

Chapitre 2 :

Pollution atmosphérique

Plan du Chapitre

- 2. Atmosphère et pollution atmosphérique
 - 2.1. Composition gazeuse de l'atmosphère
 - 2.2. Structure verticale de l'atmosphère
 - 2.3. Circulation atmosphérique
 - 2.4. Pollution atmosphérique
 - 2.4.1. Principaux polluants atmosphériques
 - 2.4.1.1. Polluants gazeux
 - 2.4.1.2. Les polluants particuliers
 - 2.5. Quelques manifestations de la pollution atmosphérique
 - 2.5.1. Les smogs
 - 2.5.2. Les dépôts acides
 - 2.5.3. Réduction de la couche d'ozone « trou dans la couche d'ozone »
 - 2.5.4. Réchauffement et changement climatiques globaux
 - 2.5.4. Législations sur la qualité de l'air

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 (N₂, 78% en volume) et de l'oxygène (O₂, 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%).

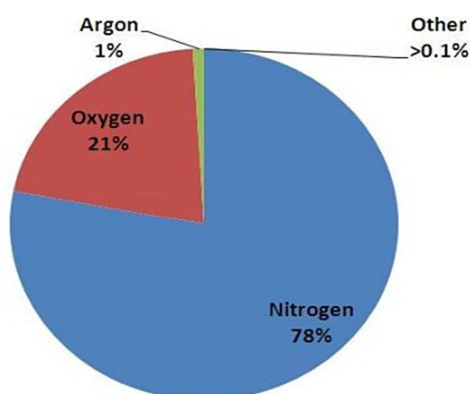


Figure 2.1 : Composition de l'air en volume

Pour le reste, soit 1 %, on y trouve de l'argon (Ar, presque 1 %), du dioxyde de carbone (CO₂, 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 ₂)	78,09
Oxygène (O ₂)	20,95
Argon (Ar)	0,94
Dioxyde de carbone (CO ₂)	0,03
Néon (Ne)	1,8 10 ⁻³
Krypton (Kr)	1,0 10 ⁻⁴
Méthane (CH ₄)	1,5 10 ⁻⁶
Hélium (He)	5,24 10 ⁻⁴
Ozone (O ₃)	0,04 10 ⁻⁶
Xénon (Xe)	8,0 10 ⁻⁶
Hydrogène (H ₂)	5,0 10 ⁻⁵

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).

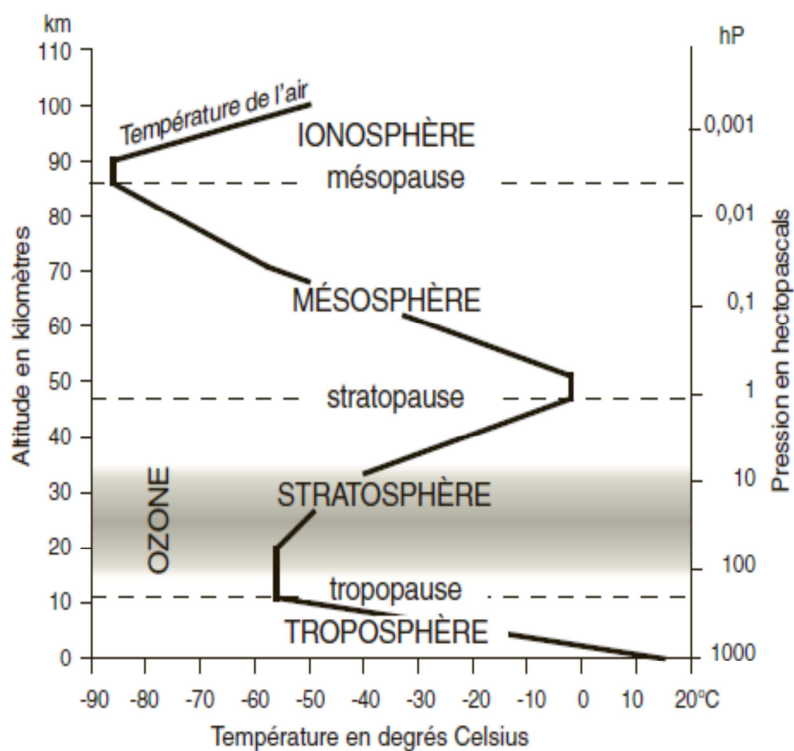


Figure 2.2 : Structure verticale de l'atmosphère

- **La troposphère.** C'est la couche qui s'étale entre le sol et sa limite supérieure, appelée **tropopause**, qui se situe vers 9 km au-dessus de pôles et vers 15 km au-dessus de l'équateur. Dans cette couche, la température y décroît lentement avec l'altitude (6°C par kilomètre) pour atteindre -50 à -60 °C à son sommet. C'est la couche qui contient 80 % de la masse totale de l'air atmosphérique, dont la pression diminue avec l'altitude (**Fig. 5**), 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'élèver 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 1N/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.

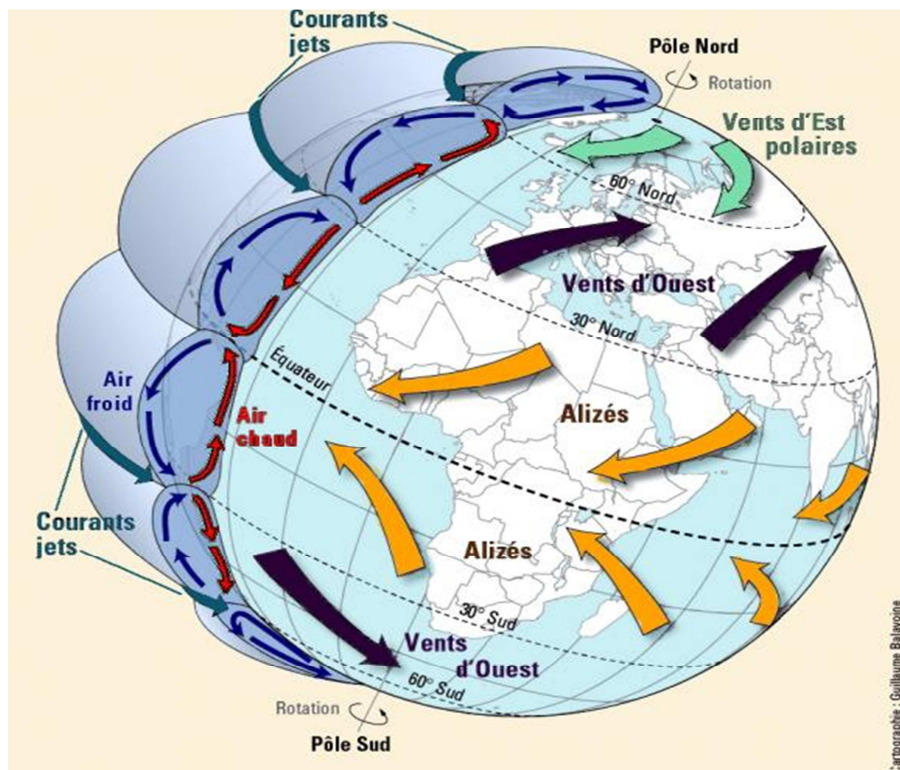


Figure 2.3 : La circulation atmosphérique

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 (CO_2 , NO_2 , ozone...etc), soit d'une modification qualitative due à l'introduction de substances étrangères à ce milieu (radioéléments, substances organiques de synthèse...etc). La pollution atmosphérique constitue sans aucun doute la plus évidente des dégradations de l'environnement par l'homme.

Les polluants atmosphériques sont souvent divisés en deux catégories, primaires et secondaires (figure 2.4). Les **polluants atmosphériques primaires** sont émis directement dans l'atmosphère, issus des sources de pollution (trafic routier, industries, chauffage, agriculture...). En revanche, **les polluants secondaires** ne sont pas directement rejetés dans l'atmosphère mais se forment à partir de réactions chimiques entre les différentes substances rejetées dans l'atmosphère.

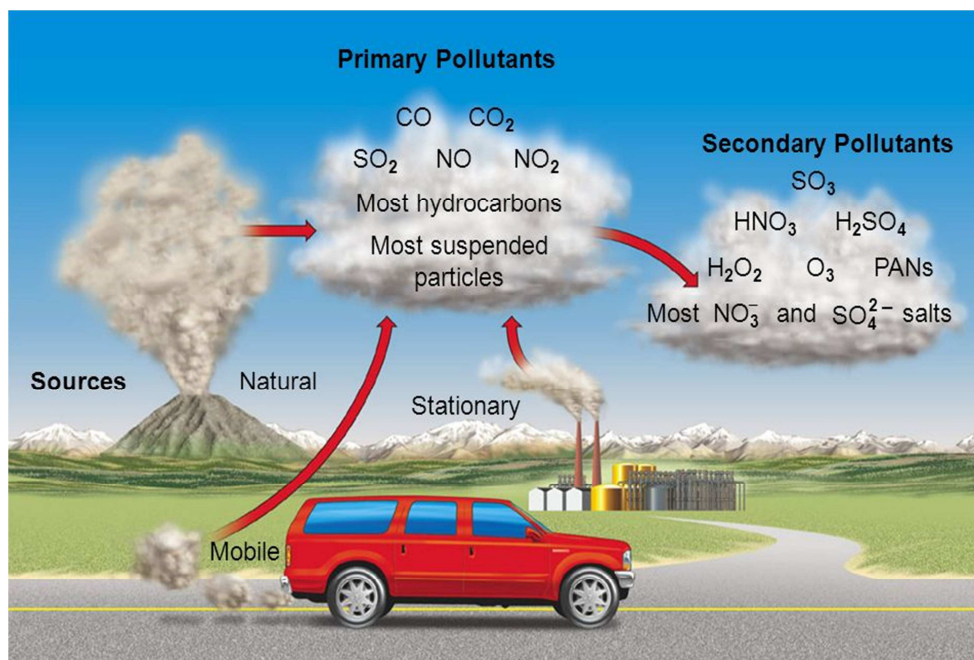


Figure 2.4 : Polluants atmosphériques primaires et secondaires

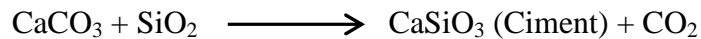
2.4.1. Principaux polluants atmosphériques

2.4.1.1. Polluants gazeux

A) Dérivés du carbone

- **Le dioxyde de carbone (CO₂)**

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^e 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 CO₂. 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 la production de ciment. Le ciment est un silicate anhydre de calcium qui est fabriqué à partir de cette 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 CO₂ 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.

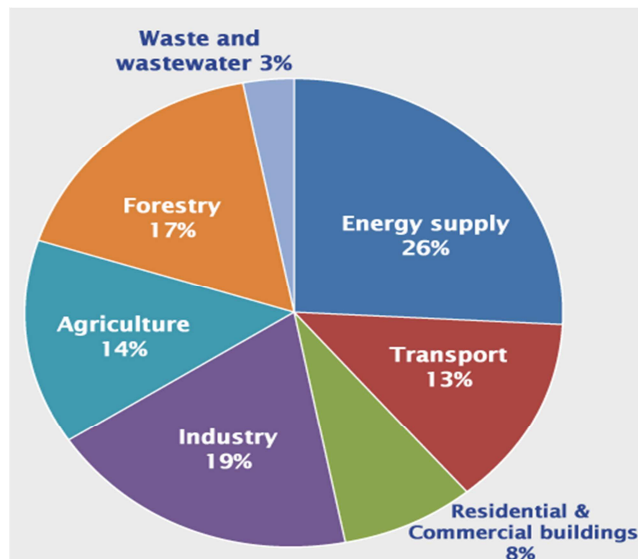


Figure 2.5 : Emission globale de CO₂ par secteur d'activité (GIEC, 2007)

- **Les hydrocarbures**
 - **Le méthane (CH₄)**

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 CO₂ 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 7cycles). Le plus simple d'entre eux est le naphthalène (2cycles, C₁₀H₈) tandis que le plus complexe est le coronène (7cycles, C₂₄H₁₂). Ils peuvent provenir à la fois de sources naturelles (feux de forêts, dégradation de la matière organique par les bactéries) que 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 (SO₂)**

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 SO₂ par les activités humaines dans le milieu urbain dépassent de loin les sources naturelles (tableau 2.2). La principale source du SO₂ 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_xS_y 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 :

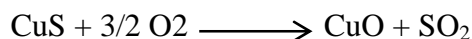


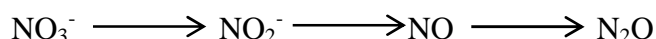
Tableau 2.2 : Emission et concentrations du dioxyde de soufre produit chaque année dans la biosphère (Ramade, 2012).

Composé	Source	Emission moyenne et 10 ⁶ t/an d'équivalent soufre	Concentration normale dans l'air pur (ppb)
SO ₂	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	

C) les dérivés de l'azote

- **Le protoxyde d'azote (N₂O)**

C'est le gaz le plus abondant des oxydes d'azote dans une atmosphère non polluée avec une concentration 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 (NO₂)**

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 peroxyacélnitrates (PAN)**

Ces substances 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 cette formule chimique : R-COO₂NO₂. 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. Cette grande famille de polluants organohalogénés résulte de l'usage à vaste échelle de solvants chlorés (dichlorométhane, chlorure d'éthylène ...etc). Ils sont considérés comme de très dangereux polluants atmosphériques.

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).

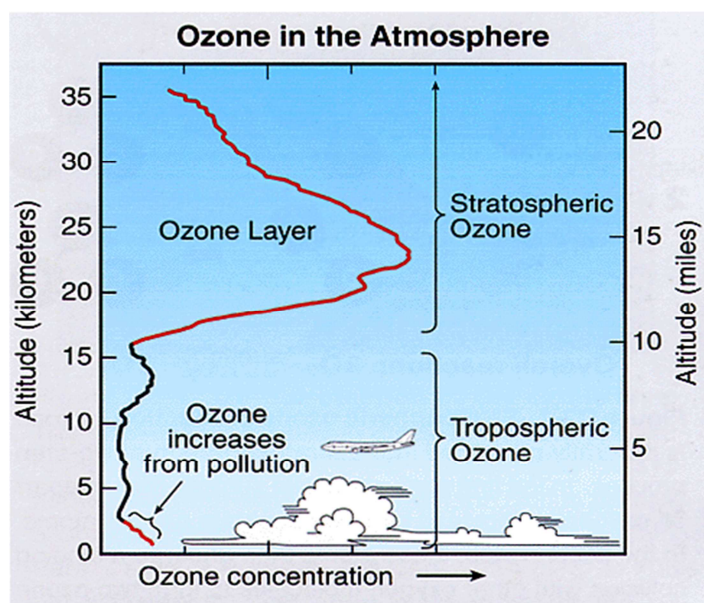
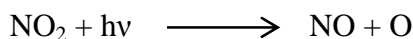
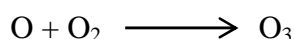


Figure 2.6 : Profil vertical des concentrations en ozone atmosphérique en fonction de l'altitude.

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_x) et les composés organiques volatils (COV) 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 (O₃) :



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}e 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.

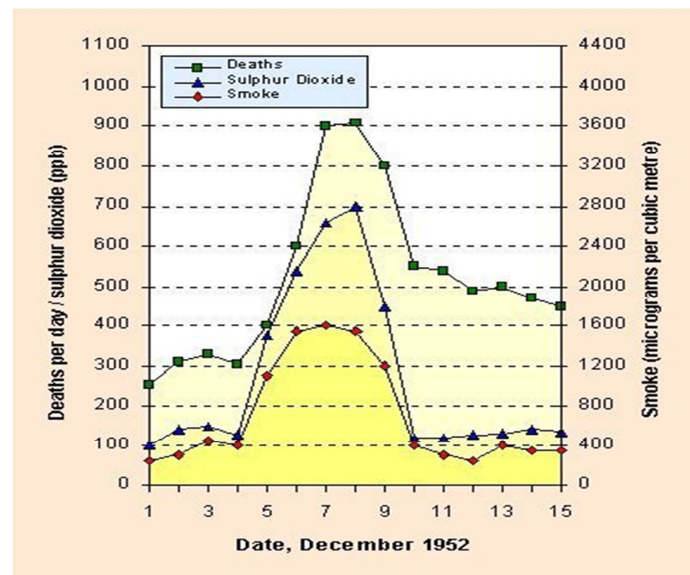
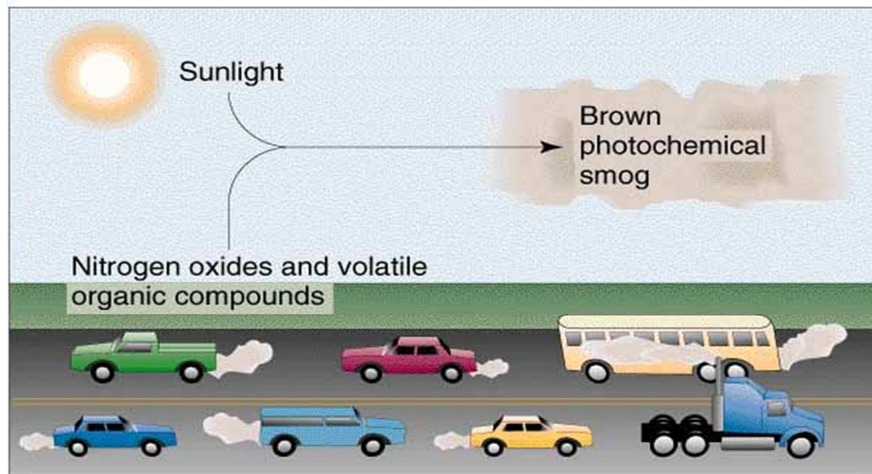


Figure 2.7 : Grand smog (Londres, 1952). Evolution de la mortalité, de la concentration de dioxyde de soufre (SO₂) et des fumées (particules).

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_x) et les COV sont impliqués dans sa formation (figure 2.8). De l'ozone se forme au niveau du sol en

présence de NO_x (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.



(b) Photochemical smog

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).

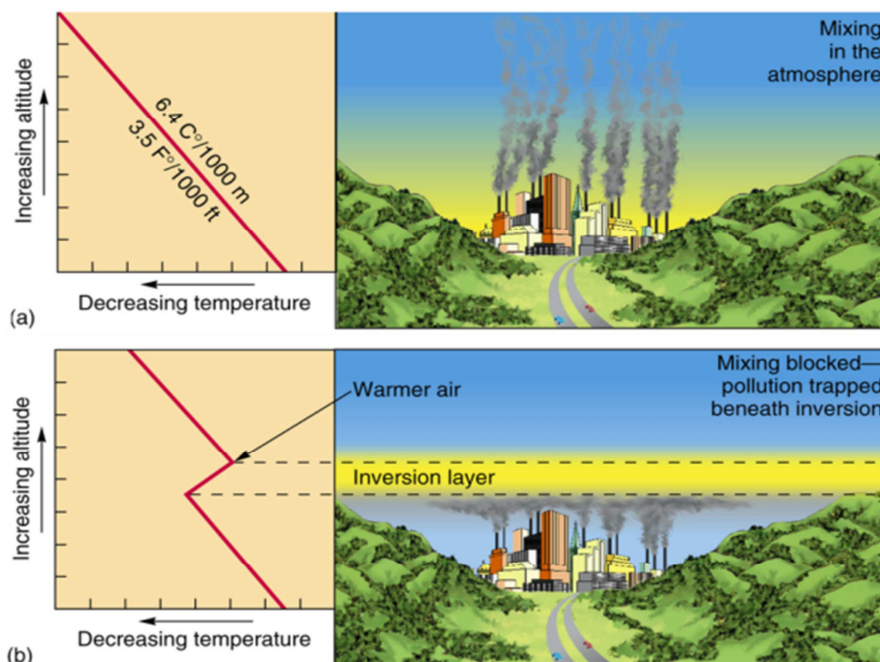
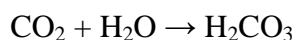


Figure 2.9 : Schéma du mécanisme de l'inversion de température et son rôle dans la formation du smog.

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).

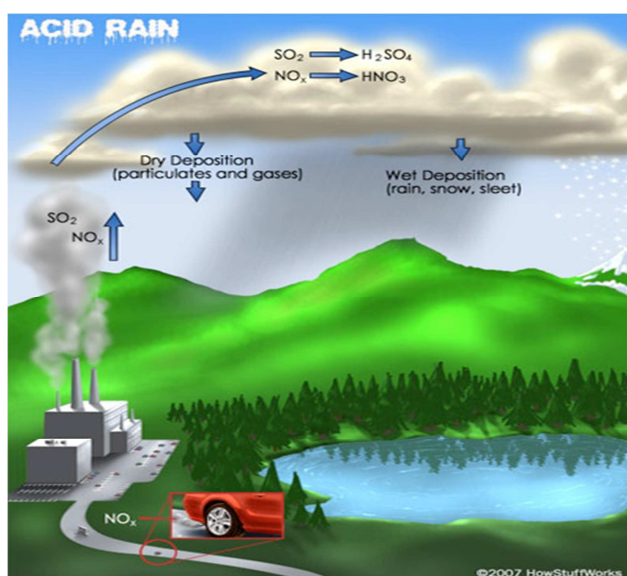
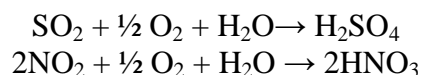


Figure 2.10 : Mécanismes de formation des dépôts acides

Les principales réactions qui conduisent à la formation des d'acidité fortes 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).

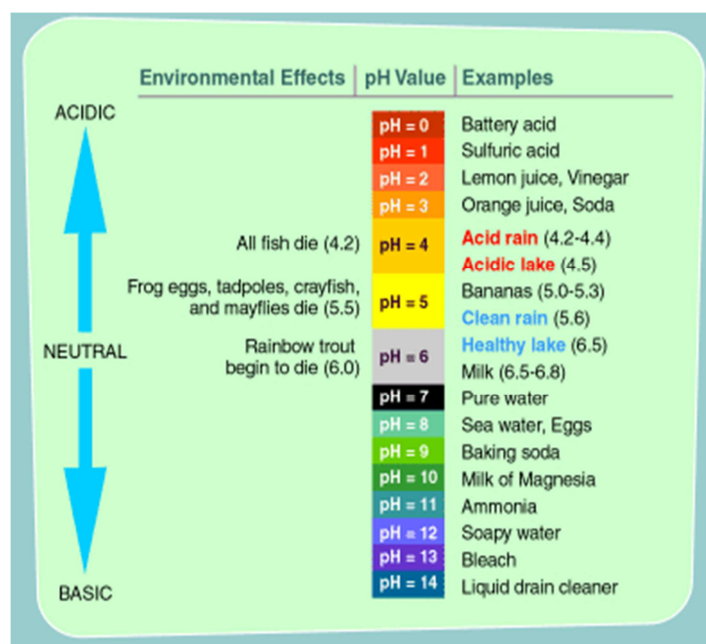


Figure 2.11 : Echelle de pH et quelques effets éco-toxicologiques des pluies acides

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.

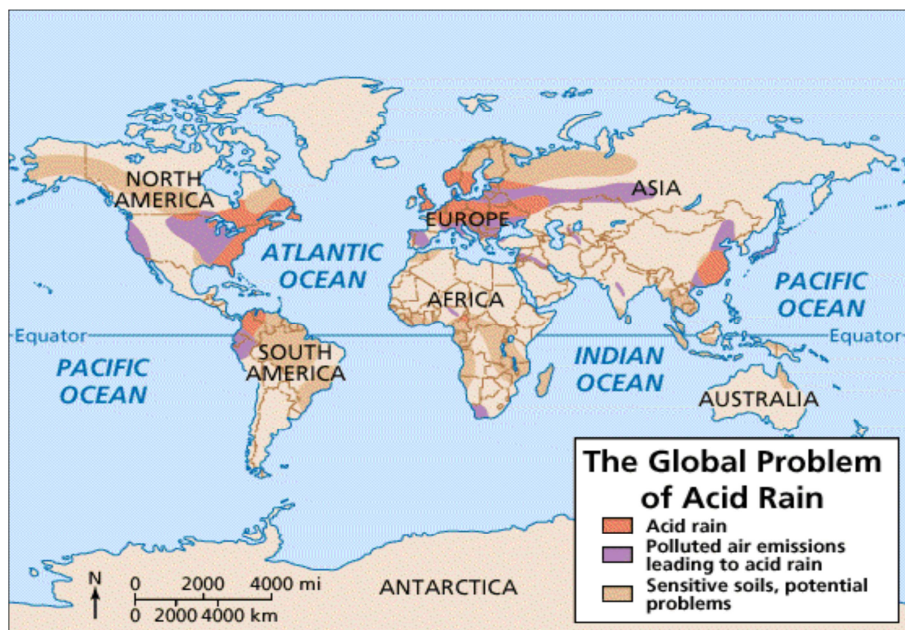


Figure 2.11 : Distribution globale des précipitations acides.

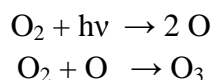
Les pluies acides ont un effet sur les matériaux vivants et non vivants. Elles attaquent les métaux et les matériaux des bâtiments, endommagent les sites historiques (Venise, Rome, Paris) et d'anciennes ruines comme les ruines mayas.

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_3) est une forme chimique particulière de l'oxygène. Il est spontanément généré dans la stratosphère par le bombardement de la molécule oxygène O_2 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 (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, la colonne d'ozone au-dessus normale est d'environ 300 DU.

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.

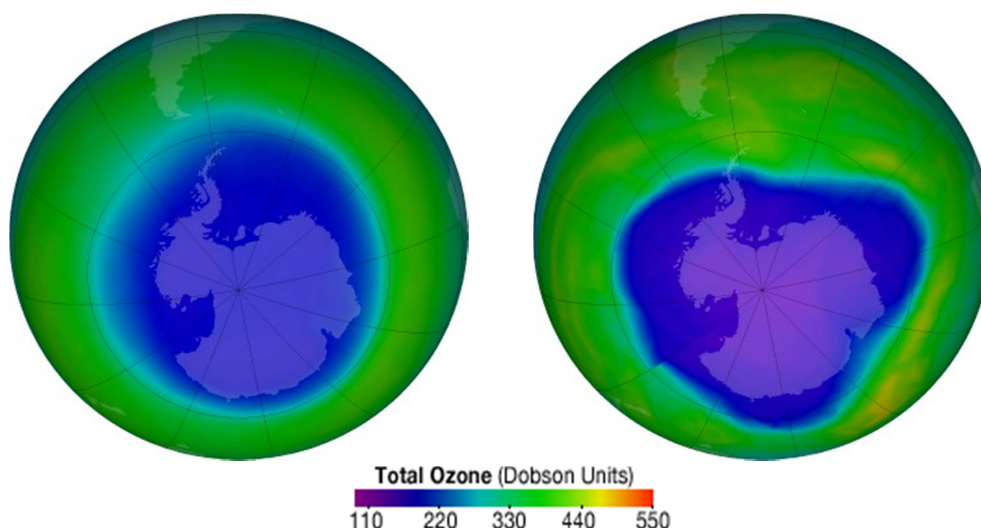


Figure 2.12 : Trou dans la couche d'ozone au-dessus de l'antarctique entre septembre 2015 à gauche et Octobre 2015 à droite (<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>).

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 km² en 2006, avec des baisses de la quantité d'ozone de presque 80 % pour certaines années (figure 2.13).

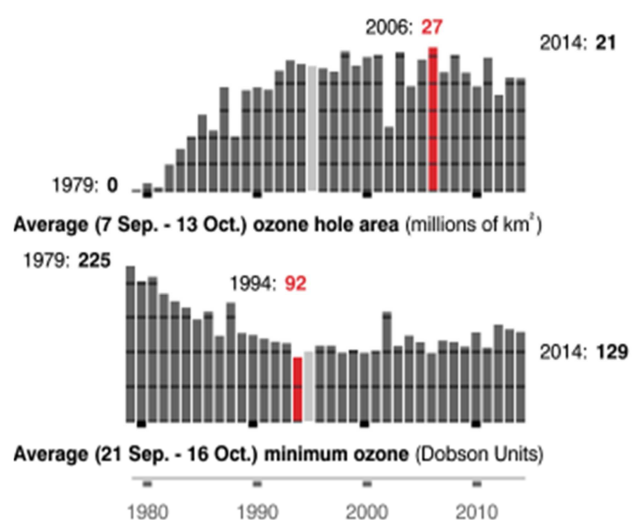


Figure 2.13 : Evolution de l'étendue du trou dans la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique en millions de km² et en unités Dobson.

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

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).

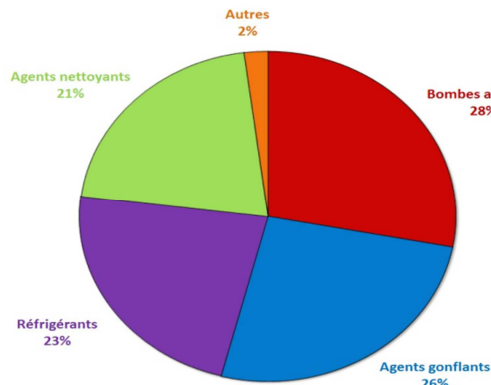


Figure 2.14 : Origine des CFC en 1986 (Organisation météorologique mondiale).

Les plus utilisés des CFC sont le fréon 11 (CFCl_3) et le fréon 12 (CF_2Cl_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).

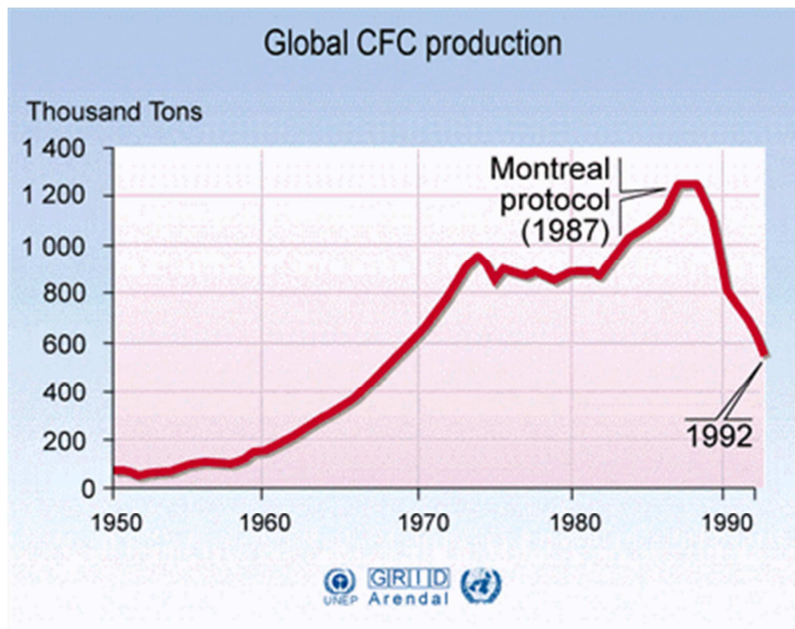
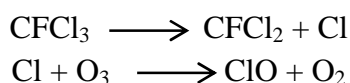


Figure 2.15 : Production mondiale des CFC.

Les HCFC (hydrochlorofluorocarbones) ont été produits après 1987 pour substituer les fréons. L'HCFC22 (CHF_2Cl) 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 (CF_2BrCl).

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

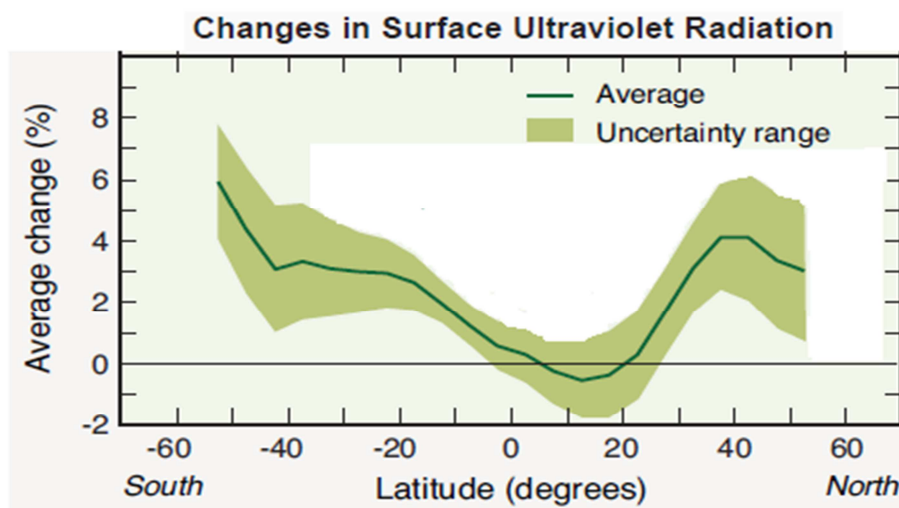


Figure 2.16 : Changement du taux des rayonnements UV qui atteignent la surface de la terre entre 1979 et 2008 (<http://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/>).

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).

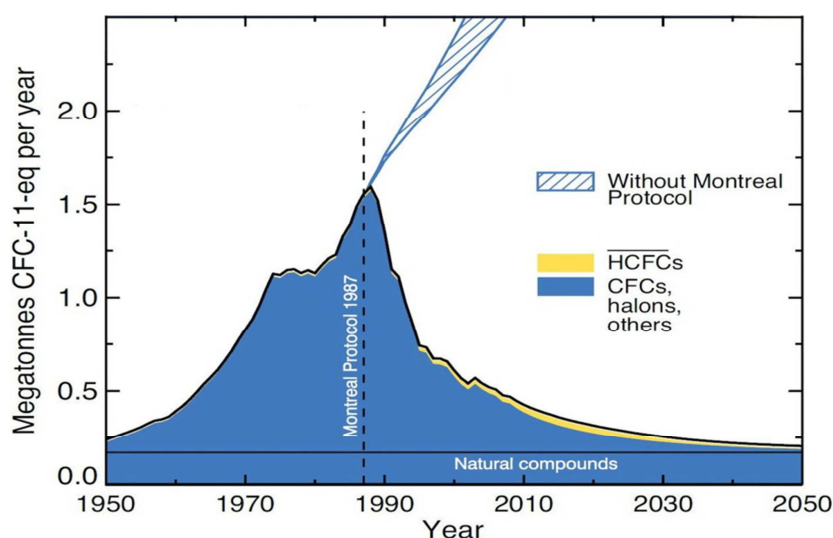


Figure 2.17 : Les émissions de gaz halogènes pondérées par l'effet destructeur sur l'ozone (en tonnes équivalent-CFC).

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 13µm). 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).

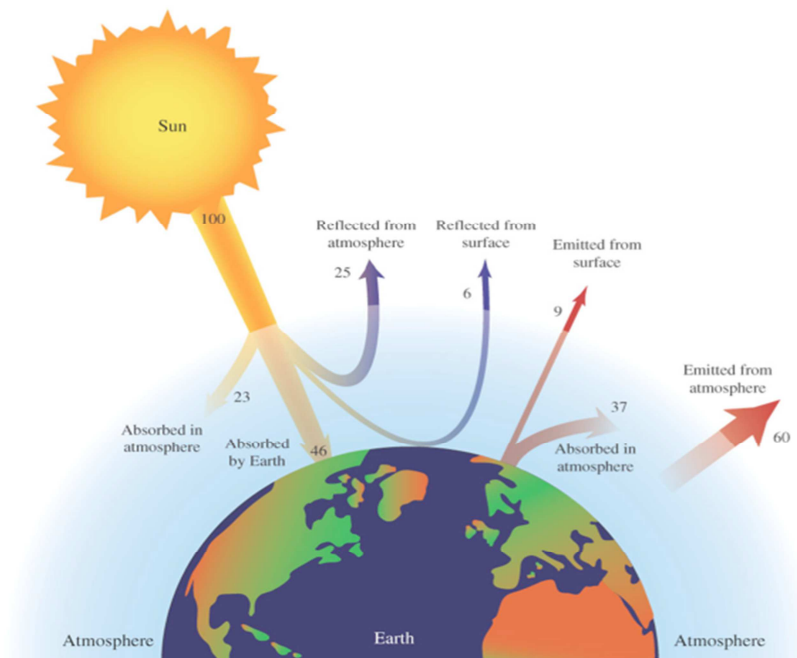


Figure 2.18 : Schéma expliquant le mécanisme de l'effet de serre

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 (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et l'ozone (O₃) (figure 2.19).

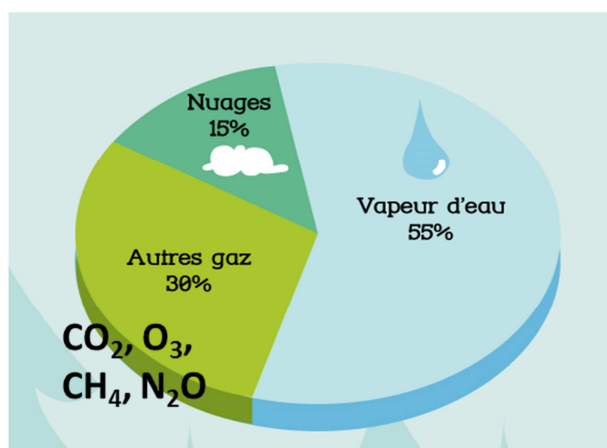


Figure 2.19 : Contribution relative des principaux gaz à l'effet de serre naturel

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).

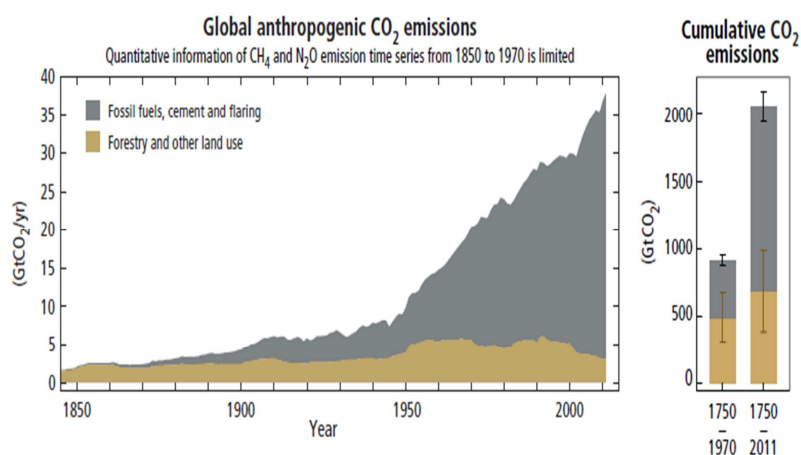


Figure 2.20 : Emission globale de CO₂ par les activités humaines dans l'atmosphère depuis 1850 (GIEC, 2014).

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.

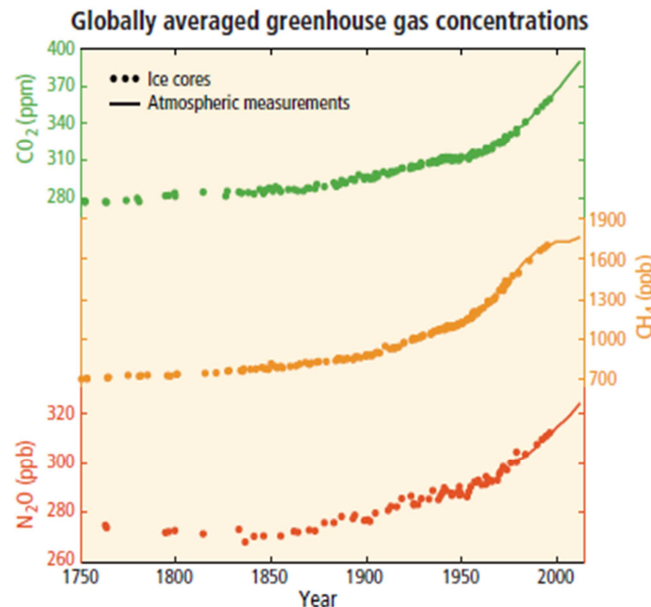


Figure 2.21: Évolution de la concentration de l'atmosphère en dioxyde de carbone, méthane et oxyde nitreux (GIEC, 2014).

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_4) et pour l'oxyde nitreux (N_2O).

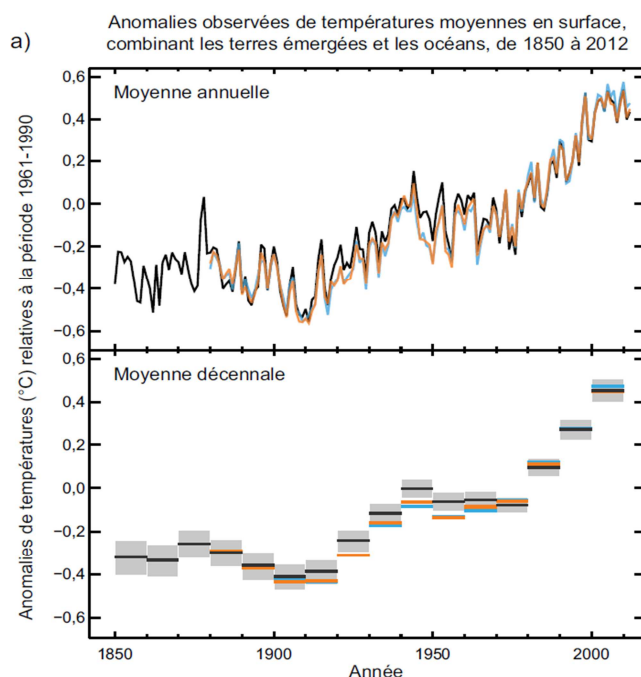


Figure 2.22 : Anomalies observées de la température moyenne terrestre sur la période 1850-2012 (GIEC, 2014)

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 CO₂ 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 (H₂CO₃) 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^e 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).

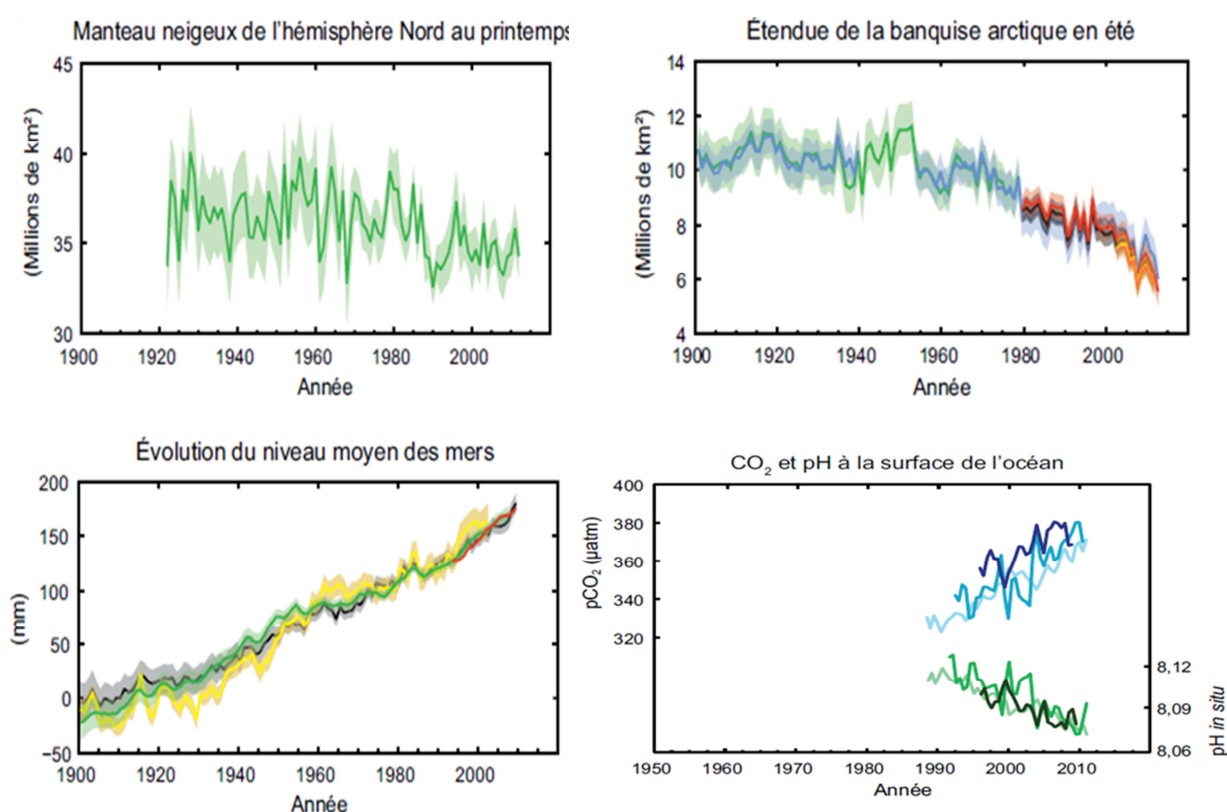


Figure 2.23 : Quelques conséquences du réchauffement climatique global (GIEC, 2014).

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.

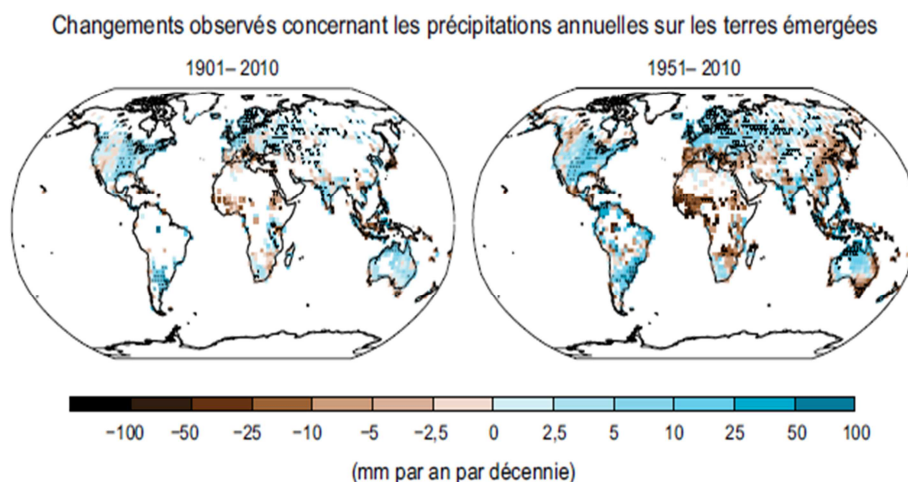


Figure 2.24 : Changements observés dans les régimes de précipitations dans le monde de 1900 à 2010 (GIEC, 2014).

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^e 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).

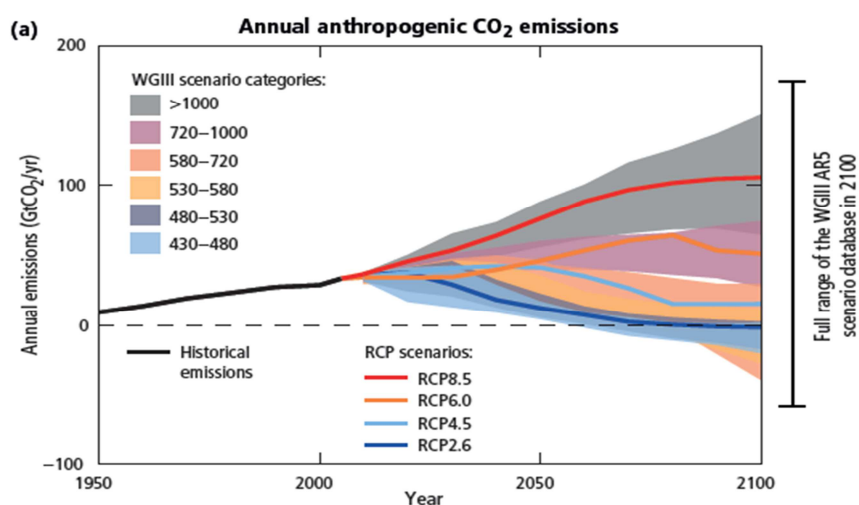


Figure 2.25 : Scénarios d'émission de gaz à effet de serre pour le XXI^e siècle (GIEC, 2014)

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^e siècle. Il est probable que ces changements soient largement plus importants que ceux observés pendant le XX^e 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 CO₂, soit en collectant directement le CO₂ des cheminées d'usine et le séquestrer profondément dans les couches géologiques ou en plantant massivement des forêts qui contribuerait à pomper le CO₂ 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 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, principal émetteur de gaz à effet de serre de la planète. Depuis Kyoto, de nombreuses réunions internationales se sont tenues pour faire accepter aux USA de ratifier le protocole et dont la dernière réunion s'est tenue à Paris en décembre 2015 (COP 21).

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 a 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 SO₂, les NO_x, 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).

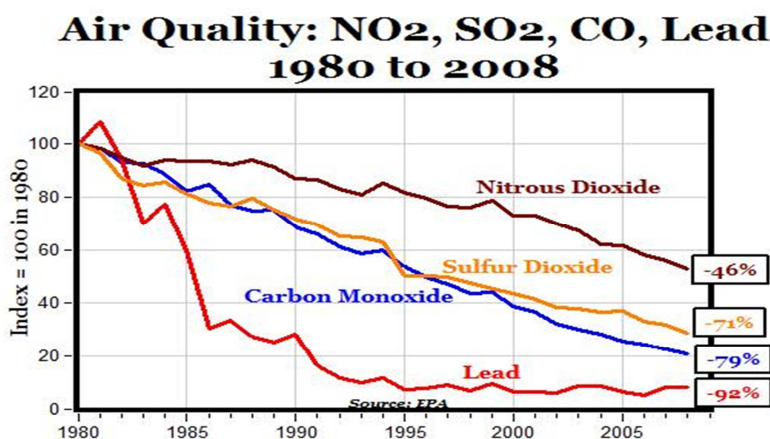


Figure 2.26 : Evolution des concentrations d'aéropolluants aux USA de 1980 à 2008 (EPA)

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 ₂	NO _x	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

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 CO₂ 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_x, SO₂, 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 précipitateurs électrostatiques et de tours de lavage éliminaient efficacement les particules (à voir dans le cours).

Conseils de lecture pour ce chapitre

Livres généralistes

- François Ramade, 2012. Eléments d'écologie appliquée
- Dana Desonie, 2007. Atmosphere : Air pollution and its effects.
- Jeremy Colls, 2002. Air pollution.
- Mark Jacobson, 2002. Atmospheric pollution
- Ranjeet Sokhi, 2008. World atlas of atmospheric pollution
- Vanda Villanyi, 2010. Air pollution
- Daniel Vallero, 2008. Fundamentals of air pollution
- Bruno Sportisse, 2008. Pollution atmosphérique, des processus à la modélisation.

Références sur les pluies acides

- Peter Brimblecombe et al., 2007. Acid rain, from deposition to recovery
- 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

- Christos Zerefos et al., 2009. Twenty years of ozone decline
- Matthew Hoffmann, 2005. Ozone depletion and climate change
- Henry Lambright, 2005. The case of ozone depletion
- <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>
- <http://www.theozonehole.com/>

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/>