

I.1. Atmosphère et pollution atmosphérique

1.1.1. Composition gazeuse de l'atmosphère

L'atmosphère est une couche d'air invisible, constituée d'un mélange gazeux qui enveloppe la terre. Ce mélange comprend surtout de l'azote (N_2 , 78% en volume) et de l'oxygène (O_2 , 21% du volume) qui constituent à eux deux 99% de l'air sec. De la vapeur d'eau y est présente aussi à des taux variables (Rarement au-delà de 5 à 6%).

1.1.2. Structure verticale de l'atmosphère

Les propriétés de l'atmosphère varient selon l'altitude. D'une part, l'air est plus dense près du sol, car les molécules de gaz sont attirées et retenues par l'attraction terrestre. D'autre part, les réactions successives engendrées par les radiations solaires pendant leur traversée de l'atmosphère font que les équilibres physico-chimiques ne sont pas les mêmes aux différents niveaux et entraînent des variations dans les proportions relatives de certains gaz. L'absorption des rayonnements énergétiques, reçus principalement du Soleil mais aussi réémis par la surface de la Terre, dépendant de l'abondance de plusieurs de ces gaz. Il en résulte que les températures de l'air varient considérablement selon l'altitude. En fonction de ces variations, l'atmosphère est divisée en 4 couches concentriques principales qui se succèdent en altitude et dans lesquelles la pression décroît progressivement. Ce sont la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et l'ionosphère (thermosphère) (**Fig.1**).

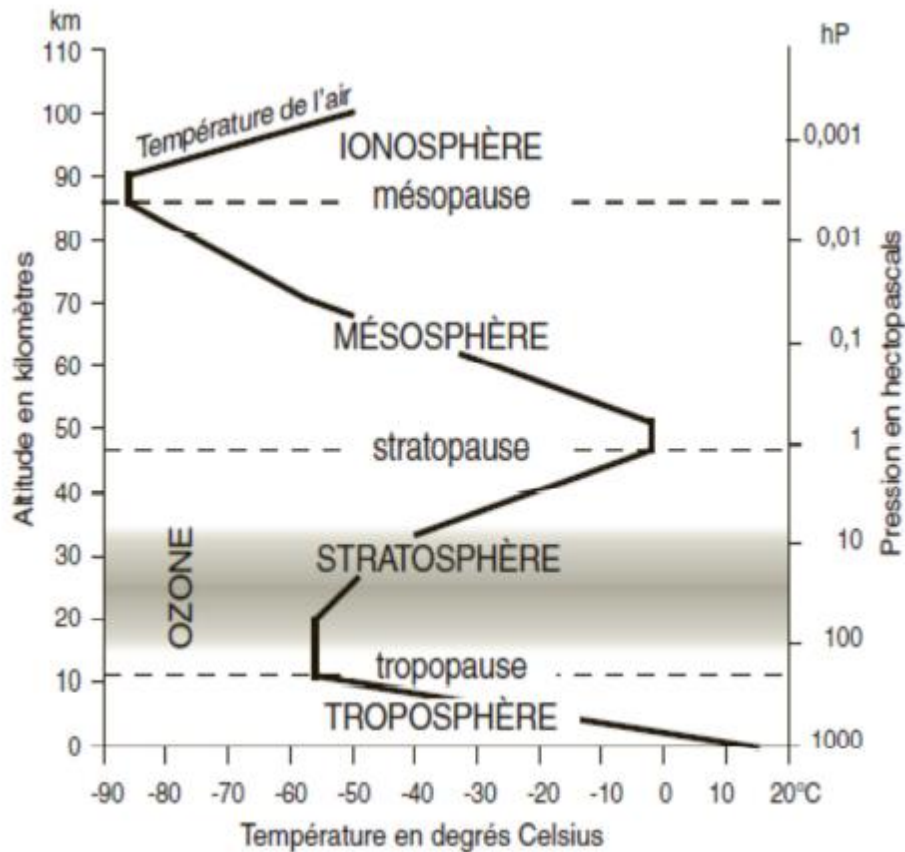


Figure 1 : Structure verticale de l'atmosphère

- La **troposphère**. C'est la couche qui s'étale entre le sol et sa limite supérieure, appelée **tropopause**, qui se situe vers 9 km au-dessus de pôles et vers 15 km au-dessus de l'équateur. Dans cette couche, la température y décroît lentement avec l'altitude (6°C par kilomètre) pour atteindre -50 à -60 °C à son sommet. C'est la couche qui contient 80 % de la masse totale de l'air atmosphérique, dont la pression diminue avec l'altitude (**Fig.1**), et pratiquement toute sa vapeur d'eau. C'est donc là que se forment les nuages et que les principaux phénomènes météorologiques se manifestent.
- La **stratosphère** se situe au-dessus de la troposphère et est limitée vers le haut par la **stratopause**, située aux environs de 50 km d'altitude. L'air y est de 10 à 1 000 fois moins dense que près du sol et sa température y augmente lentement vers le haut jusqu'à atteindre environ 10 °C en été. Cette augmentation de température est due principalement à la présence d'ozone qui, bien qu'en proportion infime, absorbe intensément le rayonnement ultraviolet du Soleil.
- La **mésosphère** va de la stratopause jusqu'à 80 km d'altitude ou elle est limitée par la mésopause. Les températures y décroissent de bas en haut jusque vers -80 °C.

• **L'ionosphère** représente la partie la plus élevée de l'atmosphère. L'air y est très raréfié et les molécules de gaz sont ionisées par les rayonnements de haute énergie qui les frappent.

2.3. Circulation atmosphérique

Les mouvements atmosphériques jouent un rôle fondamental dans la dispersion des agents polluants sur la planète. Ce sont les deux premières couches (troposphère et stratosphère) qui jouent un rôle prépondérant dans la contamination globale de la biosphère car elles assurent le transfert des polluants dans des endroits reculés de la terre, très loin des régions peuplées et industrialisées. La circulation atmosphérique est en grande partie provoquée par les variations de température. En effet, tous les endroits de la terre ne reçoivent pas la même quantité d'énergie solaire. La surface chaude près de l'équateur, réchauffe l'air qui est en contact avec elle, le poussant à se dilater et d'élever en altitude jusqu'à la tropopause. Quand l'air monte, il se rafraîchit et retombe au niveau des latitudes de 30 °N et 30 °S. Plus loin de l'équateur, des mouvements d'air similaires ont aussi lieu à des latitudes supérieures (Vers 60°N et 60°S) (**Fig.2**). En plus de ces schémas de circulation verticale, des mouvements atmosphériques horizontaux complexes se produisent, communément appelés vents. Les gaz atmosphériques ont un poids et exercent une pression qui est, au niveau de la mer de 1013 millibars (1013 hectopascal, tel que 1 hPa = 100 pascals et 1 pascal vaut 1N/m²). La pression atmosphérique est variable selon l'altitude, la température et l'humidité. Les vents ont tendance à souffler des régions à pression atmosphérique élevée vers des régions à basse pression. Plus la différence de pression est importante et plus les vents sont forts. La rotation de la terre influence la direction des vents, elle les dévie vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud. Cette tendance est le résultat de la **force de Coriolis**. Cette force est importante aux pôles et négligeable à l'équateur.

L'atmosphère comprend trois vents dominants (**Fig.2**), les **vents polaires**, les **vents d'Ouest** et les **alizés**. A côté de cette circulation troposphérique, il a été montré l'existence de vents d'ouest au niveau de la tropopause soufflant d'Ouest en est, connus sous le nom de **courants Jet** (Jet stream). Sa vitesse varie entre 35 m/s à 100m/s. Ces courants d'altitude permettent le transit circumterrestre de toute substance émise dans l'atmosphère en l'espace de 12 jours seulement. Cela explique la vitesse avec laquelle des particules émises par une explosion nucléaire ou une éruption volcanique se dispersent dans toute l'atmosphère terrestre.

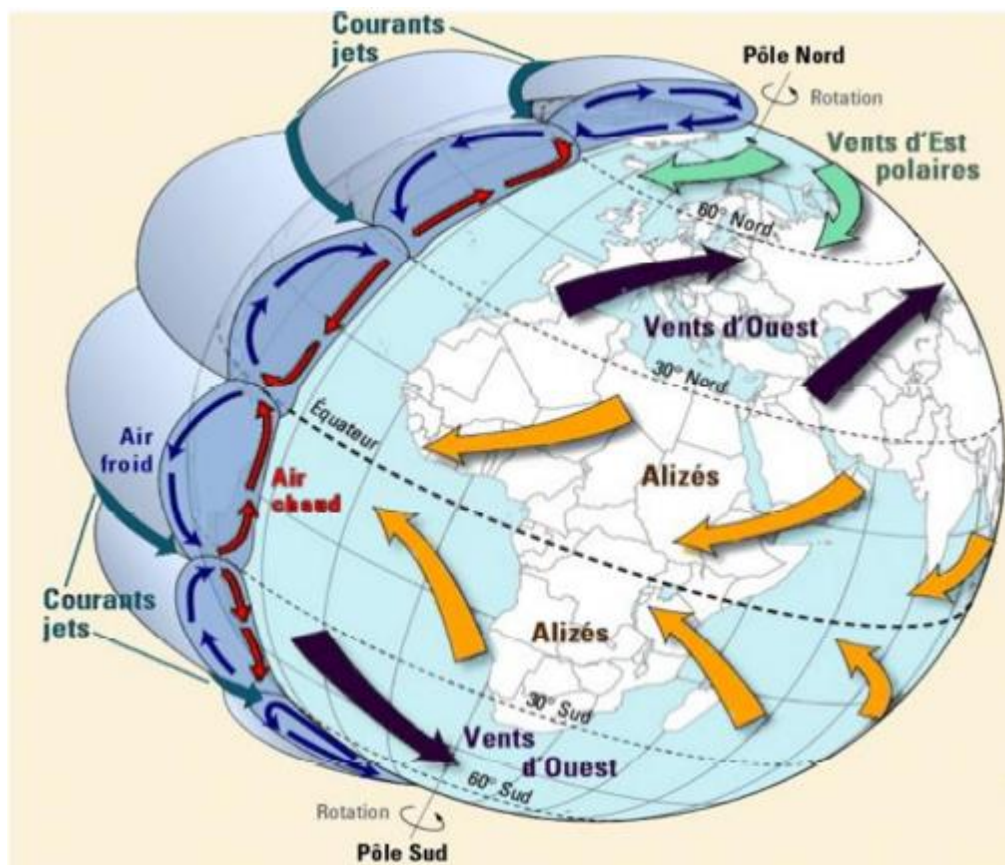


Figure .2: La circulation atmosphérique

2.4. Pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique consiste en le rejet de substances gazeuses, liquides ou solides dans l'atmosphère, directement ou indirectement, 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 excessives. Elle peut résulter soit d'une modification quantitative par la hausse de la concentration dans l'air de certains de ses constituants normaux (CO_2 , NO_2 , ozone...etc), soit d'une modification qualitative due à l'introduction de substances étrangères à ce milieu (radioéléments, substances organiques de synthèse...etc). La pollution atmosphérique constitue sans aucun doute la plus évidente des dégradations de l'environnement par l'homme.

Les polluants atmosphériques sont souvent divisés en deux catégories, primaires et secondaires (Fig.3). Les **polluants atmosphériques primaires** sont émis directement dans l'atmosphère, issus des sources de pollution (trafic routier, industries, chauffage, agriculture...). En revanche, les **polluants secondaires** ne sont pas directement rejetés dans

l'atmosphère mais se forment à partir de réactions chimiques entre les différentes substances rejetées dans l'atmosphère.

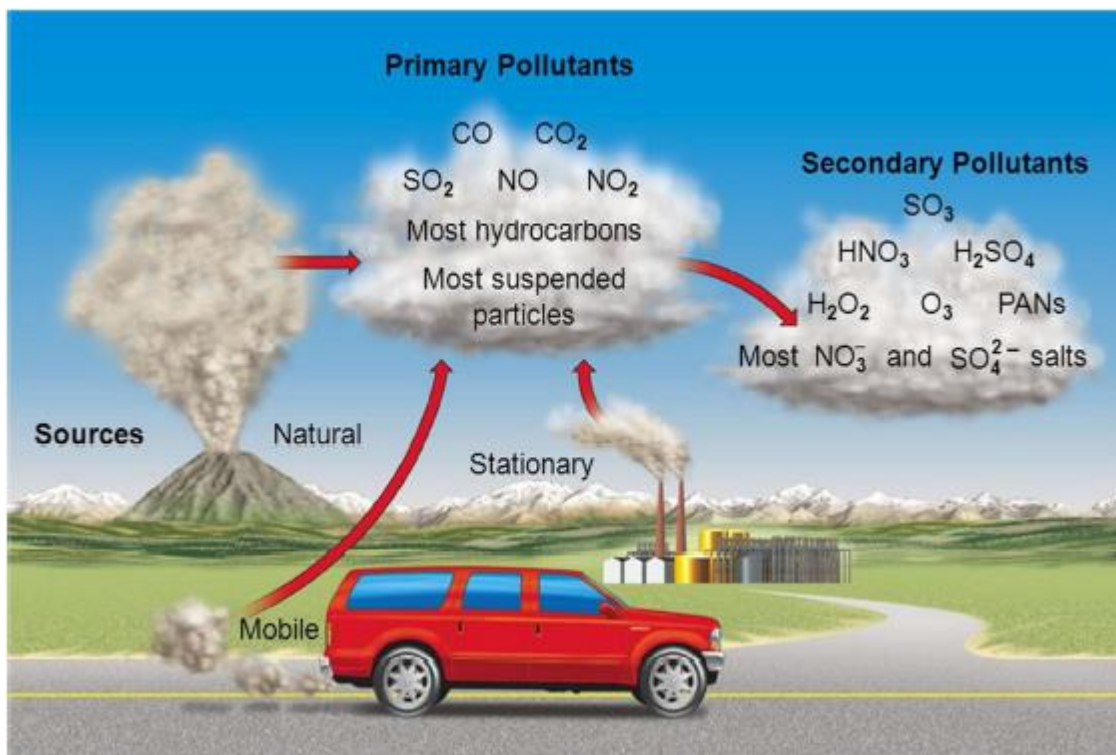


Figure.3: Polluants atmosphériques primaires et secondaires

I.3.Substances

I.3.1.Introduction

Les différentes substances ont des durées de vie dans l'atmosphère qui sont extrêmement variables, ce qui explique que les problèmes de pollution se situent sur des échelles de temps et d'espace très variables. Voici l'ordre de grandeur de la durée de vie dans l'atmosphère de quelques polluants : Les **polluants primaires** sont les polluants que l'on trouve à l'endroit de l'émission.

Tab 01. Durée de vie indicative de certaines substances polluantes dans l'atmosphère

Substance	Polluant
CH ₄	Année
CO	mois
SO ₂	Jours à mois
O ₃	quelques jours
COV	Heurs à jours
Aérosols 1-10 μm	Minutes à jours
Aérosols ≤ 1 μm	Jours à semaines

Une liste des substances les plus couramment évoquées dans les problèmes de pollution atmosphérique est proposée dans ce qui suit. Cette liste n'est pas exhaustive et évolue régulièrement en fonction des connaissances scientifiques liées à la pollution atmosphérique et à ses effets. La liste des polluants est donnée par famille : la notion de famille recouvre soit des caractéristiques physico-chimiques précises (COV, PM..), soit elle correspond à une réglementation particulière, ou encore elles sont parfois regroupées en fonction de leur effet.

I.4. Différents types de polluants

I.4.1. Polluants réglementés

Sept polluants sont actuellement réglementés et font l'objet de mesures continues dans l'air réalisées par les associations de surveillance de la qualité de l'air.

- le dioxyde de soufre : SO₂
- le monoxyde de carbone : CO
- le dioxyde d'azote : NO₂
- l'ozone : O₃
- les particules (PM10)
- le benzène : C₆H₆
- le plomb : Pb
- les hydrocarbures aromatiques polycycliques : 6 (HAP)
- le cadmium : Cd
- l'arsenic : As
- le nickel : Ni
- le mercure : Hg

I.4.2. Composés organiques

I.4.2.1. Composés organiques volatiles - COV

Les COV regroupent une multitude de substances et ne correspondent pas à une définition très rigoureuse. Les hydrocarbures appartiennent aux COV et on fait souvent l'amalgame à tort. Ceci est sans doute dû au fait que l'on exprime souvent les COV en hydrocarbures totaux (notés HC), en équivalent méthane ou propane, ou par rapport à un autre hydrocarbure de référence. Il est fréquent de distinguer séparément le méthane (CH₄) qui est un COV particulier, naturellement présent dans l'air, des autres COV pour lesquels on emploie alors la notation COVNM.

I.4.2.2. Produits Organiques Persistants (POP)

Il existe douze composés organiques toxiques à basse concentration. Ce sont des résidus industriels souvent toxiques, mutagènes et cancérigènes, qui interfèrent avec notre système hormonal et sexuel. La liste la plus communément admise est la suivante : Trichloroéthylène (TRI), Trichloroéthane (TCE), Tetrachloroéthylène (PER), Dioxines et furanes (Diox), Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), Polychlorobiphényles (PCB) et Hexachlorobenzène (HCB). Ils sont semi-volatiles et circulent plus ou moins bien dans l'air, en fonction de la température de celui-ci : dans les endroits froids, leur volatilité est réduite et ils se concentrent donc dans les régions tempérées et polaires. Ils sont lipophiles (faible solubilité dans l'eau mais forte dans les graisses), avec attirance forte pour les tissus adipeux où ils se concentrent généralement (forte bioaccumulation). Ils ont également une durée de vie très longue (persistance dans le milieu).

I.4.2.3.Sources de COV

Les sources de COV sont très nombreuses, les émissions sont dues à certains procédés industriels impliquant la mise en œuvre de solvants (chimie de base et chimie fine, parachimie, dégraissage des métaux, application de peinture, imprimerie, colles et adhésifs, caoutchouc, etc...), ou n'impliquant pas de solvants (raffinage du pétrole, utilisation de CFC, production de boissons alcoolisées, de pain, etc.).

I.4.2.4.Sources potentielles de rejets des HAP

Les HAP sont naturellement présents dans le pétrole brut et ils le demeurent dans les produits raffinés. Mais ils sont également rejetés par des sources naturelles : les feux de forêt, qui libèrent près de 2 000 tonnes de HAP par an, sont sans doute la plus grande source naturelle de HAP. Cependant, ces rejets étant généralement très éloignés dans le temps et dans l'espace, ils n'entraînent pas de risque d'exposition continue. Le dépôt atmosphérique provenant de sources à l'extérieur des pays constitue une autre voie d'entrée significative.

I.4.3.Métaux lourds

Les métaux lourds désignent en général les métaux dont le poids atomique est supérieur à celui du fer. Ces métaux sont parfois également désignés par le terme de métaux traces ou d'éléments traces métalliques. On considère en général les métaux lourds suivants : Arsenic (As), Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Mercure (Hg), Nickel (Ni), Plomb (Pb), Sélénium (Se), Zinc (Zn). Chaque métal possède des caractéristiques et un impact propre. Néanmoins, on distingue en particulier :

– **Mercure** : le mercure est le seul métal liquide à température ambiante. Il se combine très aisément avec d'autres composés et a une volatilité importante. Pour le mercure métallique

(inorganique), on le retrouve sous forme gazeuse, liquide ou ionique. Mais le mercure peut également se combiner avec du gaz carbonique et on parle alors de mercure organique.

– **Plomb** : Une source importante des émissions de plomb dans l'atmosphère a été le transport car le plomb a été pendant longtemps additionné à l'essence du fait de son pouvoir antidétonant.

– **Cadmium** : il provient surtout de l'incinération des déchets, ainsi que de procédés industriels (métallurgie..). Il a des effets sur le système respiratoire et gastro-intestinaux.

Ces 3 métaux se distinguent des autres métaux souvent considérés comme des oligo-éléments pouvant être utiles. Les premiers sont tous très toxiques (effets sur le système nerveux) et ont une durée de vie très grande et une conductivité électrique élevée. Les métaux ne posent pas seulement un problème pour la pollution de l'air, mais aussi pour celle de l'eau et des sols.

I.5. Effets des différentes substances

Les impacts de la pollution conditionnent la plupart du temps le choix des substances retenues dans un inventaire. L'échelle géographique pertinente pour analyser les phénomènes de pollution de l'air va du très local (par exemple odeurs, effets des particules, du benzène, ... sur la santé) à l'échelle mondiale (par exemple effet de serre, couche d'ozone), en passant par des phénomènes régionaux ou continentaux (pluies acides ou pollution photochimique). On classe souvent les effets en fonction de l'échelle qui les concerne.

I.5.1. Effet de serre et changement climatique

L'effet de serre est un phénomène avant tout naturel de piégeage par l'atmosphère du rayonnement de chaleur émis par la terre sous l'effet des rayons solaires. Il permet une température sur Terre bien supérieure à celle qui régnerait en son absence (+ 33°C environ). Le groupe de gaz responsables de ce phénomène est présent dans l'atmosphère à l'état de traces ; il s'agit, pour l'essentiel, de la vapeur d'eau, du gaz carbonique (CO₂), du méthane (CH₄) et du protoxyde d'azote (N₂O). C'est parce que les teneurs atmosphériques de ces gaz sont naturellement très faibles que les émissions dues aux activités humaines sont en mesure de les modifier sensiblement, entraînant, a priori, un renforcement de l'effet de serre, et par suite, des modifications possibles du climat.

Les principales substances émises considérées pour leur impact sur l'effet de serre sont donc : CO₂, CH₄, N₂O, HFC (dont spéciation selon 8 composés), PFC (dont spéciation selon 5 composés), SF₆.

I.6. Destruction de la couche d'ozone

La Couche d'ozone localisée dans la stratosphère filtre à l'extérieur les rayonnements dans la partie ultra-violette (UV) du spectre qui est préjudiciable aux cellules. Sans ozone, la vie sur

Terre ne serait pas ce qu'elle est aujourd'hui. La découverte d'un trou dans la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique et son association avec les CFCs synthétiques a amené le monde à agir pour protéger la couche d'ozone (protocole de Montréal en 1979).

La destruction de la couche d'ozone se produit quand l'équilibre naturel entre la production et la destruction de l'ozone stratosphérique est incliné en faveur de la destruction. Bien que les phénomènes naturels puissent causer la perte provisoire de l'ozone, le chlore et le brome libérés des composés synthétiques tels que les CFCs sont maintenant considérés comme cause principale de cet amincissement. Les émissions de CFCs représentent environ 80% de l'amincissement total de l'ozone stratosphérique.

I.7. Acidification, eutrophisation et photochimie

I.7.1. L'eutrophisation

L'eutrophisation est due à un apport excessif en nutriments et en matières organiques biodégradables issus de l'activité humaine. Elle s'observe surtout dans les milieux aquatiques dont les eaux sont peu renouvelées. Stimulées par un apport substantiel en certains nutriments dont principalement le phosphore et l'azote, le phytoplancton et certaines plantes aquatiques croissent et se multiplient de manière excessive, ce qui conduit, lorsqu'elles se décomposent, à une augmentation de la charge naturelle de l'écosystème en matières organiques biodégradable. Les bactéries, qui dégradent cette matière organique, prolifèrent à leur tour, en appauvrissant de plus en plus l'oxygène de l'eau.

I.7.2. Pluies acides

« Les pluies acides » est un terme utilisé pour décrire toute forme de précipitation acide (pluies, neige, grêles, brouillard). Le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote sont les principales causes des pluies acides. Ces polluants s'oxydent dans l'air pour former de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ou des sels. On les retrouve dans les nuages et les précipitations parfois à des milliers de kilomètres de leur point d'émission, (pollution transfrontière à longue distance). Ceci concourt à des dépôts acides et à l'acidification accrue des pluies par rapport à celles résultant de la seule présence de gaz carbonique dans l'air (qui fait que le pH "naturel" d'une pluie est toujours acide, de l'ordre de 5,6).

I.7.2.1. Effets sur les écosystèmes

Des recherches en laboratoires ont montré que les causes du dépérissement forestier sont très complexes : sols de mauvaise qualité, sécheresses anormales, présence de polluants dans l'atmosphère principalement la pollution acide et l'ozone. Mais à proximité de certains sites générateurs de pollution (site industriel, grosses infrastructures routières), on observe également des baisses de rendements des terres agricoles. En outre, on peut parfois observer

localement une contamination des sols où s'accumulent des métaux, comme le plomb en bordure de route.

L'acidification des lacs et des cours d'eau entraîne une destruction parfois irréversible de la vie aquatique. Outre le problème d'eutrophisation, la baisse du pH provoque la mise en solution de métaux contenus naturellement dans le sol, comme l'aluminium, toxique à l'état dissous pour presque la totalité des organismes vivants.

Les métaux lourds contaminent également à la fois les sols et les réserves d'eau douces. Leur accumulation dans les sols et les eaux laissent craindre une contamination de la chaîne alimentaire. Ce type de pollution s'observe au niveau local (proximité de certains sites), mais aussi à l'échelle régionale et continentale, notamment pour certains métaux comme le mercure.

I.7.2.2. Effets sur la santé

Les limites de concentration dans l'air ambiant de certains polluants (SO_2 , Poussières, NO_2 , Pb, O_3) imposées par des directives Européennes tiennent compte des effets sur la santé de certaines substances. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) édicte les règles qu'il faudrait respecter pour les divers polluants. Certains effets sont associés à des **seuils**, c'est à dire qu'on peut déterminer une valeur de concentration dans l'air en dessous de laquelle la substance n'est pas dangereuse. Pour certaines substances, il n'existe pas de seuil au sens médical du terme, mais il existe des seuils réglementaires (niveau de pollution acceptable, mais non dénué de conséquences).

Les effets sur la santé ayant été le plus étudiés sont les **effets à court terme** liés à des concentrations élevées. Des études sont également menées pour évaluer les conséquences à long terme d'une exposition à un niveau de pollution plus faible. Ci-dessous, les effets des polluants les plus courants sont présentés :

- Particules : plus les particules sont fines plus elles pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire et plus leur temps de séjour y est important. Elles ont une double action liée aux particules proprement dites et aux polluants qu'elles transportent (métaux, hydrocarbures, dioxyde de soufre, etc.). Elles irritent le système respiratoire humain et peuvent contribuer au déclenchement de maladies respiratoires aiguës.
- SO_2 : le SO_2 entraîne une inflammation des bronches avec un spasme qui provoque une altération de la fonction respiratoire.
- NO-NO_2 : NO_2 est toxique (40 fois plus que CO, 4 fois plus que NO) NO_2 pénètre profondément dans les poumons. Les pics de concentrations sont plus nocifs qu'une

même dose sur une longue période. NO est un gaz irritant pour les bronches, il réduit le pouvoir oxygénateur du sang.

– **COV** : certains composés organiques tels que les aromatiques, les oléfines provoquent des irritations des yeux. Les aldéhydes sont de puissants irritants des muqueuses. Certains COV tels que le benzène, sont cancérigènes.

– **CO** : CO se fixe sur l'hémoglobine du sang. Le phénomène est irréversible. On connaît les accidents mortels liés à l'inhalation de CO lors du fonctionnement défectueux de chauffe-eau.

– **Ozone** : L'ozone est un oxydant puissant. C'est un irritant des yeux, de la gorge et des bronches. Ses effets sont majorés par l'exercice physique.

– **POP** : Les conséquences de la présence de POPs qui ont pu être observées sur les animaux sont les suivantes : stérilité plus fréquente et baisse de l'effectif des populations, dysfonctionnements hormonaux, mutations sexuelles, déficiences du système immunitaire, anomalies de comportement, tumeurs et cancers, graves malformations congénitales. L'homme connaît également de graves problèmes : cancers et tumeurs, troubles du système nerveux, déficiences du système immunitaire, augmentation de cas de stérilité et modification de comportements sexuels, diminution de la production de lait chez les mères, augmentation des maladies type diabète, etc.

1.8. Différents types d'émetteurs

1.8.1. Les types d'émetteurs

Parmi tous les émetteurs potentiels de polluants, on a tendance à distinguer différentes catégories d'émetteurs :

1.8.2. Sources non-anthropiques (naturelles)

Il s'agit des sources induisant des rejets de substances polluantes mais qui ne sont pas liées à l'activité humaine. Parmi ces sources, on peut également distinguer les sources biogéniques (liées à la présence d'organismes vivants) des autres sources. L'éruption volcanique (dégagement très important de produits soufrés) est un exemple de source naturelle, de même que la production d'embruns marins (particules). Pour les sources biogéniques, il n'est pas toujours évident de classer le type de sources (cas de l'élevage d'animaux).

1.8.3. Sources anthropiques

Ces sources sont le fait de l'activité humaine. Cependant, la frontière entre les sources anthropiques et naturelles n'est pas toujours bien délimitée. Parmi les sources anthropiques, on oppose souvent les **sources fixes**, émises par des installations ne se déplaçant pas, des **sources mobiles** liées aux transports. Une autre notion est également importante pour la

caractérisation des sources et de leur distribution géographique : c'est la notion de **source ponctuelle**, qui caractérise plutôt les grands sites industriels (points sources).