

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique.

UNIVERSITÉ ABOU BAKER BELKAID

- TLEMCEM -

FACULTE DES SCIENCES

**DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE**

**Thème :**

# L'effet de serre

**Elaborés par :**

✚ M<sup>R</sup> SEMAR Mohamed

✚ M<sup>R</sup> BENCHERRAT Abdennebi

*Date soutenance : 06 Juillet 2010.*

**Membres du Jury :**

*Président :* M<sup>me</sup> DJ. Ghaffour *M.C.A, Université de Tlemcen*

*Examineurs :* M<sup>r</sup> R. Saim *M.C.A, Université de Tlemcen*

M<sup>r</sup> :Lemerini *M.C.A, Université de Tlemcen*

*Encadreur :* M<sup>r</sup> M. CHABANE *M.C.A, Université de Tlemcen*

**ANNÉE UNIVERSITAIRE 2009/2010**

## Remerciements

*Premièrement et avant tout ; nous remercions notre DIEU Clément et Miséricordieux qui nous a donné la santé et le courage pour mener à bien ce travail de fin d'études.*

*Nous tiens à exprimer nos plus vifs remerciements et nos sincères reconnaissances à nos encadreurs Mr : et qui nous ont fait l'honneur de diriger ce travail, nous les remercions pour leurs aides et leurs suggestions précieuses pour la réalisation de ce projet.*

*nous adressons nos vifs remerciements au président de jury Mme Dj Ghaffour., et aux examinateurs.*

*Nous remercions notre famille surtout notre parents qui nous ont encouragé et qui nous ont facilité la tâche et nous ont aidé avec tous les moyens possibles pour réussir dans la concrétisation de ce travail.*

*Nous remercions nos camarades de promotion pour le plaisir que nous avons eu à les côtoyer quotidiennement, ainsi pour le beau témoignage d'amitié qu'ils nous ont offert pendant toute la durée de notre formation.*

*Enfin pour tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation plus particulièrement les enseignants (es) de la faculté des Sciences.*

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont beaucoup soutenu: ma très chère mère, mon très cher père Ahmed*

*- A ma très chère grande mère.*

*- A mes seures et mon frère.*

*- A toute ma famille.*

*- A tous mes amis.*

*- A tout les lauréats de la promotion 2010 physique énergétique.*

*- A tous ceux qui me connaissent de prés ou de loin*

Mohamed.

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont beaucoup soutenu: ma très chère mère, mon très cher père*

*- À ma très chère grande mère.*

*- À mes frères*

*- À toute ma famille.*

*- À tous mes amis.*

*- À tout les lauréats de la promotion 2010 physique énergétique.*

*- À tous ceux qui me connaissent de près ou de loin*

*ABD ENNABI.*

## Introduction générale

L'énergie qui commande le climat de la Terre, c'est le soleil qui l'apporte. Ses rayons traversent l'espace pour arriver en haut de l'atmosphère. Mais que se passe-t-il ensuite? Qu'arrive-t-il à la lumière lorsqu'elle rencontre des nuages, lorsqu'elle frappe la surface terrestre ? Le soleil envoie de la lumière, la Terre se réchauffe, et ce faisant elle émet des rayons en retour. Et ces rayons ne partent pas directement vers l'espace. Eux aussi doivent traverser l'atmosphère, qui contient des nuages, et certains gaz qu'on appelle gaz à effet de serre.

Le réchauffement planétaire dont on parle tant dans les médias n'est pas controversé par la communauté scientifique : il est observé depuis 1900 et les mesures indiquent que la température moyenne globale a augmenté de 0,5 °C depuis cette date. De plus il est nettement plus prononcé dans les deux dernières décennies. Une autre observation est également incontestable : l'augmentation des gaz à effet de serre. On a en effet mesuré depuis le début de l'ère industrielle (1860) une augmentation de certains gaz à effet de serre : le CO<sub>2</sub> a augmenté de 30% et le CH<sub>4</sub> de 14,5%. L'augmentation du CO<sub>2</sub> est le résultat direct de l'activité humaine liée à la production d'énergie. Les causes de ce réchauffement, elles, en revanche, sont encore aujourd'hui un sujet de discussion entre les chercheurs.

Dans la première partie de ce mémoire nous allons donner des généralités sur les transferts thermiques, dans la partie suivante nous allons tout savoir sur l'énergie de la planète, et apprendre ce qu'est l'effet de serre. Enfin dans une

dernière partie des solutions permettant de réduire les gaz à effet de serre sont exposées.

# Chapitre I

## Généralités sur les transferts thermiques

### I-1 Introduction

Un transfert thermique, appelé plus communément chaleur, est un transfert d'[énergie microscopique désordonnée](#). Cela correspond en réalité à un transfert d'[agitation thermique](#) entre particules, au gré des chocs aléatoires qui se produisent à l'échelle microscopique.

L'exemple le plus courant de situation mettant en jeu un transfert thermique est le [système](#) constitué de deux corps en contact et ayant des [températures](#) différentes. Le corps le plus chaud cède de l'énergie sous forme de chaleur au corps le plus froid. Il y a transfert thermique entre les deux corps. Il peut se produire des transferts thermiques vers un système dont la température reste constante, par exemple dans le cas d'un [changement d'état](#) physique (exemple : la fusion de la glace à 0 °C sous la pression atmosphérique).

L'étude de ces transferts s'effectue dans le cadre de la discipline [thermodynamique](#) en s'appuyant sur les deux [premiers principes](#).

À la différence de la thermodynamique, la thermocinétique fournit des informations sur le mode de transfert en situation de *non équilibre* ainsi que sur les valeurs de flux de chaleur.

### I-2 Définitions

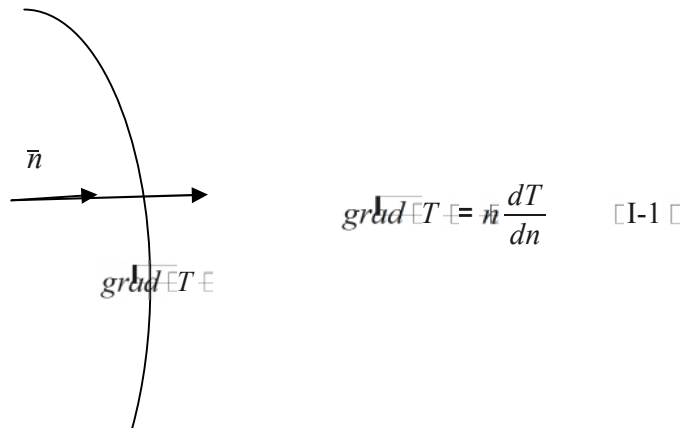
#### I-2-1 Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température :  $T = f(x,y,z,t)$ . La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température.

### I-2-2 Gradient de température

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température :

Isotherme  $T_0$



Avec :

$\bar{n}$  vecteur unitaire de la normale

$\frac{dT}{dn}$  : dérivée de la température le long de la normale

### 1.2.3 Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

$$\Phi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \quad \text{[I-2]}$$



où  $S$  est l'aire de la surface ( $m^2$ ).

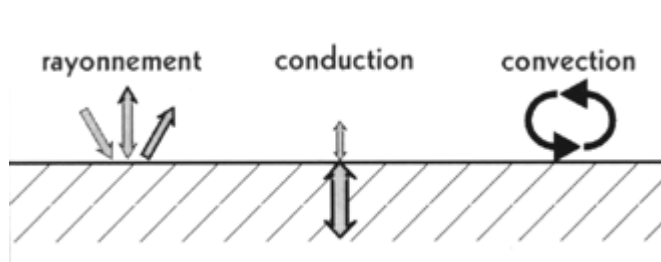
On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface  $S$  par unité de temps :

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad \text{[I-3]}$$

### I-3 les modes de transferts thermiques

Il y existe trois modes de transfert :

- Conduction : l'énergie passe d'un corps à un autre, par contact.
- Convection : un corps qui se déplace emmène avec lui l'énergie qu'il contient. La quantité d'énergie ainsi transportée peut être importante, notamment dans le cas d'un changement de phase.
- Rayonnement (radiation) : tous les corps émettent de la lumière, en fonction de leur température, et sont eux-mêmes chauffés par la lumière qu'ils absorbent.



#### I-3-1 conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. Ce mode de transfert

thermique tend à uniformiser la répartition d'énergie cinétique des particules constituantes dans la masse du corps.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température.

$$\phi = -\lambda \text{ grad } T \quad \text{[I-4]}$$

ou sous forme algébrique :  $\phi = -\lambda \frac{dT}{dx}$

avec :

$\phi$  : Flux de chaleur transmis par conduction (W)

$\lambda$  : Conductivité thermique du milieu ( $\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$x$  : Variable d'espace dans la direction du flux (m)

$S$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $\text{m}^2$ )

### I-3-2 Convection

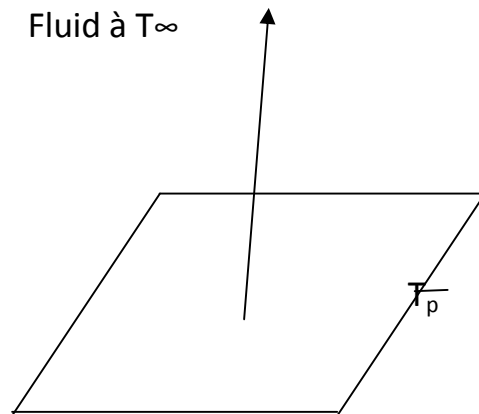
C'est le processus de transfert thermique déterminé par le mouvement des particules élémentaires d'un fluide entre des zones ayant des températures différentes, ce mouvement entraîne un mélange intense des particules fluides, qui changent de l'énergie (chaleur) et de la quantité de mouvement entre elles. Il y a deux types de convection : forcée et naturelle (libre),

La convection forcée : le mouvement de fluide est causé par l'action des forces extérieures du processus qui lui imprime de la vitesse de déplacement assez importantes. En conséquence l'intensité du transfert thermique par convection forcée sera en liaison directe avec le régime de mouvement du fluide.

La convection naturelle : a comme l'origine le mouvement produit par les différences de densité entre les particules chaudes et celles qui sont froides existant dans un fluide situé dans une chambre forces massiques.

La configuration et l'intensité de la convection naturelle sont en relation directe avec les conductions thermiques qui la déclenchent, la nature du fluide et le volume de l'espace où a lieu le processus.

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de NEWTON :



$$\phi = h S [T_p - T_\infty] \quad [I-5]$$

Avec

$\Phi$  : Flux de chaleur transmis par convection (W)

$h$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection ( $W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$ )

$T_p$  : Température de surface du solide ( $^\circ C$ )

$T_\infty$  : Température du fluide loin de la surface du solide ( $^\circ C$ )

$S$  : Aire de la surface de contact solide/fluide ( $m^2$ )

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection  $h$  est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

### I-3-3 Rayonnement

Tous les corps, quelque soit leur état : solide, liquide ou gazeux, émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Cette émission d'énergie s'effectue au détriment de l'énergie interne du corps émetteur. Le

rayonnement se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière, il est constitué de radiations de différentes longueurs d'onde

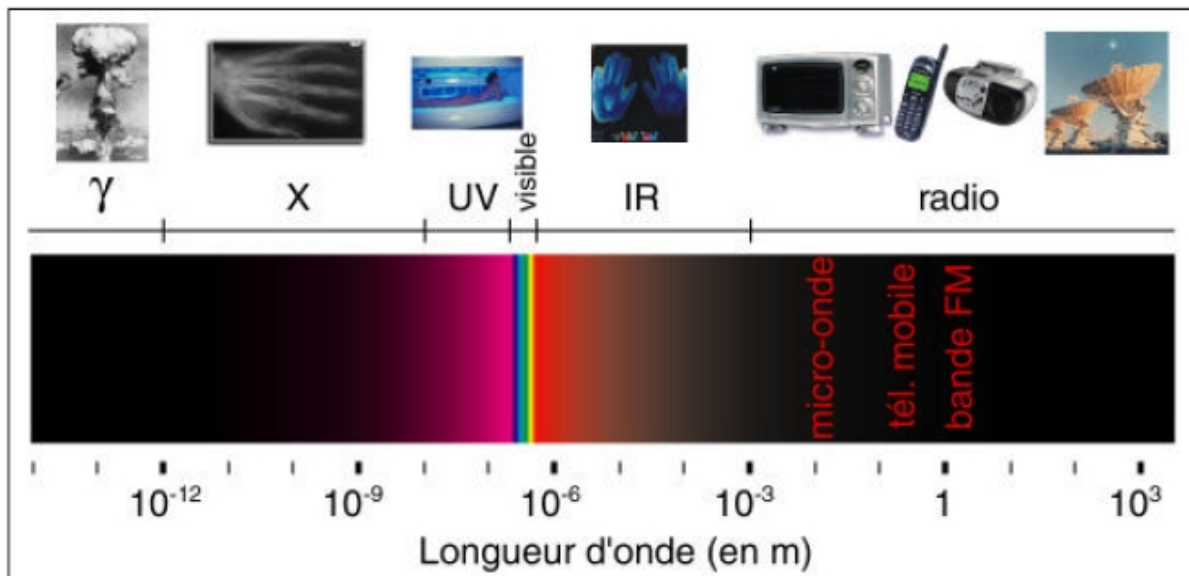


Figure (1.1) : Les différents rayonnements du spectre lumineux.

Le mécanisme de rayonnement est créé par l'émission et l'absorption des ondes électromagnétiques porteuses d'énergie rayonnante et par la transformation de celle-ci en chaleur avec le changement d'état énergétique des corps qui retiennent. Ayant la même nature que le rayonnement lumineux, le rayonnement thermique sera gouverné par les mêmes lois que celui-ci, avec tout de même des lois propres. Le rayonnement thermique n'exigeant pas un support matériel, il peut se produire même en vide. Il a une grande importance pour le transfert thermique subi par des corps solides, des gaz et dans l'espace (cosmique), son effet étant plus marquant à des températures élevées.

Des exemples typiques pour le rayonnement sont : la préparation de nourriture sur un radiateur électrique, le rayonnement solaire, etc.

#### I-4 Le rayonnement solaire

Le soleil et les étoiles représentent les sources d'énergie les plus puissantes, leur puissance étant estimée à environ  $3.9 \cdot 10^{20}$  MW. Même si la terre ne reçoit

qu'un faible pourcentage de ce gigantesque flux, soit  $1395 \text{ W/m}^2$ , la quantité d'énergie moyenne reçue pendant une année est largement supérieure tant aux besoins actuels de consommation de notre planète qu'aux réserves énergétiques fournies par les combustibles classiques.

Le soleil est une centrale nucléaire idéale, où se déroulent des réactions de fusion nucléaire qui assurent un rayonnement d'une permanence d'une constante pratiquement infinies ; la réaction de combinaison de quatre protons d'hydrogène fait naître un noyau d'hélium engendrant une quantité gigantesque d'énergie.

A la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire est pratiquement constant, les mesures faites enregistrant des déviations de l'ordre  $\pm 3$  à  $5\%$ . Il faut retenir que la surface de la terre capte un flux égal à environ  $800$  à  $900 \text{ w/m}^2$ . Ainsi le rayonnement solaire effectif sur la surface terrestre n'a pas une valeur constante. Cette grandeur dépend d'une multitude de facteurs : la position géographique, la saison, la période diurne, l'état de ciel, ainsi que la quantité de poussière, gaz carbonique et vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.

La traversée de l'atmosphère va affaiblir, où même annuler par temps nuageux le rayonnement qui provient directement de la surface de soleil. Par temps clair, le rayonnement global incident représente  $48\%$  du rayonnement global (de l'ordre de  $1000 \text{ W.m}^{-2}$ ) et un quart de ce rayonnement est diffusé par le ciel (Voir la figure).

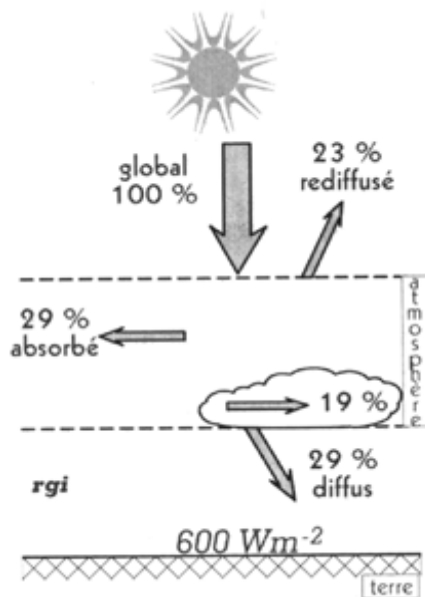


Figure (1.2.a)

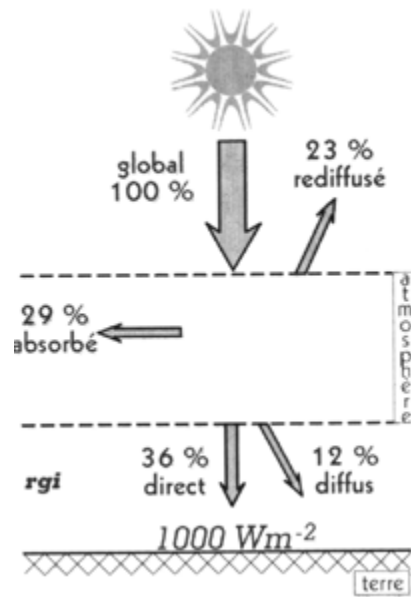


Figure (1.2.b)

Par ciel très nuageux, il n'y a pas de rayonnement direct, 19% du rayonnement est absorbé par les nuages et 29% du rayonnement atteint le sol sous forme diffuse (de l'ordre de  $600 \text{ W.m}^{-2}$ ) (Voir la figure).

On constate que l'effet de la dispersion atmosphérique sur le rayonnement solaire consiste en une réduction des bandes ultraviolette et bleue du spectre ;  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  et la poussière absorbent le rayonnement dans les zones rouges et infrarouges du spectre. Leur présence dans l'atmosphère déplace le spectre du rayonnement solaire vers le rouge, dans le domaine des énergies plus faibles.

Les nuages et l'atmosphère prélèvent une partie du flux solaire et la transmettent vers le sol par le phénomène de rayonnement diffus. Même dans la situation où le ciel est complètement découvert de nuages, la surface terrestre reçoit par rayonnement diffus environ  $420 \text{ W/m}^2$ .

La propagation de rayonnement solaire à températures élevées a lieu sur les longueurs d'onde petites (micro- onde), inférieure à  $0.5 \text{ um}$ , tandis que le

rayonnement à basse température, caractéristique à la surface terrestre correspond aux grandes longueurs d'onde.

On conclut que les gaz de l'atmosphère sont pratiquement transparents au rayonnement solaire, mais ils absorbent une partie du flux énergétique rayonné par la terre et ensuite la reflète de nouveau sur sa surface .Ce phénomène est appelé effet de serre.

### **I-5 Le bilan radiatif terrestre**

La vie sur terre est due au rayonnement solaire. En l'absence d'atmosphère, la terre considérée comme un disque recevrait un flux de  $1400 \text{ W/m}^2$ . En fait, la terre n'est pas un disque mais une sphère qui tourne. Sa surface est donc quatre fois celle du disque. La densité moyenne du rayonnement solaire est donc de  $350 \text{ W/m}^2$ .

En considérant qu'en absence d'atmosphère, la terre absorbe 90% du rayonnement solaire, l'équilibre thermique donne une température de  $0^\circ\text{C}$ . A cette température, la terre serait couverte de glace. Dans ce cas la quasi-totalité du spectre solaire serait réfléchi. La température de la terre serait alors d'environ  $-100^\circ\text{C}$ . La densité du rayonnement solaire n'est pas uniformément répartie sur la surface de la terre. On considère que le rayonnement solaire maximal au sol sous nos latitudes est de  $100 \text{ W/m}^2$  dont, en moyenne  $3/5$  sont absorbés par la terre et l'atmosphère et les  $2/5$  sont réfléchis vers l'espace. La répartition schématisée du rayonnement est représentée sur la figure (1.3).

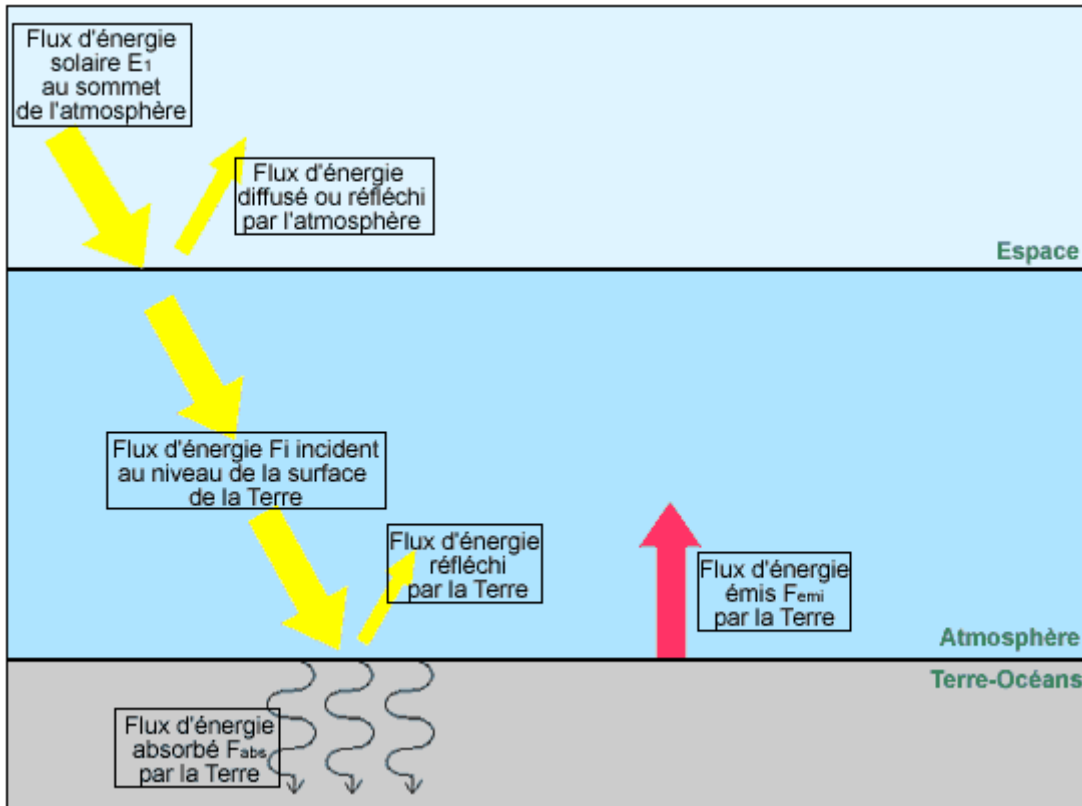


Figure (1.3) : bilan du rayonnement solaire

L'atmosphère gazeuse de la terre, d'une épaisseur de 50 km environ, absorbe de puissance solaire et de la puissance terrestre. Suivant leur nature, les gaz absorbent du rayonnement. L'ozone par exemple absorbe le flux solaire dont la longueur d'onde est inférieure à  $0.3\mu\text{m}$ , tandis que la vapeur d'eau absorbe ce flux dans 17 bandes du spectre situées autour de longueur d'onde réparties entre  $0.6$  et  $6.27\mu\text{m}$ . La valeur du flux solaire atteignant effectivement la terre dépend des coefficients de réflexions, de transmission et d'absorption, c'est-à-dire de l'épaisseur de la composition chimique des gaz que le rayonnement solaire doit traverser pour un flux solaire de  $1000\text{w}/\text{m}^2$ , le rayonnement solaire incident sur terre est de  $460\text{w}/\text{m}^2$ . Il est diversement absorbé ou réfléchi par le sol terrestre.

L'albédo est le rapport du rayonnement réfléchi par le sol au rayonnement incident, qui comprend le rayonnement solaire direct mais aussi le



rayonnement atmosphérique. Le tableau suivant donne quelques valeurs de l'albédo.

Nature du sol	albédo
Neige	0.8 – 0.9
culture	0.15 – 0.25
mer	0.05 (été) – 0.15 (hiver)
sable	0.35
rochers	0.2 – 0.25
nuages	0.4 – 0.8

La convection liée à l'existence de vents ou de courants marins tend à homogénéiser la température terrestre. De plus, les océans par leur fonction de stockage thermique lissent les variations de température entre l'hiver et l'été. Sur une année, le bilan de transferts entre le système "terre+atmosphère" et l'espace est nul. C'est-à-dire que les  $420\text{w/m}^2$  absorbés par la terre sont émis. Le transfert terre/espace est fortement dépendant du jour (bilan positif) ou la nuit (bilan négatif), de la teneur en eau de l'atmosphère c'est-à-dire de son ennuagement ou, au dessus des grandes villes, de la pollution, de latitude de la présence d'océans.

En moyenne, le rayonnement terrestre, situé dans l'infrarouge et au-delà, est absorbé par la vapeur d'eau de l'atmosphère en quasi-totalité. Toutefois, par exemple au Sahara où le degré d'hygrométrie est faible, la partie du flux radiatif réfléchi vers l'espace est telle qu'elle provoque un abaissement de la température susceptible de provoquer des gelées nocturnes. Si l'on suppose que la terre rayonne comme un corps noir, alors la température correspondant à son flux de rayonnement est de  $20^\circ\text{C}$ . Ce qui est une valeur raisonnable.

L'atmosphère elle aussi, rayonne de la puissance thermique. Ce rayonnement est situé dans une bande de longueur d'onde comprise entre  $5\mu\text{m}$  et  $100\mu\text{m}$ .

Il correspond à un corps à une température de 200 K environ. Il est bien absorbé par le sol.

### **I-6 Evaluation des flux d'énergie à la surface de la terre :**

Considérons la surface de la terre comme un système thermodynamique fermé (n'échangeant pas de matière avec l'extérieur mais uniquement de l'énergie).

Pour ce système thermodynamique, le premier principe s'écrit [15] :

$$\Delta E = W + Q \quad (I-6)$$

Où  $\Delta E$  est la variation totale d'énergie du système ;

$W$  est l'énergie sous forme de travail échangée avec l'extérieur.

Dans le cas de la surface de la terre, il n'y a pas d'échange d'énergie mécanique avec l'extérieur et  $W = 0$  ;

$Q$  est l'énergie échangée avec l'extérieur sous forme de chaleur.

Dans l'équation (1), on compte positivement toute l'énergie qui est absorbée par la surface de la terre et négativement toute l'énergie qui est émise par la surface de la terre.

La terre reçoit l'énergie solaire  $E_S$ , et elle émet l'énergie infrarouge,  $E_{IR}$ .

Compte tenu de ces échanges, le premier principe du système fermé s'écrit :

$$\Delta E = E_S - E_{IR} \quad (I-7)$$

Où  $\Delta E$  est la variation d'énergie totale du système terre.

#### **1.6.1 Bilan en régime permanent**

En régime permanent, l'énergie reçue par la terre est égale à l'énergie qu'elle réémet :  $E_S = E_{IR}$  ; d'où  $\Delta E = 0$ . L'énergie totale de la surface de la terre est donc constante.

Pour effectuer le bilan d'énergie, il faut considérer d'une part le flux solaire reçu par la terre ( $\Phi_S$ ), et d'autre part le flux infrarouge émis par la surface de la planète ( $\Phi_{IR}$ ). Mais attention : le flux solaire n'est jamais reçu que sur une section du globe (de surface  $\pi R^2$ ) alors que le rayonnement infrarouge est émis en permanence sur toute la surface de la terre ( $4\pi R^2$ ). Ce facteur 4 entre les deux surfaces concernées est déterminant car cela signifie qu'un flux infrarouge peut compenser un flux solaire quatre fois plus important. Par ailleurs, l'albedo  $a$  limite le rayonnement solaire qui parvient à la surface de la terre : seule la fraction  $(1 - a)$  de ce flux atteint effectivement la surface de la terre, de telle sorte que le flux solaire reçu par la terre s'écrit :

$$E_S = \pi R^2 (1 - a) \Phi_S \quad (I-8)$$

La terre émet un flux d'énergie  $\Phi_{IR}$  dans l'infrarouge. L'énergie  $E_{IR}$ , émise par toute la surface de la terre, est donnée par :

$$E_{IR} = 4\pi R^2 \Phi_{IR} \quad (I-8)$$

À l'équilibre, les deux valeurs sont égales, et l'on obtient :

$$E_S = \pi R^2 (1 - a) \Phi_S = E_{IR} = 4\pi R^2 \Phi_{IR} \quad (I-9)$$

**Soit**

$$\Phi_{IR} = \frac{1 - a}{4} \Phi_S \quad [I-10]$$

**Or**

$$\Phi_{IR} = \varepsilon \sigma T^4 \quad [I-11]$$

Où  $\varepsilon$  est l'émissivité de la terre,  $\sigma$  est la constante de Boltzmann et T la température. On en déduit :

$$T_0 = \sqrt[4]{\frac{1-a}{4} \frac{\phi_s}{\varepsilon \sigma}}$$

Application numérique :

Le flux solaire reçu par la surface extérieure de l'atmosphère est de  $1400 \text{ W/m}^2$  et l'albédo de la terre est négligeable, si bien que le flux solaire qui pénètre dans l'atmosphère est environ égal à  $1000 \text{ W/m}^2$ , et si  $\varepsilon = 1$  :

$$T_0 = \sqrt[4]{\frac{\frac{1}{4} \times 1000}{5,64 \times 10^{-8}}} = 257,6 \text{ K} = -16^\circ \text{C}$$

Dans ce cas, la vie sur terre serait très problématique car la température moyenne serait seulement de l'ordre de  $-16^\circ \text{C}$ . En fait, un calcul exact donne une valeur de  $-18^\circ \text{C}$ . Cette température théorique est à comparer avec la température réelle actuelle de  $+15^\circ \text{C}$ . Cette différence s'explique par l'effet de serre naturel, grâce auquel  $\varepsilon$  est inférieur à 1. Un tel modèle très simplifié permet ainsi de rendre compte à peu près de ce qui se passe au niveau de la surface de la terre en régime permanent et hors effet de serre additionnel introduit par l'activité humaine.

D'autre part, l'énergie solaire reçue par la terre est de l'ordre de :

$$\begin{aligned} E_S &= \pi R_2 (1-a) \Phi_S \times 365 \times 24 \\ &= 3,14 \times 36.1012 \times 365 \times 24 \text{ kWh/an} = 10^{15} \text{ MWh/an} \end{aligned}$$

Si on compare aux  $10\,000 \text{ Mtep}$  d'énergie annuelle consommée, on en déduit que l'énergie solaire reçue par la terre correspond à environ  $8\,600$  fois l'énergie

consommée. Pour importante que soit la consommation énergétique, elle est encore négligeable par rapport à l'énergie solaire reçue.

### 1-6-2 Bilan en régime transitoire

Si l'énergie solaire incidente et l'énergie infrarouge émise ne se compensent pas exactement, l'équation (1) entraîne qu'il y a variation de l'énergie totale à la surface de la terre.

Deux cas peuvent alors se produire :

– si l'énergie solaire incidente est inférieure à l'énergie infrarouge émise, il y aura diminution de l'énergie totale du système terre :

$$E_S - E_{IR} < 0 \Rightarrow \Delta E < 0$$

Et cette diminution de l'énergie se traduirait par un abaissement de température ;

– si, au contraire, l'énergie solaire incidente est supérieure à l'énergie infrarouge émise, il y aura augmentation de l'énergie totale du système terre :

$$E_S - E_{IR} > 0 \Rightarrow \Delta E > 0$$

Et c'est apparemment ce qui se produit actuellement à cause de la diminution de l'énergie infrarouge émise suite à l'effet de serre. Mais l'énergie totale est la somme de l'énergie interne et des énergies cinétique et potentielle. L'énergie potentielle n'étant, a priori, pas affectée par la diminution de l'énergie infrarouge, on a donc :

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_c \quad (I-12)$$

L'augmentation de l'énergie peut se décomposer en une augmentation de l'énergie cinétique,  $\Delta E_c$  (vents, etc.), et une augmentation de l'énergie interne,

$\Delta U$ . Cette augmentation de l'énergie interne peut elle-même se décomposer en plusieurs termes :

- augmentation de la chaleur sensible via l'augmentation de température de l'atmosphère et de la surface de la terre ;
- augmentation de l'énergie interne stockée par exemple sous forme de biomasse accumulée dans la biosphère ou sous toute autre forme ;
- diminution de la masse de glace dont une partie fond.

## Chapitre II

### Effet de serre : causes et les conséquences

#### II-1 Introduction :

L'atmosphère est l'enveloppe gazeuse qui entoure notre planète. La troposphère qui s'étend entre 6 et 17 km au-dessus de la surface de la Terre constitue 80% de l'atmosphère et contient la quasi-totalité de l'eau de l'atmosphère. La stratosphère qui s'étend jusqu'à 50 km d'altitude est extrêmement sèche.

L'atmosphère joue un rôle décisif dans l'équilibre terrestre. Elle maintient une température clémente indispensable à la vie sur Terre en absorbant les rayons ultraviolets nocifs émis par le soleil et en piégeant la lumière émise dans la grande longueur d'ondes, les rayons infrarouges (chaleur) émis par la Terre.

L'équilibre de l'atmosphère est fragile, le modifier pourrait provoquer des changements climatiques néfastes à l'équilibre de notre planète.

#### II-2 Le mécanisme responsable de l'effet de serre

La chaleur dégagée au centre de la Terre du fait de la radioactivité naturelle étant faible, l'énergie reçue à la surface de la terre vient pratiquement exclusivement du soleil, sous forme de rayonnement électromagnétique.

Lorsque le rayonnement solaire atteint l'atmosphère terrestre une partie est directement réfléchi par l'air, les nuages blancs et la surface claire de la terre (l'albédo). Les rayons incidents qui n'ont pas été réfléchis vers l'espace sont absorbés par l'atmosphère et la surface terrestre. Cette partie du rayonnement

absorbée par la terre lui apporte de la chaleur (énergie), qu'elle restitue à son tour, la nuit notamment et en hiver, en direction de l'atmosphère sous forme de rayons infrarouges. Ce rayonnement est alors absorbé en partie par les gaz à effet de serre. Puis dans un troisième temps cette chaleur est réémise dans toutes les directions, notamment vers la terre. (Voir la figure (2.1)).

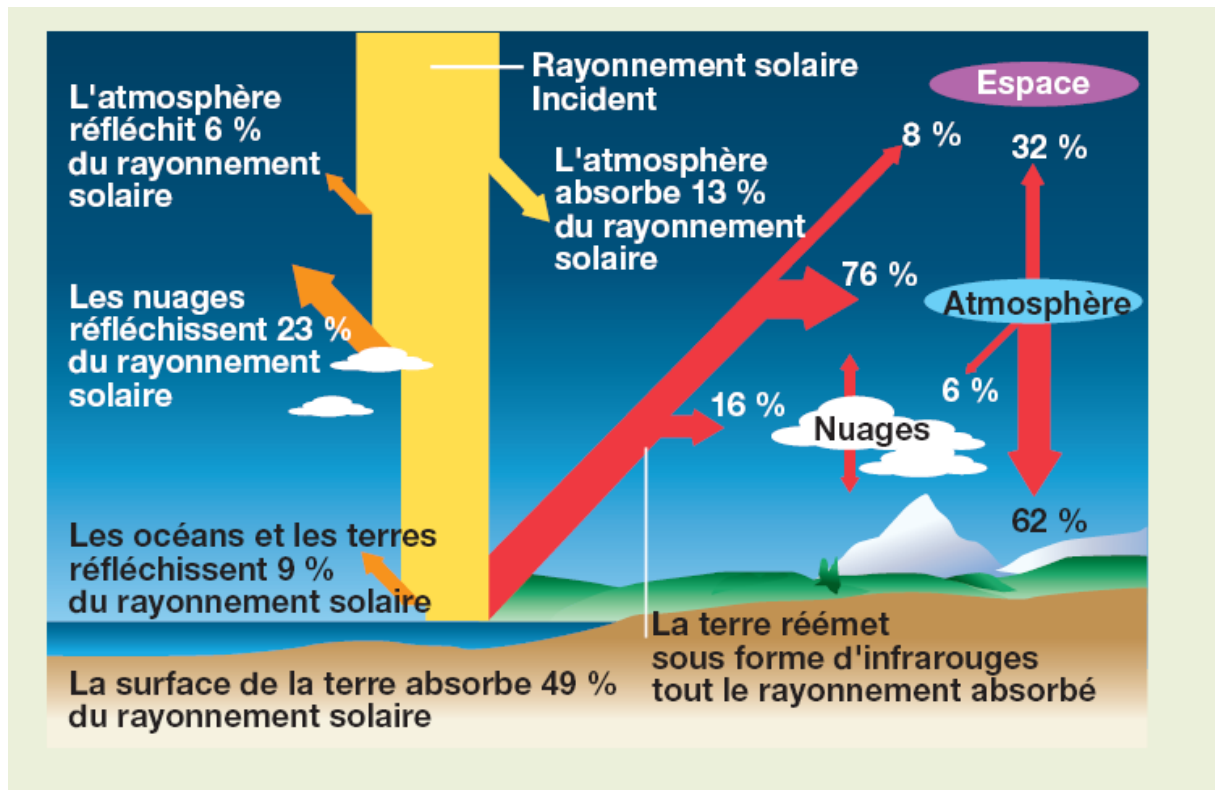


Figure (2.1) : le mécanisme de l'effet de serre.

C'est ce rayonnement qui retourne vers la terre qui crée l'effet de serre, il est à l'origine d'un apport supplémentaire de chaleur à la surface de la terre. Sans ce phénomène, la température moyenne sur terre chuterait d'abord à  $-18^{\circ}\text{C}$  (Voir la figure).





Puis, la glace s'étendant sur le globe, l'albédo terrestre augmenterait et la température se stabiliserait vraisemblablement à  $-100^{\circ}\text{C}$ .

L'effet de serre provoqué par les gaz présents dans l'atmosphère évite la perte d'énergie thermique que la Terre rayonne vers l'espace et assure une température relativement stable à la surface de la Terre et nécessaire à la présence d'eau liquide :  $15^{\circ}\text{C}$  au lieu de  $-18^{\circ}\text{C}$ .



On peut considérer l'atmosphère comme un réservoir d'énergie. Si l'effet de serre est plus efficace pour retenir l'énergie, ce réservoir se remplit et l'énergie emmagasinée par la surface terrestre augmente.

En moyenne, l'énergie venue de l'espace et reçue par la terre et l'énergie de la terre émise vers l'espace sont quasiment égales. Si ce n'est pas le cas, la température de surface de la terre évoluerait vers toujours plus froid ou vers toujours plus chaud. En effet, si les échanges moyens d'énergie avec l'espace ne sont pas équilibrés, il y aura un stockage ou un déstockage d'énergie par la terre. Ce déséquilibre provoque alors un changement de température de l'atmosphère.

L'effet de serre doit son nom à l'analogie entre l'atmosphère terrestre et une serre destinée à abriter des plantes. Les parois vitrées de la serre laissent entrer le rayonnement visible mais réfléchissent des rayonnements infrarouges, cause

importante des pertes thermiques de tout corps. Le verre et la serre joue donc un rôle analogue à celui de l'atmosphère qui contient les gaz à effet de serre.

### **II-3 Les causes à effet de serre**

Effet des activités humaines : L'activité humaine, principale cause de l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère : Actuellement, les activités humaines émettent chaque année dans l'atmosphère environ 30 GT/an d'équivalent CO<sub>2</sub> provenant, pour une part, de l'agriculture, de l'élevage et de la déforestation mais aussi et en majorité, des énergies fossiles. La planète ne semble pouvoir en absorber que la moitié, essentiellement dans les océans. Cet excédent d'émissions ne représente qu'environ 2 % des échanges entre l'atmosphère, les océans et la végétation. Cependant, ces gaz s'accumulent dans l'atmosphère où ils peuvent rester pendant plusieurs décennies voire, pour certains, plusieurs siècles.

La plupart de GES sont d'origine naturelle, mais certains d'entre eux sont uniquement dus à l'activité humaine ou bien voient leur concentration dans l'atmosphère augmenter en raison de cette activité. C'est le cas en particulier de l'[ozone](#) (O<sub>3</sub>), du [dioxyde de carbone](#) (CO<sub>2</sub>) et du [méthane](#) (CH<sub>4</sub>).

La preuve que l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique est d'origine humaine se fait par analyse [isotopique](#). L'ozone est fourni en grande quantité par l'activité industrielle humaine, alors que les [CFC](#) encore largement utilisés détruisent eux, l'[ozone](#), ce qui fait que l'on peut constater un double [phénomène](#) :

- une accumulation d'ozone dans la [troposphère](#) au-dessus des régions industrielles,
- une destruction de l'ozone dans la [stratosphère](#) au-dessus des pôles.

La combustion des [carbones](#) fossiles comme le [charbon](#), le [lignite](#), le [pétrole](#) ou le [gaz naturel](#) ([méthane](#)) rejette du CO<sub>2</sub> en grande quantité dans l'[atmosphère](#) : la concentration atmosphérique de [gaz carbonique](#) a ainsi légèrement augmenté, passant de 0,030% à 0,038 % en 50 ans. Seule la moitié serait recyclée par la [nature](#), et l'autre moitié resterait dans l'atmosphère, ce qui augmenterait l'effet de serre. Un des secteurs d'activités qui dégage le plus de gaz à effet de serre est l'énergie : à ce sujet, voir l'article [énergie et effet de serre](#).

#### **II-4 Gaz à effet de serre**

L'effet de serre est dû à la propriété différentielle de l'atmosphère dans les différentes longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique, il dépend de la structure moléculaire précise des gaz constituant l'atmosphère. Il s'est avéré que l'effet de serre de notre planète est presque exclusivement dû aux constituants très minoritaires dans l'atmosphère possédant la propriété d'absorber le rayonnement infrarouge émis par la terre.

Les deux gaz les plus abondants dans l'atmosphère, l'azote et l'oxygène qui représentent respectivement 78% et 21% de la composition atmosphérique, ne jouent pratiquement aucun rôle dans le bilan énergétique de la terre, leur structure moléculaire étant à deux atomes seulement. Parmi les éléments présents dans l'atmosphère qui absorbent le rayonnement infrarouge, il faut d'abord citer la vapeur d'eau, puis des substances comme le dioxyde de carbone, le méthane et des autres composés :

##### **II-4-1 Vapeur d'eau**

Le principal gaz à effet de serre est la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), qui assure environ les deux tiers de l'effet de serre naturel. Il est présent essentiellement dans la troposphère. Dans l'atmosphère, les molécules d'eau capturent la chaleur que

la terre réfléchit. Elles la rediffusent dans toutes les directions, réchauffant la surface de la terre, avant de rejeter finalement cette chaleur dans l'espace.

La vapeur d'eau présente dans l'atmosphère fait partie du cycle hydrologique, un circuit fermé dans lequel l'eau présente sur terre en quantité limitée circule grâce à l'évaporation et la transpiration, la condensation et les précipitations, passant des océans et des terres dans l'atmosphère avant de retomber sur terre. Les activités humaines n'augmentent pas les quantités de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Cependant, l'air chaud peut contenir beaucoup plus d'humidité et l'augmentation des températures accentue donc le changement climatique.

#### **II-4-2 Dioxyde de carbone**

Le principal responsable de l'effet de serre anthropique (dû à l'homme) est le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Il est présent à la fois dans la troposphère et la stratosphère. Il est détruit au-delà de 70 km d'altitude par le rayonnement ultraviolet émis par le soleil. Son rôle de gaz à effet de serre se joue essentiellement dans la troposphère. Globalement, il représente plus de 60 % de l'effet de serre anthropique et, dans les pays industrialisés, plus de 80 % des émissions de gaz à effet de serre.

Le carbone est présent en quantité limitée sur terre et, comme l'eau, il suit un cycle – le cycle du carbone. Il s'agit d'un système très complexe au cours duquel le carbone passe dans l'atmosphère, la biosphère terrestre et les océans. Les plantes absorbent le  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère pendant la photosynthèse. Elles utilisent le carbone pour construire leurs fibres et le rejettent dans l'atmosphère en mourant et en se décomposant. Le corps des

animaux (et des humains) contient aussi du carbone puisqu'il est composé de carbone absorbé par la consommation de plantes – ou d'herbivores. Ce carbone est rejeté sous forme de CO<sub>2</sub> par la respiration et, après la mort, par la décomposition.

Les combustibles fossiles sont les restes fossilisés d'animaux et de plantes qui se sont transformés au cours de millions d'années sous certaines conditions, raison pour laquelle ils contiennent beaucoup de carbone. De manière générale, on peut dire que le charbon est le vestige de forêts brûlées tandis que le pétrole est issu de la transformation de végétaux marins. (Les océans absorbent du CO<sub>2</sub> qui, sous forme dissoute, est traité par la flore marine au cours de la photosynthèse.)

Chaque année, des milliards de tonnes de carbone sont échangées naturellement entre l'atmosphère, les océans et la végétation terrestre. Les taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère ont varié de moins de 10 % au cours des 10 000 années qui ont précédé la révolution industrielle. Cependant, depuis 1800, les concentrations ont augmenté de près de 30 % à mesure que l'on a brûlé des quantités massives de combustibles fossiles pour produire de l'énergie – essentiellement dans les pays développés. Actuellement, nous émettons plus de 25 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère chaque année.

Récemment, les chercheurs européens ont découvert que les concentrations de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère sont plus élevées aujourd'hui qu'elles ne l'ont jamais été pendant les 650 000 années écoulées. Des calottes glaciaires ont été extraites à plus de 3 km de profondeur dans la glace de l'Antarctique, qui s'est

formée il y a des centaines de milliers d'années. La glace contient des bulles d'air qui nous fournissent un historique de la composition de l'atmosphère aux différents âges de la terre.

Le CO<sub>2</sub> peut rester 50 à 200 années dans l'atmosphère, selon la manière dont il est recyclé par les terres ou les océans.

### **II-4-3 Méthane**

Le deuxième gaz en importance pour l'effet de serre anthropique est le méthane (CH<sub>4</sub>). Il est réparti à peu près de la même façon que CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Depuis le début de la révolution industrielle, les concentrations de méthane atmosphérique ont doublé et contribué à l'accroissement de l'effet de serre à hauteur de 20 %. Dans les pays industrialisés, le méthane représente généralement 15 % des émissions de gaz à effet de serre.

Le méthane est surtout produit par des bactéries qui se nourrissent de matériau organique dans des milieux pauvres en oxygène. Il est donc émis par diverses sources naturelles ou influencées par l'homme, les émissions d'origine humaine étant prédominantes. Parmi les sources naturelles de méthane, citons les zones humides, les termitières et les océans.

Les sources d'origine humaine incluent l'extraction et la combustion de combustibles fossiles, l'élevage de bovins (les animaux mangent des plantes qui fermentent dans leur estomac, ils expirent donc du méthane et leurs excréments en contiennent), la culture du riz (les rizières inondées produisent du méthane puisque les matières organiques du sol se décomposent dans un milieu très pauvre en oxygène) et les décharges (à nouveau, les déchets organiques se décomposent sans disposer de beaucoup d'oxygène). Dans

l'atmosphère, le méthane piège la chaleur avec une efficacité 23 fois supérieure au CO<sub>2</sub>. Sa durée de vie est cependant plus courte, entre 10 et 15 ans.

#### **II-4-3 Protoxyde d'azote**

Le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) est naturellement produit par les océans et les forêts tropicales et par les bactéries du sol. Il s'accumule dans la troposphère et il est détruit par le rayonnement solaire ultraviolet quand il passe dans la stratosphère. Les sources d'origine humaine comprennent les engrais azotés, la combustion d'énergies fossiles et les procédés chimiques industriels recourant à l'azote, comme le traitement des eaux usées. Dans les pays industrialisés, le N<sub>2</sub>O représente environ 6 % des émissions de gaz à effet de serre. Comme le CO<sub>2</sub> et le méthane, le protoxyde d'azote est un gaz à effet de serre dont les molécules captent la chaleur qui tente de s'échapper dans l'espace. Le N<sub>2</sub>O retient 310 fois mieux la chaleur que le CO<sub>2</sub>. Depuis le début de la révolution industrielle, les concentrations de protoxyde d'azote dans l'atmosphère ont augmenté de près de 16 % et contribué pour 4 à 6 % à l'accroissement de l'effet de serre.

#### **II-4-4 Gaz fluorés à effet de serre**

Ce sont les seuls gaz à effet de serre qui ne sont pas présents dans la nature mais ont été développés par l'homme à des fins industrielles. Leur part dans les émissions de gaz à effet de serre des pays industrialisés est d'environ 1,5 % mais ils sont extrêmement puissants – leur capacité à piéger la chaleur est jusque 22 000 fois supérieure au CO<sub>2</sub> ils peuvent rester dans l'atmosphère pendant des milliers d'années.

Les gaz fluorés à effet de serre incluent les hydrofluorocarbures (HFC) utilisés pour le refroidissement et la réfrigération, y compris la climatisation, l'hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ) employé par exemple dans l'industrie électronique, et les hydrocarbures per fluorés (PFC) émis pendant la fabrication d'aluminium et également utilisés dans l'industrie électronique. Les plus connus sont sans conteste les chlorofluorocarbones (CFC), qui ne sont pas seulement des gaz fluorés à effet de serre mais détruisent aussi la couche d'ozone. Ils ont été progressivement interdits par le protocole de Montréal de 1987 relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone.

## **II-5 L'effet de serre et la couche d'ozone**

Environ 90% de l'ozone atmosphérique se trouve dans la stratosphère. C'est là que l'ozone ( $\text{O}_3$ ) est fabriqué "naturellement" : l'absorption d'une partie du rayonnement solaire ultraviolet (très énergétique) par la molécule de dioxygène ( $\text{O}_2$ ) provoque la cassure de cette molécule en deux atomes d'oxygène. Cette réaction ne peut se faire qu'au-delà de 20 km, car aux plus basses altitudes, le rayonnement solaire est atténué par son interaction avec les composants atmosphériques et n'a plus l'énergie nécessaire pour casser la molécule d' $\text{O}_2$ . Les deux atomes d'oxygène réagissent ensuite chacun avec une molécule de dioxygène pour donner une molécule d'ozone ( $\text{O}_3$ ).

C'est cet ozone stratosphérique qui constitue la fameuse "couche d'ozone" qui nous protège d'une partie du rayonnement ultraviolet du soleil : en effet, la molécule d'ozone a pour propriété d'absorber également une partie du rayonnement ultraviolet (un peu moins énergétique que le précédent) et de se casser en une molécule de dioxygène ( $\text{O}_2$ ) et un atome d'oxygène (O). Celui-ci

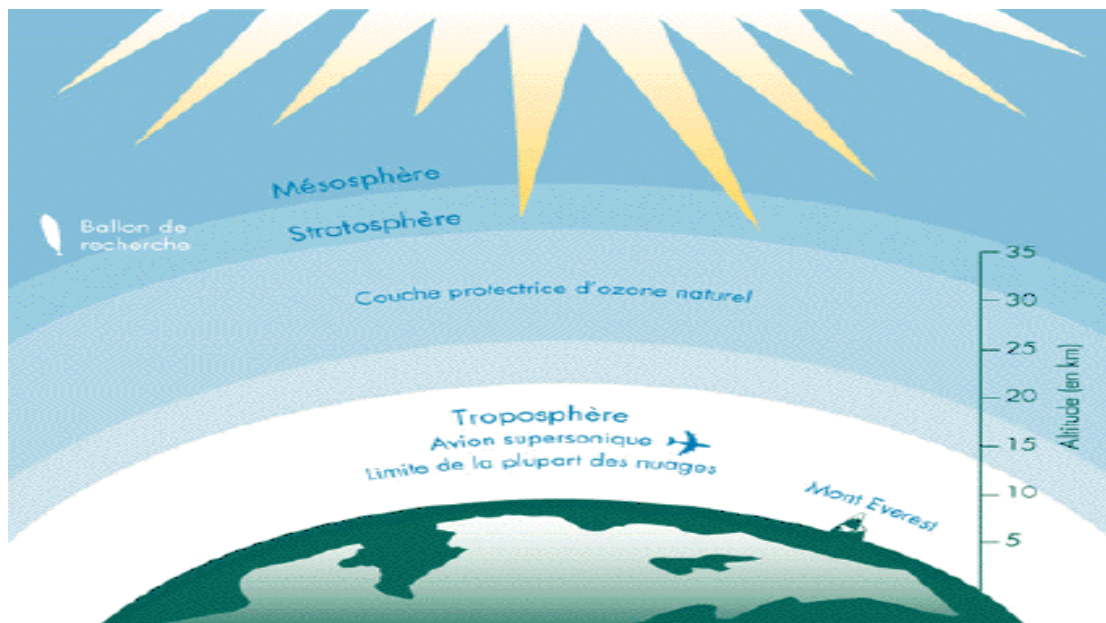


réagit ensuite avec une molécule d'ozone ( $O_3$ ) pour donner deux molécules d' $O_2$ .

Dans la troposphère, l'énergie solaire n'est plus assez forte pour casser la molécule d' $O_2$ , et la production d'ozone n'est pas possible par ce moyen là. Par contre, il existe un autre moyen : la cassure du dioxyde d'azote ( $NO_2$ ) par le rayonnement ultraviolet. L'ozone est produit en plus faible quantité que dans la stratosphère car ses précurseurs sont moins abondants que l'oxygène.

Mais l'ozone de la troposphère est aussi un gaz à effet de serre, qui contribue à peu près pour 18% de l'effet de serre "additionnel" (c'est-à-dire qui s'ajoute à l'effet de serre naturel).

Sur l'illustration, nous voyons bien que la couche d'ozone fait à peu près 10 Km.



Sans la couche d'ozone, les rayons ultraviolets nous atteindraient beaucoup plus facilement. Si l'épaisseur de la couche d'ozone diminuait d'1% seulement, il y aurait une augmentation de 4% de cas de cancers de la peau.

## **Qu'est-ce qui cause la diminution de la couche d'ozone ?**

Les CFC (chlorofluorocarbures) sont la plus grande menace pour la couche d'ozone car, quand ils s'échappent dans l'atmosphère, ils se décomposent et provoquent la transformation de l'ozone en oxygène. Les CFC sont émis par les [aérosols](#). D'autres gaz provoquent la diminution de la couche d'ozone comme l'acide nitrique, le [brome](#), le [halon](#), le gaz carbonique.

### **Le trou d'ozone et les chlorofluorocarbones CFC :**

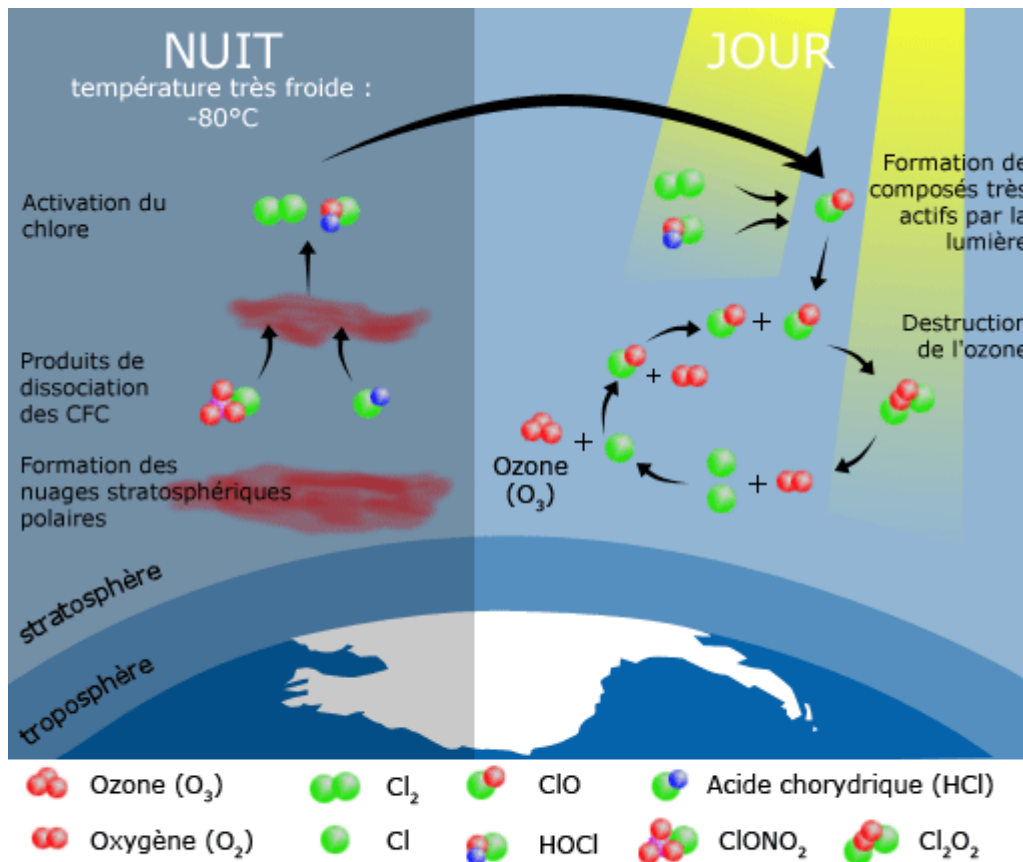
Ces composés ont l'immense avantage de ne pas être nocifs pour la santé, et d'être inertes, c'est à dire qu'ils ne réagissent pas avec les autres composés dans la troposphère (partie de l'atmosphère où nous vivons). C'est pourquoi ils restent très longtemps dans l'air et peuvent s'accumuler. Mais ce que l'homme ne savait pas, c'est que leurs molécules peuvent se casser sous l'effet des ultraviolets du soleil.

### **Que deviennent les CFC dans la stratosphère?**

La couche d'ozone bloque les rayons ultraviolets très énergétiques du soleil, et ceux qui arrivent jusque dans la troposphère sont donc trop faibles pour casser les CFC. Mais comme les CFC ont une durée de vie très longue, ils ont le temps de s'élever jusqu'à la stratosphère, là où les rayons UV sont assez forts pour casser les molécules de CFC et donner ainsi des espèces fluorées et chlorées.

Cependant ces composés chlorés (qui sont les plus mauvais pour l'ozone) peuvent subir aussi d'autres réactions, en fonction des conditions météorologiques, et ne sont donc pas forcément "disponibles" pour nuire à l'ozone. De même, alors que la couche d'ozone se réduit partout à cause de ces composés, le trou d'ozone se forme seulement dans les régions polaires, en





En Antarctique, les températures très froides pendant l'hiver favorisent la création des produits destructeurs de la couche d'ozone. Cependant, comme la destruction nécessite de la lumière, elle se produit pendant le printemps et l'été austral.

## II-6 Conséquences de l'effet de serre :

### II-6-1 A quels types d'impacts faut-il s'attendre à l'avenir ?

Les impacts du changement climatique, et donc leurs coûts économiques, augmenteront au fur et à mesure de la hausse de la température mondiale, et de l'augmentation de la fréquence de certains types d'événements extrêmes.

Les impacts seront particulièrement importants dans différents domaines :

Les phénomènes climatiques aggravés : multiplication de certains événements météorologiques extrêmes (canicules, inondations, sécheresses).

Un bouleversement de nombreux écosystèmes, avec l'extinction possible de 20 à 30% des espèces animales et végétales si la température augmente de plus

de 2.5°C, et de plus de 40% des espèces pour un réchauffement supérieur à 4°C. Ceci aurait des conséquences importantes pour les sociétés.

Des crises liées aux ressources alimentaires : dans de nombreuses parties du globe (Asie, Afrique, zones tropicales et subtropicales), les productions agricoles chuteront, ce qui risque de provoquer des crises alimentaires, sources potentielles de conflits et de migrations.

Des dangers sanitaires : le changement climatique aura vraisemblablement des impacts directs sur le fonctionnement des écosystèmes et sur la transmission des maladies animales, susceptibles de présenter des éléments pathogènes potentiellement dangereux pour l'homme.

Des déplacements de population : l'augmentation du niveau de la mer (18 à 59 cm d'ici 2100) devrait provoquer l'inondation de certaines zones côtières (notamment les deltas en Afrique et en Asie), provoquant d'importantes migrations dont la gestion sera délicate.

## **II-6-2 Les impacts par grands secteurs**

Eau : augmentation de 10 à 40% des risques d'inondations dans les régions humides et diminution de 10 à 30% de la disponibilité en eau dans les régions sèches.

Ecosystèmes : le seuil de 1,5 à 2,5 °C de réchauffement apparaît critique pour le maintien de la biodiversité actuelle. Un réchauffement supérieur entraînera des changements importants dans la structure et la fonction des écosystèmes.

A partir de 2°C de réchauffement, les écosystèmes terrestres risquent de relâcher plus de gaz à effet de serre dans l'atmosphère qu'ils n'en stockeront.

Agriculture et alimentation : le potentiel de production alimentaire devrait croître si l'augmentation de la température locale reste inférieure à un seuil compris entre 1 et 3°C, mais à partir de 3°C de réchauffement, cette productivité diminuera.

Santé : l'accroissement des maladies diarrhéiques, des affections dues aux canicules, inondations, tempêtes, incendies et sécheresses sera couplé à l'augmentation de maladies cardiorespiratoires en raison de niveaux plus élevés d'ozone troposphérique.

### **II-6-3 Les impacts régionaux**

Afrique : un des continents les plus vulnérables à la variabilité et au changement climatique, à cause de multiples pressions et de sa faible capacité d'adaptation (manque d'eau, production agricole sévèrement compromise, malnutrition aggravée...).

Asie : continent aux régions côtières très exposées (inondations côtières) et où la fonte des glaciers de l'Himalaya perturbera les ressources en eau et donc le rendement des cultures entraînant un risque de sous-alimentation très élevé

Régions polaires : glaciers et calottes glaciaires diminueront en épaisseur et en superficie, entraînant une perturbation du mode de vie des populations locales et des écosystèmes.

Petites îles : territoires et populations menacés par la hausse du niveau de la mer et la possible augmentation de l'intensité des tempêtes, réduction des ressources en eau.

Europe : cohérence entre les changements déjà observés et ceux simulés pour le futur (augmentation des inondations à l'intérieur des terres et des inondations côtières, accroissement de l'érosion, réduction de la couverture neigeuse, extinction d'espèces, diminution des précipitations en été, vagues de chaleur), posant problème à de nombreuses activités économiques.

Amérique : au Sud, remplacement progressif de la forêt tropicale par la savane en Amazonie orientale, disparition des glaciers et baisse de la disponibilité de l'eau pour la consommation humaine, l'agriculture et la production d'énergie. Au Nord, incendies, destruction des forêts ; vulnérabilité accrue des zones côtières à forte croissance de population et risque de l'intensité des tempêtes tropicales et des cyclones.

# Chapitre III

## Solutions pour lutter contre l'augmentation de l'effet de serre



### III-1 Introduction

La solution au problème de l'augmentation de l'effet de serre est loin d'être évidente. Il ne suffira pas d'arrêter de produire des gaz à effet de serre pour que le réchauffement de la planète cesse. Dans le meilleur des cas cela permettrait de le stabiliser ou de ralentir sa progression. En effet, le cycle du carbone est un processus lent et même si on arrêta immédiatement de rejeter des gaz à effet de serre - ce qui est très improbable - il faudrait plusieurs centaines d'années avant que l'océan, le sol et les végétaux n'absorbent le dioxyde de carbone excédentaire. En plus de limiter nos rejets de gaz à effet de serre, il faudrait donc pouvoir éliminer ceux que nous avons rejetés dans l'atmosphère depuis plus de deux siècles.

Les principaux gaz à effet de serre sont le méthane, le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote (NOx). Bien qu'il existe des projets pour la diminution des émissions de méthane, par exemple en modifiant la nutrition des bovins, les principaux programmes s'attaquent au dioxyde de carbone. La durée de vie



atmosphérique du dioxyde de carbone peut varier de 50 à 200 ans, tandis que celle du méthane se situe autour de 10-12 ans. Il est donc important de réduire notre production de dioxyde de carbone le plus rapidement possible.

### **III-2 Utiliser moins d'énergie**

Un des moyens les plus évidents pour diminuer les rejets de dioxyde de carbone est d'utiliser moins d'énergie. La lutte contre le gaspillage d'énergie permettra non seulement d'économiser nos ressources et notre argent, mais aussi de ralentir notre émission de dioxyde de carbone.

On peut aussi augmenter l'efficacité au point de consommation. Par exemple, les ampoules halogènes consomment nettement moins d'énergie pour produire la même quantité de lumière, les machines à laver Staber à axe horizontal utilisent moins d'eau et trois fois moins d'énergie que les laveuses traditionnelles, etc. L'utilisation des transports en commun permet également de produire moins de gaz à effet de serre que lorsque chaque voyageur utilise son propre véhicule.

### **III-3 Capturer le gaz carbonique**

Une stratégie complémentaire à la diminution de notre production de gaz à effet de serre serait de capturer le dioxyde de carbone qui est déjà dans l'atmosphère. Le gaz carbonique pourrait ensuite être stocké ou utilisé par l'industrie.

La capture peut s'effectuer à la source de gaz carbonique, par exemple dans les centrales électriques qui utilisent des combustibles fossiles. Plusieurs techniques sont à l'étude. Lorsque la concentration en gaz carbonique est très

haute, il est possible de capturer le gaz carbonique grâce à un processus cryogénique. Si la concentration en dioxyde de carbone est relativement faible, l'utilisation de solvants, tel que le monoethanolamine, est possible. Un aspect important de la capture du dioxyde de carbone dans la production énergétique est que ce processus aura lui-même un coût énergétique. La productivité et la rentabilité des centrales devront être recalculées en fonction de ce coût.

Une fois le dioxyde de carbone capturé, il faudra le stocker. Plusieurs alternatives sont possibles. Le dioxyde de carbone pourrait être injecté dans des puits de pétrole. Cela permettrait d'une part de stocker le gaz carbonique et d'autre part d'augmenter la production du puit. Un projet pilote de démonstration de cette méthode a été démarré à Weyburn (Saskatchewan) en juillet 2000.

Une autre possibilité serait de stocker le dioxyde de carbone dans les océans. Les océans sont déjà les plus grands réservoirs de gaz carbonique de la planète. Leur capacité d'absorption est très grande et pourrait être utilisée pour stocker nos rejets de dioxyde de carbone. Deux stratégies sont envisagées, le gaz carbonique pourrait être injecté sous forme liquide à grande profondeur (plus de 3000 m) ou sous forme gazeuse à profondeur moyenne (+/- 1500 m). Les impacts environnementaux sont encore à l'étude.

#### **III-4 Planter d'arbres et de forêts**

Une autre stratégie pour faire diminuer le taux de dioxyde de carbone atmosphérique serait de planter d'arbres et de forêts qui constituent des « puits de carbone ». Bien exploitées et renouvelées elles participent à la lutte contre le dérèglement climatique : Tant que l'arbre grossit en volume et prend

de la hauteur il prélève du gaz carbonique. Ce gaz, en excès dans l'atmosphère, augmente l'effet de serre et dérègle le climat. Grâce à la chlorophylle et à l'énergie solaire, les feuilles transforment l'eau et le gaz carbonique en bois. Un mètre cube de bois stocke ainsi environ une tonne de gaz carbonique. Les racines et la litière de feuilles qui se transforment en humus sont aussi élaborées à partir du gaz carbonique et le fixent.

En retirant ce gaz carbonique de la circulation un arbre et une forêt, dans un lieu donné, ont donc un impact positif global sur de longues durées. Ainsi, en Provence, on estime qu'un arbre d'espèce locale bien adaptée au sol et bien entretenue, fixera l'équivalent net d'une tonne de carbone (ou 3,7 tonnes de gaz carbonique) après déduction des carburants consommés pour la plantation, les entretiens et la coupe.

En même temps une forêt purifie l'air, retient et nourrit le sol, protège les eaux souterraines, abrite une flore et une faune typiques, produit du miel, des extraits pour la phytothérapie et les produits cosmétiques. Elle alimente les filières du bois et génère des emplois en milieu rural. Elle offre aussi des espaces de détente et de beaux paysages. Dans les zones méditerranéennes une plantation bien entretenue et adaptée au climat et aux sols est moins vulnérable à l'incendie que les friches embroussaillées.

### **III-5 Opter pour Les énergies propres et renouvelables**

Il est également primordial de se tourner vers des techniques de production d'énergie à haut rendement ou d'augmenter le rendement des techniques existantes. Les technologies telles que la production combinée de chaleur et

d'électricité par les centrales conventionnelles ont fait leurs preuves et permettent d'atteindre des taux d'efficacité de 86%.

Les carburants alternatifs qui produisent peu ou pas de dioxyde de carbone pourraient permettre de limiter les émissions des transports. Le remplacement du pétrole par le gaz naturel ou l'hydrogène est actuellement à l'essai dans plusieurs pays.

Les énergies renouvelables pourraient nous permettre de limiter notre dépendance envers la combustion du pétrole, et par conséquent de produire moins de gaz à effet de serre. L'hydro-électricité, l'énergie éolienne, les énergies solaires actives et passives et la biomasse sont les sources d'énergie renouvelables les plus répandues. Ces sources sont considérées comme rentables et matures d'un point de vue commercial. L'énergie nucléaire peut aussi être utilisée comme alternative aux combustibles fossiles. En 1990, 17% de l'électricité produite dans le monde provenait de centrales nucléaires. Cependant, le problème du stockage des déchets radioactifs et la réaction de l'opinion publique face à l'implantation de nouvelles centrales rendent l'expansion de la production nucléaire peu probable.

### **III-5-1 La fusion thermonucléaire, source d'énergie du futur ?**

La fusion nucléaire est un processus où deux [noyaux atomiques](#) s'assemblent pour former un noyau plus lourd. La fusion de noyaux légers dégage d'énormes quantités d'[énergie](#) provenant de l'attraction entre les [nucléons](#) due à l'[interaction forte](#). La fusion nucléaire constitue le mécanisme à l'origine du rayonnement des étoiles et en particulier du Soleil.

Bien que l'énergie libérée par la fusion nucléaire soit considérable, les réactions de fusion ne se produisent pas spontanément, du moins dans les conditions de température et de pression auxquelles nous sommes habitués. Ainsi, la probabilité d'observer une réaction de fusion entre deux noyaux d'hydrogène à la surface de la terre est quasiment nulle. En effet, pour fusionner, les noyaux, qui sont chargés positivement, doivent d'abord vaincre leur tendance naturelle à se repousser. Ceci est possible lorsque la matière est dans des conditions extrêmes comme au cœur du Soleil (pression énorme et température de plusieurs millions de degrés).

La voie de recherche la plus prometteuse et la plus étudiée consiste à maîtriser à très haute température un plasma confiné dans une boîte immatérielle en forme d'anneau créée par des champs magnétiques, appelée « Tokamak ».

### **III-5 -2 La fusion : les avantages du nucléaire sans ses inconvénients**

La fusion présente trois avantages majeurs. D'abord, elle utilise comme combustible le deutérium dont les réserves terrestres sont quasiment inépuisables et le tritium relativement facile à produire ; son exploitation industrielle permettrait donc de résoudre, pour de nombreux millénaires, les problèmes liés à notre approvisionnement énergétique. En effet, les chiffres sont éloquentes : l'exploitation d'une centrale électrique de 1000 MW basée sur la combustion du charbon nécessite de brûler pas loin de 3 millions de tonnes de charbon par an. A même puissance, une centrale fonctionnant sur le principe de la fusion nucléaire ne consommerait qu'un quart de tonne d'un mélange basé pour moitié de deutérium et pour moitié de tritium. Alors que les effets liés à la combustion de combustibles fossiles (charbon et pétrole par exemple) risquent d'altérer à long terme nos conditions de vie, le

développement d'une source d'énergie ne produisant aucun gaz à effet de serre rencontre évidemment un intérêt grandissant.

Le deuxième avantage majeur de la fusion est sans conteste la sécurité inhérente à ce phénomène. D'abord, seule la quantité de combustible nécessaire au fonctionnement du réacteur (à peine quelques grammes) est injectée dans l'enceinte du tokamak. Ainsi, si l'état du réacteur déviait trop des conditions normales d'exploitation, il est très simple de le mettre hors service rapidement. De même, l'injection accidentelle d'éléments indésirables (comme de l'air) dans l'enceinte, stopperait immédiatement les réactions de fusion. En fait, les quantités de plasma qui se trouveront au sein du réacteur seront si faibles qu'un incident, aussi improbable soit-il, ne pourrait jamais entraîner un événement catastrophique du type d'une explosion et limiterait ses effets à la mise hors service du réacteur.

Plus important peut-être est la propreté relative de la fusion nucléaire. En effet, le deutérium est un isotope qui se trouve à l'état naturel et dans une fraction non négligeable dans l'hydrogène qui constitue l'eau. Sa production est donc aisée et non polluante. Le tritium, quant à lui, est un élément radioactif. Il se dégrade en émettant des rayonnements énergétiques. Cependant, son temps de vie, c'est-à-dire la période pendant laquelle il émet des rayonnements potentiellement dangereux, est très courte (de l'ordre de la dizaine d'année). De plus, la réaction de fusion ne génère pas, directement ou indirectement, de sous-produits radioactifs de longs temps de vie. Les interactions entre les neutrons rapides qui s'échappent de l'enceinte du réacteur et les parois génèreront certainement des déchets radioactifs. En fait, une partie importante du tritium consommé dans les réacteurs de fusion

pourrait directement être produite par les interactions entre ces neutrons fortement énergétiques et le lithium constituant certains éléments des parois du réacteur. Ainsi, le seul combustible radioactif serait produit et consommé directement dans le réacteur. De plus, contrairement aux déchets radioactifs liés aux centrales classiques, ceux produits par la fusion auront un temps de vie court. Leur nuisance potentielle pourra alors facilement être gérée par un stockage et une surveillance à court ou moyen terme. Ainsi les déchets de la fusion ne constitueront ni un fardeau ni un danger pour les générations qui nous suivront.

### **III-6 Améliorer le rendement du moteur**

Moins consommer de carburant pour moins polluer ! La solution paraît évidente, pourtant la mise sur le marché de modèles moins gourmands en énergie n'est pas vraiment la norme. La principale source d'économie de carburant est le rendement du moteur (20 % de gain espéré), puis la masse du véhicule (10-15 %), les frottements à l'intérieur du moteur (environ 10 %), l'augmentation du couple spécifique (environ 10 %), puis les frottements et l'aérodynamique générale du véhicule. Mais ces changements nécessitent l'incorporation de technologies très pointues. Les moteurs diesel ont un meilleur rendement et contribuent ainsi à limiter l'effet de serre par rapport au moteur à essence. Ainsi, certains modèles peuvent déjà parcourir 100 kilomètres avec seulement trois litres de carburant. Mais les émissions d'oxydes d'azote (Nox) et de particules des moteurs diesel constituent des sources de pollution, qui en font des alternatives discutées. Si l'on ajoute que l'offre en carburant diesel est limitée, cette solution apparaît globalement insuffisante à long terme.

## **III-7 Le système de dépollution par plasma froid**

### **III-7-1 Définition d'un plasma**

On associe généralement l'idée de plasma à l'image d'un milieu gazeux ionisé à très haute température. Le représentant le plus illustre de cette espèce dénommée "plasma chaud" est le soleil. Il s'agit d'une masse de gaz de très forte densité, dont la température atteint un à plusieurs millions de degrés, et totalement ionisée, c'est à dire composée exclusivement d'ions et d'électrons qui interagissent constamment entre eux sans jamais pouvoir former un atome ou une molécule stable.

### **III-7-2 Plasma froid**

A un niveau beaucoup plus faible de température, on parle de "plasma froid". Il existe cependant une gradation dans la "froideur". Si le gaz est à la pression atmosphérique ou à haute pression, il est assez fortement ionisé, bien qu'il subsiste des atomes et des molécules neutres, et les collisions entre toutes les particules qui le composent sont nombreuses, ce qui tend à homogénéiser la température, à un niveau de l'ordre de 10 000 à 40 000 K. Ce milieu en équilibre thermodynamique local est appelé "plasma thermique". Si au contraire la décharge électrique se produit dans un gaz à faible pression, le milieu reste très faiblement ionisé. Les ions étant peu nombreux (moins de  $10^{-2}$  par espèce neutre), les électrons, qui ont absorbé l'énergie de la décharge, rencontrent essentiellement des molécules non chargées et les "bousculent" un peu, sans toutefois les briser. On obtient alors un milieu très original, caractérisé par deux températures différentes : la température des électrons, qui se situe entre 10 000 et 100 000 K (soit 1 à 10 eV), et celle, prédominante, des molécules et atomes non chargés, qui varie entre la température ordinaire



et quelques centaines de degrés. C'est ce milieu particulier qu'on appelle "plasma froid" dans le langage courant.

Les électrons y possèdent une énergie certes insuffisante pour casser les molécules, mais suffisante pour les faire "vibrer" ou "tourner" ou encore les "exciter" (déplacer un électron périphérique sans l'extraire). Le plasma froid est en fait un générateur de radicaux et d'espèces excités très actifs chimiquement, que seule pourrait créer une activation chimique à très haute température.

### **III-7-3 Traitement des polluants gazeux**

Aujourd'hui, le plasma produit à pression atmosphérique est utilisé pour des applications environnementales et biologiques très diverses (génération d'ozone, dépollution d'air et d'eau, bio-décontamination, traitements de surface, etc). Ces applications sont basées sur les effets chimiques du plasma amorcés par les ions, les électrons, les radicaux et autres particules actives. La combinaison plasma - catalyseur peut considérablement améliorer la qualité et l'efficacité des processus chimiques en jeu. Le plasma généré dans les cavités et les capillarités du catalyseur pourrait améliorer son efficacité pour la destruction des composés gazeux nocifs. Il pourrait prendre le relais du catalyseur lorsque celui-ci donne, seul, de mauvaises performances dues aux conditions (basse température, excès d'oxygène). La combinaison idéale du plasma et du catalyseur a été un véritable défi pour l'amélioration des pots catalytiques des véhicules.

Le système de dépollution par plasma froid ou plasma non-thermique est une solution innovante de traitement des gaz d'échappement. Encore au stade exploratoire, le concept est basé sur la création d'un milieu ionisé en créant un champ électrique pulsé au travers des gaz à traiter. Sous l'effet de ce champ électrique, les molécules de gaz se fragmentent et réagissent plus efficacement sur le catalyseur placé en aval.

Le concept global agit en deux étapes complémentaires. La première est associée au réacteur plasma non-thermique qui produit des électrons hautement énergétiques et des radicaux libres (O, N) qui entrent en collision avec les molécules stables du gaz d'échappement. L'effluent contenant un excès d'oxygène, les réactions chimiques qui découleront de cette modification du milieu conduiront à l'oxydation du NO en NO<sub>2</sub>. La seconde étape fait intervenir un catalyseur spécifique pour compléter la réaction de transformation des molécules polluantes. Ce catalyseur transforme le NO<sub>2</sub> produit par le réacteur plasma froid en azote (N<sub>2</sub>, constituant normal de l'air). Au bilan, ce concept permet de traiter les émissions polluantes, notamment les oxydes d'azote, bien que la composition du gaz d'échappement (riche en oxygène) ne soit pas favorable à leur élimination.

Le système plasma non-thermique n'est pas sensible à l'empoisonnement par le soufre contenu dans le carburant, empoisonnement qui s'accompagne d'une diminution de l'efficacité des catalyseurs conventionnels après plusieurs milliers de kilomètres. Cet impact est particulièrement important pour les constructeurs compte tenu de la sévèrisation des normes internationales vis-à-vis de l'endurance des véhicules.

Contrairement aux catalyseurs conventionnels, le système plasma non-thermique est efficace à haute comme à basse température. Le traitement électrique du gaz est bien sûr efficace à haute température (400°C en diesel et 600°C en essence) mais également pendant les périodes de démarrage du véhicule (températures inférieures à 100°C). Cet avantage est particulièrement intéressant dans la mesure où les émissions d'oxydes d'azote produites au cours de cette phase ne sont pas traitées par les catalyseurs conventionnels.

Enfin, appliqué à l'automobile, le réacteur qui produit le plasma non-thermique se positionne dans la ligne d'échappement, sous le châssis. Sur les motorisations du groupe PSA Peugeot Citroën, il est associé à un catalyseur spécifique et au filtre à particules développé par le Groupe. L'objectif est de réduire les émissions d'oxydes d'azote et d'agir sur les suies produites en diesel pour assister la régénération du filtre à particules.

## **Conclusion générale**

L'effet de serre est un phénomène naturel provoqué par des gaz contenus dans l'atmosphère, appelés gaz à effet de serre ayant la capacité à piéger le rayonnement infrarouge qui arrive vers la terre.

Ce phénomène maintient la température clémente indispensable à la vie sur terre. Mais, lorsque la concentration de gaz à effet de serre augmente, le piégeage du rayonnement infrarouge serait plus efficace, et il y aura une chaleur supplémentaire sur la surface terrestre menaçant la vie d'humanité.

On vu dans ce mémoire que nous sommes responsables de l'excès de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et du réchauffement climatique, il est donc de notre devoir de réduire nos émissions de gaz à effet de serre.

Nous avons évoqué dans ce mémoire les causes responsables de l'effet de serre également, nous avons proposé quelques solutions possibles, pour lutter contre l'effet de serre.

Il est toutefois du rôle de chaque citoyen de faire les efforts nécessaires pour diminuer la pollution atmosphérique, il faut unir les efforts des différents pays.

## SOMMAIRE

<i>Introduction Générale.....</i>	<i>1</i>
<i>Chapitre 1: Généralités sur les transferts thermiques</i>	
<i>I-1 Introduction.....</i>	<i>2</i>
<i>I-2 Définitions.....</i>	<i>3</i>
<i>I-2-1 Champ de température.....</i>	<i>3</i>
<i>I-2-2 Gradient de température.....</i>	<i>4</i>
<i>1.2.3 Flux de chaleur.....</i>	<i>4</i>
<i>I-3 les modes de transferts thermiques.....</i>	<i>5</i>
<i>I-3-1 conduction.....</i>	<i>5</i>
<i>I-3-2 Convection .....</i>	<i>6</i>
<i>I-3-3 Rayonnement.....</i>	<i>7</i>
<i>1-4 Le rayonnement solaire .....</i>	<i>8</i>
<i>1-5 Le bilan radiatif terrestre.....</i>	<i>11</i>
<i>1-6 Évaluation des flux d'énergie à la surface de la terre.....</i>	<i>14</i>
<i>1-6-1 Bilan en régime permanent.....</i>	<i>14</i>
<i>1-6-2 Bilan en régime transitoire.....</i>	<i>17</i>
<i>Chapitre 2 : Effet de serre : causes et les conséquences</i>	
<i>II-1 Introduction .....</i>	<i>19</i>
<i>II-2 Le mécanisme responsable de l'effet de serre .....</i>	<i>19</i>
<i>II-3 Les causes à effet de serre .....</i>	<i>21</i>

<i>II-4 Gaz à effet de serre .....</i>	<i>23</i>
<i>II-5 L'effet de serre et la couche d'ozone .....</i>	<i>28</i>
<i>II-6 Conséquences de l'effet de serre .....</i>	<i>32</i>
<i>II-6-1 A quels types d'impacts faut-il s'attendre à l'avenir ?.....</i>	<i>32</i>
<i>II-6-2 Les impacts par grands secteurs .....</i>	<i>33</i>
<i>II-6-3 Les impacts régionaux .....</i>	<i>34</i>
 <i>Chapitre 3 : Solutions pour lutter contre l'augmentation</i> <i>de l'effet de serre</i>  	
<i>III-1 Introduction.....</i>	<i>36</i>
<i>III-3 Capturer le gaz carbonique.....</i>	<i>36</i>
<i>III-4 Planter d'arbres et de forêts.....</i>	<i>38</i>
<i>III-5 Opter pour Les énergies propres et renouvelables.....</i>	<i>39</i>
<i>III-5-1 La fusion thermonucléaire, source d'énergie du futur ?.....</i>	<i>40</i>
<i>III-5 -2 La fusion : les avantages du nucléaire sans ses inconvénients.</i>	<i>41</i>
<i>III-6 Améliorer le rendement du moteur.....</i>	<i>43</i>
<i>III-7 Le système de dépollution par plasma froid.....</i>	<i>43</i>
<i>III-7-1 Définition d'un plasma.....</i>	<i>43</i>
<i>III-7-3 Traitement des polluants gazeux.....</i>	<i>45</i>
<i>Conclusion Générale.....</i>	<i>48</i>