contribuent à l'effet de serre et au dérèglement climatique, et sont acidifiants et eutrophisants ; devenus la principale source des pluies acides (alors que la pollution par les oxydes de soufre a régressé) et de l'acidification des eaux douces.

Le protoxyde d'azote N_2O est un puissant gaz à effet de serre.

Le dioxyde d'azote NO_2 et d'autres NO_x interviennent dans la formation des oxydants photochimiques (ozone troposphérique). Cette forme de pollution oxydante, acide et eutrophisante de l'air et indirectement de l'eau et des sols a significativement augmenté là où les UV (source photochimique d'ozone troposphérique) sont plus intenses (en raison du trou de la couche d'ozone) et par effet indirect dans l'accroissement de l'effet de serre.

Il est important de distinguer polluants atmosphériques et gaz à effet de serre.

Les NO_x sont des précurseurs importants pour la formation des pluies acides, des aérosols secondaires et, lorsqu'ils se combinent à des composés organiques volatils, d'oxydants photochimiques (ozone troposphérique², smog estival).

Les NO_x proviennent essentiellement de la combustion des combustibles fossiles (par les cimenteries¹⁶, les chauffages et les véhicules à moteur thermique notamment, y compris catalysés) et de quelques procédés industriels (production d'acide nitrique, fabrication d'engrais, traitement de surface, etc.).

Ils sont principalement formés dans les chambres de combustion et ont trois origines (mécanismes décrits sous forme simplifiée) :

6.5.4 Couche d'ozone

La couche d'ozone est la partie de l'atmosphère située entre vingt et cinquante kilomètres d'altitude (stratosphère). La concentration en ozone y est de l'ordre de dix parties par million. L'ozone de la stratosphère absorbe la plupart des rayons ultraviolets dommageables (rayons UV-B) sur le plan biologique. L'absorption des rayons ultraviolets par l'ozone crée une source de chaleur qui forme la stratosphère (une région où la température augmente avec l'altitude). Elle joue donc un rôle déterminant dans la structure de la température de l'atmosphère terrestre. Sans l'action filtrante de la couche d'ozone, les

rayons UV-B pénétreraient librement l'atmosphère et atteindraient la surface de la Terre provoquant des effets néfastes liés à l'exposition excessive aux rayons. Les UV-B altèrent l'ADN et s'avèrent à ce titre fortement mutagènes sur les plantes et les animaux.

Les instruments terrestres et les satellites ont enregistré une baisse de l'ozone stratosphérique en raison des activités humaines avec les émissions de gaz tels que les CFC, les halons etc... La quantité d'ozone qui se situe au-dessus de certaines régions de l'Antarctique (qui porte le nom de colonne d'ozone) est appauvrie jusqu'à 60 % pendant le printemps en Antarctique (de septembre à novembre). Ce phénomène porte le nom de trou d'ozone antarctique.

Pour contrer l'amincissement de la couche d'Ozone, les pays ont adopté le protocole de Montréal.

Protocole de Montréal

Le Protocole de Montréal est un accord international visant à réduire de moitié des substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Il a été signé par 24 pays et par la Communauté économique européenne en septembre 1987. Il impose la suppression de l'utilisation de CFC (chlorofluorocarbones), de halons et de tout autre ODC synthétique.

Le calendrier d'élimination progressive et initialement prévu pour les pays développés est le suivant (sous réserve utilisations essentielles autorisées):

- halons : élimination complète d'ici le 1er janvier 1994;
- chlorofluorocarbones (CFC), HBFC, méthyle chloroforme, tétrachlorure de carbone : élimination complète d'ici le 1er janvier 1996;
- hydrochlorofluorocarbones (HCFC) : Gel de la consommation d'ici le 1er janvier 1996; gel de la production d'ici 2004; élimination complète d'ici le 1er janvier 2030;
- bromure de méthyle : gel d'ici le 1er janvier 1995; élimination complète d'ici le 1er janvier 2005 et rapport sur la consommation annuelle;
- interdiction de la production et de la consommation de bromochlorométhane à compter du 1er janvier 2002. (Les pays en développement ont, en moyenne, un délai de grâce de 10 à 15 ans pour se conformer à ces objectifs.)

Les Parties ont l'obligation d'interdire l'importation et l'exportation des substances réglementées et des produits utilisant ces substances, en provenance et à destination d'états non Parties au Protocole;

- Les Parties doivent mettre en IJuvre un système de permis pour l'importation et l'exportation de substances réglementés neuves, usagées, recyclées ou récupérées, en provenance et à destination d'états non Parties au Protocole;
 - Les Parties doivent mettre en IJuvre des mesures pour contrôler l'importation et l'exportation de produits et d'équipement utilisant des substances réglementées, en
-

- provenance et à destination d'états non Parties au Protocole;
- Les Parties interdisent l'importation de HCFC d'états non Partie à compter du 1er janvier 2004;
 - Les Parties interdisent le commerce de bromochlorométhane avec des états non Partie à compter du 1er janvier 2001.

Les Parties doivent déposer un rapport statistique annuel au Secrétariat du Protocole sur leur production et leur consommation de substances réglementées, ainsi que sur leurs importations et exportations de ces substances.

Chlorofluocarbure (CFC)

Les CFC sont des composés chimiques commercialement appelés Fréon. Incolores, inodores, ininflammables, non-corrosifs à l'état gazeux ou liquide, ils ne sont pas intrinsèquement toxiques, mais certains de leurs produits de décomposition peuvent être dangereux. Les deux principaux dérivés des CFC sont les Halons et les HCFC. Les premiers membres de ce groupe ont été utilisés comme réfrigérants dans les années 1930. Ils ont été également été utilisés comme gaz propulseur des aérosols, comme matières premières dans la synthèse de composés organiques, comme solvants, comme extincteurs et comme agents d'expansion dans les mousses de matières plastiques. Les CFC sont responsables de la dégradation de l'ozone qui protège la Terre à haute altitude (stratosphère) et absorbent les rayonnements ultraviolets de haute énergie, contribuant ainsi activement à l'augmentation de l'Effet de serre.

En 1987 à Montréal, les principaux pays producteurs de CFC et de Halons décidèrent d'en stopper la production. En Europe, depuis le 1er octobre 2000, les CFC ne peuvent plus être mis sur le marché et doivent être impérativement récupérés et détruits depuis le 1er janvier 2002.

6.5.5 Gaz à effet de serre(GES)

Les Gaz à Effet de Serre sont des gaz qui absorbent une partie des rayons solaires en les redistribuant sous la forme de radiations au sein de l'atmosphère terrestre, phénomène appelé effet de serre.

Plus d'une quarantaine de gaz à effet de serre ont été recensés par le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) parmi lesquels figurent: la Vapeur d'eau (H₂O), le Dioxyde de carbone (CO₂), le Méthane (CH₄), l'Ozone (O₃), le Protoxyde d'azote (N₂O), l'Hydrofluorocarbures (HFC), le Perfluorocarbures (PFC) et l'Hexafluorure de soufre (SF₆).

Le dioxyde de carbone (CO₂) représente près de 70% des émissions de gaz à effet

de serre d'origine anthropique. Il est principalement issu de la combustion des énergies fossiles (pétrole, charbon) et de la biomasse.

Le protoxyde d'azote (N_2O) représente 16% des émissions. Il provient des activités agricoles, de la combustion de la biomasse et des produits chimiques comme l'acide nitrique.

Le méthane (CH_4) représente 13% des émissions. Il est essentiellement généré par l'agriculture (rizières, élevages). Une partie des émissions provient de la production et de la distribution de gaz et de pétrole, de l'extraction du charbon, de leur combustion et des décharges.

Les gaz fluorés (HFC, PFC, SF_6) représentent 2% des émissions. Ces gaz sont utilisés dans les systèmes de réfrigération et employés dans les aérosols et les mousses isolantes. Les PFC et le SF_6 sont utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs. Les gaz fluorés ont un pouvoir de réchauffement 1 300 à 24 000 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone et une très longue durée de vie. C'est pourquoi ils représentent un réel danger malgré la modeste part qu'ils représentent dans les émissions totales de GES.

Afin de limiter l'accentuation de l'effet de serre et la hausse des températures à la surface de la planète, des politiques de réduction ou de limitation d'émissions de certains GES ont été mises en place par de nombreux pays dans le cadre du protocole de Kyoto.

Protocole de Kyoto

En décembre 1997, à l'issue de la troisième réunion des pays signataires de la convention de Rio, 38 pays industrialisés se sont engagés à réduire les émissions de six gaz à effet de serre en signant le Protocole de Kyoto: CO_2 , CH_4 , N_2O , HFC, PFC, SF_6 .

Ces pays industrialisés se sont engagés sur une réduction de leurs émissions de 5,2% en moyenne entre 2008 et 2012 par rapport au niveau de 1990. Les pays en développement sont exemptés d'engagements chiffrés afin que leur développement ne soit pas remis en cause.

Pour entrer en vigueur, ce protocole a dû être ratifié par plus de 55 pays totalisant plus de 55% des émissions de gaz à effet de serre. L'Union Européenne et de nombreux autres pays ont ratifié le protocole en 2002. La France s'est engagée à ne pas émettre en 2010 plus de gaz à effet de serre qu'elle n'en émettait en 1990, soit 563,9 millions de tonnes équivalent CO_2 . La Russie a ratifié l'accord fin 2004 ce qui a déclenché l'entrée en vigueur du protocole. En 2007, l'Australie l'a ratifié. Les états-Unis en revanche se sont retirés du protocole depuis 2001. Pour respecter le protocole de Kyoto, l'Union Européenne a mis en place un programme d'actions et un système d'échange des droits d'émission des gaz à effet de serre.

6.5.6 Méthane(CH₄)

Gaz sans couleur se composant de molécules de quatre atomes d'hydrogène et d'un atome de carbone. Le méthane est le constituant principal du gaz naturel, combustible d'origine fossile. Il est libérés dans l'atmosphère quand la matière organique se décompose dans des environnements avec de faibles niveaux d'oxygène. Il contribue fortement à l'effet de serre tandis que sa durée de vie dans l'atmosphère est de l'ordre de la décennie.

Les sources naturelles incluent les terres marécageuses, les marais, les termites et les océans. Les sources synthétiques incluent l'exploitation et la brûlure des combustibles fossiles, les processus digestifs chez les ruminants tels que les bétail, les paddys de riz et les sites d'enfouissement des déchets. La plus grande partie du méthane émis est décomposée dans l'atmosphère par les réactions avec les radicaux d'hydroxyle (OH). Depuis le début de la Révolution Industrielle, la concentration atmosphérique en méthane a plus que doublée, et a contribué à 20% à l'augmentation de l'effet de serre, en deuxième place seulement après le dioxyde de carbone(CO₂).

6.6 Pollution aquatique

Un milieu aquatique est dit pollué lorsqu'on note la présence dans l'eau d'agents physiques, chimiques ou biologiques issues des activités humaines, qui la rendent impropre à son utilisation par l'homme et/ou perturbent les écosystèmes aquatiques. On peut classer la pollution aquatique comme suit :

- Pollution thermique à cause des eaux de refroidissement des centrales thermiques ou nucléaires, des industries métallurgiques....
 - Pollution microbiologique à cause des eaux de vannes (issues des WC), élevage...
 - Pollution mécanique à cause des eaux riches en matières minérales ou organiques en suspension (gravières, mines,...)...
 - Pollution toxique à cause de certaines eaux industrielles.
 - Pollution radioactive à cause des eaux usées des hôpitaux et des centrales nucléaires.
 - Pollution organique à cause des eaux domestiques, industries agro-alimentaires...
 - Pollution nutritives à cause des eaux domestiques, pollution diffuse agricole (excès d'azote et de phosphore).
-