

# Bilan énergétique – effet de serre – couche d’ozone

## Energie incidente au sommet de l’atmosphère

Selon la théorie du corps noir, tout objet dont la température est supérieure au 0 absolu (0K) rayonne. Le flux d’énergie qui s’échappe de la surface d’un objet dépend de sa température. Ceci est exprimé par la loi de Stéfán-Boltzmann :

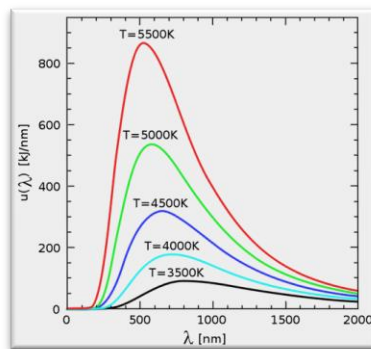
$$\phi = \sigma T^4$$

$\phi$  = énergie émise sous forme de rayonnement par unité de surface (W/m<sup>2</sup>),

$\sigma$  = cste universelle dite de Stéfán-Boltzmann =  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

T = tp°C en degré Kelvin (K)

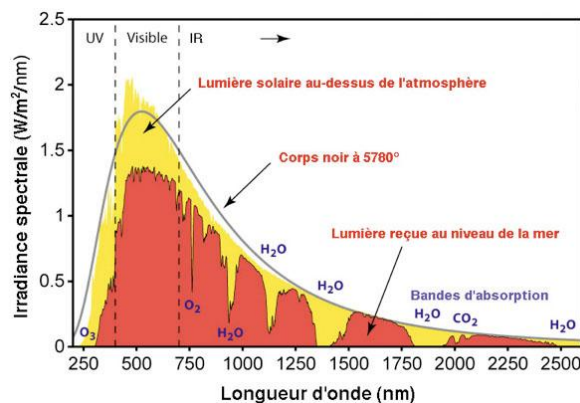
De plus, le rayonnement émis est caractérisé par un spectre dont la distribution énergétique en fonction de la longueur d’onde ( $\lambda$ ) dépend étroitement de la température (voir figure).



La loi de Wien indique la  $\lambda$  principale du rayonnement émis ( $\lambda$  du pic) :

$$\lambda_{E_{\max}} = 2.898 \cdot 10^{-3} / T$$

Si l’on mesure le spectre lumineux arrivant au sommet de l’atmosphère, en provenance du soleil, on s’aperçoit qu’il correspond à l’émission d’un corps à 5780K.



On peut donc calculer l’Energie totale émise par le soleil :

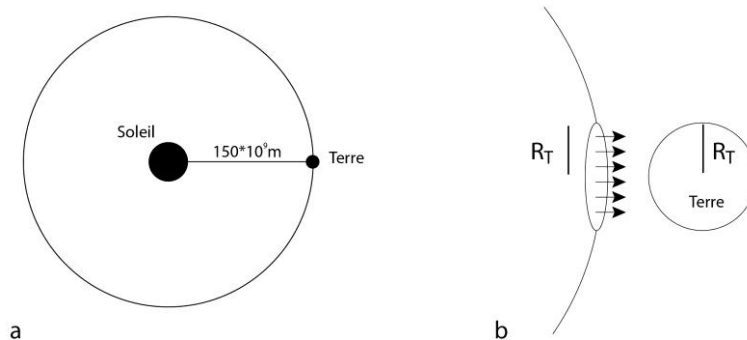
$$E_s = \phi \cdot S = \phi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R_s^2 = 4 \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot \pi \cdot R_s^2 = 3.8 \cdot 10^{26} \text{W}$$

Avec  $R_s$  le rayon solaire = 700000km.

A une distance  $R_{TS}$  (distance Terre-Soleil), cette énergie est redistribuée sur une sphère de rayon  $R_{TS}=150*10^6$ km. L'énergie par unité de surface de cette sphère correspond à l'énergie par unité de surface arrivant au sommet de l'atmosphère terrestre :

$$E = 3.8*10^{26}/(4*\pi*(150*10^9)^2) = 1370 \text{ W/m}^2$$

Ce  $1370 \text{ W/m}^2$  est appelé « constante » solaire. En fait, elle n'est pas tout à fait constante. Depuis une trentaine d'années les satellites mesurent des variations de l'ordre de 0.1%. Les variations les plus importantes s'opérant avec un cycle de 11 ans (en lien avec les tâches solaires).

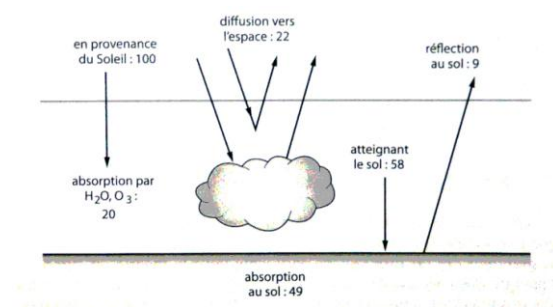


Pour connaître l'Énergie moyenne ( $E_m$ ) disponible sur Terre en provenance du soleil, on calcule l'énergie passant au travers d'un disque de rayon équivalent au rayon terrestre  $R_T$  et on redistribue cette énergie sur toute la surface de la Terre :

$$E_m = E*\pi*R_T^2/(4*\pi*R_T^2)=E/4=1370/4 = 342 \text{ W/m}^2$$

### Absorptions et réflexions dans l'atmosphère

En comparant le spectre lumineux mesuré au sommet de l'atmosphère à celui enregistré au niveau des océans, on voit qu'une partie de l'énergie a été absorbée, dans des longueurs d'ondes bien particulières. Ces « trous » dans le spectre correspondent principalement à l'absorption par les molécules d' $O_3$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ... (voir en exemple le paragraphe sur l'absorption des UV par l' $O_3$ ). Ces absorptions représentent 20% des  $342 \text{ W/m}^2$  disponibles au sommet de l'atmosphère.



Les phénomènes de réflexion sur les nuages et les particules présentes dans l'atmosphère renvoient 22% du rayonnement solaire vers l'espace. 58% ( $100-22-20$ ) atteignent donc la surface du globe. Mais à l'échelle du globe, environ 9% sont réfléchis (-> Albédo). Donc seuls 49% de l'énergie incidente au sommet de l'atmosphère atteint le sol et est absorbée pour réchauffer celui-ci.

Le pouvoir de réflexion d'un corps est appelé Albédo. L'albédo est défini comme l'Energie réfléchie sur l'Energie incidente. L'albédo moyen de la Terre, au niveau du sol est :

$$A_{\text{sol}} = 9/58 = 15\%$$

L'albédo du sol dépend de sa nature. Un sol recouvert de neige a un albédo >90%. Un désert sableux, 30 à 50%, la végétation 10 à 25%.

L'Albédo global du système Terre+Atmosphère est :

$$A_{\text{T-A}} = (22+9)/100 = 31\%$$

Rq : Cet albédo global est difficile à évaluer dans les modèles climatiques car il dépend étroitement de la couverture nuageuse.

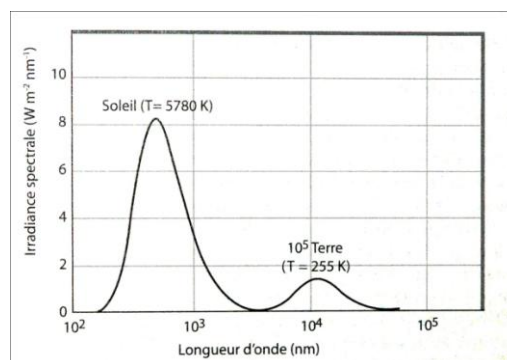
### Emission en Infra Rouge par la Terre et effet de serre

On vient de voir que 342W/m<sup>2</sup> sont disponibles au sommet de l'atmosphère. 49% sont absorbés par le sol et 20% sont absorbés par l'atmosphère soit un total de 236W/m<sup>2</sup> absorbés par le système Terre-Atmosphère (syst T-A). Lorsqu'un corps absorbe de l'énergie, sa température doit augmenter. Or la Terre, hormis les variations climatiques de faible amplitude, a une température globalement constante depuis des centaines de millions d'années. Ceci veut dire qu'il y a un équilibre radiatif et que le syst.T-A réémet autant d'Energie qu'il n'en reçoit. On peut calculer la température de réémission :

$$T = (E/\sigma)^{1/4} = (236/5.67 \cdot 10^{-8})^{1/4} = 255\text{K} \text{ soit } -18^\circ\text{C}$$

-18°C est la température de réémission du syst T-A. C'est la température que l'on trouve à environ 5 km d'altitude. Au sol, la température est différente. Elle est d'environ +15°C. Pourquoi une température si élevée au sol ? Calculons l'énergie émise par un sol à +15°C :

$E = \sigma T^4 = 390\text{W/m}^2$ . Le sol émet plus que ce qui va effectivement repartir vers l'espace pour équilibrer le bilan énergétique (236W/m<sup>2</sup>). Le sol émet plus, tout simplement car une partie de ce qui est émis par le sol est absorbé par l'atmosphère et ne part pas vers l'espace. La différence entre le 390 et le 236 correspond à l'effet de serre. A +15°C, la terre a un spectre d'émission dans l'Infra Rouge.



Or les molécules de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> absorbent une partie de ce rayonnement IR émis. **C'est l'effet de serre.** Si l'atmosphère ne contenait pas ces molécules et qu'il n'y avait pas d'effet de serre, le bilan énergétique serait assuré par une émission depuis le sol de 236W/m<sup>2</sup>. En d'autres termes, sans effet

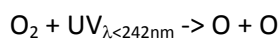
de serre, la température au sol serait de  $-18^{\circ}\text{C}$ . Donc merci l'effet de serre ! (comme quoi, même si on en parle toujours de manière négative en ce moment car il est responsable du réchauffement climatique, l'effet de serre est avant tout indispensable à la vie sur Terre...).

### Absorption des UV par l'Ozone

L'ozone atmosphérique est fondamental pour la vie sur Terre car il protège des rayons UV en provenance du soleil. Il existe une zone située dans la stratosphère où la concentration en ozone est plus importante : c'est la couche d'ozone.

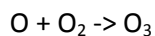
Comment l'ozone nous protège-t-il et pourquoi existe-t-il une « couche » d'ozone ?

Lorsque les molécules d' $\text{O}_2$  sont soumises à un rayonnement ultraviolet de  $\lambda < 242\text{nm}$ , il se produit une photodissociation :



Il se crée des atomes libres d'O et les UV  $< 242\text{nm}$  sont absorbés. Or c'est au sommet de l'atmosphère que les UV sont les plus abondants (car non encore filtrés). En revanche, au sommet de l'atmosphère, les molécules d' $\text{O}_2$  sont rares (toutes les molécules sont rares...). Au fur et à mesure que les UV traversent l'atmosphère, ils sont de moins en moins nombreux, donc le taux de dissociation des  $\text{O}_2$  diminue. En revanche, comme il y a de plus en plus de molécules présentes dans l'atmosphère, la quantité totale d' $\text{O}_2$  dissociée (et donc d'O libres créés) augmente. C'est vers 30-40km d'altitude que la combinaison entre qté d' $\text{O}_2$  et UV disponibles produit le plus d'O libres (voir courbes).

Or les O libres peuvent se recombinaison avec les molécules d' $\text{O}_2$  pour former de l'ozone :



C'est donc vers 30-40 km , que l'on retrouvera le maximum d' $\text{O}_3$ . C'est la couche d'ozone.

La molécule d' $\text{O}_3$  a une durée de vie très courte car elle va subir elle aussi une photodissociation qui va absorber les UV $<320\text{nm}$  :



Cette dissociation absorbe la quasi-totalité des UV $<320\text{nm}$ . Dissociation de  $\text{O}_2$  et  $\text{O}_3$  ont donc un pouvoir de filtration très important des UV. C'est ce qui nous protège.

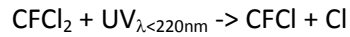
### Trou dans la couche d'ozone

→ Problème des CFC (Chlorofluorocarbures) :

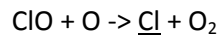
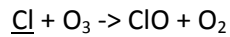
Ils sont utilisés dans les réfrigérateurs, climatiseurs etc...jusque dans les années 2000. Les CFC ont une durée de vie assez longue dans la troposphère car ils ne sont pas lessivés par les pluies (ils ne se dissolvent pas dans l'eau). Certains atteignent donc la stratosphère par le jeu des courants atmosphériques.

Arrivés dans la stratosphère, les CFC sont exposés aux UV et les UV $<220\text{nm}$  vont entraîner la formation de Chlore libre :



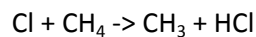


Cette réaction n'a lieu qu'à partir de 30-40km, quand les UV sont encore disponibles, c'est à dire, en plein dans la couche d'ozone... Or le Cl détruit l'ozone de cette façon:



Le bilan de ces 2 réactions successives est la disparition d'une molécule d'O<sub>3</sub> tout en conservant le Cl intact. Le Cl peut donc détruire beaucoup d'autres molécules d'O<sub>3</sub>... D'où une destruction accrue des O<sub>3</sub> sans filtration des UV<320nm...le trou dans la couche d'ozone se forme.

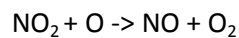
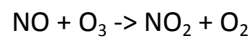
Ce qui est problématique avec le chlore, c'est qu'il peut rester très longtemps dans la stratosphère. Pour être évacué il doit d'abord être combiné à du méthane CH<sub>4</sub> :



Une fois le HCl formé, il suffit (cela peut être très long...), par le jeu de courants atmosphériques, qu'il redescende dans la stratosphère où il y a de l'eau. Le HCl étant très soluble, il pourra être facilement lessivé par les pluies (qui auront tendance à être acidifiées...).

➔ Problème du monoxyde d'azote NO

Contrairement aux CFC, le monoxyde d'azote est soluble dans l'eau où il forme des composés de type HNO<sub>3</sub>. Donc, tant qu'il est libéré dans la troposphère, il n'est pas problématique. En revanche s'il est libéré dans la stratosphère où l'eau est quasi-absente, il peut devenir néfaste pour l'ozone, selon le même mécanisme que le Cl :



Comme pour le Cl, le bilan est une disparition d'O<sub>3</sub> mais le NO reste intact...

Le NO est un produit de combustion libéré par les avions. Tant qu'ils volent dans la troposphère, ce n'est pas un pb (cas de la plupart des avions qui volent au sommet de la troposphère ou base de la stratosphère). En revanche le développement d'une flotte d'avions stratosphériques deviendrait problématique (ex : le concorde...)