

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université A. MIRA – BEJAIA

Faculté de Technologie



Département de Génie des Procédés

## **Polycopié de cours**

**Matière : Pollution Air, sol et eau**

**Niveau : 3<sup>ème</sup> Année Licence Génie des Procédés**



**Présenté par :**

Dr. Moufok AZZOUG

Année universitaire : 2016-2017

## Objectifs du cours

Depuis l'émergence de la conscience environnementale au cours des années 70s, il ne se passe pas un jour sans que soit relaté dans les medias, un fait ayant un rapport proche ou lointain avec l'environnement. Les problématiques autour des sciences environnementales (surexploitation des ressources naturelles, pollutions diverses, changement climatique...etc) animent les débats au sein de la communauté scientifique et suscite de plus en plus l'intérêt du grand public. Aujourd'hui, les questions autour de la préservation de l'environnement et de sa défense suscitent engouement et vocations. Cependant, elles demeurent très peu enseignées et peinent à trouver leurs places dans les programmes d'enseignement universitaires, surtout dans ceux destinés aux étudiants des filières technologiques et industrielles. En effet, les activités industrielles de tous genres représentent une part primordiale, soit directement ou indirectement (par l'utilisation des produits industriels) dans la dégradation et la pollution de l'environnement. Par conséquent, il devient impératif de sensibiliser les étudiants des filières technologiques et industrielles à la prise en compte des grands problèmes environnementaux générés par leurs secteurs d'activité.

C'est dans ce contexte que se situe ce cours à caractère transversal dont l'objectif est d'explorer les problèmes environnementaux sous l'angle de la **pollution** : Il en retrace l'histoire, la décrit dans ses différents aspects (atmosphérique, lithosphérique et aquatique) et enfin propose des solutions afin d'engager l'étudiant dans une réflexion approfondie autour des questions environnementales et de lui fournir les connaissances nécessaires pour intégrer les aspects environnementaux dans sa pratique professionnelle.

# Programme

## **Chapitre 1 : Introduction aux sciences environnementales et aux sciences de la pollution**

Introduction générale.....	1
1. Introduction aux sciences de la pollution.....	3
1.1. Définition.....	3
1.2. Classification des pollutions.....	3
1.3. Historique.....	5
1.3.1. Les causes anciennes de la pollution.....	5
1.3.2. Les causes actuelles de la pollution.....	6
1.3.2.1. Explosion démographique contemporaine.....	6
1.3.2.2. Production et consommation d'énergie.....	7
1.3.2.3. Diversification des polluants chimiques.....	9
1.3.2.4. Pollutions dues à l'agriculture et l'élevage intensifs.....	9
1.4. Notion d'empreinte écologique.....	10

## **Chapitre 2: Pollution atmosphérique**

2. Atmosphère et pollution atmosphérique.....	13
2.1. Composition gazeuse de l'atmosphère.....	13
2.2. Structure verticale de l'atmosphère.....	14
2.3. Circulation atmosphérique.....	15
2.4. Pollution atmosphérique.....	17
2.4.1. Principaux polluants atmosphériques.....	18
2.4.1.1. Polluants gazeux.....	19
2.4.1.2. Les polluants particulaires.....	22
2.5. Quelques manifestations de la pollution atmosphérique.....	23
2.5.1. Les smogs.....	23
2.5.2. Les dépôts acides.....	25
2.5.3. Réduction de la couche d'ozone « trou dans la couche d'ozone ».....	27
2.5.3.1. Les causes de la réduction de la couche d'ozone.....	29

2.5.3.2. Conséquences de la destruction de la couche d’ozone et protocole de Montréal.....	29
2.5.4. Réchauffement et changement climatiques globaux.....	32
2.5.4. Législations sur la qualité de l’air.....	38

## **Chapitre 3 : Pollution des sols**

3. Sols et pollution des sols.....	42
3.1. Le Sol.....	42
3.1.1. Origine des sols.....	42
3.1.2. Composition et horizons des sols.....	43
3.1.3. Propriétés des sols.....	44
3.1.3.1. La couleur.....	44
3.1.3.2. La texture.....	44
3.1.3.3. La porosité.....	45
3.1.3.4. L’acidité .....	45
3.2. Dégradation des sols.....	45
3.2.1. Erosion des sols.....	45
3.2.2. Carences minérales.....	45
3.2.3. Salinisation des sols.....	45
3.2.4. Désertification.....	46
3.3. Pollution des sols.....	46
3.3.1. Pollution par les engrais.....	46
3.3.2. Pollution par les pesticides .....	48
3.3.2.1. Devenir et comportement des pesticides dans le sol.....	49
3.3.2.2. Impacts éco-toxicologiques des pesticides.....	51
3.3.3. Pollution par les éléments traces métalliques.....	52
3.3.3.1. Origine des ETM dans le sol.....	52
3.3.3.2. Interaction des ETM avec les constituants des sols .....	53
3.4. Qualité des sols.....	56
3.5. Réhabilitation et traitement des sols pollués.....	56



## **Chapitre 4 : Pollution des milieux aquatiques**

4. Eau et pollution des eaux.....	60
4.1. L'eau.....	60
4.1.1. La répartition des ressources en eau sur terre.....	60
4.1.2. Le cycle de l'eau.....	61
4.2. Pollution des eaux.....	62
4.2.1. Pollution par les eaux usées.....	62
4.2.1.1. Contamination microbiologique des eaux.....	62
4.2.1.2. Contamination par les matières organiques.....	63
4.2.2. La pollution des eaux par les métaux toxiques.....	66
4.2.2.1. Pollution par le mercure.....	66
4.2.2.1. Pollution par le plomb.....	67
4.2.3. La pollution des eaux par les polluants organiques persistants (POPs).....	69
4.2.3.1. Les polychlorobiphényles (PCB).....	69
4.2.3.2. Les Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).....	70
4.2.3.3. Les produits pharmaceutiques.....	70
4.2.4. Pollution des eaux par les hydrocarbures.....	71
4.2.4.1. Devenir du pétrole déversé en mer.....	72
4.3. Traitement des eaux usées.....	74
4.4. Cadre réglementaire pour le contrôle de la pollution des eaux.....	76

# **Chapitre 1 :**

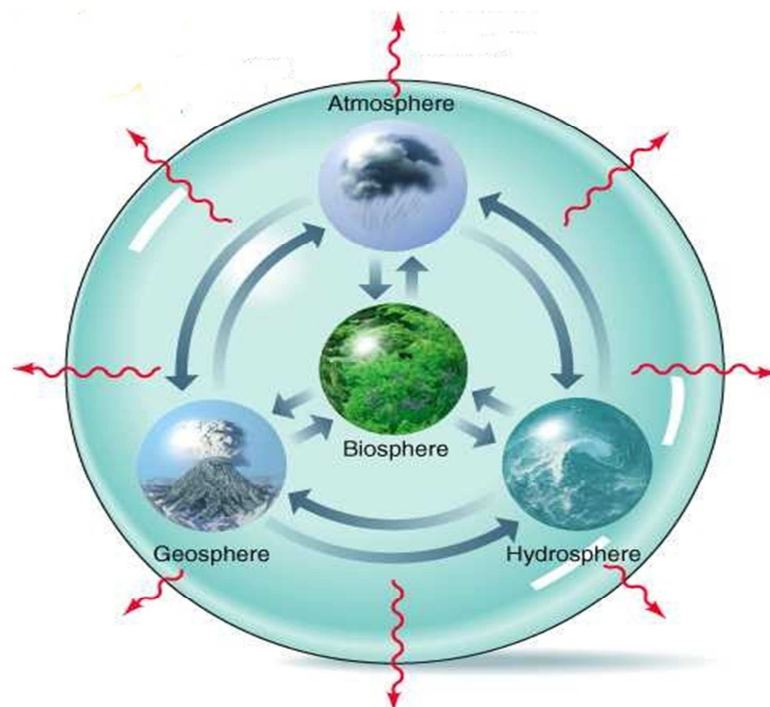
## **Introduction aux sciences environnementales et aux sciences de la pollution**

## Introduction générale

L'environnement est l'ensemble des éléments qui constituent le voisinage d'un être vivant ou d'un groupe d'origine humaine, animale ou végétale et qui interagissent avec lui directement ou indirectement.

Depuis l'émergence de la conscience écologique au cours des années 1970, le terme environnement est utilisé pour désigner l'ensemble des conditions physiques, chimiques, biologiques, climatiques, géographiques et culturelles au sein desquelles se développent les organismes vivants en général et les êtres humains en particulier. L'environnement inclut donc l'air, la terre, l'eau, les ressources naturelles, la flore, la faune, les hommes et leurs interactions.

Afin de trouver un moyen commode d'appréhender les grandes caractéristiques de notre environnement, et afin d'analyser la place des êtres vivants au sein de la planète et la place particulière de l'homme, on a coutume de diviser le monde qui nous entoure en 4 grandes sphères fonctionnant comme un système dont les différentes parties sont connectées : la lithosphère (géosphère), l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère (Figure 1.1).



**Figure 1.1** : Les sphères du système terrestre (Ramade, 2012)

- **La lithosphère**

C'est l'ensemble du substrat solide (Sols et roches) qui affleure à la surface des continents et sur le fond des océans. Sa principale caractéristique est son caractère solide.

- **L'hydrosphère**

Elle représente le compartiment « eau » de la terre, sous ses trois formes (solide aux pôles, liquide dans l'océan, les rivières, les nappes et les êtres vivants, et vapeur dans l'atmosphère).

- **L'atmosphère**

L'atmosphère est une mince enveloppe, principalement à l'état gazeux, qui est collée par attraction à la surface du globe. Dans sa partie la plus basse elle est agitée de mouvements très rapides qui conditionnent les échanges thermiques de notre planète.

- **La biosphère**

Elle comprend l'ensemble des êtres vivants de la planète et elle se concentre à l'interface entre atmosphère et hydrosphère ou la lithosphère. Mais la biosphère est également présente au sein de la lithosphère au moins jusqu'à une profondeur de quelques kilomètres sous forme microbienne, et au sein de l'hydrosphère et de l'atmosphère.

Les sciences environnementales modernes traitent les nombreuses problématiques interdépendantes liées aux populations humaines, aux ressources naturelles de la terre et à la pollution de l'environnement. Aujourd'hui, l'homme est devenu le principal acteur des changements de son environnement. Il occupe une place si importante que certains spécialistes sont amenés à lui consacrer une sphère à part entière « **Anthroposphère** ». Cette appellation est utilisée pour souligner le poids que l'homme fait peser sur le fonctionnement des autres sphères en captant leurs ressources et en modifiant l'équilibre de leurs interactions.

Avec une population de plus en plus croissante, l'espèce humaine est en train d'épuiser les ressources naturelles de notre planète, conduisant inexorablement vers la dégradation des milieux naturels et aux pollutions les plus diverses.

## 1. Introduction aux sciences de la pollution

### 1.1. Définition

Ce terme de **pollution** qualifie généralement une multitude d'actions qui, d'une façon ou d'une autre dégradent le milieu naturel. La définition retenue dans sa conception actuelle pourrait s'énoncer de la façon suivante « *la pollution correspond à toute modification anthropogénique d'un écosystème se traduisant par un changement de concentration des constituants chimiques naturels ou de la diffusion directe ou indirecte de substances chimiques artificielles, d'une perturbation du flux de l'énergie, de l'intensité des rayonnements, de la circulation de la matière ou encore de l'introduction d'espèces exotiques dans un milieu naturel* » (Ramade, 2012).

La pollution est en général un sous-produit de l'activité humaine qui peut toucher l'**atmosphère**, le **sol** ou les **eaux**. Elle peut affecter la santé humaine, l'eau de consommation, l'eau de baignade, la production agricole, les espèces animales ou végétales, la beauté des paysages...etc.

### 1.2. Classification des pollutions

Donner une classification des pollutions n'est pas une chose aisée car on peut la réaliser à partir de nombreux critères, mais la classification la plus commode est celle de grouper les agents polluants selon leur nature : **physique** (rayonnement ionisants, pollutions sonores, réchauffement artificiel d'un milieu dû à une source de chaleur technologique), **chimique** (substances minérales, organiques ou de nature biochimique), enfin la pollution **biologique** (micro-organismes pathogènes, populations d'espèces exotiques invasives et introduites par l'homme ou encore introduction des organismes génétiquement modifiés (OGM) dans l'agriculture). On peut aussi classer les pollutions de façon écologique en prenant en considération le milieu récepteur de cette pollution (Atmosphère, Hydrosphère, sols).

Le tableau 1.1 dresse une synthèse de la classification citée ci-dessus.

**Tableau 1.1** : Classification des principaux types de pollutions (Ramade, 2012)

Nature des pollutions	Milieu affecté par la pollution		
	Atmosphère	Hydrosphère	Sols
<b>1. Pollution physique</b>			
Radiations ionisantes	+	+	+
Pollution thermique	+	+	+
Bruits et vibrations (nuisance sonore et auditive)	+		+
Pollution lumineuse	+	+	+
<b>2. Pollution chimique</b>			
Dérivés gazeux du carbone	+	+	
Hydrocarbures	+	+	+
Dérivés du soufre	+	+	+
Dérivés de l'azote	+	+	+
Métaux et Métalloïdes toxiques		+	+
Fluorures	+		+
Aérosols et particules solides	+		
détergents		+	
Pesticides et autres composés de synthèse non volatils		+	+
Substances chimiques nauséabondes	+		
<b>3. Pollution biologique</b>			
Contamination microbiologique (bactéries et virus)	+	+	+
OGM			+
Espèces invasives introduites		+	+
<b>4. Nuisance esthétique</b>			
Dégradation d'un milieu rural ou urbain ou d'un paysage par l'urbanisation sauvage et des aménagements de toutes sortes mal-conçus	+		+

### 1.3. Historique

#### 1.3.1. Les causes anciennes de la pollution

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, la pollution n'est pas un phénomène récent ou accidentel, mais compte parmi les plus anciens. En effet, la pollution est un phénomène indissociable de l'espèce humaine depuis l'apparition des premiers hominidés il y a quelques deux à trois millions d'années. **Le feu** fut sans doute le premier acquis technologique majeur de l'homme et la première cause de pollution humaine à travers les fumées qu'il engendre. Jusqu'à ce qu'il en assure la maîtrise, l'homme vécut en parfaite harmonie avec la nature et occupa dans les écosystèmes qu'il peuplait une niche écologique sans doute équivalente à celles des autres espèces animales. Mais aussitôt que les hommes disposèrent du feu, probablement depuis au moins 800 000 ans pour les premières traces de foyers (site de Benot Ya'aqov en Israël), ils se mirent à polluer leur environnement, comme en témoignent les couches de fumées noirâtres qui tapissent les grottes préhistoriques.

Au début du néolithique (il y a 10 000 ans à peu près), l'impact de l'homme sur la biosphère s'est accru de manière considérable, avec la sédentarisation, la domestication d'animaux, la pratique de l'agriculture et l'accroissement démographique qui en est résulté. Après le feu, **l'agriculture** constitue sans conteste la deuxième révolution technologique de l'humanité et a conditionné les civilisations qui se succédèrent depuis cette époque jusqu'à la période récente. L'agriculture constitua alors la première cause de perturbation de la biosphère causée par l'homme et son extension s'est produite au détriment des écosystèmes naturels (substitution de biomes forestiers au profit de terrains agricoles, disparition d'espèces sauvages au profit des espèces domestiques...etc). L'agriculture permit aussi une certaine sédentarisation de l'habitat et l'apparition de la vie urbaine et les concentrations humaines avec la constitution des premières cités, avec leurs ruisseaux d'écoulement d'effluents domestiques, les fumées et l'accumulation des déchets et résidus divers (déchets ménagers, matières fécales...etc). A cette pollution domestique du néolithique (de 10 000 à 4500 ans avant le présent) a succédé une pollution proto-industrielle avec **l'apparition de l'activité minière et de la métallurgie** en antiquité. L'exploitation des métaux permet de mouler une variété d'objets (armes, outils et bijoux). Cette technologie aura permis de favoriser les échanges commerciaux qui se multiplient. Historiquement, l'exploitation des métaux apparaît dans un certain ordre chronologique qui donne leur nom aux périodes où leur usage est prédominant. Nous aurons ainsi, l'âge du cuivre (-4600 à -2000), l'âge du bronze (mélange de

civre et d'étain) (-2000 à -1000) et l'âge du fer (-1000). En parallèle à ces métaux largement utilisés, d'autres métaux sont aussi exploités depuis l'antiquité tels le Plomb, le Cadmium et le Mercure entre autres. Cette activité minière et métallurgique s'est souvent accompagnée d'une production de déchets qui ont des impacts non négligeables dans les cités antiques, en témoignent les récits des narrateurs grecs et romains. Mais quoi qu'il en soit, ces pollutions anciennes depuis la domestication du feu par l'homme demeuraient limitées dans leur nature et leur étendue jusqu'à l'avènement de la civilisation industrielle moderne. Cette dernière confère aujourd'hui aux problèmes environnementaux une ampleur sans précédent.

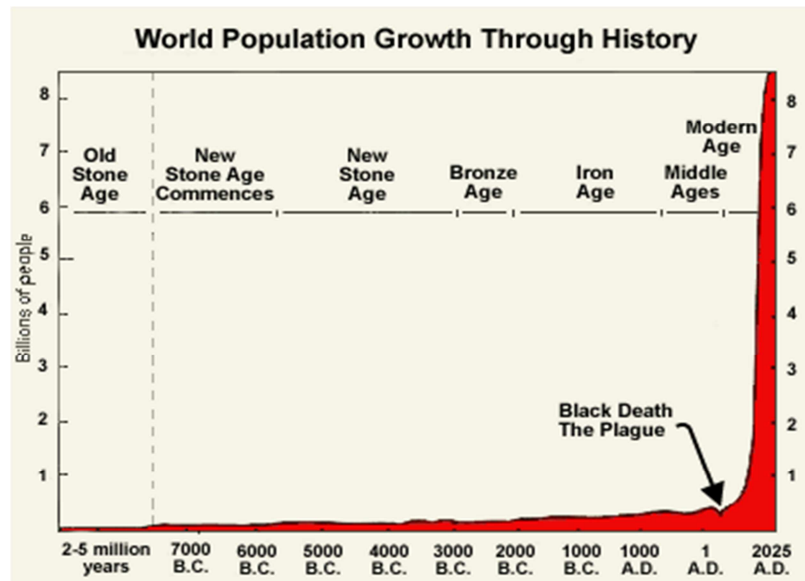
### **1.3.2. Les causes actuelles de la pollution**

Le début du XVIII<sup>e</sup> siècle a vu les premiers balbutiements de la civilisation technologique et industrielle dans laquelle nous vivons aujourd'hui. Les structures économiques et sociales des pays nouvellement industrialisés (Europe de l'Ouest) se modifient rapidement. La mise au point de nouvelles machines industrielles, synthèse de nouveaux produits et l'application de nouvelles méthodes de culture et d'élevage beaucoup plus efficaces finissent par changer radicalement les relations entre l'homme et son environnement. Ce changement deviendra plus significatif au cours de la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, marqué par un développement fulgurant de l'industrie moderne.

#### **1.3.2.1. Explosion démographique contemporaine**

La multiplication inconsidérée de l'espèce humaine (*Homo sapiens*) constitue, tout autant que son développement technologique, le facteur primordial de la dégradation de l'environnement. L'accroissement fulgurant de la population humaine a amené certains spécialistes à parler de « Bombe P », P pour population (Ehrlich, 1968, Ehrlich et Ehrlich, 1970). Au début de notre ère (il y a 2000 ans) la population humaine n'était que 200 millions d'habitants, 3 milliards en 1960 et 5 milliards en 1987 (Figure 1.2). En 2016, les experts de la démographie mondiale ont estimé à près de 7.4 milliards de personnes. Les effectifs de la population humaine pourraient atteindre 10 milliards en 2050 et 11 milliards en 2100 (*Population Reference Bureau, 2016*).





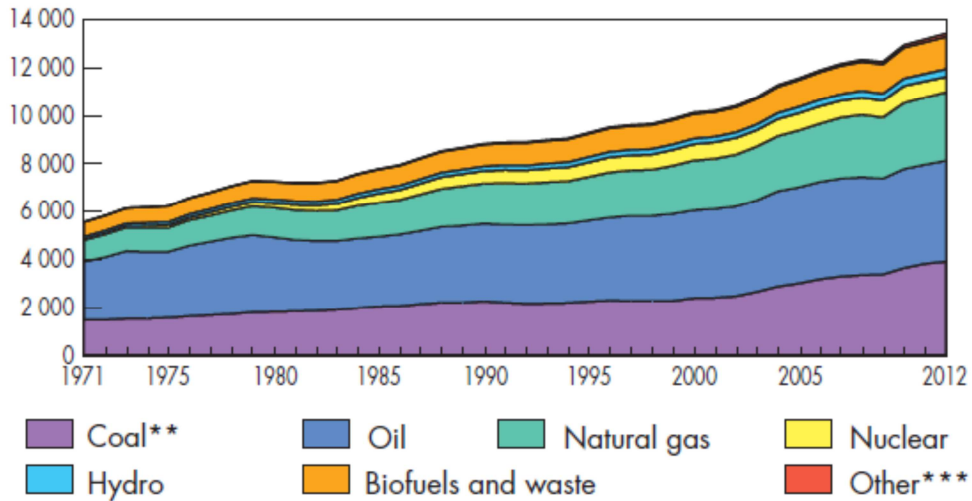
**Figure 1.2 :** Croissance démographique des effectifs humains depuis les origines (*Population Reference Bureau*)

Les effectifs de la population humaine toujours de plus en plus importants, consomment d'énormes quantités de nourriture et d'eau, utilisent beaucoup d'énergie et de matières premières et produisent beaucoup de déchets. On estime la production mondiale de déchets à quelques 4 milliards de tonnes par an ([www.Planetoscope.com](http://www.Planetoscope.com)). Un Américain ou un européen produit en moyenne entre 600 et 700 kg de déchets solides par an et un habitant du tiers monde quant à lui en produit 100 à 200 kg/an.

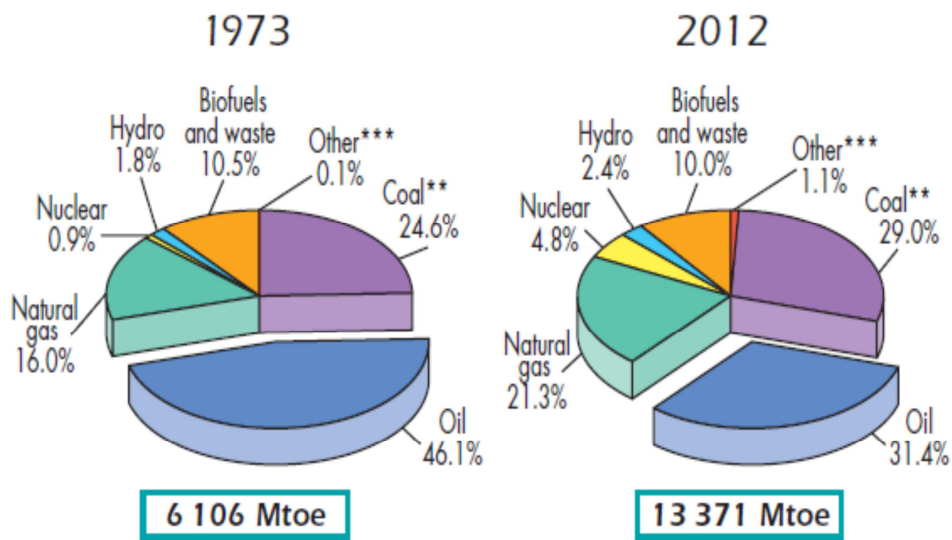
### 1.3.2.2. Production et consommation d'énergie

La consommation d'énergie mondiale représente 13371 Millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep, Mtoe en anglais) en 2012 (Figure 1.3) dont une part importante des combustibles fossile (Pétrole et gaz naturel) (Figure 1.4). Le pétrole reste toujours comme source majoritaire d'approvisionnement énergétique à l'échelle mondiale.

Les aéropolluants produits par les combustibles fossiles soulèvent de graves problèmes environnementaux et climatiques, tels que le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et les oxydes de carbones qui sont responsables de désastreux phénomènes de pluies acides, de smog ou encore du réchauffement climatique global sur lesquels on va revenir dans les chapitres suivants.



**Figure 1.3 :** Evolution de la consommation mondiale en énergie en millions de tonnes équivalent pétrole (MTEP) de 1971 à 2012 (IEA, 2014).



**Figure 1.4 :** Part relative des différentes sources d'énergie dans la consommation mondiale en énergie pour 1973 et 2012 (IEA, 2014).

### **1.3.2.3. Diversification des polluants chimiques**

Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, l'industrie chimique a mis à notre disposition une multitude de nouvelles molécules chimiques de synthèse. Depuis les années 1990s, on estime que plus 120 000 molécules chimiques sont commercialisées dans le monde et que chaque année 500 à 1000 molécules nouvelles sont mises sur la marché.

L'un des aspects les plus préoccupants de la pollution par les substances chimiques globale tient en la croissance des rejets de polluants organiques persistants (POPs) tant dans les pays industrialisés que dans les pays du tiers monde. Ces POPs (pesticides, hydrocarbures aromatiques, produits pharmaceutiques, PCB...etc) se dégradent difficilement et perdurent dans l'environnement pendant de nombreuses années. Ils peuvent alors contaminer tous les compartiments de l'environnement : l'eau, l'air, le sol et les sédiments, mais aussi tous les produits que l'on ingère. Ils peuvent également être déplacés d'un milieu à l'autre. De ce fait, les micropolluants pourraient avoir une action néfaste à long terme sur les organismes vivants sur les équilibres des écosystèmes et la santé humaine.

### **1.3.2.4. Pollutions dues à l'agriculture et l'élevage intensifs**

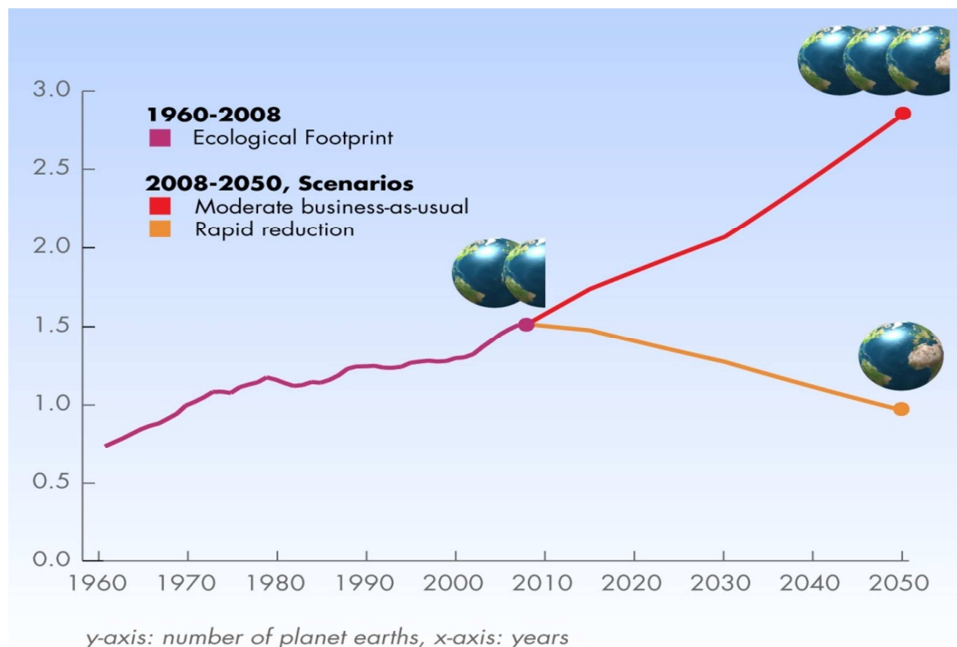
La dernière cause majeure de la pollution de la biosphère est liée au développement d'un modèle d'une agriculture et d'un mode d'élevage modernes dominant dans presque tous les pays du monde, développés ou en voie de développement. L'usage intensif des pesticides de fertilisants azotés, de phosphates et de sels de potasse dans l'agriculture a conduit à une augmentation spectaculaire des rendements des cultures.

Dans le même temps, l'élevage industriel avec des exploitations comptant parfois plusieurs milliers de bovins, des dizaines de milliers de porcs et des centaines de milliers de volailles est devenue une source considérable de pollution dans le milieu rural. Ces exploitations génèrent des quantités immenses de fumier, provoquant une pollution insidieuse des sols, des eaux superficielles ou littorales et des nappes phréatiques.

En définitive cette civilisation technologique moderne nous a rendu des services incontestables sur le plan du confort et du niveau de vie. Cependant, cette modernité conduit inexorablement à la surexploitation des ressources naturelles et à des d'effets nocifs et indésirables sur les milieux naturels.

### 1.4. Notion d’empreinte écologique

Afin de se représenter la quantité de nature qu’on utilise et d’évaluer l’impact de l’homme sur l’environnement, l’environnementaliste suisse **Mathis Wackernagel** a développé le concept d’**empreinte écologique**. D’après ce scientifique, chaque personne a une empreinte écologique, c’est-à-dire « *une quantité moyenne de terre productive, d’eau douce et d’océan qui est indispensable à cette personne pour lui fournir continuellement nourriture, bois, énergie, eau, logement, moyens de transport et pour éliminer ses déchets* ». D’après le rapport du « *Living Planet 2014* » produit par les scientifiques du WWF (World Wildlife Fondation), la terre a une surface d’environ 12 milliards d’hectares biologiquement très productifs qu’on appelle « **biocapacité** ». Si l’on divise cette surface par la population mondiale (7,4 milliards), on attribue à chaque personne 1,6 hectare utilisable. Comme l’empreinte écologique mondiale moyenne est supérieure à 2 hectares par personne, cela signifie que nous avons besoin **d’une planète et demie** pour subvenir à nos besoins et éliminer nos déchets (Figure 1.5). De ce fait, nous avons donc une dette écologique vis-à-vis de la nature. A titre d’exemple, un Américain a une empreinte supérieure à 7 hectares. Si tout le monde consommait comme un Américain, il faudrait disposer de **5 planètes**.



**Figure 1.5 :** Evolution de l’empreinte écologique mondiale moyenne de 1960 à 2012 et prévision pour 2050 ([www.footprintnetwork.org](http://www.footprintnetwork.org)).

## Références bibliographiques et conseils de lecture pour ce chapitre introductif

**Brimblecombe, P., Makra, L. 2005.** Selections from the history of environmental pollution, with special attention to air pollution. Part 2. From medieval time to the 19th century. *International Journal of Environment and Pollution*, 23, 351–367.

**Ehrlich, P.R. 1968.** The population bomb. New York: Ballantine.

**Ehrlich, P.R., Ehrlich, A.H. 1970.** Population, ressources, environment: issues in human ecology. San Francisco, CA: W.H. Freeman and Co.

**International Energy Agency (IEA, 2014).** Key world energy statistics.

**Living planet Report, 2014**

**Makra, L., Brimblecombe, P. 2004.** Selections from the history of environmental pollution, with special attention to air pollution. Part 1. *International Journal of Environment and Pollution*, 22, 641–656.

**Ramade, F., 2012.** Eléments d'écologie appliquée. Action de l'homme sur la biosphère. Edition Dunod. 824p.

### Sites internet

<http://www.footprintnetwork.org>

<http://www.planetoscope.com>

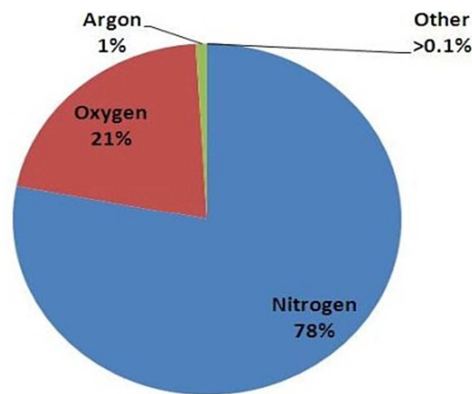
<http://www.prb.org/>

**Chapitre 2 :**  
**Pollution atmosphérique**

## 2. Atmosphère et pollution atmosphérique

### 2.1. 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<sub>2</sub>, 78% en volume) et de l'oxygène (O<sub>2</sub>, 21% du volume) qui constituent à eux deux 99% de l'air sec (figure 2.1). De la vapeur d'eau y est présente aussi à des taux variables (Rarement au-delà de 5 à 6%).



**Figure 2.1 :** Composition de l'air en volume

Pour le reste, soit 1 %, on y trouve de l'argon (Ar, presque 1 %), du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>, 0,03 %), et des traces infimes d'une multitude d'autres gaz : néon, krypton, hélium, ozone, hydrogène (voir tableau 2.1).

**Tableau 2.1 :** Composition de l'atmosphère exprimée en pourcentage par rapport à l'air sec.

Gaz constituants de l'air sec	Pourcentages en volume
Azote (N <sub>2</sub> )	78,09
Oxygène (O <sub>2</sub> )	20,95
Argon (Ar)	0,94
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	0,03
Néon (Ne)	1,8 10 <sup>-3</sup>
Krypton (Kr)	1,0 10 <sup>-4</sup>
Méthane (CH <sub>4</sub> )	1,5 10 <sup>-6</sup>
Hélium (He)	5,24 10 <sup>-4</sup>
Ozone (O <sub>3</sub> )	0,04 10 <sup>-6</sup>
Xénon (Xe)	8,0 10 <sup>-6</sup>
Hydrogène (H <sub>2</sub> )	5,0 10 <sup>-5</sup>

### 2.2. 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) (Figure 2.2).

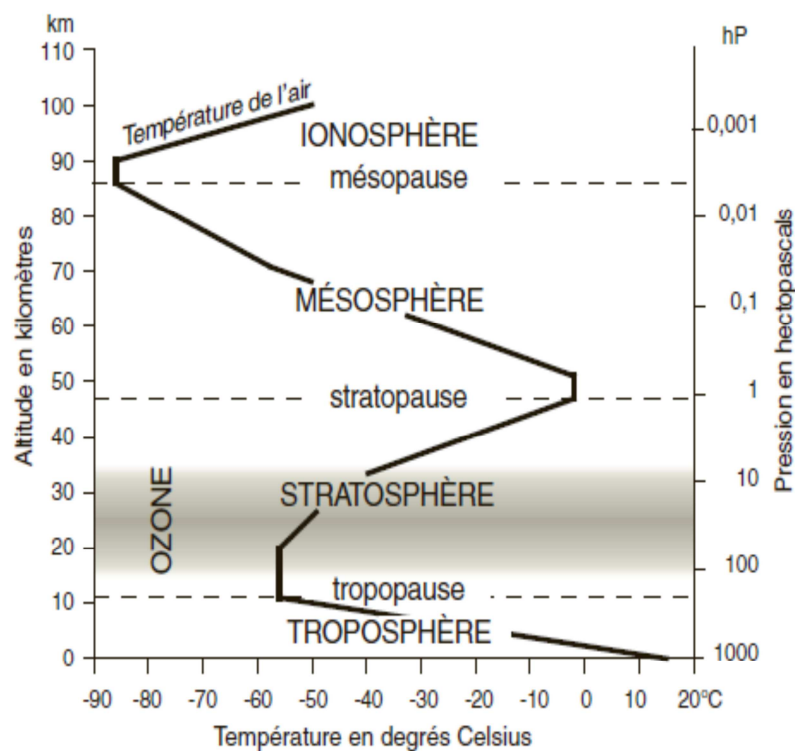


Figure 2.2 : Structure verticale de l'atmosphère (Jacobson, 2002)



- 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 (Figure 2.2), 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.

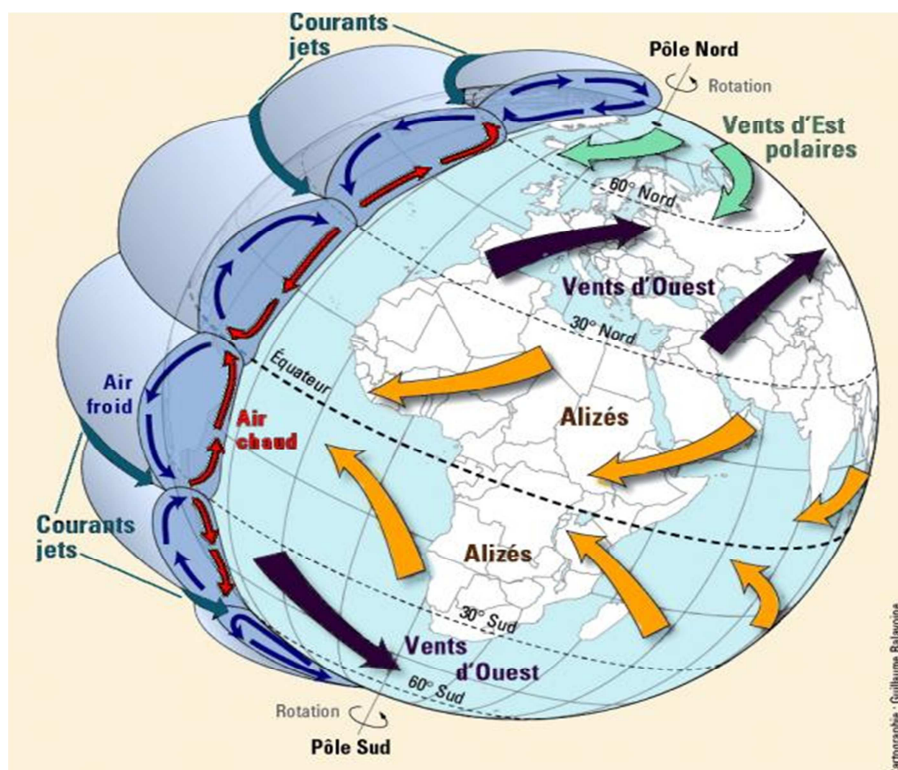
### 2.3. Circulation atmosphérique

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 rafraichit 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) (figure 2.3). 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  $1\text{N/m}^2$ ). 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 (figure 2.3), 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.



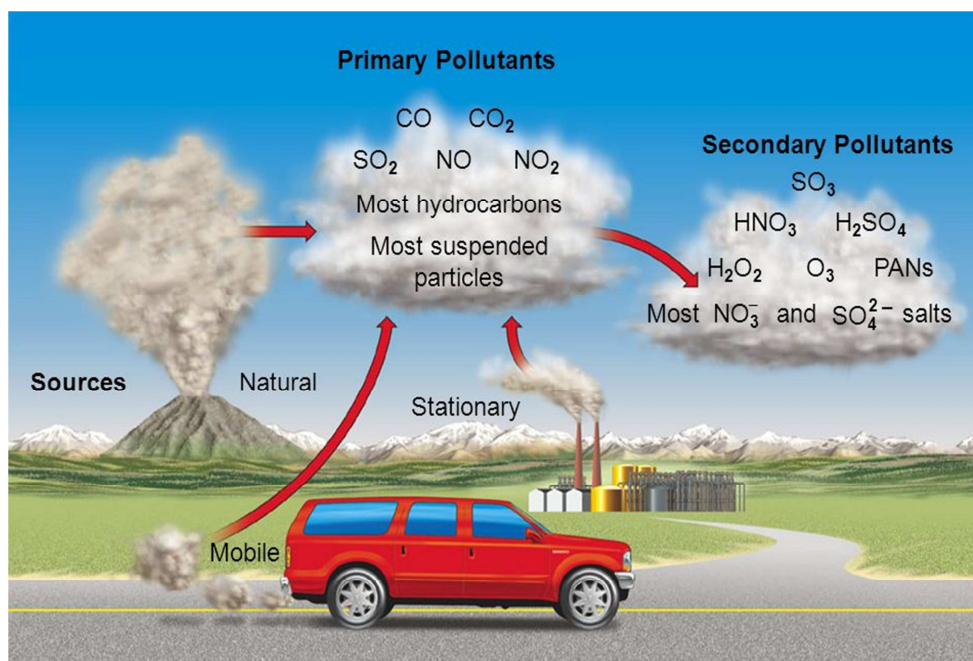
**Figure 2.3** : La circulation atmosphérique

## 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 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , 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 (figure 2.4).

- **Les polluants atmosphériques primaires** sont émis directement dans l'atmosphère, issus des sources de pollution (trafic routier, industries, chauffage, agriculture...).
- **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 2.4 :** Polluants atmosphériques primaires et secondaires

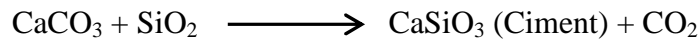
### 2.4.1. Principaux polluants atmosphériques

#### 2.4.1.1. Polluants gazeux

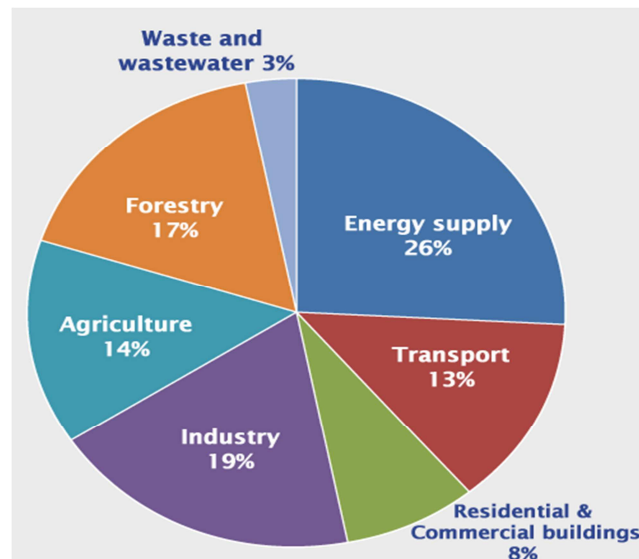
##### A) Dérivés du carbone

- **Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)**

C'est un constituant normal de l'atmosphère, il s'y rencontre aujourd'hui à raison de 400 ppmv (parties par millions en volume). Il a présenté de très fortes variations au cours des temps géologiques. Cependant, depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, son taux atmosphérique n'a cessé d'augmenter à cause de l'utilisation massive de combustibles fossiles brûlés pour la production d'énergie par la civilisation industrielle. La combustion de 12g de carbone fossile produit 44g de CO<sub>2</sub>. Par conséquent, il n'est pas difficile de concevoir les quantités de gaz carbonique générées par l'oxydation par de telles masses de combustibles fossiles. A cela doit s'ajouter les volumes de gaz carboniques rejetés par les la production de ciment. Le ciment est un silicate anhydre de calcium qui est fabriqué à partir de la réaction chimique suivante :



A côté de ces activités industrielles, d'autres sources anthropiques (dues à l'activité humaine) sont des sources non négligeables de l'émission du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (agriculture, chauffage domestique et résidentiel, déforestation, transports...etc.) (figure 2.5). Le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre ; son accumulation dans l'atmosphère est associée au réchauffement climatique global de la planète sur lequel on va revenir plus en détails plus loin dans ce cours.



**Figure 2.5** : Emission globale de CO<sub>2</sub> par secteur d'activité (GIEC, 2007)

- **Les hydrocarbures**
  - **Le méthane (CH<sub>4</sub>)**

Ce gaz à l'état de trace est naturellement présent dans l'atmosphère. Cependant, il en existe des quantités considérables dans la lithosphère car c'est le constituant majeur des gisements fossiles de gaz naturel. Le méthane atmosphérique provient essentiellement de la dégradation anaérobie de la matière organique dans les sédiments et les sols humides (rizières, marécages...etc.). Le métabolisme et la fermentation entérique des herbivores et les termites sont les autres sources de la production biogéochimique naturelle du méthane. Depuis l'avènement de l'ère industrielle, on assiste à une augmentation fulgurante des teneurs en méthane atmosphérique (650 ppb, (partie par milliards en volume) en 1750 à 1800 ppb en 2015). Cette augmentation résulte de l'accroissement du cheptel domestique et de l'augmentation des surfaces cultivées en rizières pour satisfaire les besoins alimentaires d'une démographie de plus en plus croissante. Le méthane est un gaz à effet de serre 25 fois plus puissant que le CO<sub>2</sub> et sur lequel on va revenir dans le cours sur le changement climatique.

- **Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)**

Les HAP constituent une classe diversifiée de composés organiques. Ils sont constitués par la fusion d'un nombre variable de cycles benzéniques (2 à 7 cycles). Le plus simple d'entre eux est le naphthalène (2 cycles, C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>) tandis que le plus complexe est le coronène (7 cycles, C<sub>24</sub>H<sub>12</sub>). Ils peuvent provenir à la fois de sources naturelles (feux de forêts, dégradation de la matière organique par les bactéries) et de sources anthropiques. Les HAP se forment lors des combustions incomplètes des carburants en particulier dans les moteurs diesel. Beaucoup d'entre eux sont cancérigènes et dangereux pour la santé humaine.

- **Les aldéhydes**

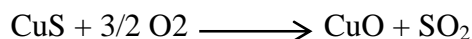
Ils se forment essentiellement lors des combustions incomplètes. Les raffineries de pétrole, l'incinération des ordures ménagères ainsi que les moteurs de voiture en sont les sources majoritaires de ces substances dans l'atmosphère.

### **B) Les dérivés du soufre**

- **Le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>)**

En absence de toute source de pollution, ce composé se trouve à des quantités très infimes dans l'atmosphère. Le volcanisme et la fermentation dans les divers environnements aquatiques et les feux de forêt constituent les principales sources naturelles du dioxyde de soufre. Depuis des décennies, les émissions de SO<sub>2</sub> par les activités humaines dans le milieu urbain dépassent de loin les sources naturelles (tableau 2.2). La principale source du SO<sub>2</sub> atmosphérique provient de la combustion des combustibles fossiles. La métallurgie des métaux non ferreux constitue la deuxième cause principale de ce composé. Cela provient du fait que le minerai dont sont extraits les principaux métaux est constitué de pyrite dont la formule est M<sub>x</sub>S<sub>y</sub> où « x » est le nombre d'atomes du métal M « y » le nombre d'atome du soufre.

La première étape de l'extraction d'un métal consiste en l'oxydation de la pyrite ; ainsi dans le cas de la pyrite cuivreuse on aura la réaction :



- **L'hydrogène sulfuré (H<sub>2</sub>S)**

Ce composé est présent naturellement dans l'atmosphère. Il est produit lors des fermentations anaérobies par les sulfobactéries, tant en milieu marin que continental.

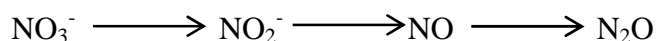
**Tableau 2.2 :** Emission et concentrations du dioxyde de soufre et de l'hydrogène sulfuré produits chaque année dans la biosphère (Ramade, 2012).

Composé	Source	Emission moyenne en 10 <sup>6</sup> t/an d'équivalent soufre	Concentration normale dans l'air pur (ppb)
SO <sub>2</sub>	Combustion du charbon	63,0	0,14 (air continental) 0,07(air marin)
	Raffinage du pétrole	4,0	
	Combustion du pétrole	19,3	
	Métallurgie	13,6	
	Volcanisme	28	
H <sub>2</sub> S	Emissions industrielles	3,9	0,1
	Emissions naturelles	32	

**C) les dérivés de l'azote**

- **Le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O)**

Le N<sub>2</sub>O est le plus abondant des oxydes d'azote dans une atmosphère non polluée avec une concentration de de 0,25 ppm. C'est un puissant gaz à effet de serre contribuant au réchauffement climatique. Sa source principale dans l'atmosphère est due à la dénitrification par les bactéries des nitrates utilisés à vaste échelle dans les engrais chimiques selon la réaction suivante :



- **Le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>)**

Avec le NO, ce gaz joue un rôle fondamental dans tous les problèmes de la pollution atmosphérique. C'est un gaz stable et fortement coloré en jaune qui réduit la visibilité et confère cette coloration brunâtre aux masses d'air qui recouvrent les grandes villes urbanisées. Ce phénomène est connu sous le nom de « Smog » sur lequel on reviendra ultérieurement. Les gaz d'échappement automobiles et les combustions à haute température sont les principales sources de ces oxydes d'azote.



- **Les peroxyacylnitrates (PAN)**

Les PAN se forment par réactions photochimiques entre divers constituants des atmosphères polluées exposées à de fortes insulations dans des villes à climat méditerranéen. Les PAN ont pour structure de base la formule chimique suivante :  $R-COO_2NO_2$ . Où R est un radical alkylique ( $C_nH_{2n+1}$ ). Les PAN sont très toxiques pour les végétaux et très irritants pour les yeux et les voies respiratoires.

### D) Les composés organiques volatils (COV) et dérivés halogénés

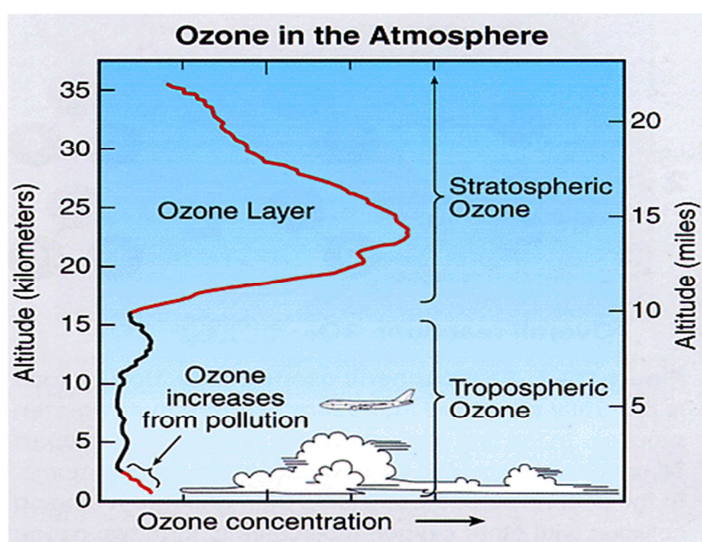
Un composé chimique est dit organique lorsque sa molécule possède au moins un atome de carbone lié à un atome d'hydrogène. Cependant les atomes d'hydrogène peuvent être remplacés par d'autres atomes tels que l'oxygène, l'azote, le soufre, le phosphore, le silicium ou encore des halogènes (fluor, chlore, brome, iode...). Les composés organiques volatils (COV) sont des substances qui se caractérisent par leur grande volatilité, c'est-à-dire qu'ils émettent des vapeurs même à pression et température ambiante et se répandent aisément dans l'atmosphère.

Les chlorofluorocarbones (CFC) par exemple sont très dangereux et sont principalement la cause du trou de la couche d'ozone qu'on va aborder plus tard.

L'incinération de matières plastiques et d'ordure conduit à la formation des dioxines, substances très préoccupantes en raison de leur impact toxicologique.

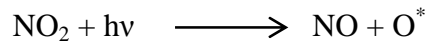
### E) l'Ozone ( $O_3$ )

L'ozone ( $O_3$ ) est un gaz qu'on trouve dans différentes parties de l'atmosphère. Sa concentration dans l'air s'élève avec l'altitude pour atteindre son maximum d'abondance entre 20 et 40 km où il forme un écran qui protège la terre des rayonnement ultraviolets nocif, communément appelé « **couche d'ozone** » ou ozone **stratosphérique** (figure 2.6).

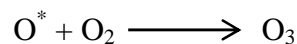


**Figure 2.6 :** Profil vertical des concentrations en ozone atmosphérique en fonction de l'altitude.

Par contre, l'ozone qu'on trouve près du sol, dit « **troposphérique** » est un polluant nocif tant pour la santé humaine que pour l'environnement. Dans des conditions non polluées, les teneurs en ozone ne dépassent guère les 10 à 15 ppb. Par contre, on relève des concentrations supérieures à 1000 ppb dans les phénomènes de pollution urbaine. Il se forme quand les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) subissent une réaction photochimique à la lumière du soleil suivant les réactions suivantes :



L'oxygène radicalaire ainsi formé réagira très vite avec la molécule de dioxygène en présence de COV qui catalysent la réaction pour former une molécule d'ozone (O<sub>3</sub>) :



### 2.4.1.2. Les polluants particuliers

Les poussières « aérosols » constituent l'autre catégorie de polluants atmosphériques. Ce type de pollution constitue aussi l'un des aspects majeurs de la contamination de l'atmosphère par les activités humaines. Cependant, de nombreux phénomènes naturels (volcanisme, embruns, tempêtes) sont aussi d'importantes sources naturelles d'aérosols.

Parmi les principales causes de pollution de l'air par les particules figure l'usage des combustibles fossiles, dont les combustions incomplètes provoquent l'émission dans l'air d'aérosols de tous genres. C'est le cas par exemple de l'utilisation du charbon qui renferme du carbone, des hydrocarbures et de nombreux métaux.

Les chantiers de génie civil, les extractions minières à ciel ouvert ainsi que le débroussaillage par des feux de forêt intentionnels sont des causes non négligeables de particules.

Ces aérosols comportent à la fois des particules solides (poussières) ou liquides dispersés dans l'air par les diverses activités humaines. Elles sont généralement classées par ordre de taille décroissante.

- Les particules de grand diamètre, supérieur à 10 µm, dites sédimentables.
- Les particules semi-fines peu ou pas sédimentables, de taille ≤ 10 µm, dénommées PM10.
- Les particules fines, insédimentables de taille ≤ 2,5 µm (PM2,5).
- Les particules inframicroscopiques, insédimentables ≤ 1 µm (PM1).

L'examen de ces particules atmosphériques a permis de détecter toute sorte de polluants chimiques organiques ou inorganiques qui s'adsorbent à leurs surfaces, les rendant ainsi très nocives pour la santé humaine.

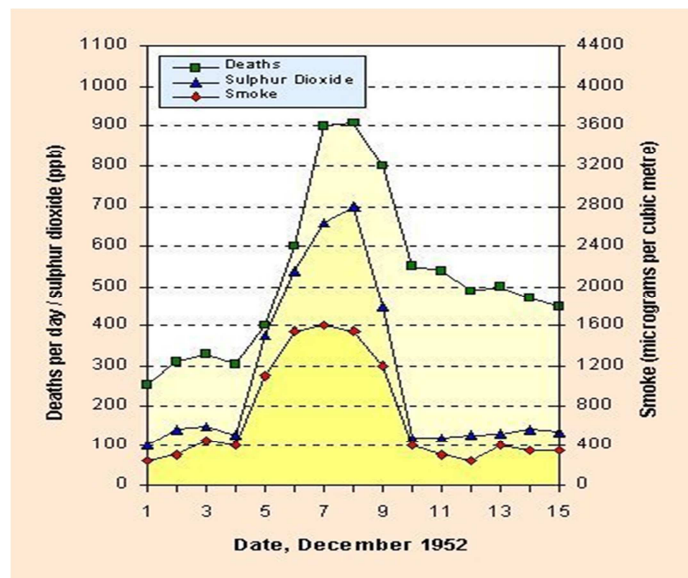


## 2.5. Quelques manifestations de la pollution atmosphérique

### 2.5.1. Les smogs

Le terme « smog », contraction des mots anglais smoke (fumée) et de fog (brouillard, brume) a été inventé au début du xx<sup>e</sup> siècle pour désigner cette pollution de l'air urbain qui recouvrait la ville de Londres, provoquée par la combustion abusive de charbon. Aujourd'hui, il y a deux grandes sortes de smog :

- Le smog classique de type londonien ou **smog industriel** (pollution par la fumée), qui est provoqué par les oxydes de soufre et la matière particulaire. Les pires épisodes ont bien évidemment lieu en hiver lorsque les maisons se chauffent au fuel et au charbon. En décembre 1952, 4000 londoniens moururent dans le pire incident industriel lié au smog au monde (figure 2.7). 8000 autres moururent dans les deux mois qui suivirent.

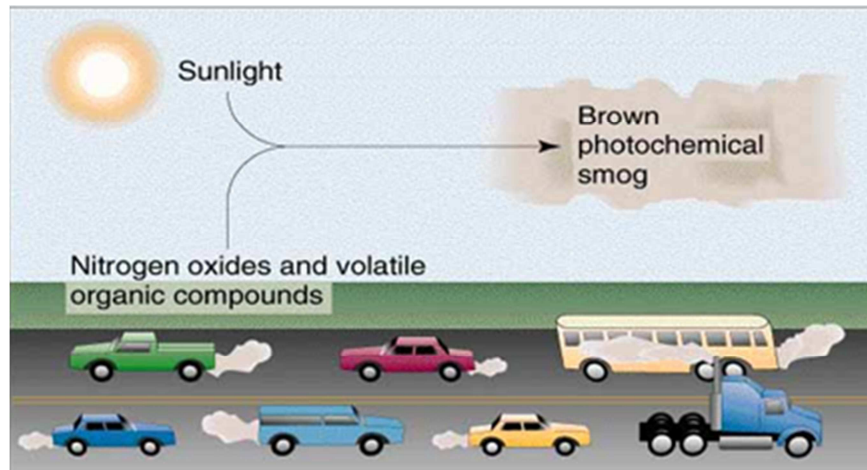


**Figure 2.7 :** Grand smog (Londres, 1952). Evolution de la mortalité, de la concentration de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et des fumées (particules) (Jacobson, 2002).

Grace à l'évolution des lois sur la pollution atmosphérique et la qualité de l'air, le smog industriel n'est plus un problème significatif dans les pays développés aujourd'hui. En revanche, il est souvent grave dans de nombreuses villes industrielles des pays en développement.

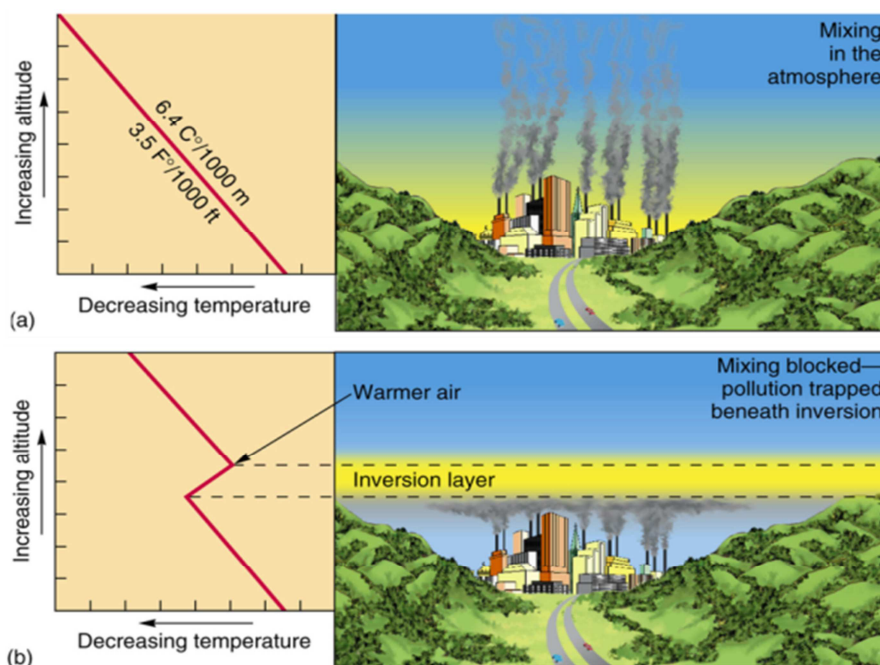
- Un autre type de smog est le **smog photochimique**. Il est appelé ainsi en raison du rôle que joue la lumière sur les différents polluants chimiques primaires pour en former des secondaires. Remarqué pour la première fois dans la région de Los Angeles dans les années 1940 où sévissait une brume orange foncée qui recouvrait la ville. Le smog photochimique est généralement plus important durant les mois d'été. Les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et les COV sont impliqués dans sa formation (figure 2.8). De l'ozone se forme au niveau du sol en

présence de NO<sub>x</sub> (issus des échappements des automobiles) par réactions photochimiques (voir section 2.4.1.1, E). L'ozone ainsi formé réagit avec les différents polluants atmosphériques pour former plus de 100 polluants secondaires dont les PAN discutés précédemment. Ces smogs sont très irritants pour les yeux et les voies respiratoires.



**Figure 2.8** : Formation du smog photochimique

L'apparition de ces smogs est liée à la présence d'une inversion de température. Elle se caractérise par l'inversion du gradient thermique dans la troposphère (figure 2.9).

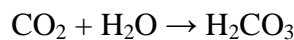


**Figure 2.9** : Schéma du mécanisme de l'inversion de température et son rôle dans la formation du smog (Ramade, 2012).

Dans des conditions normales, les polluants se dissipent dans l'atmosphère et se diluent avec l'altitude. Par contre, dans des conditions d'inversion de la température, les polluants restent emprisonnés près du sol. Ces inversions sont parfois dues à une stagnation d'air due à une masse atmosphérique de haute pression. Certains types topographiques augmentent les probabilités d'inversion de températures, comme les villes situées dans les vallées, près des côtes ou adossées à des versants montagneux qui reçoivent le vent de face. Par exemple, le bassin de Los Angeles est une plaine qui s'étend entre l'océan pacifique et des montagnes au nord et à l'est. Pendant l'été, le climat ensoleillé produit un air chaud et sec à des altitudes élevées. Les montées d'eau profondes froides sur la côte californienne rafraichissent l'air côtier qui s'engouffre dans la vallée de Los Angeles où il est bloqué par les montagnes et emprisonné à la surface par l'air chaud en altitude, ce qui provoque une inversion de température. La ville de Los Angeles a connu des smogs durant jusqu'à 250 jours par an dans les années 1960.

### 2.5.2. Les dépôts acides

Les termes « dépôts acides » ou « pluies acides » font référence à la présence dans les précipitations d'acides forts qui conduisent à des pH anormalement bas, pouvant être inférieurs à 3 dans les cas extrêmes. Si l'eau pure possède un pH de 7 (neutre), les précipitations naturelles sont proches de la neutralité, modérément acides avec un **pH de 5,6**. Cela est dû à la formation d'acide carbonique atmosphérique ( $H_2CO_3$ ) suite à la dissolution du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) présent dans l'atmosphère, suivant la réaction suivante :



Les dépôts acides se produisent quand le dioxyde de soufre ( $SO_2$ ) et les oxydes d'azote ( $NO_x$ ) sont rejetés dans l'atmosphère, se combinent avec la vapeur d'eau atmosphérique pour former des acides forts comme l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) ou l'acide nitrique ( $HNO_3$ ) (figure 2.10).

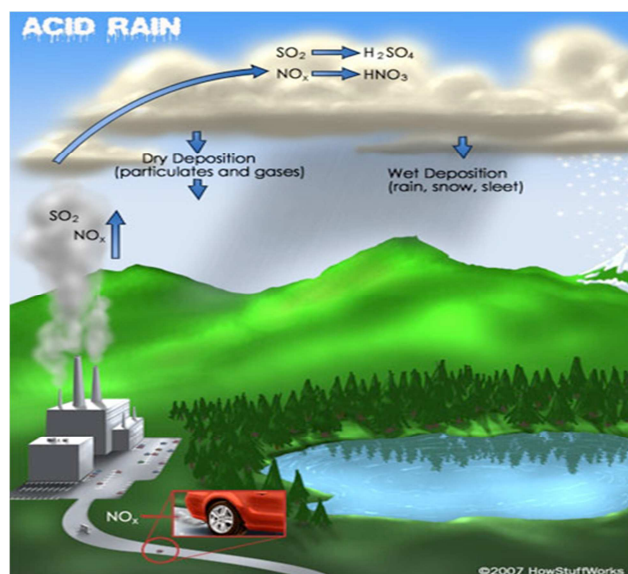
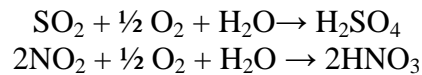
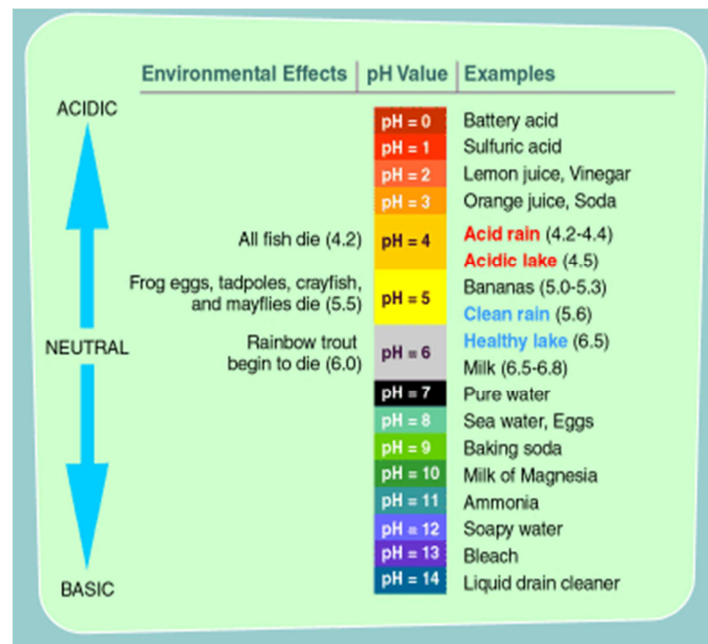


Figure 2.10 : Mécanismes de formation des dépôts acides

Les principales réactions qui conduisent à la formation des acides forts à partir des oxydes de soufre et d'azote sont les suivantes :



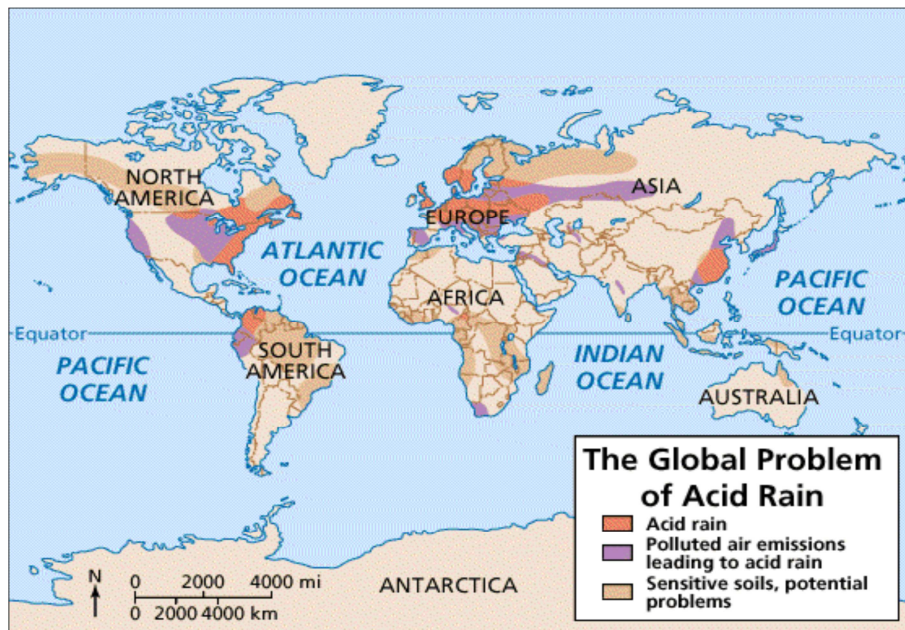
On commence à parler de précipitations acides lorsqu'elles possèdent un **pH plus faible que 5,0** (figure 2.11).



**Figure 2.11** : Echelle de pH et quelques effets éco-toxicologiques des pluies acides (Jacobson, 2002)

Les précipitations acides se produisent là où une densité de population et l'activité industrielle sont fortes. Toutefois, les émissions acidifiantes voyagent sur de plus grandes distances, transportés par le vent avant de se déposer. Les polluants se déposent ainsi à des milliers de kilomètres de leur lieu d'origine, c'est ce qu'on appelle « **l'effet global de distillation** ». La figure 2.12 montre les différentes régions du globe touchées par les problèmes des précipitations acides. Les régions les plus touchées par les précipitations acides sont l'Europe, l'Amérique du Nord et la Chine.





**Figure 2.11** : Distribution globale des précipitations acides (Brimblecombe et al., 2007).

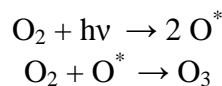
Les pluies acides ont un effet sur les matériaux vivants et non vivants. Elles attaquent les métaux et les matériaux des bâtiments, endommagent les sites historiques (Venise, Rome, Paris) et d'anciennes ruines comme les ruines mayas.

Les dépôts acides ont un effet néfaste aussi sur les lacs et les êtres vivants qui y vivent en réduisant le pH de l'eau et en dissolvant certains métaux toxiques lors du ruissellement.

Enfin, les pluies acides ont été mises en cause dans la baisse drastique de la productivité primaire des écosystèmes terrestres et jouent un rôle incontestable dans le phénomène du dépérissement des forêts.

### 2.5.3. Réduction de la couche d'ozone « trou dans la couche d'ozone »

L'ozone (O<sub>3</sub>) est une forme chimique particulière de l'oxygène. Il est spontanément généré dans la stratosphère par le bombardement de la molécule oxygène O<sub>2</sub> par les ultraviolets (UV) qui produit l'oxygène radicalaire (O), lequel réagit ensuite avec la molécule de dioxygène pour former l'ozone selon les réactions suivantes :

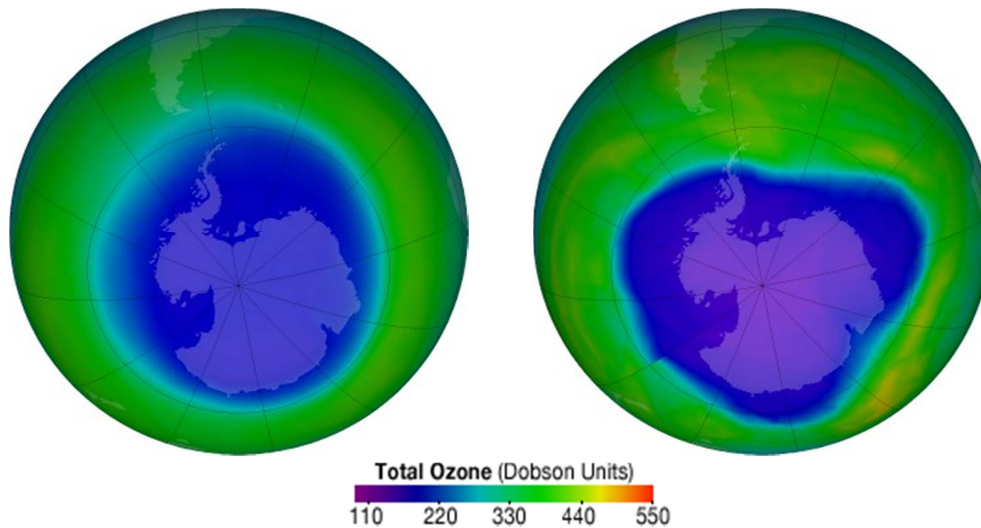


L'ozone stratosphérique forme une couche qui se répartit entre 10 et 45 km d'altitude avec des concentrations avoisinant les 8 ppm. Cette couche d'ozone protège la terre des rayons ultraviolets nocifs (voir la section 2.4.1.1, E). Si la totalité de l'ozone comprise dans cette colonne d'air était ramenée à la température et à la pression de l'atmosphère standard (0 °C et 1 atmosphère), on obtiendrait alors une couche d'environ 3 mm d'épaisseur.

La teneur en ozone stratosphérique s'exprime en unité Dobson, unité d'épaisseur de la couche d'ozone (notée DU pour Dobson Unit en anglais). Elle est définie comme une couche

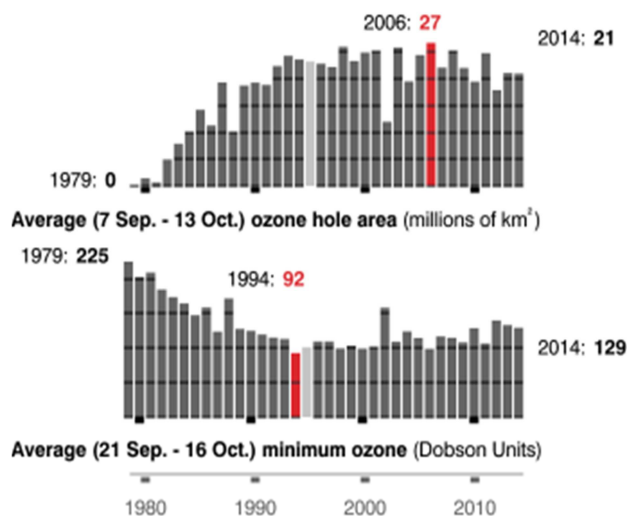
de 0.01 mm d'épaisseur à la température et la pression de l'atmosphère standard. Donc, l'épaisseur de la couche d'ozone normale est d'environ 300 DU (3mm dans les conditions atmosphériques standard).

La couche d'ozone au-dessus de l'antarctique se réduit de façon naturelle pendant quelques mois chaque année (généralement pendant le printemps austral qui correspond à l'automne boréal) (Figure 2.12). On parle de "trou" dans la couche d'ozone lorsque la valeur de la colonne intégrée en ozone est inférieure à 220 unités Dobson.



**Figure 2.12 :** Trou dans la couche d'ozone au-dessus de l'antarctique entre septembre 2015 à gauche et Octobre 2015 à droite (<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>).

Vers le milieu des années 1980, un trou dans la couche d'ozone supérieur à celui explicable par les causes naturelles fut observé. Ce trou a continué de croître pour atteindre un maximum de 27 millions de km<sup>2</sup> en 2006, avec des baisses de la quantité d'ozone de presque 80 % pour certaines années (figure 2.13).



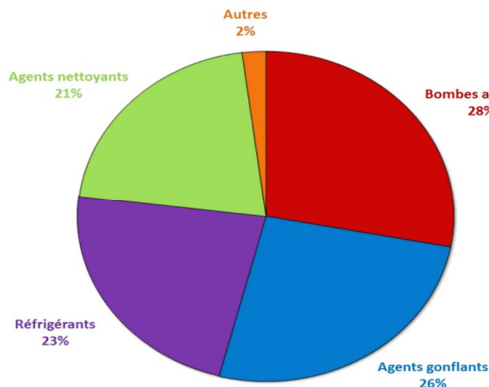
**Figure 2.13 :** Evolution de l'étendue du trou dans la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique en millions de km<sup>2</sup> et en unités Dobson.

(<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>).

Note: No data were acquired during the 1995 season

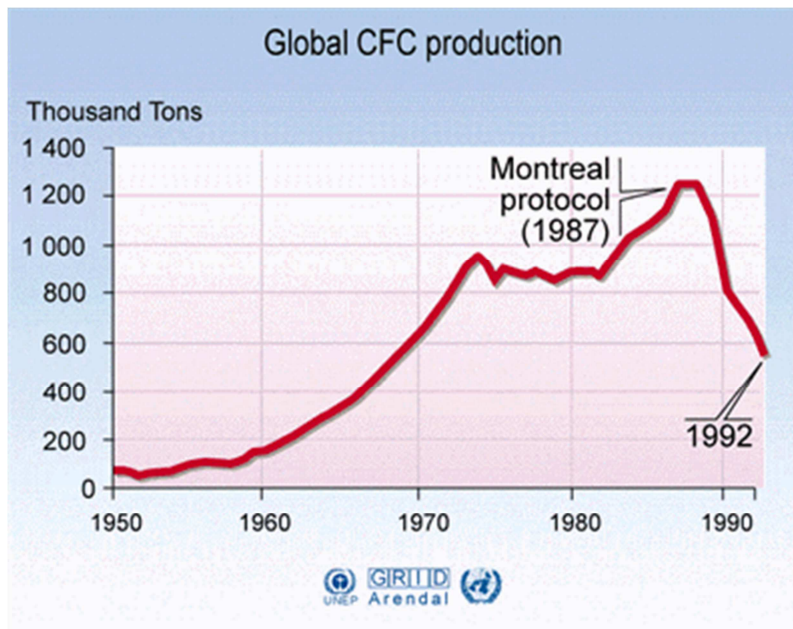
### 2.5.3.1. Les causes de la réduction de la couche d'ozone

Les CFC (Chlorofluorocarbones) sont les principaux responsables de la dégradation de la couche d'ozone. Les CFC, dénommés aussi **fréons**, sont des hydrocarbures chlorofluorés qui ont été utilisés depuis les années 1930 d'abord comme liquides cryogéniques dans les congélateurs et les réfrigérateurs etc., puis à partir des années 1950, comme des gaz propulseurs dans les bombes aérosols, comme mousses dans les emballages et comme solvants (figure 2.14).



**Figure 2.14 :** Origine des CFC en 1986 [Organisation météorologique mondiale].

Les plus utilisés des CFC sont le fréon 11 ( $\text{CFCl}_3$ ) et le fréon 12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ) et le fréon 112 ( $\text{C}_2\text{F}_2\text{Cl}_4$ ). Le maximum de production mondiale des fréons a été atteint en 1987 avant de décroître après l'adoption du protocole de Montréal sur lequel on va revenir juste après (figure 2.15).

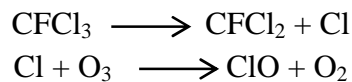


**Figure 2.15 :** Production mondiale des CFC (<https://www.grida.no>).

Les HCFC (hydrochlorofluorocarbones) ont été produits après 1987 pour substituer les fréons. L'HCFC22 ( $\text{CHF}_2\text{Cl}$ ) a connu une vaste utilisation dans les climatiseurs. Cependant, leur capacité à dégrader l'ozone et leur caractère à effet de serre a conduit au début des années 2000 à leur interdiction progressive qui deviendra totale à partir de 2020.

Une autre catégorie de destructeurs de la couche d'ozone sont les halons. Ce sont des molécules proches des CFC mais chlorofluorobromés, servant essentiellement dans les extincteurs. Le plus utilisé d'entre eux est le halon 12B11 ( $\text{CF}_2\text{BrCl}$ ).

La découverte du rôle des CFC dans la destruction de l'ozone stratosphérique a été faite en 1973 par deux chercheurs : Rawland et Molina, ce qui leur a valu le prix Nobel de chimie en 1995 en compagnie de Paul Crutzen. Ils ont décrit plus d'une centaine de réactions qui aboutissent à la destruction de l'ozone dans la stratosphère dont les plus importantes sont les suivantes :



En effet, les CFC sont des composés très stables qui montent lentement vers la stratosphère où ils catalysent la destruction de l'ozone. Au contact des rayons ultraviolets (UV), ces gaz libèrent leur chlore par photolyse. De plus, les cristaux de glace présents dans les nuages stratosphériques transforment les composés chlorés de l'atmosphère en chlore actif susceptible de détruire l'ozone. La destruction de l'ozone stratosphérique se produit dans les régions polaires lorsque les températures descendent en dessous de  $-80\text{ }^\circ\text{C}$ . À ces températures des nuages se forment dans la basse stratosphère au sein desquels des réactions chimiques transforment des composés issus des CFC en composés actifs. Ces processus conduisent à une destruction rapide de l'ozone au retour de la lumière solaire au-dessus du pôle.

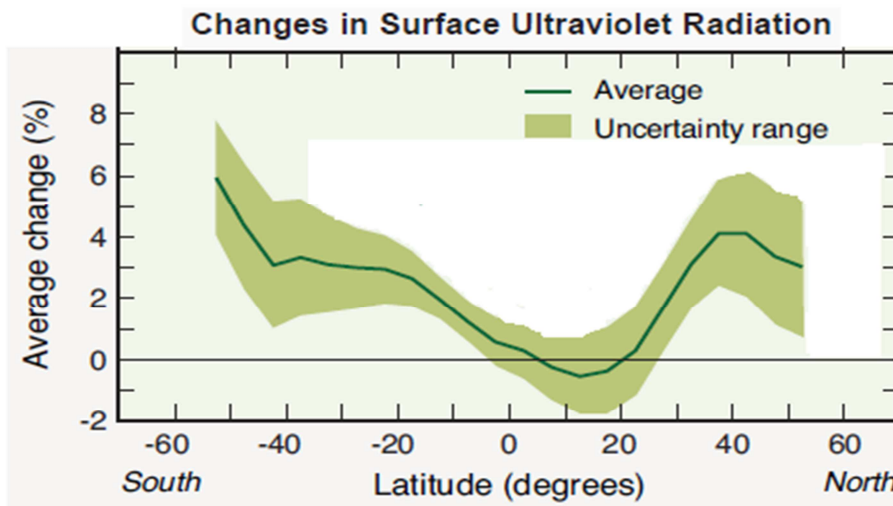
Les travaux de ces chercheurs ont servi de base scientifique à la promulgation du protocole de Montréal en 1987, destiné à protéger la couche d'ozone par l'interdiction des CFC et des halons, mais dont la ratification n'a été que progressive et demeure encore aujourd'hui incomplète.

### **2.5.3.2. Conséquences de la destruction de la couche d'Ozone et protocole de Montréal**

Avec la diminution de la couche d'ozone, les rayons UV atteignant la surface de la terre ont augmenté sensiblement depuis 1979 sur toute la planète (figure 2.16). Une exposition trop longtemps aux rayons UV entraîne plusieurs problèmes de santé chez l'homme, notamment les cancers de la peau, les cataractes (opacification du cristallin) et l'affaiblissement du système immunitaire. D'après l'Organisation mondiale de la santé (OMS), chaque année, on compte dans le monde 2 à 3 millions de nouveaux cas de cancer de la peau dont plus de 130 000 nouveaux cas de cancer mélanocytaires (mélanomes malins). On estime à 66 000 le nombre annuel de décès par mélanome et autres cancers de la peau.

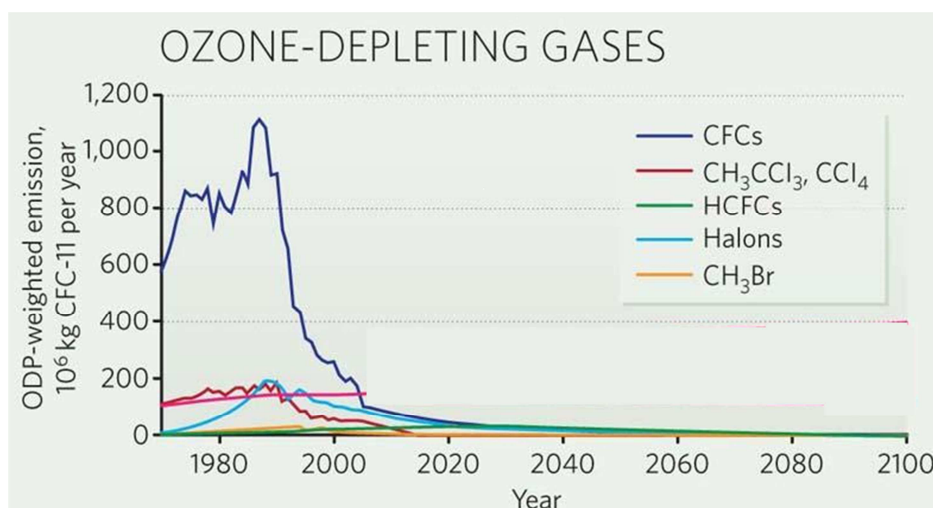
Les écologistes sont aussi préoccupés par ces taux élevés des rayons UV qui risquent d'endommager le fonctionnement des écosystèmes terrestres et aquatiques.





**Figure 2.16** : Changement du taux des rayonnements UV qui atteignent la surface de la terre entre 1979 et 2008 (<http://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/>).

Face à ce phénomène global et d'une extrême gravité, de nombreux pays se rencontrèrent pour adopter **le protocole de Montréal en 1987** qui fait suite à la Convention de Vienne de mars 1985. Ce premier prévoyait de réduire la production de CFC de moitié avant 1998 et est entré en vigueur en 1989. Cependant, malgré ces efforts, la situation de la couche d'ozone a continué d'empirer au début des années 1990. Devant cette urgence, il est décidé en 1990, avec l'amendement de Londres puis celui de Copenhague en 1992, l'arrêt total de la production de CFC pour l'an 2000. Il a également été amendé en 1995 à Vienne, en 1997 à Montréal et en 1999 à Pékin. Depuis le 16 septembre 2009, le protocole de Montréal est ratifié par l'ensemble des 197 membres de l'ONU, ce qui en fait le seul traité universel. Le protocole a progressivement interdit la production de chlorofluorocarbones (CFC), ce qui a conduit à la baisse de leur émission dans l'atmosphère (figure 2.17).



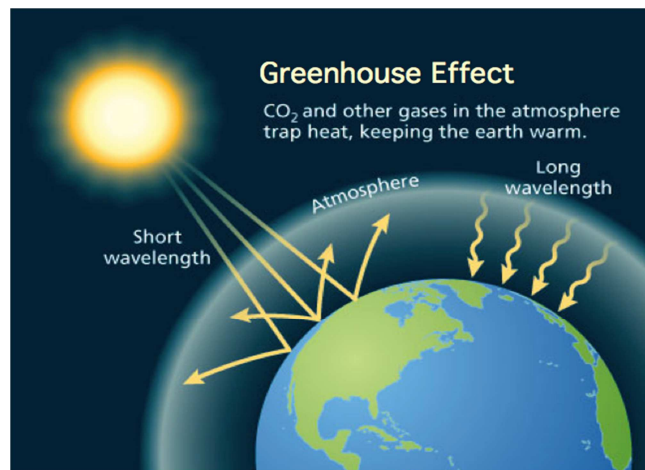
**Figure 2.17** : Les émissions de gaz halogènes réduisant la couche d'ozone depuis 1970 et prévision pour l'horizon 2100 (Ravishankara et al, 2009).

En dépit de l'adoption du protocole de Montréal, le trou dans la couche d'ozone a continué de s'accroître jusqu'au début des années 2000 atteignant son record en 2006 (voir figure 2.13). Cela résulte du considérable temps de résidence des CFC et des halons dans la stratosphère (entre 58 et 520 ans). D'après l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'environnement, la couche d'ozone située au-dessus des latitudes moyennes, devrait se reconstituer d'ici à 2049. Enfin, au-dessus de l'Antarctique, la reconstitution de la couche d'ozone ne devrait pas intervenir avant 2065.

### 2.5.4. Réchauffement et changement climatique global

Le climat sur Terre est une machine fonctionnant de manière complexe, dont la force motrice est assurée par **l'énergie solaire**. La température moyenne superficielle terrestre dépend fortement de la quantité de rayonnement solaire et de la quantité de chaleur retenue par l'atmosphère.

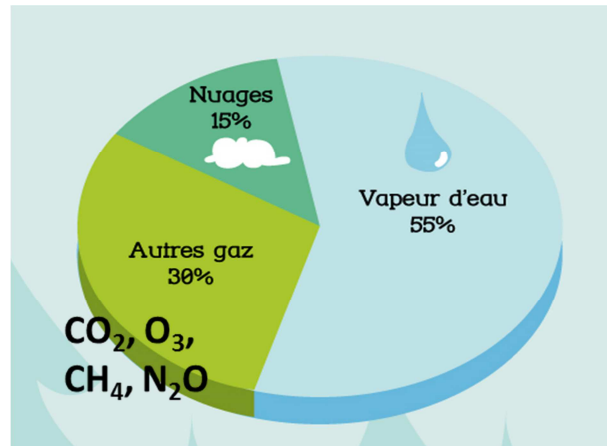
La Terre reçoit l'énergie du soleil sous forme de lumière et de chaleur (essentiellement dans la partie du spectre électromagnétique correspondant au visible, dont la longueur d'onde est comprise entre 390 à 780 nm). Environ 30% de ce rayonnement est réfléchi par l'atmosphère et la surface terrestre. C'est **l'effet albédo**. L'énergie restante est absorbée par la surface terrestre et réchauffe la Terre. Cette chaleur est ensuite renvoyée sous forme de rayonnement ascendant de grandes longueurs d'onde (essentiellement dans l'infrarouge, de 8 à 13 $\mu$ m). Une partie de cette chaleur est émise vers l'espace, mais une autre partie est absorbée dans l'atmosphère par les gaz à effet de serre et renvoyée vers la Terre (figure 2.18).



**Figure 2.18** : Schéma expliquant le mécanisme de l'effet de serre

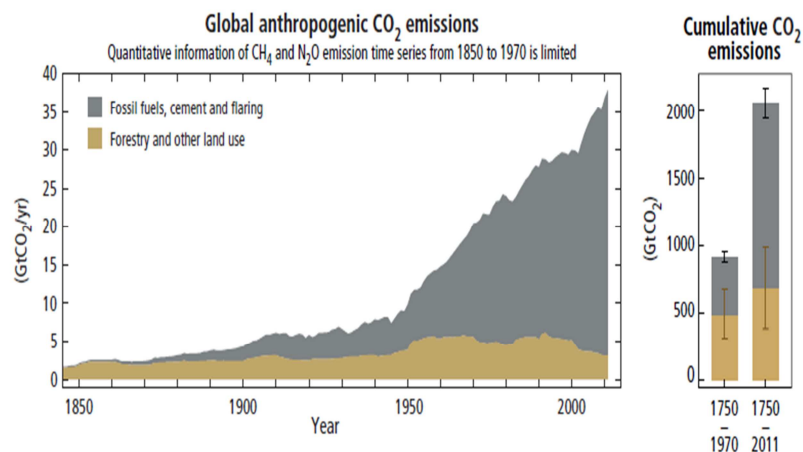
L'échange thermique continu de rayons infrarouges entre la surface de la terre et l'atmosphère provoque un réchauffement. Autrement dit, l'atmosphère fait office d'isolant thermique, à la manière d'une serre agricole: ce phénomène s'appelle **l'effet de serre naturel**. Si la terre n'était pas pourvue d'atmosphère, la température à la surface du globe serait de **-19°C**. Toute l'eau serait gelée en permanence et les températures seraient trop basses pour que les plantes et animaux puissent y survivre. Grâce à cet effet de serre naturel, la température moyenne de la Terre est de **15°C**.

Les principaux gaz à effet de serre naturels sont la vapeur d'eau, dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), le méthane ( $\text{CH}_4$ ), le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) et l'ozone ( $\text{O}_3$ ) (figure 2.19).



**Figure 2.19** : Contribution relative des principaux gaz à l'effet de serre naturel

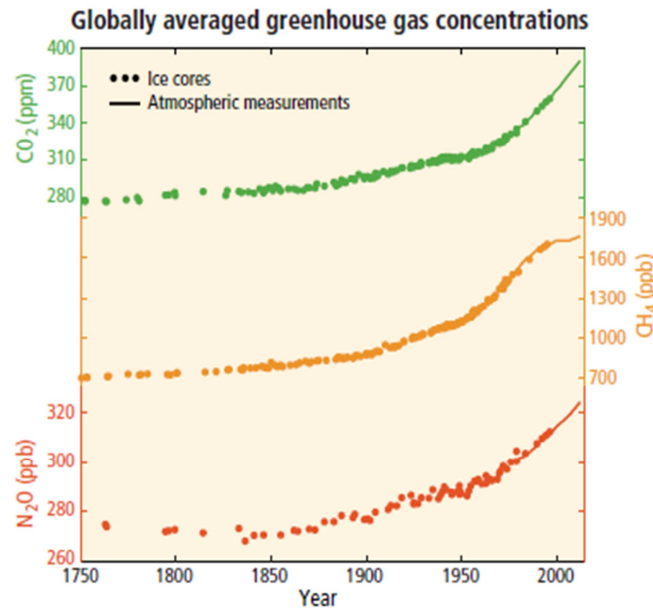
Ces gaz sont présents naturellement dans l'atmosphère, mais ils peuvent également être générés par les activités humaines et perturber ainsi le bilan radiatif de la Terre. Cette perturbation provoque **un effet de serre additionnel** et par conséquent **un réchauffement climatique**. La synthèse des données concernant l'évolution climatique de la planète est réalisé par le Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC, IPCC en anglais : Intergovernmental Panel on Climate Change). Jusqu'au XIXe siècle, les variations climatiques ont été guidées par des processus naturels, mais l'activité industrielle, qui s'est développée à partir de cette période, a apporté à ce fonctionnement des modifications non négligeables. Ces modifications sont dues, pour la plus grande part, à l'introduction dans l'atmosphère de quantités considérables de gaz à effet de serre (figure 2.20).



**Figure 2.20** : Emission globale de  $\text{CO}_2$  par les activités humaines dans l'atmosphère depuis 1850 (GIEC, 2014).

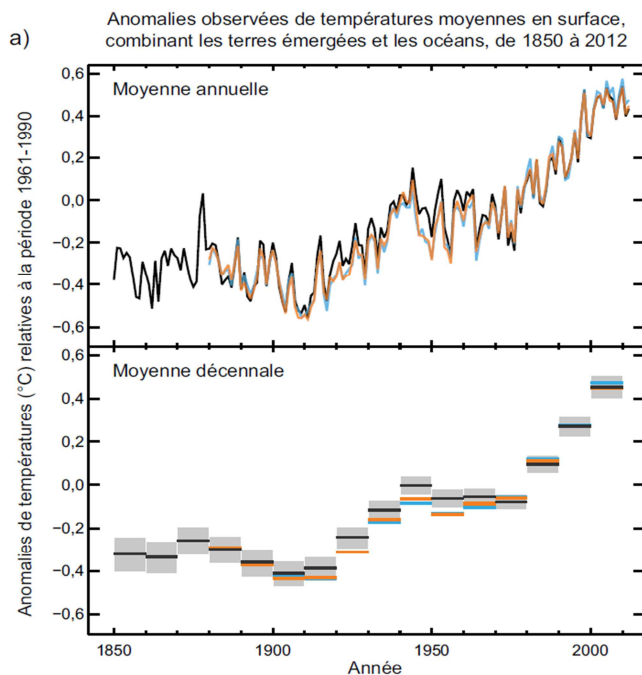
Par conséquent, Les teneurs atmosphériques en ces gaz ont augmenté de manière considérable (figure 2.21). Les variations de leurs concentrations sont connues par des mesures directes

dans l'atmosphère, pour les quelques dernières dizaines d'années et, avant que ces mesures ne soient possibles, par des mesures dans les bulles d'air enfermées dans les glaces.



**Figure 2.21:** Évolution de la concentration de l'atmosphère en dioxyde de carbone, méthane et oxyde nitreux (GIEC, 2014).

La concentration du dioxyde de carbone était de 280 ppm en volume jusqu'au XIXe siècle, elle avait depuis augmenté considérablement, atteignant 400 ppm en 2015. Un accroissement similaire a été noté pour le méthane (CH<sub>4</sub>) et pour l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O).

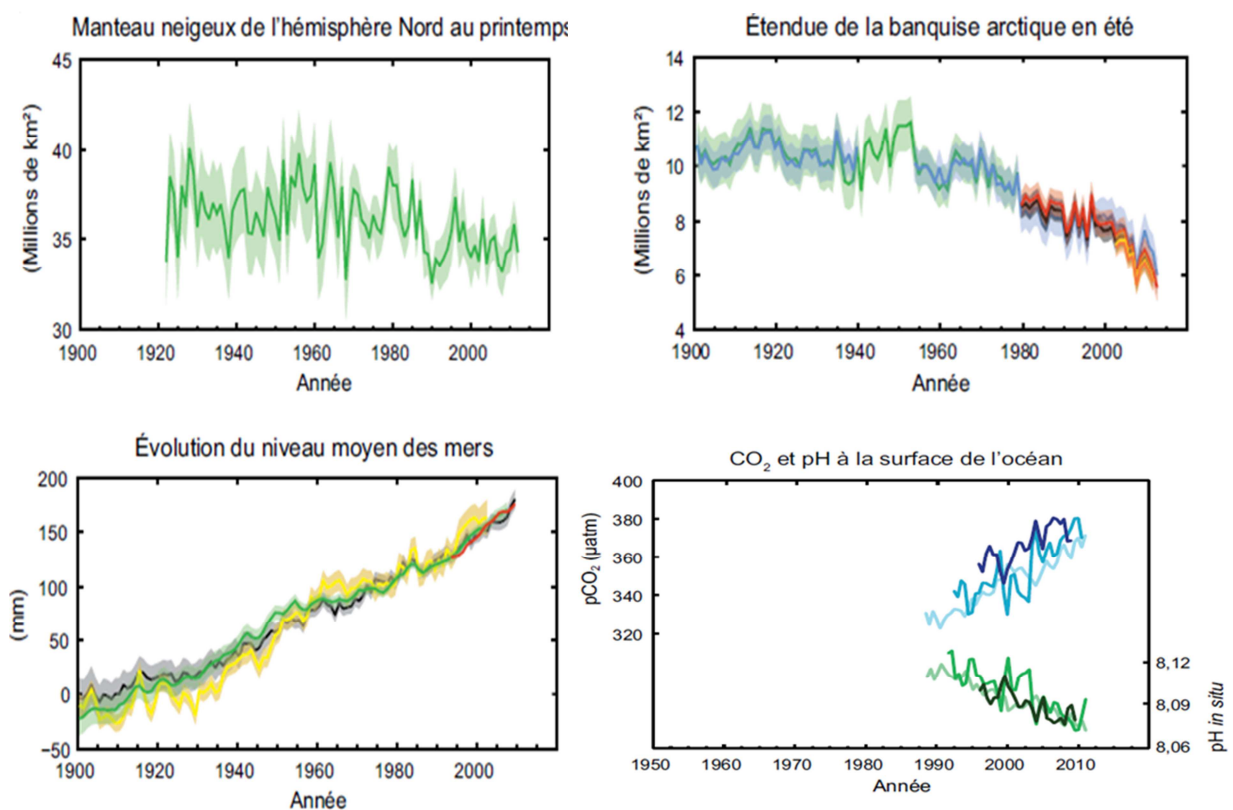


**Figure 2.22 :** Anomalies observées de la température moyenne terrestre sur la période 1850-2012 (GIEC, 2014)

L'augmentation de l'effet de serre (**effet de serre additionnel**) dû à l'introduction de ces gaz dans l'atmosphère a été rendu responsable du réchauffement climatique que l'on constate en examinant les variations séculaires la température terrestre fournies par des milliers de stations de mesures réparties à travers la planète depuis l'invention des instruments de mesure (figure 2.22). Entre 1850 et 2012, l'augmentation de la température moyenne de la terre a été de **0,85°C**.

### 2.5.4.1. Conséquences du réchauffement climatiques

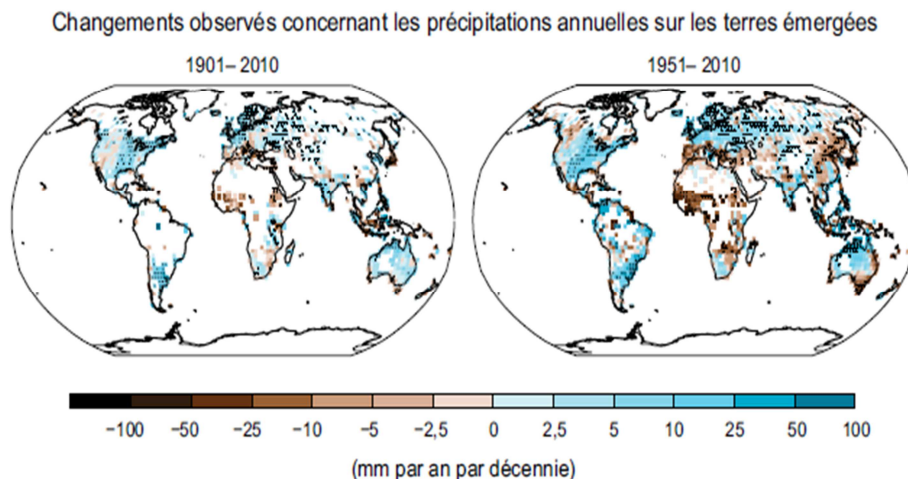
Les effets du changement climatique sont perceptibles et variés. Des études scientifiques ont montré que l'océan a absorbé près de la moitié du CO<sub>2</sub> émis par les activités humaines. Cependant, cette absorption n'est pas sans conséquences sur la chimie des océans. Elle entraîne une acidification des eaux (diminution de leur pH) par la formation d'acide carbonique (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) dont les conséquences représentent une grave menace pour les écosystèmes marins. Cet acide attaque les coquilles carbonatées des organismes marins comme les récifs coralliens entre autre. D'autres indices témoignent du réchauffement généralisé qu'a connu la terre au cours du XX<sup>e</sup> siècle, en particulier le recul des glaciers de montagnes, l'élévation du niveau de la mer à cause de la dilatation thermique des océans (20cm depuis 1900) et la diminution des surfaces des glaces de mer (banquises) (figure 2.23).



**Figure 2.23 :** Quelques conséquences du réchauffement climatique global (GIEC, 2014).

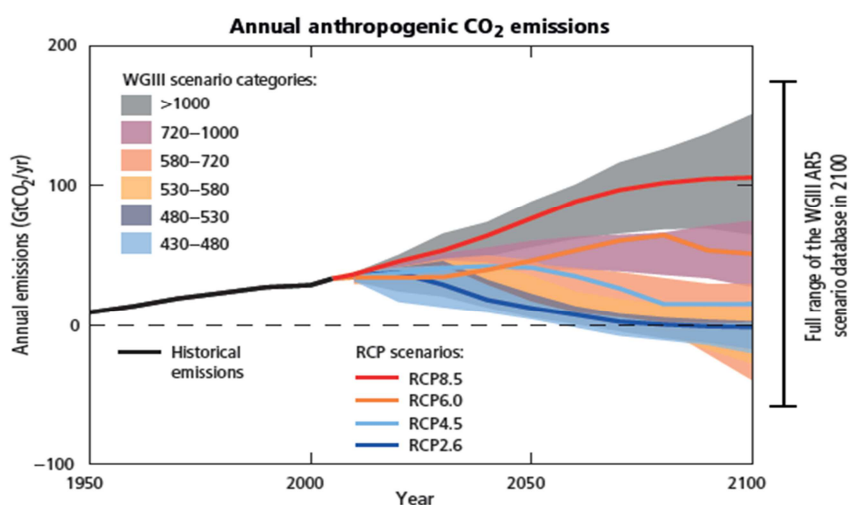
A côté de ces changements majeurs observés, il conviendrait aussi de citer l'impact du réchauffement climat sur les régimes des précipitations dans le monde (figure 2.24). Une liste plus complète inclurait l'impact du réchauffement climatique sur la santé humaine, l'agriculture, la biodiversité, le tourisme, les infrastructures...etc.





**Figure 2.24** : Changements observés dans les régimes de précipitations dans le monde de 1900 à 2010 (GIEC, 2014).

Dans la mesure où la production de gaz à effet de serre ne cesse pas, il est fort probable que leurs effets climatiques persistent dans l’avenir. Ces effets ont été évalués et modélisés par le GIEC, qui insiste sur le fait que cet avenir climatique dépend de la façon dont nos sociétés évolueront, notamment en termes de consommation de combustibles fossiles. Le GIEC envisage un certain nombre d’hypothèses désignées comme scénarios RCP (Representative Concentration Pathway), relatifs à l’évolution de la concentration en **gaz à effet de serre** au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Ces scénarios sont basés sur un jeu d’hypothèses démographiques et socio-économiques impliquant une plus ou moins grande utilisation des énergies fossiles. Parmi les 4 scénarios de référence du GIEC, les plus représentatifs sont les scénarios RCP 8.5 et RCP 2.6. Le premier correspond à des hypothèses d’utilisation persistante de combustibles fossiles, de démographie galopante et des pics d’activité économique alors que le deuxième se fonde sur une forte réduction de l’usage des combustibles fossiles et faisant un appel important aux énergies renouvelables dans une économie plus soucieuse de l’environnement (figure 2.25).



**Figure 2.25** : Scénarios d’émission de gaz à effet de serre pour le XXI<sup>e</sup> siècle (GIEC, 2014)

En définitive, la poursuite des émissions de gaz à effet de serre au rythme actuel ou à un rythme plus élevé devrait accentuer le réchauffement et modifier profondément le système climatique au XXI<sup>e</sup> siècle. Il est probable que ces changements soient largement plus importants que ceux observés pendant le XX<sup>e</sup> siècle (fonte des glaciers et des banquises, élévation du niveau de la mer, changement des régimes des précipitations, acidification des océans...etc). Ainsi, il faut s'attendre à ce que ces changements dans le système climatique aient des conséquences importantes sur nos environnements et sur la biodiversité. Ces changements semblent inéluctables et d'autant plus importants que l'on ne mettra pas en œuvre ou pas suffisamment, de mesures limitant les émissions de gaz à effet de serre.

### **2.5.4.2. Contrer et limiter le changement climatique**

La prise de conscience suscitée par les impacts potentiels du changement climatique sur la biosphère en général et les sociétés humaines en particulier nous amène légitimement à élaborer des stratégies face à ce problème. En raison de leurs temps de résidence (de quelques dizaines d'années à quelques centaines d'années), les gaz à effet de serre vont persister dans l'atmosphère même si nous arrêtons complètement leurs émissions. Il y a deux manières de faire face au changement climatique global : l'atténuation et l'adaptation. L'atténuation consiste à limiter les émissions de gaz à effet de serre pour modérer le changement climatique et donner ainsi du temps à la recherche afin de stopper ou faire reculer ce changement. L'adaptation quant à elle consiste à apprendre à vivre avec les modifications environnementales et sociétales générées par ce changement.

- **Atténuation du changement climatique global**

Les alternatives au pétrole, au charbon et au gaz naturel comme les énergies renouvelables moins émettrices de gaz à effet de serre (énergie solaire, éoliennes, géothermique) pourraient aider à résoudre en grande partie le problème du réchauffement global. En outre, des politiques de taxation sur les utilisateurs de combustibles fossiles pourraient s'avérer efficaces pour limiter leur utilisation par les citoyens et les industries. Parallèlement à ces mesures pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, plusieurs pays se lancent dans des recherches sur la gestion du carbone et sur les moyens de stocker et séquestrer le CO<sub>2</sub>, soit en le collectant directement le CO<sub>2</sub> des cheminées d'usine et le séquestrer profondément dans les couches géologiques ou en plantant massivement des forêts qui contribuerait à pomper le CO<sub>2</sub> via la photosynthèse.

- **Efforts internationaux pour réduire les émissions de gaz à effet de serre**

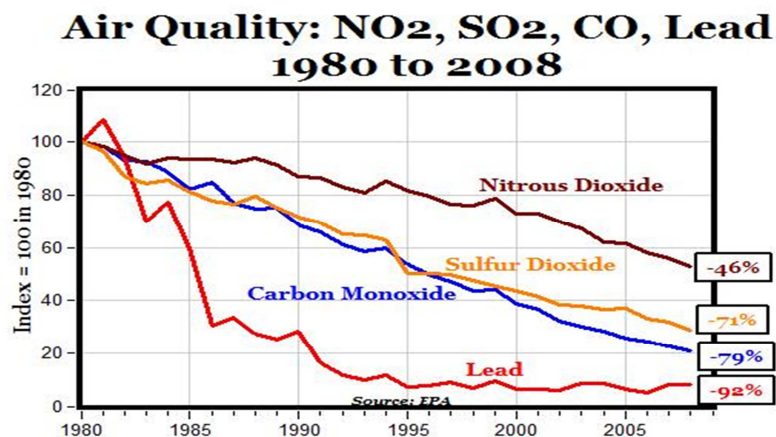
Aujourd'hui, presque tous les pays de la planète ont signé la convention des nations unies sur le changement climatique (UNFCCC) établie au sommet de la terre à RIO en 1992. Son but primordial était de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre à des niveaux suffisamment bas pour empêcher les conséquences dangereuses potentielles du changement climatique sur les sociétés humaines. Les pays signataires de cette convention se sont réunis en 1996 à Genève et se sont mis d'accord sur un calendrier pour limiter les émissions de gaz à effet de serre. Ce calendrier fut établi lors d'un autre meeting à Kyoto, au Japon en 1997, c'est le fameux **protocole de Kyoto** qui a fixé des objectifs chiffrés pour chaque pays afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 5% à l'horizon 2012 par rapport au niveau d'émission en 1990. Il faut noter que les Etats Unis et l'Australie n'ont pas ratifié le

protocole, ce qui rend l'application de ce protocole difficile du fait de la non-participation des Etats Unis, un des principaux émetteurs de gaz à effet de serre de la planète avec la chine. Depuis Kyoto, de nombreuses réunions internationales se sont tenues pour convaincre les USA de ratifier le protocole et dont la dernière réunion s'est tenue à Marrakech en décembre 2016 (COP 22).

### 2.5.4. Législations sur la qualité de l'air

La première loi pour un air propre (clean air act) en Europe fut introduite en Grande Bretagne en 1956. Cette loi fait suite à l'épisode du grand Smog londonien de 1952. Elle avait pour objectif de réduire les fumées toxiques en interdisant l'utilisation de charbon dans certaines zones « smokeless zones ». Cette loi fut améliorée en 1968 en obligeant les usines utilisant beaucoup de charbon à construire de très hautes cheminées pour favoriser la dispersion des fumées (tall chimneys).

Aux Etats Unis, la première législation de grande envergure visant l'amélioration de la qualité de l'air et le contrôle de la pollution atmosphérique fut le « air pollution control act » en 1955. Cette loi a donné naissance au fameux **Clean Air Act**, introduit en 1970 et mis à jour en 1977 et 1990. Le Clean Air Act établit les normes de la réglementation de la qualité de l'air aux USA et autorise l'EPA (Environmental Protection Agency) à fixer les normes et limites des quantités de polluants atmosphériques partout sur le territoire américain. Cette loi s'est intéressée à six polluants majeurs (le plomb, les particules, le SO<sub>2</sub>, les NO<sub>x</sub>, le monoxyde de carbone et l'ozone) et a établi des limites maximales à ne pas dépasser pour chacun des polluants. Les conséquences immédiates de cette loi fut l'amélioration de la qualité de l'air et la baisse considérable des concentrations des polluants atmosphériques cités ci-dessus, avec notamment la baisse de près de 92% des concentrations de plomb atmosphérique grâce au passage à l'essence sans plomb (Figure 2.26).



**Figure 2.26** : Evolution des concentrations d'aéropolluants aux USA de 1980 à 2008 (EPA)



En Europe, les normes pour les polluants atmosphériques sont fondées sur des valeurs limites ou seuils réputés tolérables et qui sont définies par les différentes directives européennes. Ces normes concernent les mêmes aéropolluants majeurs qu'aux USA et sont synthétisées dans le tableau 2.3

**Tableau 2.3** : Normes de l'union européenne sur les aéropolluants

Valeurs limite	Concentration des aéropolluants ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ )			
	Particules	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	Ozone
Seuil pour la protection des plantes	nd	nd	nd	65
Valeur guide pour l'année	50	50	50	110
Valeur guide pour la journée	125	125	135	180
Valeur limite moyenne annuelle	80	80	nd	nd
Seuil d'alerte	250	350	200	360

En Algérie, la surveillance de la qualité de l'air est confiée à l'observatoire national de l'environnement et du développement durable (ONEDD) et les normes de qualité de l'air sont régies par le décret présidentiel n° 06-01 du 7 janvier 2006 paru dans le Journal Officiel de la République Algérienne (JORA). Les normes algériennes s'intéressent aux mêmes polluants atmosphériques que dans les USA et l'Union européennes (Tableau 2.4).

Tableau 2.4 : Les normes de qualité de l'air en Algérie (JORA, 2006)

	Concentration des aéropolluants ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ )			
	Particules	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	Ozone
Valeur Guide	50	150	135	110
Valeur limite	80	350	200	200
Seuil d'information		350	400	180
Seuil d'alerte		600	600	360

Ces différentes législations sur la qualité de l'air imposent un certain nombre de mesures et de normes permettant d'atténuer les phénomènes de pollution atmosphérique. Par exemple, les voitures hybrides et les bus roulant au gaz naturel émettent beaucoup moins de CO<sub>2</sub> que les véhicules roulant aux carburants classiques (essence et gasoil). En outre, la généralisation des pots catalytiques et des pots à oxydation (dispositifs pour filtrer les gaz d'échappement automobiles) dans les voitures a permis de réduire considérablement les émissions d'aéropolluants (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, Particules fines...etc) par les véhicules dans les pays développés. A noter aussi l'amélioration des techniques de raffinage en amont, qui permettent d'avoir des carburants de qualité (ne contenant pas beaucoup de soufre et de métaux lourds).

Concernant les industries, il a été constaté que les cheminées d'usines équipées de filtres électrostatiques et de tours de lavage éliminaient efficacement les particules fines.

## **Références bibliographiques et conseils de lecture pour ce chapitre**

### **Livres généralistes**

- **Colls, Jeremy., 2002.** Air pollution. Taylor&Francis group, 577p.
- **Desonie, Dana., 2007.** Atmosphere : Air pollution and its effects. Chelsea house publishers. 209p.
- **Jacobson, Mark., 2002.** Atmospheric pollution. Histroy, science and régulation. Cambridge University Press, 412p.
- **Ramade, François., 2012.** Eléments d'écologie appliquée. Action de l'homme sur la biosphère. Edition Dunod, 824p.
- **Sokhi, Ranjeet., 2008.** World atlas of atmospheric pollution. Anthem Press. 145p.
- **Sportisse, Bruno., 2008.** Pollution atmosphérique, des processus à la modélisation. Springer-Verlag, 349p.
- **Vallero, Daniel., 2008.** Fundamentals of air pollution. Elsevier, 967p.
- **Villanyi, Vanda., 2010.** Air pollution. Vanda Villanyi editions, 378p.

### **Références sur les pluies acides**

- **Brimblecombe, P., Hara, H., Houle, D., Noval, M., 2007.** Acid rain, from deposition to recovery. Springer-Verlag, 406p.
- **The watt committee on energy, 2005.** Acid rain
- **AMAP Assessment, 2006.** Acidifying Pollutants, Arctic Haze, and acidification in the Arctic.
- **National Atmospheric Deposition Program/National Trends Network** (<http://nadp.isws.illinois.edu>).

### **Références sur la couche d'ozone**

- **Zerefos, C., Contopoulos, G., Skalkeas, G., 2009.** Twenty years of ozone decline. Springer-Verlag, 460p.
- **Matthew Hoffmann, 2005.** Ozone depletion and climate change. State University of New York Press, 276p.
- **Ravishankara, A.R., Daniel, J.S., Portmann, R.W., 2009.** Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century. Science, 326 : 123-125.
- <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>
- <http://www.theozonehole.com/>
- <http://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/>.

### **Références sur le changement climatique**

- <http://www.ipcc.ch/>

### **Références sur la qualité de l'air**

- <http://www3.epa.gov/>
- <http://www.airparif.asso.fr/>

# **Chapitre 3 :**

## **Pollution des sols**

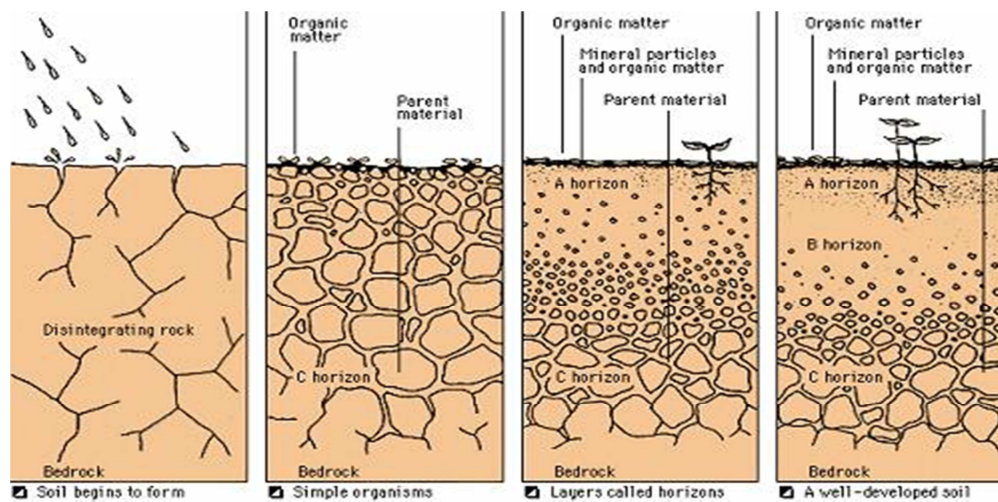
### 3. Sols et pollution des sols

#### 3.1. Le Sol

Le sol est l'épiderme vivant de notre planète. Il constitue la fine pellicule externe de la croûte terrestre. Situé à l'interface entre l'atmosphère, l'eau, les roches et le monde vivant, le sol participe aux grands cycles d'énergie, d'eau et d'éléments. Avec les milieux aquatiques, les sols constituent l'un des deux compartiments essentiels à la vie sur terre.

##### 3.1.1. Origine des sols

Le sol se forme à partir de la désagrégation lente de la roche mère sous l'action conjuguée de processus d'altérations physiques, chimiques et biologiques. La fragmentation de la roche mère en des particules de plus en plus fines est un processus très lent qui peut prendre des milliers d'années (figure 3.1).



**Figure 3.1 :** Grandes étapes de la formation des sols

On estime qu'il faudrait entre 200 et 1000 ans pour former un horizon de surface de 2,5cm. Il faut ajouter à cela le temps relativement lent que met la matière organique pour se déposer et s'accumuler dans le sol. La pédogenèse (formation du sol) est un processus continu, impliquant des interactions permanentes entre les éléments de la croûte terrestre et la biosphère. L'épaisseur du sol varie entre une fine pellicule dans des sols jeunes comme c'est le cas dans les régions polaires ou sur les pentes de montagnes à plusieurs mètres dans les sols forestiers âgés.

Les facteurs topographiques comme la présence ou l'absence de vallées sont aussi impliquées dans la formation des sols. Sur les fortes pentes, les sols sont minces et superficiels, constamment entraînés vers le bas par gravité. Le ruissellement et l'érosion éolienne tendent à amplifier ce phénomène. Par contre en bas des pentes et dans les vallées, on observe la formation de sols plus épais appelés « **sols colluviaux** ».

### 3.1.2. Composition et horizons des sols

Le sol est composé de quatre éléments distincts. La fraction minérale qui représente environ 45% d'un sol, la matière organique (environ 5%) qui est composée d'humus (matière organique en décomposition), de racines et d'organismes divers (bactéries, champignons, vers ...etc), l'eau (environ 25%) et enfin l'air (25%) (figure 3.2). Les processus biologiques ont une grande influence sur la composition des sols (en participant au recyclage de la matière et des éléments) ainsi qu'à leur fertilité.

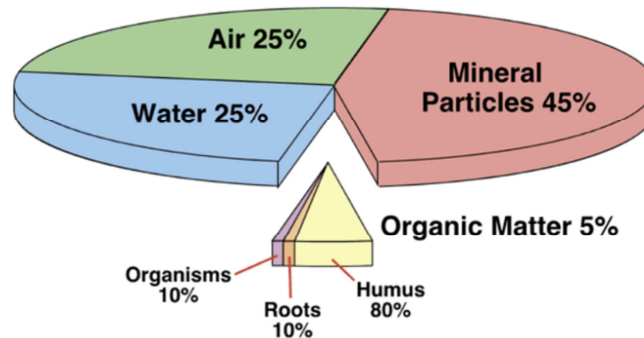


Figure 3.2 : Composition d'un sol

Une coupe verticale dans les sols révèle une organisation sous forme de couches qui s'empilent les unes sur les autres pour former des **horizons** qui ont une composition et des propriétés particulières (Figure 3.3).

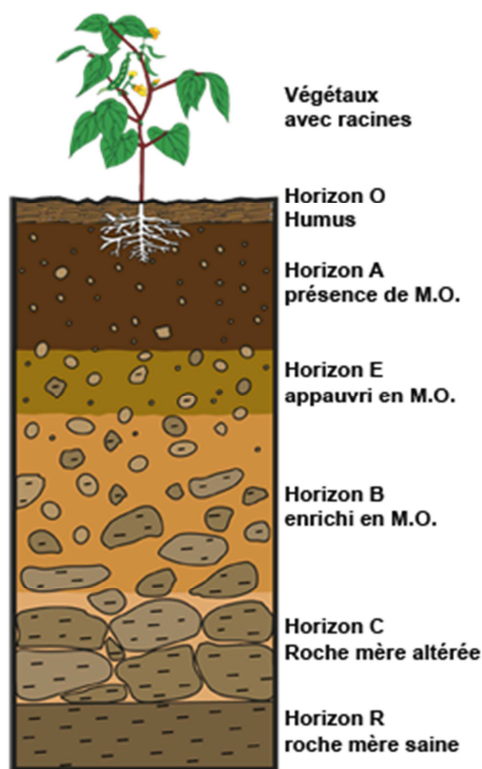


Figure 3.3 : Profil de sol

L'**horizon O**, horizon de surface qui est riche en matière organique. C'est la couche dans laquelle s'accumule la litière végétale et se décompose progressivement. Cet horizon est caractéristique des sols organiques riches et fertiles. Il peut être complètement absent dans les sols pauvres tels que les sols désertiques. Sous l'horizon O, on trouve l'**horizon A**, riche en matière organique et en humus mais pauvre en éléments minéraux nutritifs qui sont lessivés vers les horizons plus profonds. Dans certains sols, un horizon fortement lessivé (**Horizon E**) se développe entre les horizons A et B. L'**horizon B** est une zone d'accumulation des éléments nutritifs qui ont été lessivés dans les horizons supérieurs. Il est riche en argile, en fer et en aluminium. En dessous se trouve l'**horizon C** qui est formé par des

fragments de la roche mère.

### 3.1.3. Propriétés des sols

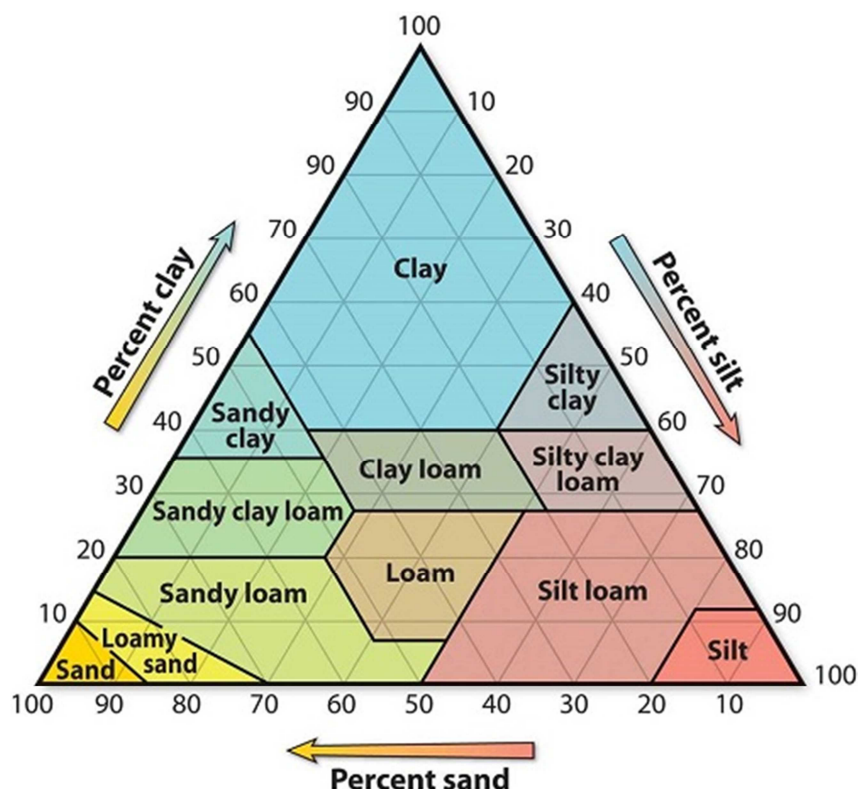
#### 3.1.3.1. La couleur

La couleur est l'un des critères de classification les plus évidents dans un profil de sol. Une couleur rouge est généralement indicative d'un sol riche en oxydes ferriques ( $Fe_2O_3$ ,  $Fe(OH)_3$ ), alors qu'un sol à la teinte grise peut quant à lui résulter d'un enrichissement en oxydes d'aluminium ( $Al(OH)_3$ ) ou encore en silicates (sels découlant de la silice ( $SiO_2$ )). La couleur noire est indicative d'un sol riche en matières organiques.

#### 3.1.3.2. La texture

La texture d'un sol se réfère à la taille et aux proportions relatives des particules minérales qui le composent. Les particules de taille supérieure à 2 mm sont appelées graviers ou cailloux. Celles ayant un diamètre compris entre 0,05 à 2 mm représentent les **sables**. Les particules de tailles moyennes (0,002 à 0,05 mm) sont appelées **limons** et enfin les particules dont la taille est inférieure à 0,002 mm sont appelées **argiles**.

Selon le pourcentage de chaque fraction minérale, il est possible de classer les sols en quatre principaux groupes : sols sableux, sols limoneux, sols argileux et sols équilibrés ou loameux. Chacun de ces groupes possède des caractéristiques qui lui sont propres (figure 3.4).



**Figure 3.4** : Triangle de classification des sols selon la texture (<https://www.usgs.gov>)

La texture d'un sol affecte ses propriétés et par voie de conséquence la croissance des végétaux. Un terrain agricole idéal par exemple présenterait des proportions de 40% de sables, de 40% de limons et de 20% d'argile.



### 3.1.3.3. La porosité

La porosité représente le volume de l'ensemble des pores du sol occupés par l'eau ou l'air. La mesure de la porosité permet de donner certaines indications sur les capacités de drainage ou de rétention de l'eau ainsi que l'aération dans le sol. Elle peut fournir une idée assez juste de la structure du sol.

### 3.1.3.4. L'acidité

L'acidité d'un sol est mesurée par son pH. La plupart des sols présentent des valeurs de pH comprises entre 4 et 8 bien que certains sols peuvent présenter des pH très bas (acides).

Le pH d'un sol a une influence considérable sur les écosystèmes végétaux car la disponibilité de certains éléments minéraux dépend du pH. A des pH bas (acides), certains minéraux comme l'aluminium deviennent solubles et absorbés par les plantes à des doses parfois toxiques. Certains éléments minéraux indispensables à la croissance des plantes tels que le Calcium, le manganèse ou le phosphore sont facilement lessivés dans des sols acides, réduisant ainsi leur disponibilité pour les plantes. Un pH optimum pour un sol en ce qui concerne la croissance végétale est compris entre 6 et 7.

## 3.2. Dégradation des sols

Les activités humaines ont une grande influence sur les sols, en perturbant les équilibres naturels et en exacerbant les problèmes telles que l'érosion, la perte de la fertilité, la salinisation et désertification.

### 3.2.1. Erosion des sols

L'érosion des sols fait référence à l'amincissement de la couche arable sous l'effet de forces érosives naturelles tels que le vent, l'eau et la glace ou à cause des activités agricoles. L'eau et le vent sont particulièrement efficaces pour la désagrégation des sols et le transport des particules ainsi produites sur de longues distances.

Les mauvaises pratiques agricoles accélèrent aussi l'érosion. Cependant, elles ne sont pas les seules responsables. La destruction des couverts végétaux lors de l'ouverture des routes, la construction de bâtiments et l'exploitation forestière ont aussi pour effet d'aggraver les phénomènes d'érosion.

### 3.2.2. Carences minérales

Dans les écosystèmes naturels, les végétaux absorbent les éléments minéraux indispensables à leur croissance grâce à leur système racinaire. Après leur mort, les végétaux sont dégradés et décomposés par les micro-organismes, ce qui restitue les éléments minéraux aux sols. Dans les agrosystèmes, ce cycle naturel est rompu car les plantes cultivées sont récoltées et les éléments qu'elles contiennent ne retournent pas dans le sol. Sur le long terme, un sol cultivé perdra inévitablement sa fertilité.

### 3.2.3. Salinisation des sols

Les sols des régions arides et semi-arides contiennent d'importantes quantités de sels. Dans ces zones, les précipitations faibles favorisent l'accumulation des sels en surface, alors

que dans les régions à fortes pluviométrie, les sels sont lessivés et entraînés vers les nappes et les cours d'eau.

Le phénomène de salinisation des sols agricoles résulte de l'accumulation des sels due à l'irrigation. L'eau d'irrigation contient de petites quantités de sels qui s'accumulent progressivement au fil des années après l'évaporation de l'eau.

### 3.2.4. Désertification

Le phénomène de désertification survient après la dégradation des sols agricoles ou forestiers après l'érosion, le surpâturage, la surexploitation agricole et la déforestation. C'est en Asie et en Afrique que ce phénomène est le plus prononcé.

### 3.3. Pollution des sols

Contrairement à la pollution atmosphérique qui sévit dans les zones urbaines et industrielles, la pollution des sols affecte, elle, les zones rurales. Cette pollution résulte de plusieurs causes, notamment les dépôts de polluants atmosphériques qu'on a vus dans le chapitre précédent. Cependant, la cause majeure de contamination des sols reste l'utilisation abusive d'engrais et de pesticides par le secteur agricole. L'agriculture moderne constitue donc la principale cause de la pollution des sols compte tenu des surfaces affectées mais aussi de l'intensité du traitement des surfaces cultivées par les différents types de substances agrochimiques.

#### 3.3.1. Pollution Par les engrais

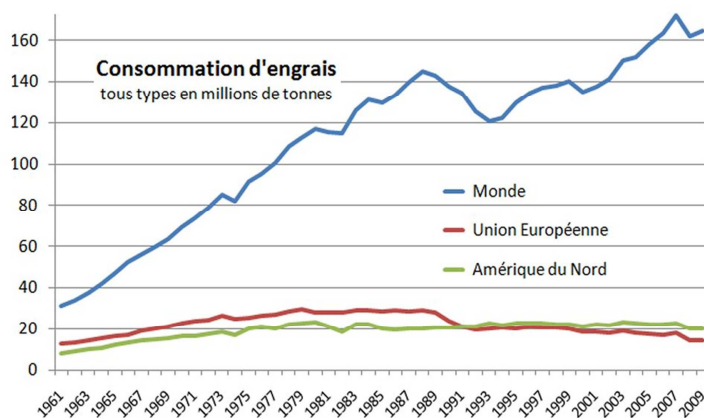
Les fertilisants minéraux ou organiques (fumiers, lisiers, boues des stations d'épuration) sont dispersés sur les sols afin d'augmenter les rendements des plantes et des végétaux cultivés (figure 3.5). En effet, l'usage des engrais vient de la nécessité de restituer aux sols les éléments minéraux essentiels (Azote, phosphore et potassium), parfois aussi le soufre et le magnésium et autres oligo-éléments qui sont contenus dans le végétaux et emportés par la récolte.

Les engrais chimiques les plus utilisés se répartissent en trois grandes familles :

- Les engrais azotés sont utilisés pour apporter aux sols l'azote essentiel à la croissance des végétaux. Ils sont essentiellement sous forme de nitrate de calcium ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ), le nitrate d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) et le sulfate d'ammonium ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ).
- Les engrais phosphatés, sous forme de ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) apportent à la terre le phosphore
- Les engrais potassiques qui sont constitués de potasse ( $\text{K}_2\text{O}$ ) ou de sulfates de potassium ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ).

Depuis les années 50, d'énormes quantités d'engrais sont utilisées chaque année en agriculture. La consommation mondiale a atteint une valeur record de 180 millions de tonnes en 2013 (figure 3.5).





**Figure 3.5** : Utilisation d’engrais dans le monde entre 1961 et 2009 (<http://www.fertilizer.org/>).

Les engrais chimiques augmentent certes les rendements agricoles mais leur utilisation massive et répétée est responsable des phénomènes de pollution massive des sols. En effet, les phosphates et les nitrates sont la cause majeure de la pollution des nappes phréatiques par infiltration depuis les horizons supérieurs. Ce type de pollution est très difficile à traiter et constitue une sérieuse menace pour la santé humaine. En outre, les phosphates et les nitrates sont responsable des phénomènes d’eutrophisation des eaux côtières, un phénomène sur lequel on va revenir dans le chapitre suivant sur la pollution des milieux aquatiques et marins. Enfin, pour des raisons de cout de fabrication des engrais, ces substances ne sont pas bien purifiées, contribuant ainsi à ramener dans les sols les impuretés et les résidus de nombreux métaux toxiques qu’elles renferment (tableau 3.1).

**Tableau 3.1** : Principaux métaux contenus dans les engrais phosphatés (Ramade, 2012)

Elément	Concentration (mg.Kg <sup>-1</sup> )
Arsenic	2,2 à 12
Cadmium	50 à 170
Chrome	66 à 243
Cobalt	0 à 9
Cuivre	4 à 79
Plomb	7 à 92
Nickel	7 à 32
Sélénium	0 à 4,5
Vanadium	20 à 180
Zinc	50 à 1430

La fertilisation abusive des sols avec des engrais chimiques aboutit inexorablement à la perturbation du fonctionnement des systèmes pédologiques, en particulier les cycles de la matière. Sur le long terme, il a été constaté la dégradation des structures physiques des sols, notamment avec la régression du complexe argilo-humiques, la perte de la matière organique

ainsi qu'une accumulation des métaux toxiques. A cela, on doit ajouter la perturbation des cycles biogéochimiques naturels de l'azote, du phosphore et du potassium.

### 3.3.2. Pollution par les pesticides

Le terme pesticide vient de l'anglais « pest » qui signifie ravageur, nuisible. Il désigne toutes les substances naturelles ou de synthèse qui présentent des activités particulières contre développement des organismes vivants considérés comme nuisibles pour l'agriculture, l'hygiène publique, la santé publique, la santé vétérinaire ou les surfaces non agricoles. Les pesticides, appelés également **produits phytosanitaires**, sont utilisés dans divers secteurs d'activités. À des fins agricoles, ils sont majoritairement employés pour la protection des cultures afin d'augmenter les rendements, et sont également présents dans l'élevage pour lutter contre les insectes et les bactéries. Dans le domaine de la santé publique, ils sont utilisés dans lutte contre certains insectes vecteurs de maladies afin d'éviter les épidémies.

Les pesticides sont classés selon leurs propriétés biologiques ou chimiques. La classification biologique regroupe les pesticides selon les organismes visés (tableau 3.2).

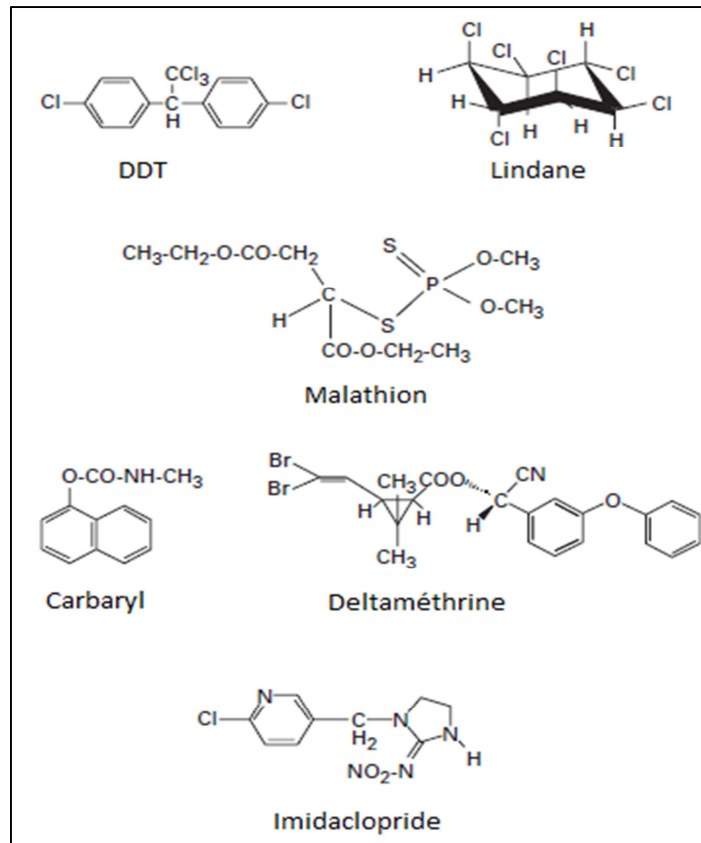
**Tableau 3.2** : Classes biologiques des pesticides

Classe biologique	Cible
Insecticides	Insectes
Herbicides	Mauvaises herbes
Fongicides	Champignons
Nématicides	Nématodes
Bactéricides	Bactéries
Rodenticides	Rongeurs
Corvicides	Oiseaux ravageurs
Acaricides	Mites
Molluscicides	Limaces

Dans la classification chimique, les pesticides sont regroupés selon leur composition chimique. On distingue les pesticides inorganiques, les pesticides organométalliques et les pesticides organiques. Ces derniers sont de loin les plus utilisés dans le monde actuellement. Ils se répartissent en cinq grandes familles chimiques principales (figure 3.6)

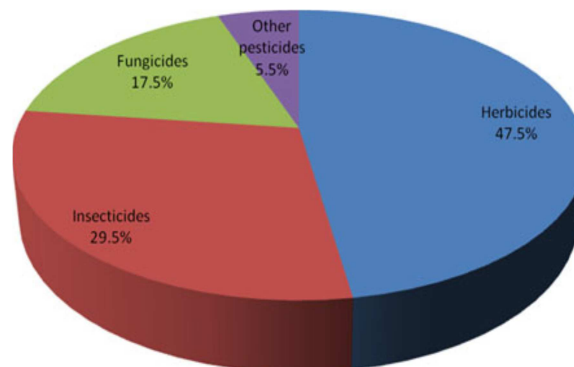
- Les organochlorés (DDT, lindane, Dieldrine...etc)
- Les organophosphorés (Malathion entre autres)
- Les carbamates (Carbaryl)
- Les pyréthroides (deltaméthrine)
- Les néonicotinoïdes (imidaclopride)

Les pesticides occupent une place particulière parmi les causes de pollution de l'environnement en raison du caractère volontaire de leur dispersion dans les milieux naturels. Le développement de l'industrie des pesticides a connu un essor considérable depuis la deuxième guerre mondiale. On estime que plus de 3000 substances ont déjà fait l'objet d'une utilisation agricole dans le monde.



**Figure 3.6** : Formules chimiques de quelques pesticides

La consommation mondiale en pesticides est d'environ **2 millions de tonnes par an**, dont 45% par l'Europe et 25% par les USA. Les substances les plus consommées sont les herbicides (47,5%), les insecticides (29,5%), les fongicides (17,5%) et les autres familles de pesticides (5,5%) (Figure 3.7).

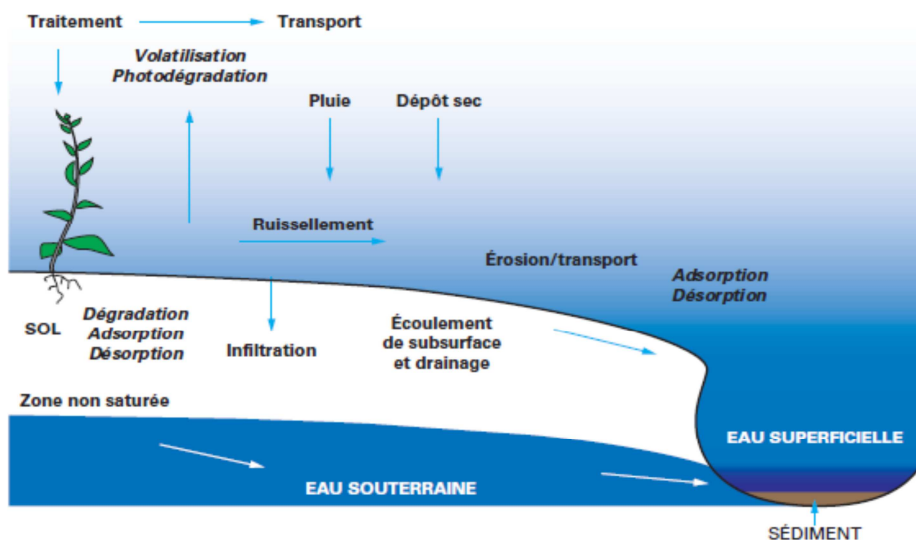


**Figure 3.7** : Consommation mondiale de pesticides en fonction des principales familles (De et al., 2014)

### 3.3.2.1. Devenir et comportement des pesticides dans le sol

La **rétenion** par le sol et la **persistance** des pesticides sont les deux facteurs fondamentaux qui conditionnent leur caractère polluant. La distribution et le devenir des pesticides dans le sol implique des phénomènes complexes tels que le ruissellement, l'infiltration, qui mettent en jeu des processus complexes tels que l'adsorption/désorption, la

précipitation/dissolution, la bioaccumulation (accumulation dans les organismes biologiques) et la volatilisation (figure 3.8). Ces processus contrôlent le transport des pesticides du sol vers les autres compartiments environnementaux et leur devenir à long terme. L'importance relative de ces processus varie avec la nature chimique des molécules appliquées, les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols et le climat.



**Figure 3.8 :** Processus impliqués dans le devenir des pesticides dans le sol (<http://www.driaf.ile-de-france.agriculture.gouv.fr>).

**La persistance** d'un pesticide dans un sol est la résultante d'un certain nombre de processus physico-chimiques et biologiques qui font diminuer sa concentration dans ce même sol. La dégradation de ce pesticide conduit à des modifications de sa structure moléculaire et à l'apparition de composés intermédiaires (métabolites). Ces résidus ainsi produits, peuvent persister dans le sol des mois, des années voire des décennies (Tableau 3.3).

**Tableau 3.3 :** Persistance de certains pesticides organochlorés dans le sol (Ramade, 2012).

Pesticide	% de persistance
	Après 14 ans
Aldrine	40
Chlordane	40
Endrine	41
Heptachlore	16
HCH	10
Toxaphène	45
	Après 15 ans
Aldrine	28
Dieldrine	31
	Après 17 ans
DDT	39
	Après 30 ans
Chlordécone	100

### 3.3.2.2. Impacts éco-toxicologiques des pesticides

Malgré les avantages immédiats inhérents à leur utilisation, les pesticides présentent un certain nombre d'inconvénients. Ces derniers découlent de leurs particularités toxicologiques qui finissent par affecter non seulement les espèces ciblées mais aussi la structure et le fonctionnement des écosystèmes.

Ces effets découlent de la toxicité aiguë des pesticides, dont les conséquences sont immédiates (mortalité immédiate de certaines espèces) et de la toxicité chronique (à long terme) due à l'exposition permanente à de faibles doses de pesticides.

Les effets éco-toxicologiques s'observent lorsque les pesticides subissent une bioamplification dans la chaîne alimentaire (incorporation des pesticides le long des maillons trophiques avec une augmentation de leur concentrations d'un maillon inférieur à un maillon supérieur) (figure 3.9). Cette amplification de la concentration des pesticides dans le réseau trophique continue jusqu'à atteindre un seuil critique pour les espèces se situant au sommet de la chaîne alimentaire qui peut se manifester par une mortalité directe ou des effets physiologiques insidieux comme la stérilité et la diminution du taux de reproduction qui aboutissent à la disparition progressive des peuplements.

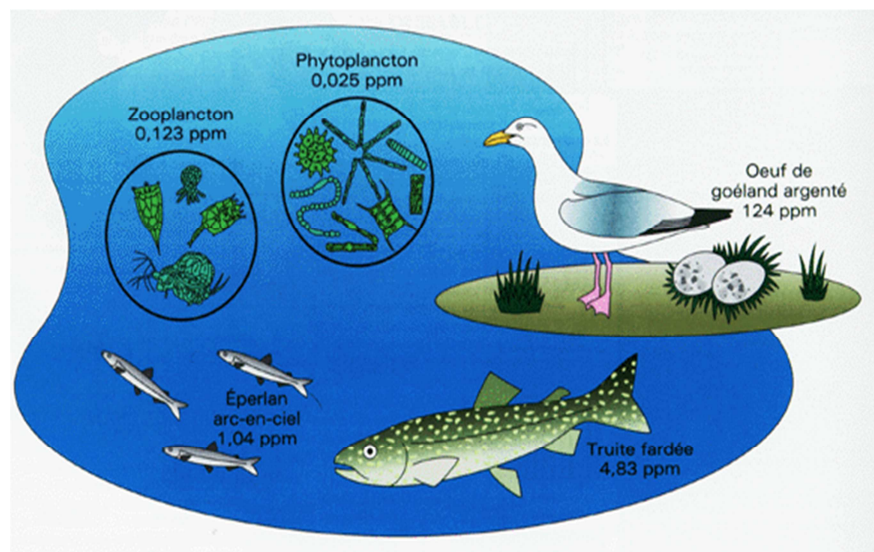


Figure 3.9 : Bioamplification des pesticides dans une chaîne alimentaire marine

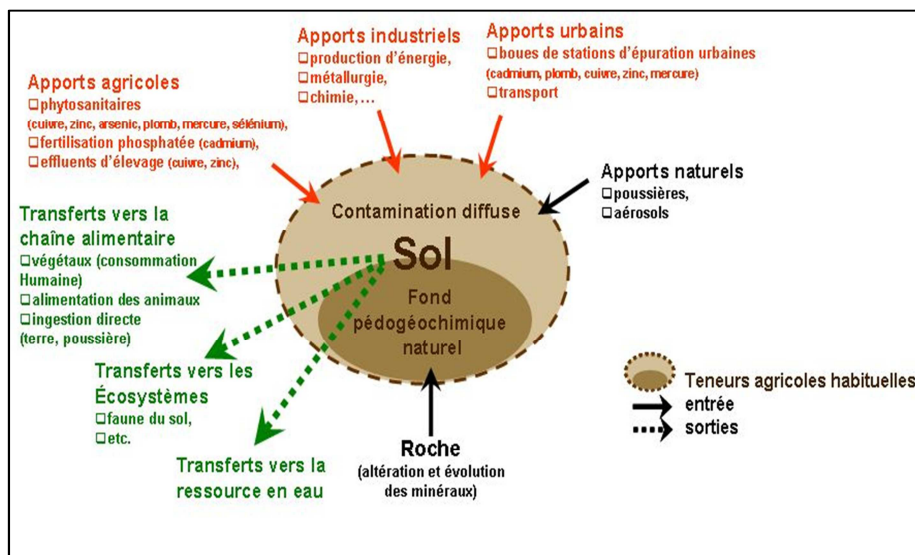
### 3.3.3. Pollution par les éléments traces métalliques

Les éléments traces métalliques (ETM) sont les éléments chimiques, constituants de la croûte terrestre, dont les teneurs sont inférieures à  $1000 \text{ mg. Kg}^{-1}$  (0,1 %). Ils ne représentent que 0,6 % du total des minéraux composant la croûte terrestre, alors que les 12 éléments majeurs (O ; Si ; Al ; Fe ; Ca ; Na ; K ; Mg ; Ti ; H ; P ; Mn) représentent 99,4 %.

Dans les sols, les ETM sont soit des métaux (par exemple Cd, Cu, Cr, Ni, Pb) ou métalloïdes (B, Se, As). Certains d'entre eux sont qualifiés de lourds en raison de leur densité supérieure à  $6 \text{ g.cm}^{-3}$  (Pb, Cd, Hg, As...etc).

#### 3.3.3.1. Origine des ETM dans le sol

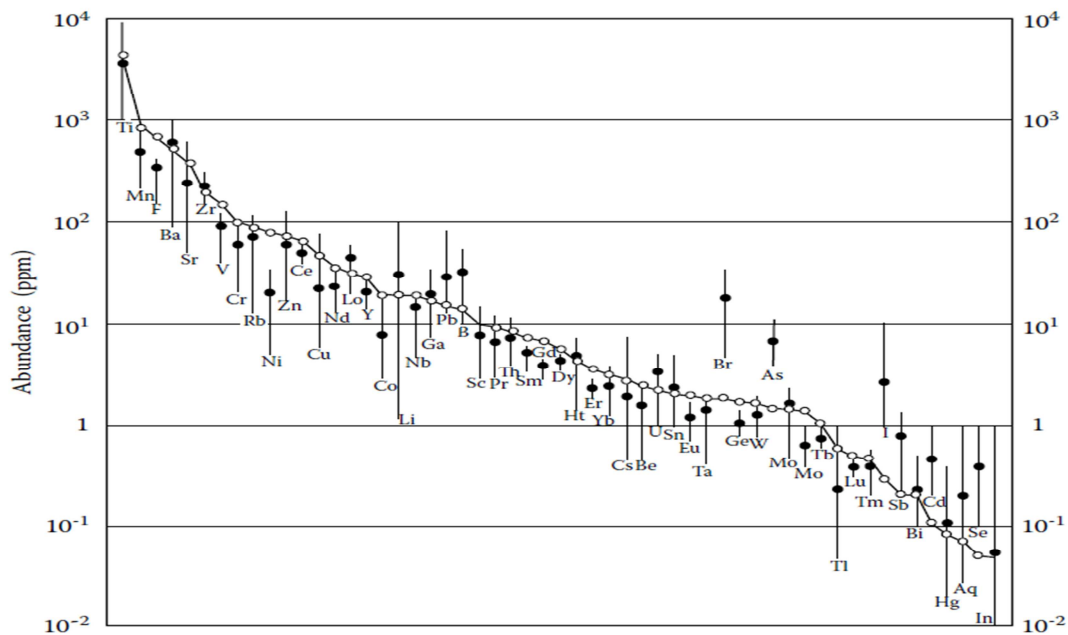
Les ETM présents dans les sols sont issus de la désagrégation de la roche mère (fond pédogéochimique naturel) d'une part, et des apports anthropiques d'autre part (apports anthropiques directs : fertilisants, pesticides, industries diverses ou indirects via les retombées atmosphériques) (figure 3.10).



**Figure 3.10** : Sources des ETM dans les sols et leur transfert vers les autres compartiments de l'environnement (Girard et al., 2011).

- **Le fond pédogéochimique naturel**

Il correspond à la concentration d'un élément dans un sol, résultant des évolutions naturelles géologiques et pédologiques en dehors de toute intervention anthropique. Ce fond résulte d'un héritage direct du matériau parental (figure 3.11). Les teneurs en ETM vont ainsi être différentes en fonction des types de sols et des régions géographiques.



**Figure 3.11 :** Concentrations en ETM dans les sols comparée à leur abondance dans la lithosphère. Les cercles noirs indiquent leurs concentrations dans les sols et les cercles ouverts, leurs concentrations dans la lithosphère (Kabata-Pendias, 2011).

- **Apports directs ou indirects d'origine anthropique**

- Apports agricoles (fertilisants, fumiers, déjections animales, boues d'épuration, composts, pesticides...etc).
- Apports atmosphériques d'origine lointaine (poussières et aérosols provenant des activités industrielles, trafic automobile, incinérateurs...etc.)
- Des pollutions localisées massives (souvent à proximité d'une source industrielle, mines, usines métallurgiques ...etc).

Dans les études environnementales portant sur l'étude de la contamination des sols par les éléments trace métalliques, il conviendrait d'abord de déterminer les fonds pédogéochimiques locaux pour pouvoir évaluer la contamination d'un sol par des apports exogènes. Ce fond servira de référence à partir de laquelle seront calculés les facteurs d'enrichissement d'un élément donné. Le niveau de composition de référence communément utilisé est la teneur de cet élément dans la croûte terrestre. Le facteur d'enrichissement sera ainsi calculé comme suit :

$$FE = X_{\text{sol}} / X_{\text{croûte terrestre}}$$

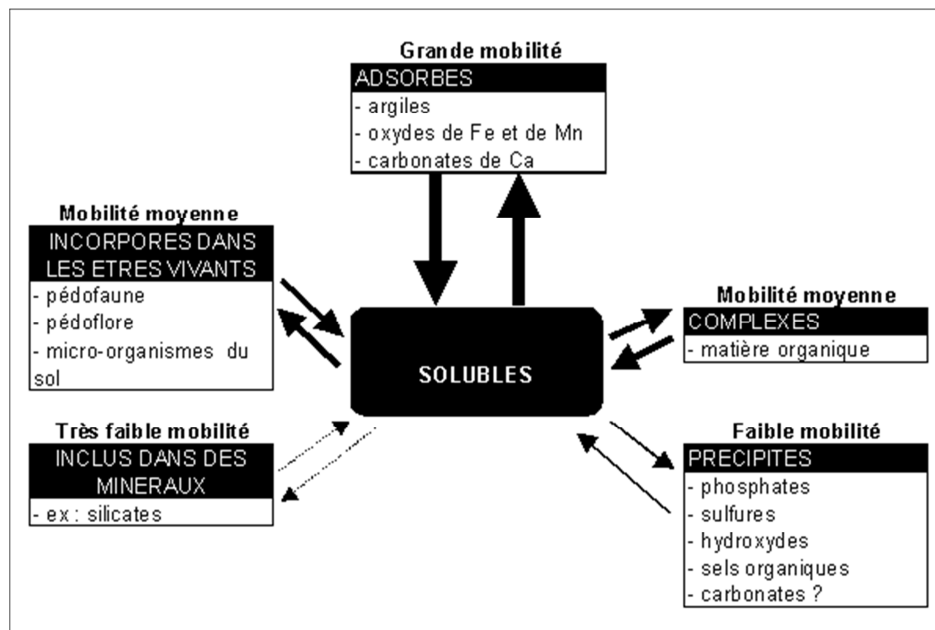
Où  $X_{\text{sol}}$  est la teneur de l'élément X dans le sol et  $X_{\text{croûte terrestre}}$  celle du même élément dans la croûte.

### 3.3.3.2. Interaction des ETM avec les constituants des sols

Les teneurs totales en ETM dans les sols n'est pas une indication suffisante pour évaluer les risques de mobilité, de biodisponibilité et d'impact sur le fonctionnement de écosystèmes. Dans le sol, les ETM se répartissent dans les différentes fractions qui composent ces sols (Figure 3.12). Généralement, la quantité existant dans la solution du sol ne représente qu'un



infime pourcentage de la totalité du polluant. Les métaux se concentrent donc dans la fraction solide du sol, à savoir les fractions organiques (Acides organiques, complexes organiques, phénols...) et minérales (Argiles, carbonates, sels minéraux, oxydes métalliques...).



**Figure 3.12** : Répartition des ETM dans les différentes composantes du sol (Juste, 1995)

- **Mobilité et spéciation des ETM dans les sols**

Les variations des conditions du milieu modifient la distribution des ETM entre les composantes du sol. La mobilité des ETM est définie comme leur capacité à être transféré vers des phases où ils sont de moins en moins énergiquement retenus, le compartiment ultime étant représenté par la solution du sol. La mobilité des ETM dépendent des paramètres physico-chimiques et biologiques du sol.

- **Effet du pH**

La variation de pH (naturelle ou anthropique) semble être le facteur déterminant dans la mobilité des ETM dans le sol, notamment dans leur mise en solution. Une baisse du pH favorise la mobilité des métaux. Inversement, l'augmentation du pH provoque l'immobilisation par formation de composés insolubles. Il faut cependant noter que certains ETM comme le bore obéissent moins strictement à ce type de comportement ou, au contraire, comme le molybdène, l'arsenic, le sélénium présentent un comportement opposé : leur mobilité augmente avec l'élévation du pH (Tableau 3.4).

- **Le potentiel Redox**

Les conditions d'oxydo-réduction (Eh) ont une influence sur le comportement des éléments chimiques. Elles mesurent la capacité d'un milieu à céder des électrons à un agent oxydant ou à accepter des électrons venant d'un agent réducteur. A titre d'exemple, le manganèse et le fer sont plus mobiles dans le sol sous leurs formes réduites que sous leurs formes oxydées. Les effets du pH et du potentiel Redox sur la mobilité des ETM dans le sol sont résumés dans le tableau 3.4.



**Tableau 3.4** : Mobilité relative des différents ETM dans le sol en fonction du pH et du potentiel Redox (Forstner, 1985)

Mobilité relative	pH		Potentiel Redox	
	Neutre-alkalin	Acide	Oxydant	Réducteur
Très haute	Se, Mo	B	B	-
Haute	As	Zn, Cd, Co, Ni, Mn	Mo, So	-
Moyenne	Mn	Cu, Al, Pb, Cr	Cu, Co, Hg, Ni, Zn, Cd	Mn
Basse	Pn, Fe, Zn, Cd, Tl	Fe(III), Tl	Pb, Tl	Fe, Zn, Co, Ni, Tl
Très basse	Al, Cr, Hg, Cu, Ni, Co	Mo, Se, As	Al, Cr, Fe, Mn	Al, Cr, Hg, Cu, Se, B, Mo, Cd, Pb

➤ **Température et humidité du sol**

Ces deux paramètres influent indirectement via l'activité biologique du sol. En effet, l'activité biologique induit une production de substances acides ou complexantes issues de la biodégradation de matières organiques, alors que l'élévation de la température agit directement sur la dissolution de composés fixant les ETM, facilitant ainsi leur absorption par la flore.

➤ **Facteurs microbiologiques**

Les micro-organismes agissent sur la mobilité des éléments traces minéraux dans le sol par le biais de leur métabolisme qui agit sur leur spéciation et aboutit, soit à la leur mise en solution dans la phase liquide, soit à leur précipitation.

• **Biodisponibilité et toxicité des métaux**

La biodisponibilité peut se définir comme la capacité d'un élément trace à passer dans un compartiment du sol dans lequel il sera directement assimilable par les êtres vivants. La biodisponibilité d'un élément trace est intimement liée à la phase liquide du sol, car c'est à partir de là que les ETM sont transférés vers les organismes.

La biodisponibilité comprend :

- La disponibilité environnementale : elle correspond à l'offre du sol
- La biodisponibilité environnementale qui correspond à l'absorption d'un ETM par un organisme
- La biodisponibilité toxicologique qui reflète l'accumulation et/ou l'effet de l'ETM dans l'organisme.

L'accumulation des métaux dans les sols a pour conséquence des effets néfastes sur l'équilibre et le fonctionnement des écosystèmes et sur leurs populations. La toxicité des métaux pour les micro-organismes des sols réside dans leur capacité à établir des complexes stables avec les protéines à activité enzymatique, ce qui peut aboutir à leur inactivation. En

outre, certains métaux qualifiés de xénobiotiques (aucune fonction physiologique connue) peuvent perturber les fonctions cellulaires en entrant en compétition avec les nutriments essentiels sur les sites disponibles de la membrane cellulaire.

- **Le transfert des ETM vers les horizons profonds et les bassins versant**

Les ETM peuvent être transférés vers le réseau hydrographique (fleuves, rivières, lacs et nappes phréatiques) sous forme particulaire, colloïdale ou dissoute. La proportion de chacune de ces formes varie selon les processus de transfert et selon les sources de pollution. Les formes dissoutes se retrouvent dans les eaux de drainage et les écoulements de subsurface, alors que les écoulements de surface transportent plutôt des ETM dans la phase particulaire.

### 3.4. Qualité des sols

La qualité des sols est un facteur essentiel pour la santé des écosystèmes terrestres et pour la rentabilité des sols agricoles. Cette qualité s’apprécie en fonction notamment de sa texture, de sa structure et de sa composition. Toutefois, la qualité d’un sol ne peut être évaluée à partir de critères purement physico-chimiques et biologiques absolus mais en fonction de ses aptitudes à remplir ses fonctions écologiques, économiques, de production ou de support.

Afin de préserver la qualité des sols, des mesures sont prises à travers le monde pour limiter et atténuer les effets néfastes des différents types de pollution qui menacent les sols. Ces mesures se traduisent par la mise en place de normes de qualité. A titre d’exemple, le problème de la pollution des sols par les métaux toxiques (mercure, plomb, cadmium, arsenic ...etc) a conduit les pays développés à adopter des normes relatives à la teneur maximale des sols en ces éléments (tableau 3.5).

**Tableau 3.5 :** Normes relatives aux teneurs maximales dans les sols des principaux métaux toxiques dans certains pays de l’OCDE (mg/kg de sol en poids sec) (Ramade, 2012).

Pays	Cd	Cr	Co	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
Union européenne	3	200	nd	140	1,5	75	300	nd	300
Canada	3	750	40	150	0,8	150	375	2	600
France	2	150	nd	100	1	50	100	10	300
Grande Bretagne	3	400	nd	135	1	75	300	3	300
Hollande	0,8	100	20	36	0,3	30	40	nd	140
Suède	0,4	30	nd	40	0,3	30	40	nd	75
Suisse	0,8	75	25	50	0,8	50	50	nd	200

### 3.5. Réhabilitation et traitement des sols pollués

La réhabilitation (remédiation) des sols pollués s’impose lorsqu’une pollution affecte un sol de manière à altérer l’équilibre des écosystèmes ou présenter un danger pour la santé humaine. L’objectif de cette démarche est d’intervenir afin de ramener un sol à des conditions environnementales durables, dans lesquelles les risques liés aux agents polluants sont réduits au minimum. La réhabilitation des sols pollués peut s’effectuer par le biais de procédés physico-chimiques (Désorption thermique, électrocinétique...etc) ou biologiques

(Phytorémediation, Bioventing, Biosparging...) développés en détails dans l'article synthétique de Roudier (2004).

### Conseils de lecture pour ce chapitre

- **De, A., Bose, R., Kumar, A., Mozumdar, S., 2014.** Targeted delivery of pesticides using biodegradable polymeric nanoparticles. USA: Springer-Verlag.
- **Duchaufour, P., 2004.** Introduction à la science du sol. Edition Dunod. 352p.
- **Fortsner, U., 1985.** Chemicals forms and reactivities of metals in sediments in "chemical methods for assessing bio-available metals in sludges and soil", Leschber R., Davis R.D., L'Hermite P., CEC, Elsevier Applied Science publishers, 1-30.
- **Girard, M.C., Walter, C., Rémy, J.C., Berthelin, J., Morel, J.L., 2011.** Sols et environnement. Edition Dunod. 896p.
- **Juste, C., 1995.** Les micro-polluants métalliques dans les boues résiduares des stations d'épuration urbaines, Convention ADEME-INRA, ADEME éd., 209p.
- **Kabata-Pendias, A., 2011.** Trace elements in soils and plants. Taylor&Francis, 534p.
- **Mirsal, I.A., 2008.** Soil pollution : Origin, monitoring, remediation. Sringer-Verlag, 310p.
- **Ramade, F., 2012.** Eléments d'écologie appliquée. Actions de l'homme sur la biosphère. Edition Dunod. 824p.
- **Roudier, P., 2004.** Techniques de réhabilitation des sites et sols pollués. Techniques de l'ingénieur.
- <http://www.fertilizer.org/>
- <https://www.usgs.gov/>

**Chapitre 4 :**  
**Pollution des milieux**  
**aquatiques**

## 4. Eau et pollution des eaux

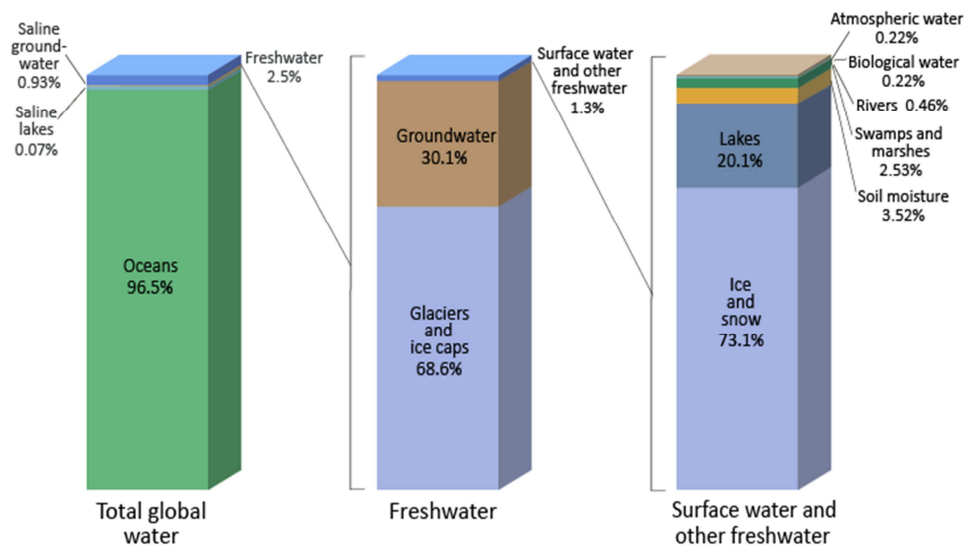
### 4.1. L'eau

L'eau occupe une place particulière au sein de notre planète. La terre est la seule planète du système solaire à posséder autant d'eau à sa surface et sous ses trois formes : gazeuse (vapeur d'eau), liquide (océans et eaux continentales) et solide (glace).

La vie sur terre serait même impossible sans eau. Toutes les formes de vie, depuis les bactéries jusqu'aux plantes et animaux supérieurs contiennent de l'eau. En outre, les enveloppes hydrologiques (océans, rivières, lacs ...etc) sont des supports pour le monde vivant. Nous dépendons entièrement de l'eau pour notre survie ainsi que pour notre confort. Nous en buvons, naviguons sur les cours d'eau, lacs et océans et en utilisons des quantités énormes pour l'agriculture, l'industrie, la production d'énergie et le traitement des déchets.

#### 4.1.1. La répartition des ressources en eau sur terre

Estimer le volume total des eaux terrestres est une véritable gageure. Les seules quantités d'eau qu'il est possible d'estimer sont celles qui se trouvent dans les principaux réservoirs de l'hydrosphère, que sont les mers et océans, les eaux continentales (superficielles et souterraines), l'atmosphère et la biosphère. Les eaux contenues dans le manteau terrestre sont quant à elles très difficiles à quantifier.



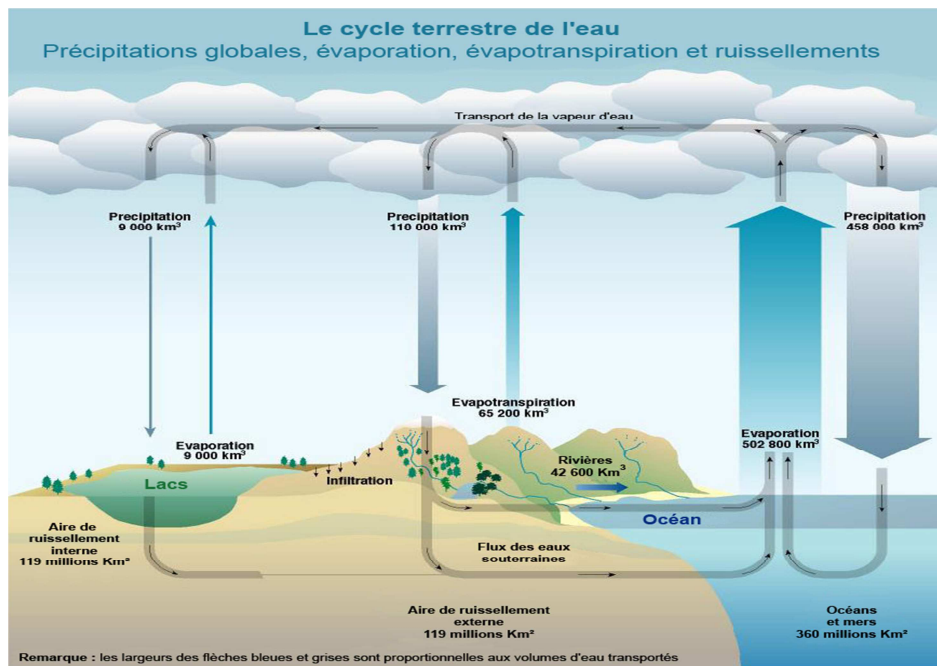
**Figure 4.1 :** Répartition des ressources en eau sur la planète (<http://www.usgs.gov/>)

On estime actuellement qu'il y aurait à peu près 1 385 990 800 km<sup>3</sup> d'eau dans l'hydrosphère. Cependant, la plus grande part de cette eau provient des océans qui constituent le réservoir le plus important de la planète mais dont les eaux sont salées (figure 4.1). L'eau douce ne constitue qu'un peu moins de 3 % de l'eau à la surface du globe, dont la majorité est peu disponible parce qu'elle est gelée dans les glaces polaires ou se trouve dans le milieu souterrain (figure 4.1).

Les eaux douces de surface (lacs, rivières) ne représentent qu'une fraction très modeste. C'est pourtant cette fraction qui représente un intérêt capital pour les activités humaines, ainsi que pour toute la vie terrestre. Elle participe à la dynamique et **le cycle de l'eau**.

#### 4.1.2. Le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau est un concept qui englobe les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre (Figure 4.2). En effet, au cours de son cycle, l'eau circule continuellement entre les différents réservoirs de la planète via des phénomènes tels que l'évaporation, les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration dans les nappes...etc.



**Figure 4.2** : Représentation du cycle de l'eau (Musy et al., 2014).

Dans chacun de ces grands réservoirs terrestres, l'eau se renouvelle au fil des ans. La vitesse de renouvellement des eaux dans les réservoirs est mesurée par un flux : le temps de séjour moyen ou temps de résidence est obtenu en divisant la taille du réservoir par le flux d'entrée (somme de tous les flux entrants) ou de sortie (somme de tous les flux sortants) (tableau 4.1). L'avantage de ces transferts est qu'ils permettent aux réserves de se renouveler : plus le temps de résidence dans un réservoir est court, plus l'eau de ce réservoir est rapidement renouvelée.



**Tableau 4.1** : Temps de séjour de l'eau dans les différents réservoirs (Musy et al., 2014)

Les réservoirs	Les temps de résidence
Océans	2 500 ans
<b>Eaux continentales</b>	
Glaciers	1 600 à 9 700 ans
Eaux souterraines	1 400 ans
Mers intérieures	250 ans pour la mer Caspienne
Lacs d'eau douce	17 ans pour les grands lacs 1 an pour les autres lacs
Humidité des sols	1 an
Rivières	16 jours
Atmosphère (humidité de l'air)	8 jours
Biosphère (cellules vivantes)	quelques heures

## 4.2. Pollution des eaux

Le phénomène de la pollution des milieux aquatiques est un problème global dont la gravité varie d'un endroit à l'autre. Il constitue l'un des aspects les plus inquiétants de la dégradation de la biosphère par les activités humaines.

### 4.2.1. Pollution par les eaux usées

La cause la plus fréquente de ce type de pollution résulte du rejet en milieu continental ou littoral d'une grande variété de substances organiques et minérales qui peuvent avoir plusieurs origines : effluents urbains renfermant des résidus ménagers (lessives, produits d'entretiens...) et des matières fécales ou industriels tels que les rejets des industries agroalimentaires, chimiques, pétrochimiques, textiles...etc. La pollution de l'hydrosphère par les eaux usées provoque un dysfonctionnement total de ces écosystèmes avec la disparition des espèces autochtones et l'apparition d'espèces opportunistes.

#### 4.2.1.1. Contamination microbiologique des eaux

Cette pollution se traduit par une forte contamination du milieu aquatique par de nombreux agents pathogènes, bactéries et virus. Parfois, elle est à l'origine de sérieux problèmes d'hygiène et de santé publique. En effet, les eaux usées domestiques contiennent une large gamme de bactérie, virus, vers parasites...etc. A titre d'exemple, la charge bactérienne des eaux usées domestiques, qui représentent la principale source de micro-organismes pathogènes pour l'homme est très élevée, soit  $10^9$  à  $10^{10}$  germes/litre. La typhoïde, le choléra, la dysenterie bactérienne, et les hépatites virales font partie des maladies les plus courantes transmises par l'eau contaminée.

#### 4.2.1.2. Contamination par les matières organiques

En plus de véhiculer des agents pathogènes, les eaux d'égouts domestiques ou industriels (égouts d'abattoirs, de papeteries, de laiteries, de fromageries, de sucreries...etc) provoquent un autre problème environnemental : l'enrichissement en matières organiques (acides organiques, protéines, hydrocarbures, graisses, colloïdes...etc).

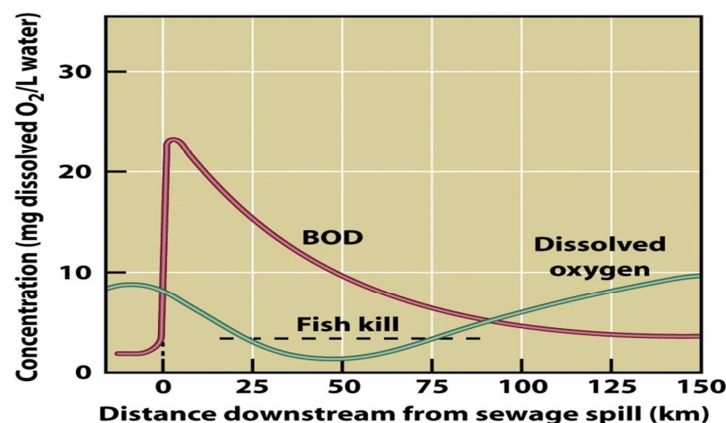
L'enrichissement du milieu aquatique ou « **eutrophisation** » est dû à la présence à des concentrations élevées d'azote et de phosphore. Des micro-organismes aérobies (bactéries, champignons...etc) décomposent cette matière organique en présence d'oxygène. Cependant, quand un milieu aquatique est trop chargé en matières organiques provenant des égouts, les micro-organismes consomment la plupart de l'oxygène dissous. En conséquence, il ne reste que peu ou pas d'oxygène pour les poissons et autres animaux aquatiques qui finissent par quitter l'écosystème ou mourir.

#### 4.2.1.3. Caractéristiques générales des eaux usées

Choisir les paramètres de mesure de la pollution est particulièrement délicat, du fait de la multitude de polluants présents dans les eaux résiduaires. Cependant, un certain nombre de critères globaux sont utilisés pour la détermination et la caractérisation du degré de pollution par les eaux usées.

- **La demande biologique en oxygène (DBO<sub>5</sub>)**

La charge de pollution d'une eau en matières organiques s'évalue par la demande biologique en oxygène en 5 jours (**DBO<sub>5</sub>**). Ce paramètre mesure la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes pour dégrader les matières organiques présentes dans l'eau usée pendant 5 jours. La DBO d'une eau usée est généralement très élevée, ce qui provoque la diminution de l'oxygène dissous dans l'eau (**hypoxie**) (Figure 4.3). Quand l'oxygène vient à manquer, les micro-organismes anaérobies comme les bactéries méthanogènes et sulfatoréductrices produisent des composés malodorants comme l'anhydride sulfureux (H<sub>2</sub>S) ou le méthane (CH<sub>4</sub>) qui détériorent davantage la qualité de l'eau.



**Figure 4.3** : Effet des eaux d'égout sur l'oxygène dissous et la DBO (Miller et Spoolman, 2014).

- **La demande chimique en oxygène (DCO)**

La DCO représente tout ce qui est susceptible d'être oxydé dans l'eau, en particulier certains sels minéraux oxydables (sulfures, sulfites,...), et la majeure partie des composés organiques.

D'autres paramètres de routine sont aussi mesurés comme la température, le pH, la salinité, les matières en suspension (MES), l'oxygène dissous, azote kjedahl (NTK) (azote organique et ammoniacal), azote total (qui englobe les formes oxydées de l'azote) et le phosphore total (voir Rodier, 2009 pour plus de détails).

Les tableaux 4.2 et 4.3 présentent les caractéristiques des eaux usées de quelques grandes branches industrielles.

**Tableau 4.2** : Caractéristiques des eaux résiduaires industrielles par branche industrielle (Boeglun et Roubaty, 2007).

Branches industrielles	Caractéristiques des eaux usées
<b>Industries agroalimentaires</b>	
Conserves de légumes et fruits, industrie de la pomme de terre	Teneur élevée en MES, matières organiques dissoutes, pH parfois alcalin, amidon
Conserves de viande et salaisons	Forte concentration en matières organiques dissoutes et en suspension (sang, protéines) graisses, NaCl
Laiteries	Forte concentration en matières organiques dissoutes principalement protéines, lactose, graisses
Sucreries	Forte concentration en matières organiques dissoutes et en suspension (sucres et protéines), NH <sub>3</sub>
Huileries, margarineries	Matières grasses, acidité et salinité fortes, teneur élevée en matières organiques
Boissons non alcoolisées	Alcalinité élevée, teneur en matières en suspension, détergents, DBO
<b>Industries chimiques et de synthèse</b>	
Produits phosphatés, acide phosphorique, engrais phosphatés	Argiles, limons et huiles, faible pH, teneur élevée en matières en suspension et produits siliceux et fluorés
Caoutchouc et polymères de synthèse	Teneur élevée en matière en suspension, pH variable, teneur élevée en chlorures et DCO
Insecticides et pesticides	Teneur élevée en matières organiques, benzène, toxiques pour les bactéries et les poissons, acides
Raffinerie et pétrochimie	Hydrocarbures aliphatiques et aromatiques plus ou moins émulsifiés, sulfures, matières en suspension, peu de DBO sauf eaux de procédé phénolées
<b>Industrie papetière</b>	
Pâte à papier	Pollution organique élevée, couleur, teneur élevée en matières en suspension, colloïdales et dissoutes ; sulfites ; pH variable

Papiers et cartons	Eaux blanches et organiques, fibres, alumine, titane, kaolin, baryte, pigments, latex, sels de mercure
<b>Industrie textile</b>	
Blanchisserie	Teneur élevée en alcalinité et en matières organiques ; détergents
Fabrication des fibres	Présence de solvants, produits d'enzymage, colorants, eaux neutres chargées de matières organiques
Préparation des fibres	Matières en suspension élevées ou moyennes, eaux alcalines ou acides, matières organiques (DCO) très élevées et variables, colorants, produits chimiques, réducteurs ou oxydants : parfois sulfures, graisse

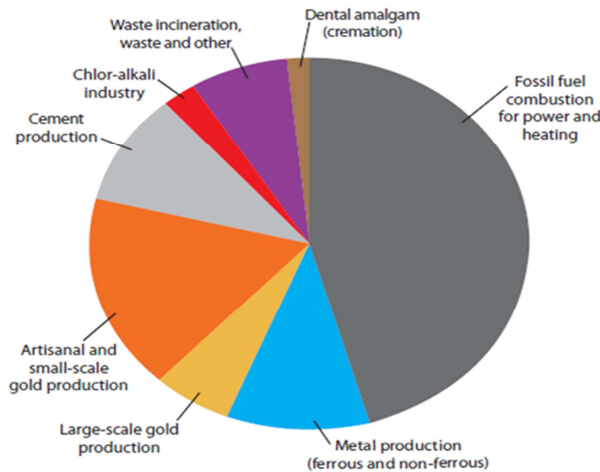
**Tableau 4.3 :** Quelques paramètres physicochimiques des eaux usées industrielles par branche industrielle (Bond et Straub, 1974).

Industrie	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DCO (mg/l)	MES (mg/l)	pH
<b>Industrie du vêtement</b>				
Coton	200 - 1000	400 - 1800	200	8 - 12
Laine	2000 - 5000	2000 - 5000	3000 - 30000	9 - 11
Tannerie	1000 - 2000	2000 - 4000	2000 - 3000	11 - 12
<b>Industrie agroalimentaire</b>				
Brasserie	850	1700	90	4 - 8
Distillerie	7	10	faible	-
Laitrie	600 - 1000	150 - 250	200 - 400	Acide
Agrumes	200	-	7000	Acide
Abattoir	1500 - 2500	200 - 400	800	7
Procédés de pommes de terre	2000	3500	2500	11 - 13
Volaille	500 - 800	600 - 1050	450 - 800	6 - 9
<b>Industrie pétrochimique</b>				
Raffinage du pétrole	100 - 500	150 - 800	130 - 600	2 - 6

**4.2.2. La pollution des eaux par les métaux toxiques**

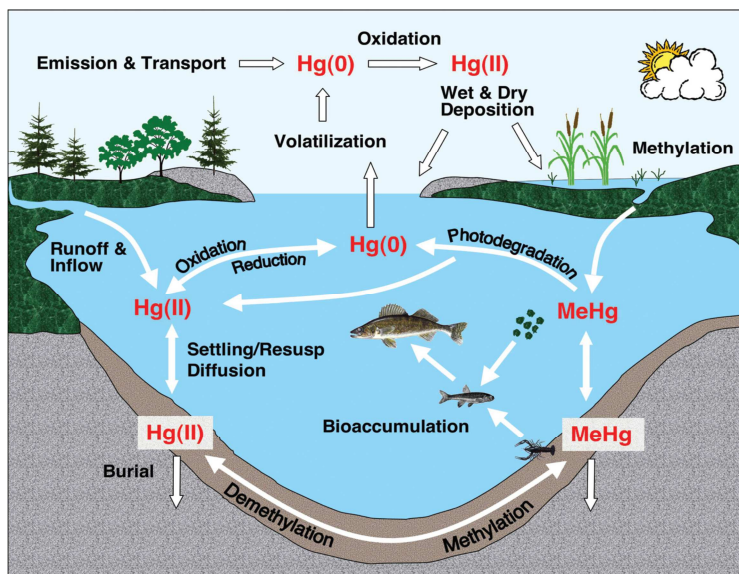
**4.2.2.1. Pollution par le mercure**

Le mercure se retrouve essentiellement à l'état naturel sous forme de minerai de cinabre (HgS). Il est rejeté dans l'environnement à la fois par le biais de phénomènes naturels (volcanisme et érosion des roches superficielles) et les activités humaines. Cependant, la pollution par le mercure est essentiellement due à la combustion de charbon dans les centrales thermoélectriques (Figure 4.4).



**Figure 4.4** : Sources du mercure dans l'environnement par secteurs d'activités (AMAP, 2011).

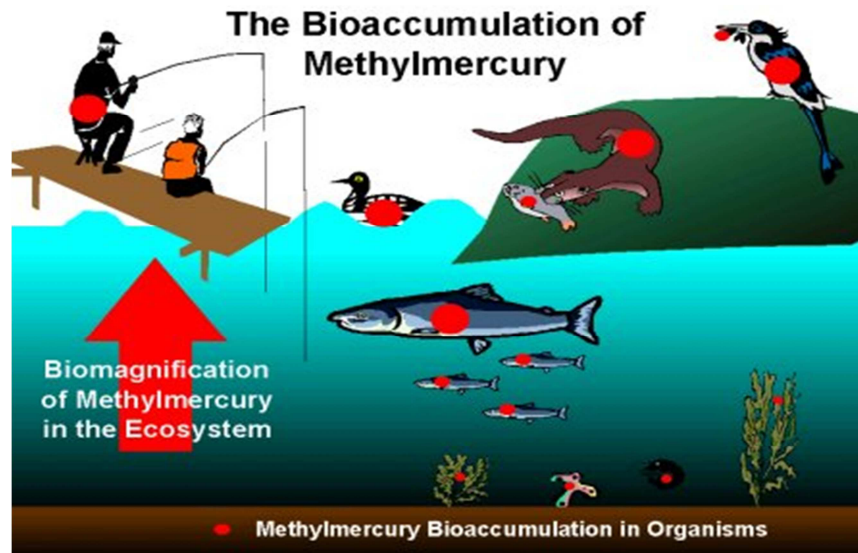
La phase atmosphérique de son cycle biogéochimique est très importante car le mercure se volatilise facilement à température ambiante et passe ainsi dans l'atmosphère sous forme de vapeur (Hg<sup>0</sup>). L'atmosphère devient alors le principal pourvoyeur en mercure de l'hydrosphère. Une fois dans l'eau, le mercure peut alors prendre part à des cycles biogéochimiques et se transformer en forme hautement toxique par méthylation (Figure 4.5). En effet, certaines bactéries sédimentaires anaérobies transforment le mercure inorganique en méthylmercure (CH<sub>3</sub>Hg<sup>+</sup>) et ultérieurement en diméthylmercure ((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>Hg) via la réaction suivante :



**Figure 4.5** : Cycle biogéochimique du mercure dans l'hydrosphère (Selin et al., 2009).

Ces composés méthylés prennent une place particulièrement importante dans les études écotoxicologiques à cause de leur capacité de bioaccumulation (facteur de 10<sup>3</sup> à 10<sup>9</sup>) dans les organismes supérieurs de la chaîne trophique par rapport au milieu ambiant, mais aussi à cause de leur toxicité sur l'ensemble des écosystèmes aquatiques.

En effet, le méthylmercure est la forme chimique du mercure la plus toxique. Ce composé possède la capacité de s'accumuler dans les tissus des organismes vivants et de se concentrer le long des différents maillons de la chaîne alimentaire (Figure 4.6). Les concentrations en méthylmercure sont les plus importantes chez les espèces de plus grande taille et les prédateurs, dont se nourrissent l'homme et d'autres animaux. La consommation de poissons est la principale source d'exposition au mercure dans les populations humaines.



**Figure 4.6 :** Bioaccumulation du méthylmercure le long de la chaîne trophique

On constate chez les organismes aquatiques que des effets toxiques peuvent apparaître à des concentrations de 0,03 à 0,1 µg/l d'eau avec la perturbation de la production primaire et l'inhibition de la fécondité et de la ponte.

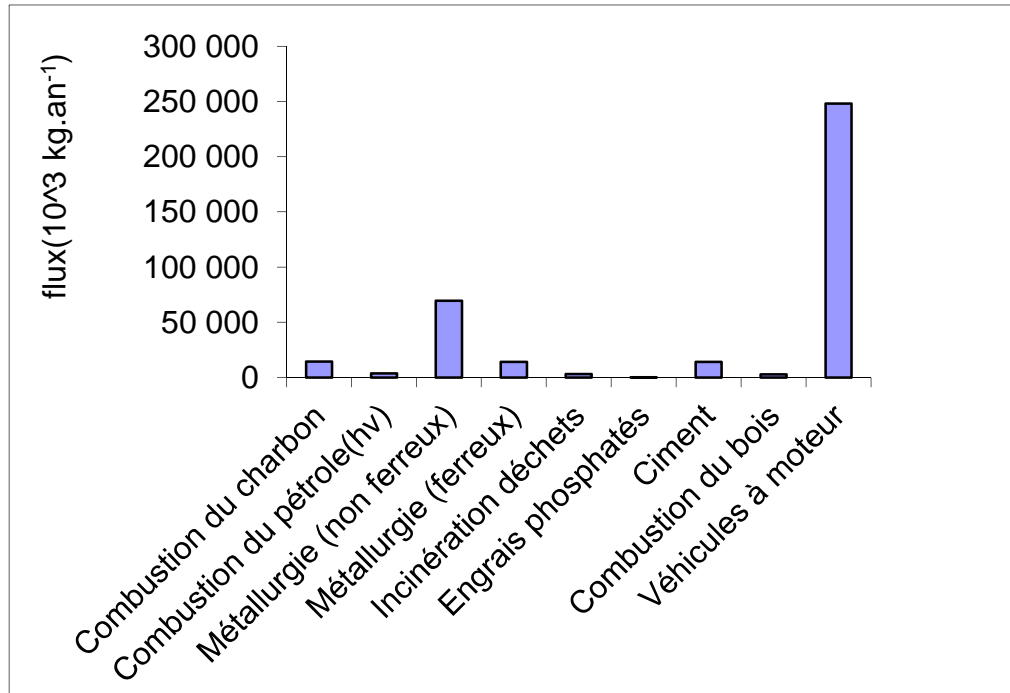
Chez l'être humain, les effets toxiques du méthylmercure se manifestent par des lésions du système nerveux central. Une exposition plus longue entraîne une infirmité motrice et des perturbations de la vision, débilité et retard mental. Des signes neurologiques d'intoxication apparaissent avec des concentrations de 200 à 400 µg/l de méthylmercure dans le sang.

L'intoxication des populations humaines par le mercure est devenue tristement célèbre suite au drame de Minamata en 1956 au Japon, qui provoqua la mort de plus de 1400 personnes et en intoxiqua des milliers d'autres. Cet accident résulte de la contamination des poissons dont se nourrissaient les habitants de la baie de Minamata suite au rejet en mer de chlorures de méthylmercure par une usine de fabrication d'acétaldéhyde.

### 4.2.2.1. Pollution par le plomb

Le plomb (Pb) se trouve naturellement sous forme de galène (PbS). Ces gisements sont exploités essentiellement dans les industries de produits semi-finis (alliages, accumulateurs, batteries) et l'usage des dérivés alkylés de plomb comme antidétonant dans les essences automobiles (Figure 4.7). Cette dernière source est fort heureusement en voie de diminution en raison de l'introduction des essences sans plomb depuis le milieu des années 1980s.





**Figure 4.7 :** Sources d'émissions de plomb dans l'environnement par secteurs d'activité (Pacyna et Nriagu, 1988).

Ces produits se retrouvent par la suite dans le milieu marin. Dans l'eau de mer, les formes chimiques dominantes sont les espèces inorganiques dissoutes ( $PbCO_3$ ,  $PbCl_2$ ). La bioconcentration du plomb inorganique dans la matrice biologique peut être supérieure d'un facteur de  $10^2$  à  $10^5$  par rapport à l'eau de mer.

D'un point de vue toxicologique, on estime que la production primaire est fortement affectée à partir d'un seuil de 500ng/l.

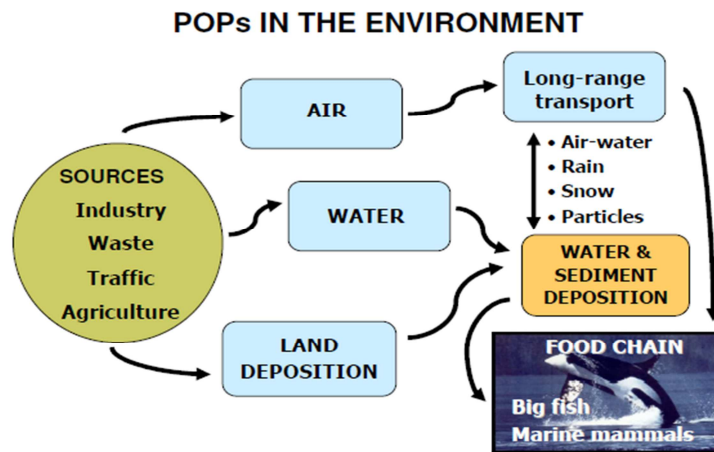
Lors de l'absorption d'aliments contenant de fortes proportions de plomb, une intoxication appelée Saturnisme peut avoir lieu. Les symptômes de l'intoxication aiguë débutent par des nausées, des vomissements et des douleurs gastriques. Les manifestations cliniques de l'intoxication chronique sont l'anémie, fatigue, malaises intestinaux, constipation ou diarrhée avec des nausées. Les enfants sont particulièrement exposés à l'empoisonnement, même à des concentrations minimales. Le plomb peut alors retarder le développement moteur, altérer la mémoire et provoquer des problèmes d'audition et des troubles de l'équilibre. Chez les adultes, il peut provoquer une augmentation de la pression artérielle.

D'autres métaux peuvent aussi avoir des effets néfastes sur l'environnement, les écosystèmes aquatiques ainsi que sur la santé humaine. On peut citer parmi eux le Cadmium, le Chrome, le Vanadium, l'Arsenic, l'Etain, le Cuivre et l'Aluminium, le cobalt...etc.



### 4.2.3. La pollution des eaux par les polluants organiques persistants (POPs)

Les Polluants organiques persistants (POPs) font partie de la grande famille des micropolluants, polluant présents en petites quantités dans l'environnement, de l'ordre du nanogramme par litre ( $\text{ng.l}^{-1}$ ). Ils sont dits "persistants" parce que les POPs se dégradent difficilement et perdurent dans l'environnement pendant de nombreuses années. Ils peuvent alors contaminer tous les compartiments de l'environnement : l'eau, l'air, le sol et les sédiments, mais s'accumulent aussi dans tous les maillons de la chaîne alimentaire. Ils peuvent également être déplacés d'un milieu à l'autre (Figure 4.8).



**Figure 4.8 :** Cycle des POPs dans l'environnement

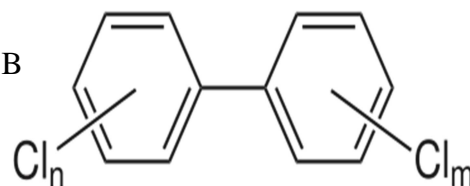
Les POPs regroupent plusieurs types de composés contenant un ou plusieurs atomes de carbone. Ce groupe peut être scindé en deux grandes familles : les pesticides et les autres micropolluants organiques, qui comprennent notamment :

- Les polychlorobiphényles (PCB)
- Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)
- Les contaminants émergents (médicaments, produits de soins corporels, lessives...etc).

#### 4.2.3.1. Les polychlorobiphényles (PCB)

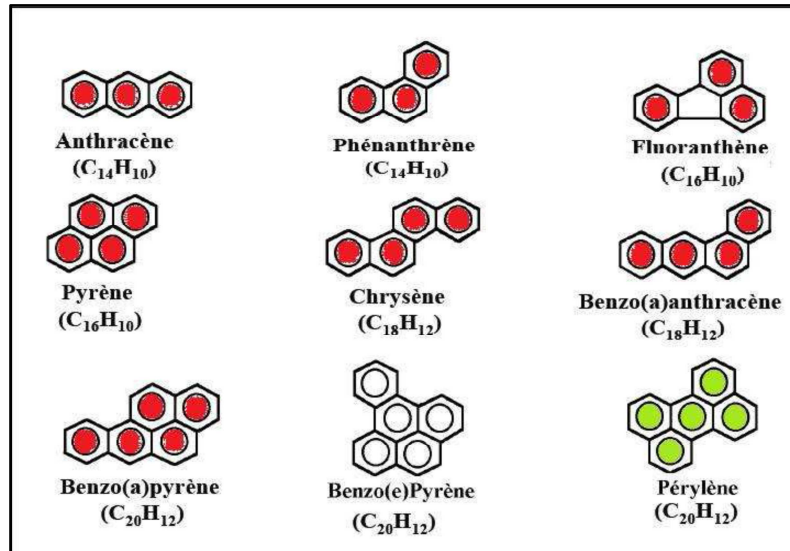
Les PCB forment une famille de 209 composés organochlorés de synthèse (Figure 4.9). Ces molécules de synthèse possèdent des propriétés particulières (stabilité thermique, résistance à l'oxydation...) qui font qu'elles ont été largement utilisées comme isolants dans les condensateurs et transformateurs électriques, comme additifs dans les peintures et les plastiques). Ils sont produits depuis les années 1920s, mais il a fallu attendre l'année 1977 pour qu'ils soient prohibés aux USA et la plupart des pays de l'OCDE. La France a quant à elle, attendu 1992 pour procéder à leur interdiction.

**Figure 4.9 :** Structure chimique des PCB



#### 4.2.3.2. Les Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) constituent une classe diversifiée de composés organiques. Ils sont formés par la fusion de 2 à 7 cycles benzéniques (figure 4.10) ; le plus simple des HAP est le naphthalène (2cycles) tandis que le plus complexe est le coronène (7cycles).



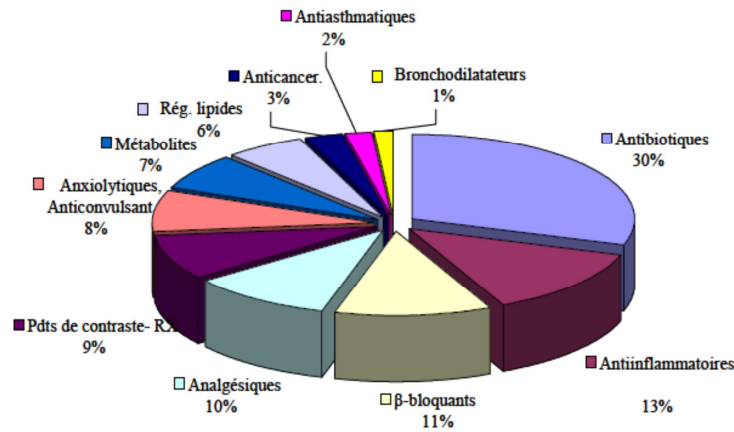
**Figure 4.10** : Structure chimique de quelques HAP

Les HAP se forment essentiellement lorsque la combustion des matières organiques est incomplète (source pyrolytique), mais sont également présents dans les carburants bruts (source pétrogénique). Ils constituent l'une des familles de contaminants organiques les plus répandues dans l'environnement. En raison de leurs propriétés cancérigènes et mutagènes sur les êtres vivants, les HAP ont fait l'objet d'investigations dans plusieurs compartiments environnementaux incluant l'air, l'eau, le sol et les sédiments.

#### 4.2.3.3. Les produits pharmaceutiques

Dans les sciences environnementales, les résidus pharmaceutiques font partie de la catégorie des micropolluants organiques dits « émergents ». Ces derniers désignent un ensemble de substances dont la présence, l'étude et la surveillance dans l'environnement sont relativement récentes. Cette catégorie de micropolluants regroupe entre autres les produits de soins personnels (champoings, dentifrices, parfums, déodorants, crèmes solaires), les retardateurs de flammes, le coprostanol, la caféine...etc.

La présence de produits pharmaceutiques dans l'environnement a été mentionnée pour la première fois aux États-Unis où de l'acide clofibrique a été détecté dans les eaux usées traitées (Garrison et al., 1976). D'autres produits et résidus pharmaceutiques ont été ensuite détectés dans les eaux de surface en Grande-Bretagne en 1981 (Richardson et Bowron, 1985) et au Canada (Rogers et al., 1986). Depuis ces travaux pionniers, ces substances sont considérées comme des contaminants de l'environnement qui viennent s'ajouter aux contaminants dits classiques (PCB, Métaux lourds, pesticides, hydrocarbures). Les substances les plus retrouvées dans les milieux aqueux sont représentées dans la figure 4.11.

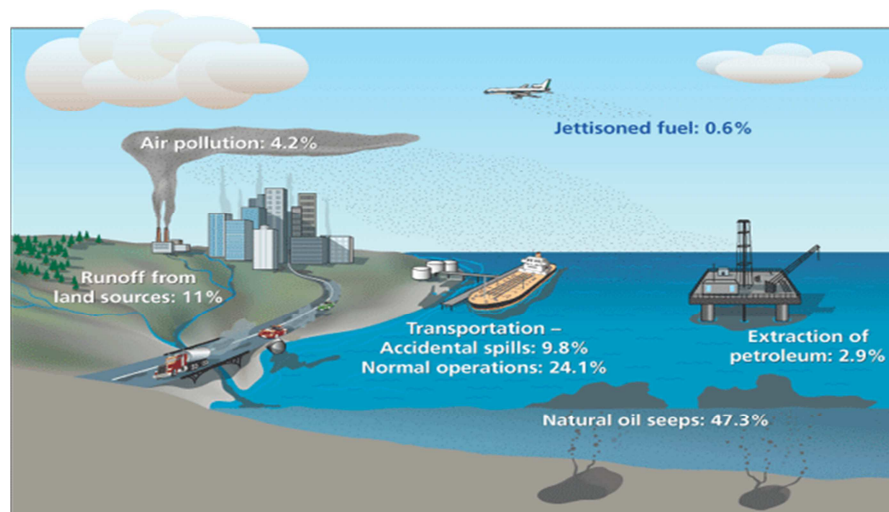


**Figure 4.11** : Les différentes classes pharmaceutiques retrouvées dans les milieux aqueux (Coetsier, 2009).

Les produits pharmaceutiques sont des substances biologiquement actives qui affectent les organismes vivants, même à des doses très faibles. Une fois émises dans l’environnement, ces substances pharmaceutiques peuvent avoir un impact négatif sur la faune et la flore et altérer la santé des écosystèmes en général et la santé humaine en particulier. En effet, le déclin de certaines populations de poissons dans les grands lacs américains a été associé à certaines hormones contraceptives présentes dans les milieux aquatiques par féminisation des mâles ou encore la disparition d’une espèce de vautour au Pakistan liée à l’absorption de Diclofénac présent dans les carcasses de leurs proies.

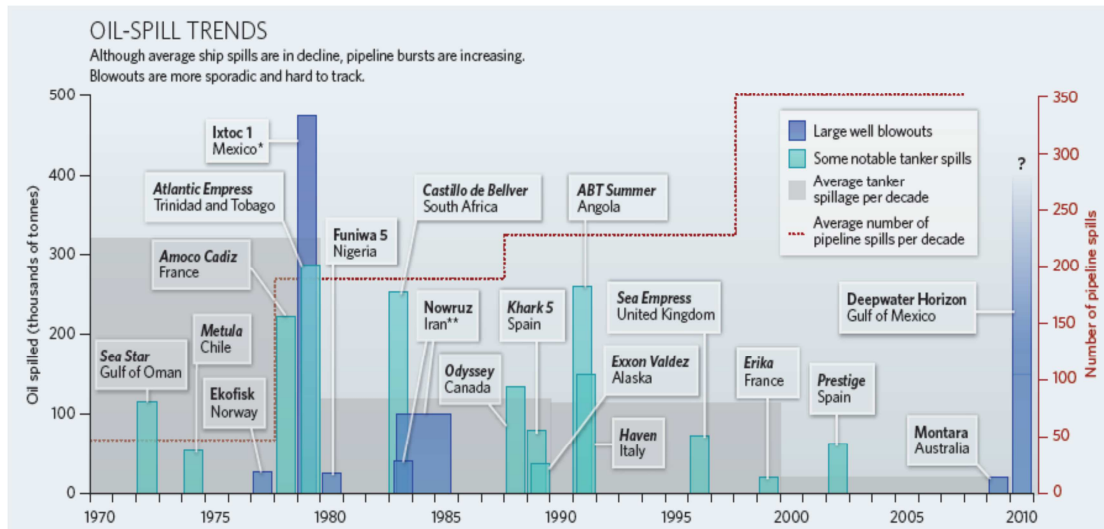
#### 4.2.4. Pollution des eaux par les hydrocarbures

Les mers et les océans sont soumis à une forte contamination par les hydrocarbures avec des quantités pouvant aller jusqu’à  $8,3 \cdot 10^6$  tonnes introduites dans les océans annuellement (NRC, 2003). Les sources de cette contamination sont multiples : suintement naturels, activités liées aux transports (déversements volontaires ou accidentels), l’exploitation offshore, apports côtiers par les industries portuaires, apports continentaux drainés par les rivières et les fleuves ainsi que les apports atmosphériques (Figure 4.12)



**Figure 4.12** : Sources des hydrocarbures dans les océans

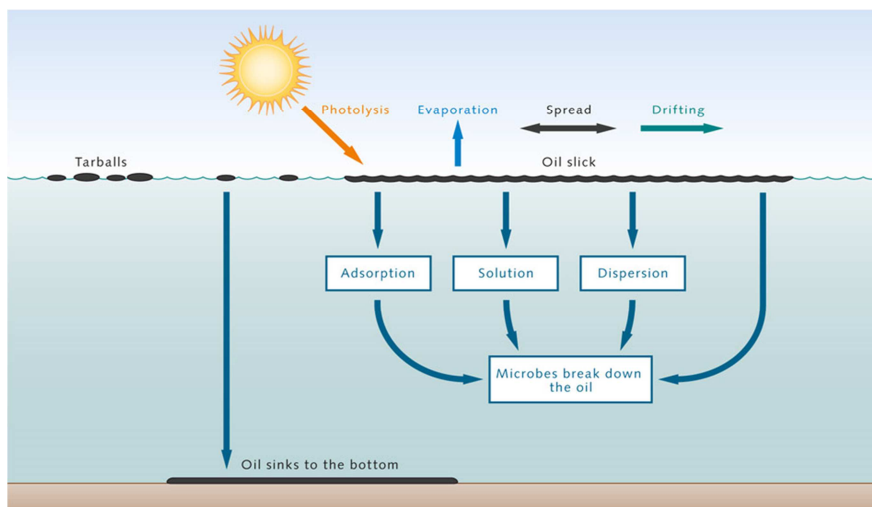
Parmi toutes ces sources énumérées ci-dessus, les accidents au niveau des plates-formes offshore ou encore ceux liés aux tankers ont causé à plusieurs reprises d'importants déversements de pétrole brut dans l'océan, induisant ainsi des catastrophes écologiques « marées noires » (oil spills en anglais) (Figure 4.13).



**Figure 4.13** : Nombre, causes et importance des marées noires enregistrées durant la période 1970-2010 (Jernolov, 2010).

#### 4.2.4.1. Devenir du pétrole déversé en mer

Le pétrole déversé en mer subit diverses transformations sous l'action de facteurs physiques et chimiques (Figure 4.14). Après son déversement, le pétrole subit l'évaporation de ses fractions volatiles, tandis que la partie qui s'étale sur la surface de la mer va subir une photo-oxydation et une autre partie sera transportée vers les continents par les embruns marins. Les fractions restantes vont quant à elles subir l'action des facteurs biogéochimiques. En effet, de nombreuses bactéries aérobies vont s'attaquer au pétrole pour le décomposer en fractions de plus faible poids moléculaire.



**Figure 4.14** : Devenir du pétrole brut déversé en mer

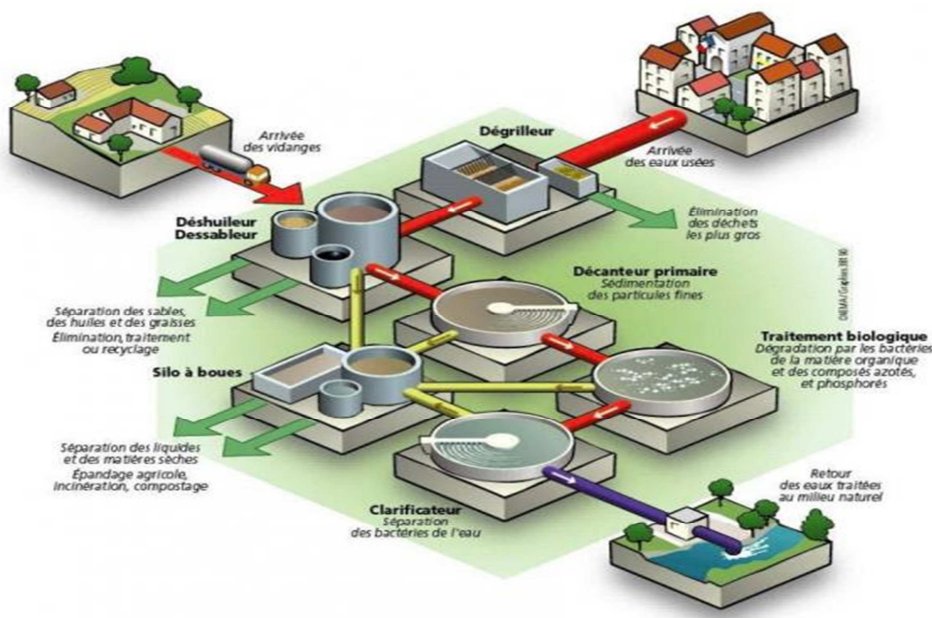
Le comportement des hydrocarbures à la surface des océans dépend de la quantité déversée, de la nature physico-chimique de l'hydrocarbure, les conditions climatiques qui prévalent et enfin l'état de la mer. L'évolution primaire d'une nappe de pétrole, qui correspond à la première semaine après le déversement est une période critique pour les écosystèmes littoraux. Elle conduit généralement à la pollution des rivages causant au passage de graves impacts sur la faune et la flore marine. Agir pendant cette semaine est fondamental dans la lutte anti-pollution par les hydrocarbures. Pour ce faire, un large éventail de choix opérationnels s'offre au coordinateur de la lutte anti-pollution.

- Actions à la source
  - Stopper ou réduire le déversement.
  - Confiner et récupérer ou disperser le polluant.
  - Alléger le navire en transférant le contenu vers un autre navire.
  - Intervention sur les nappes au large en les confinant par des barrages et récupérer à l'aide de pompes.
  - Disperser par un produit dispersant pour rendre le pétrole moins visqueux et faciliter sa fragmentation.
  
- Actions près du littoral
  - Protéger les zones sensibles du littoral par des barrages flottants
  - Confiner les nappes dans des barrages comme au large pour faciliter leur pompage.
  - Accélérer la dégradation en épandant des souches bactériennes sur les produits pétroliers
  
- Lutte sur le littoral
  - Retenir les nappes sur les sites touchés pour éviter qu'elles ne contaminent les autres sites.
  - Mettre en place des chantiers de récupération et de nettoyage, avec une bonne chaîne de traitement des déchets.

### 4.3. Traitement des eaux usées

Les **eaux usées** sont des eaux souillées par les activités humaines et rejetées après leur usage domestique ou industriel. Après son usage, cette eau contient alors plusieurs polluants chimiques et biologiques vus précédemment.

Afin de limiter les risques de contamination et de perturbation des écosystèmes naturels, les eaux usées doivent être traitées afin de les rendre propres avant de les rejeter dans l'environnement. Le traitement des eaux usées s'effectue dans des stations d'épuration ou « STEP ». Cependant, ces stations d'épuration ne peuvent correctement fonctionner que si un réseau d'assainissement performant est installé en amont. Ce réseau d'égouts collecte les eaux usées à la sortie des habitations et les achemine vers la station d'épuration. Une fois dans une STEP, les eaux usées subissent une série d'opérations impliquant à la fois des procédés physiques, chimiques et biologiques (Figure 4.15).



**Figure 4.15** : Schéma d'une station d'épuration des eaux usées

Dans les STEPs les plus performantes, la purification des eaux comporte quatre phases principales :

- **Le Prétraitement et le traitement primaire :**

**Le prétraitement** permet d'éliminer les déchets grossiers solides et les matières insolubles. Il comprend :

- **Le dégrillage** : Les eaux usées passent à travers une grille qui retient les gros déchets flottants (bois, plastiques, papiers..etc).
- **Le dessablage** : Cette étape permet de retirer le sable et le gravier de l'eau par sédimentation dans un bassin.
- **Le déshuilage** : En injectant des bulles d'air dans l'eau, les huiles et les graisses produisent une mousse en surface de l'eau qui sera enlevée à l'aide d'un racloir.



**Le traitement primaire** permet aux matières en suspension de se déposer par simple gravité sous forme de boues dans un décanteur primaire. Il est possible aussi d'ajouter des produits chimiques coagulants et flocculants pour éliminer les matières colloïdales. Cette étape comprend :

- **La décantation** : Simple dépôts des particules par gravité.
- **La coagulation-floculation** : La coagulation est la déstabilisation de particules colloïdales par addition d'un réactif chimique appelé coagulant. La floculation est l'agglomération de particules en microflocs et ensuite en flocons plus volumineux que l'on appelle floccs.
- **La filtration** : La filtration a pour but la clarification d'une eau. On distingue trois types de filtration :
  - ❖ la filtration sur matériaux filtrants tel que le sable et l'antracite.
  - ❖ la filtration sur charbon actif en grain.
  - ❖ la filtration membranaire.

Le traitement primaire génère des boues qu'on appelle « boues primaires » qui sont ensuite recueillies par pompage de fond.

- **Le traitement secondaire** : L'eau issue du traitement primaire va ensuite subir un traitement secondaire qui vise à éliminer les matières en solution dans l'eau (matières organiques, substances minérales...).

Le traitement secondaire implique un traitement biologique des effluents afin de les débarrasser de leurs matières organiques.

- **Le traitement biologique** : Au cours de ce traitement, l'eau arrive dans un bassin où se développent des cultures de micro-organismes (bactéries aérobies) qui vont digérer la matière organique contenue dans l'eau. Dans le procédé de **lits bactériens**, l'eau usée passe à travers des lits aérés de roches poreuses contenant des micro-organismes qui décomposent la matière organique. Dans un autre procédé biologique, celui des **boues activées**, les eaux usées sont aérées par des turbines dans les bassins d'aération. Les bactéries seront alors constamment mêlées à l'eau ou supportées par des particules et décomposent les matières organiques. Au cours de ce procédé des boues secondaires sont aussi produites.

- **Le traitement tertiaire**

Dans la majorité des stations d'épuration, les eaux sont rejetées dans les milieux naturels après les traitements secondaires. Cependant, les eaux usées contiennent encore des polluants comme des minéraux dissous, de métaux lourds, des bactéries et des virus. On ajoute des traitements tertiaires aux traitements de base lorsque les eaux usées doivent être rejetées dans des écosystèmes fragiles (zones de baignade, de conchyliculture...). Ces traitements supplémentaires consistent en une **désinfection** qui permet d'éliminer les micro-organismes pathogènes par l'ajout de chlore ou d'ozone ou par l'action de rayons ultraviolets. La **déphosphatation**, quant à elle, permet d'éliminer les phosphates en excès dans l'eau en y ajoutant de la chaux ou du chlorure de fer. Finalement, une **filtration** sur sable et sur charbon actif permet d'éliminer divers contaminants chimiques.



### • Le traitement des boues résiduaires

L'élimination des boues primaires et secondaires qui sont recueillies lors du traitement des eaux est un problème majeur. Il existe plusieurs façons de traiter les boues en fonction de leur destination. L'objectif principal étant bien évidemment d'en réduire le volume pour limiter la quantité à stocker ou à épandre. Plusieurs destinations sont alors possibles pour les boues:

- **L'épandage agricole** qui représente une valorisation des boues comme fertilisant (elles contiennent de l'azote, du phosphore et de la matière organique).
- **L'élaboration de compost** par incorporation de paille ou de sciure ou de déchets verts. Le compost peut ensuite être utilisé pour l'épandage agricole.
- **L'incinération** comme c'est le cas pour les ordures ménagères.
- **L'immersion dans l'océan** : Pratique désormais interdite.

#### 4.4. Cadre réglementaire pour le contrôle de la pollution des eaux

De nombreux pays à travers le monde ont voté des lois visant à lutter contre la pollution de l'eau. On peut citer parmi elle : la loi sur la qualité de l'eau aux USA « le clean water act » en 1977, la loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA) en France ou encore la loi n° 05-12 du 4 août 2005 relative à l'eau en Algérie.

Ces différentes lois servent à préserver la qualité de l'eau dans les milieux naturels en sanctionnant les pollueurs par des amendes (comme c'est le cas aux états unis) ou en les taxant pour payer les coûts de la dépollution (principe du pollueur-payeur en France par exemple). Par ailleurs, ces lois définissent aussi les valeurs limite d'un polluant dans un compartiment aquatiques (norme de salubrité) ou des normes de rejet de polluants dans les milieux naturels. A titre d'exemple, les Tableaux 4.4 et 4.5 représentent les normes algériennes relatives aux rejets d'effluents industriels liquides, régies par le Décret exécutif n° 06-141 du 19 avril 2006, paru dans le Journal Officiel de la République Algérienne.

Cependant, bien que la plupart des pays aient légiféré sur la pollution des milieux aquatiques, le contrôle et la mise en application des lois sont difficiles même dans les pays développés. Ceci est dû au manque de ressources humaines et matérielles affectées pour veiller à ce que les lois soient exécutées ou encore au fort lobbying qu'exercent les grands groupes industriels sur les politiques.

**Tableau 4.4:** Les valeurs limites maximales des paramètres de rejet d'effluents industriels liquides dans un milieu récepteur (JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE, 2006).

PARAMETRES	UNITES	VALEURS LIMITES	TOLERANCES AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Températures	°C	30	30
pH	-	6,5 à 8,5	6,5 – 8,5
MES	mg/l	35	40
DBO5	mg/l	35	40
DCO	mg/l	120	130
Azote Kjeldahl	mg/l	30	40
Phosphates	mg/l	10	15
Cyanures	mg/l	0,1	0,15
Aluminium	mg/l	3	5
Cadmium	mg/l	0,2	0,25
Chrome total	mg/l	0,5	0,75
Fer	mg/l	3	5
Manganèse	mg/l	1	1,5
Mercure	mg/l	0,01	0,05
Nickel	mg/l	0,5	0,75
Plomb	mg/l	0,5	0,75
Cuivre	mg/l	0,5	1
Zinc	mg/l	3	5
Huiles et Graisses	mg/l	20	30
Hydrocarbures totaux	mg/l	10	15
Indice de Phénols	mg/l	0,3	0,5
Solvants organiques	mg/l	20	-
Chlore actif	mg/l	1,0	-
PCB	mg/l	0,001	-
Détergents	mg/l	2	-
Tensioactifs anioniques	mg/l	10	-

**Tableau 4.5:** Les valeurs limites maximales des paramètres de rejet d'effluents industriels dans un milieu récepteur par branches industrielles (JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE, 2006).

**I - INDUSTRIE AGRO-ALIMENTAIRE :**

**a - Abattoirs et transformation de la viande :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Volume /quantité	m3/t carcasse traitée	6	8
PH	-	5,5 - 8,5	6-9
DBO <sub>5</sub>	g/t	250	300
DCO	"	800	1 000
Matière décantable	"	200	250

**b - Sucrierie :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Température	°C	30	30
PH	-	6-9	6-9
DBO <sub>5</sub>	mg/l	200	400
DCO	"	200	250
MES	"	300	350
Huiles et graisses	"	5	10

**c - Levurerie :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Température	°C	30	35
PH	-	5,5 - 8,5	6,5 - 8,5
DBO <sub>5</sub>	mg/l	100	120
DCO	"	7 000	8 000
MES	"	30	50

**d - Brasserie :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Température	°C	30	30
PH	-	5,5 - 8,5	9 - 10,5
DBO <sub>5</sub>	g/t de malt produit	250	300
DCO	"	700	750
MES	"	250	300

**e - Corps Gras :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Température	°C	30	30
PH	-	5,5 - 8,5	6-9
DBO <sub>5</sub>	g/t	200	250
DCO	"	700	800
MES	"	150	200

**2 - Industrie de l'Energie :**

**a - Raffinage de pétrole :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Débit d'eau	m <sup>3</sup> /t	1	1,2
Température	°C	30	35
PH	-	5,5 - 8,5	5,5 - 8,5
DBO <sub>5</sub>	g/t	25	30
DCO	"	100	120
MES	"	25	30
Azote total	"	20	25
Huiles et graisses	mg/l	15	20
Phénol	g/t	0,25	0,5
Hydrocarbures	g/t	5	10
Plomb	mg/l	0,5	1
Chrome 3+	"	0,05	0,3
Chrome 6+	"	0,1	0,5

**b - Cokéfaction :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
DBO <sub>5</sub>	mg/l	30	40
DCO	"	120	200
Phosphores	"	2	2
Cyanures	"	0,1	0,1
Composés d'Azote	"	35	40
Indice Phénols	"	0,3	0,5
Benzène, Toluène, Xylène	"	0,08	0,1
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques	"	0,08	0,1
Sulfure	"	0,08	0,1
Substances filtrables	"	40	50

**3 - Industrie mécanique :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Température	°C	30	30
PH	-	5,5- 8,5	5,5- 8,5
DCO	mg/l	300	350
Cyanure	"	0,1	0,15
Cuivre	"	0,7	1
Nickel	"	0,7	1
Zinc	"	2,5	3
Plomb	"	0,7	1
Cadmium	"	0,5	1
Hydrocarbures	"	15	20
Phénol	"	0,5	1
Métaux totaux	"	20	25

**4 - Industrie de transformation des métaux :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Cuivre	mg/l	1.5	2
Nickel	"	2	2,5
Chrome	"	1,5	2
Fer	"	5	7,5
Aluminium	"	5	7,5

**5 - Industrie de minerais non métallique :**

**a - Céramique :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Température	°C	30	30
PH	-	5,5 - 8,5	5,5 - 8,5
DCO	mg/l	80	120
Matière décantable	"	0,5	1
Plomb	"	0,5	1
Cadmium	"	0,07	0,2

**b - Verre :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES INDUSTRIES ANCIENNES
Température	°C	30	30
PH	-	5,5 - 8,5	5,5 - 8,5
DCO	mg/l	80	120
MES	"	0,3	0,5
Plomb	"	0,5	1
Cadmium	"	0,07	0,2
Chrome	"	0,1	0,1
Cobalt	"	0,1	0,1
Cuivre	"	0,1	0,3
Nickel	"	0,1	0,5
Zinc	"	2	5

c - Ciment, plâtre et chaux :

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Température	°C	30	30
PH	-	5,5 - 8,5	5,5 - 8,5
DCO	mg/l	80	120
Matière décantable	"	0,5	1
Plomb	"	0,5	1
Cadmium	"	0,07	0,2
Chrome	"	0,1	0,1
Cobalt	"	0,1	0,1
Cuivre	"	0,1	0,3
Nickel	"	0,1	0,5
Zinc	"	2	5

6 - Industrie de textile :

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Température	°C	30	35
PH	-	6,5-8,5	6-9
DBO <sub>5</sub>	mg/l	150	200
DCO	"	250	300
Matière décantable	"	0,4	0,5
Matière non dissoute	"	30	40
Oxydabilité	"	100	120
Permanganate	"	20	25

7 - Industrie de tannerie et mégisserie :

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES INDUSTRIES ANCIENNES
DBO <sub>5</sub>	mg/l	350	400
DCO	"	850	1000
MES	"	400	500
Chrome total	"	3	4

## Références bibliographiques et conseils de lecture pour ce chapitre

- **Aga, Diana., 2008.** Fate of Pharmaceuticals in the Environment and in Water Treatment Systems. Taylor&Francis, 408p.
- **AMAP Assessment 2002:** Heavy Metals in the Arctic.
- **AMAP Assessment 2011:** Mercury in the Arctic.
- **AMAP Assessment 2013 :** Technical background report on the global mercury Assessment.
- **Boeglin, J.C., Roubaty, J.L., 2007.** Pollution industrielle de l'eau - Caractérisation, classification, mesure. Techniques de l'ingénieur.
- **Bond, R., Straub, C.P., 1974.** Wastewater, treatment and disposal. CRC Press, 905p.
- **Coetsier, C 2009.** Approche intégrée de la gestion environnementale des produits pharmaceutiques dans des rejets de stations d'épuration urbaines et leur milieu récepteur : occurrence impact et traitement tertiaires d'élimination, Thèse de Doctorat de l'université Montpellier 2.
- **De Jong, Folkert., 2006.** Marine eutrophication in perspective. Springer-Verlag, 344p.
- **Gaujous, Didier., 1995.** La pollution des milieux aquatiques. Aide-mémoire. Broché, 220p.
- **Jernolov, A., 2010.** How to defend against future oil spills. Nature 466:182–183.
- **Kümmerer, Klaus., 2008.** Pharmaceuticals in the environment. Springer-Verlag, 531p.
- **Leacock, Elspeth, 2005.** The Exxon Vadez oil spill. Facts on file, INC, 112p.
- **Miller, J.T., Spoolman, S.E., 2015.,** Environmental science. Cengage Learning, 596p.
- **Musy, A., Higy, C. Reynard, E., 2014.** Hydrologie : Tome 1, Une science de la nature, une gestion sociétale. PPUR Presses Polytechniques. 500p.
- **National Research Council (NRC), 2003.** Oil in the sea.
- **Nriagu, O.J., Pacyna, J.M., 1988.** Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. Nature 333, 134-139.
- **Ramade, François., 2012.** Eléments d'écologie appliquée. Actions de l'homme sur la biosphère. Edition Dunod. 824p.
- **Selin, N.E., 2009.** Global biogeochemical mercury cycling : A review. The Annual Review of Environment and Resources 34 :43-63.
- **Spellman, Frank., 2003.** Handbook of water and wastewater treatment plant operations. CRC Press, 669p.
- **<http://www.usgs.gov/>**



