# TD 1 - Bilan Radiatif à la surface de la Terre - Correction

## Corps Noir

Le corps noir est un objet idéal qui absorberait toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit, sans en réfléchir ou en transmettre. Il n'est fait aucune autre hypothèse sur la nature de l'objet. La lumière étant une onde électromagnétique, elle est absorbée totalement et l'objet devrait donc apparaître noir, d'où son nom.

D'après la loi de Stefan-Boltzmann, la densité de flux d'énergie $M^o$ (en $W.m^{-2}$) émis par le corps noir varie en fonction de sa température $T$ (exprimée en kelvin) selon la formule:

$$M^o(T) = \sigma T^4$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67.10^{-8}\ J.K^{-4}.m^{-2}.s^{-1}$). Un corps rayonne d'autant plus qu'il est plus chaud.

La **loi de Planck** définit la distribution de luminance énergétique monochromatique du rayonnement thermique du corps noir en fonction de la température thermodynamique.

Le maximum de la loi de Planck est fonction de la temperature. :

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{4,965 \cdot kT} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T}$$

avec $\lambda_{max}$ en mètres et $T$ en kelvins. Cette loi (la loi de Wien) exprime le fait que pour un corps noir, le produit de la température et de la longueur d'onde du pic de la courbe est toujours égal à une constante. Cette loi très simple permet ainsi de connaître la température d'un corps assimilé à un corps noir par la seule forme de son spectre et de la position de son maximum.

## Constante Solaire

1. Par quel mécanisme l'énergie produite par le Soleil est-elle transportée jusqu'aux planètes ?

*La chaleur produite par la fusion nucleaire de l'hydrogène au coeur du Soleil traverse de nombreuses couches jusqu'à sa surface (photosphère) pour y être libérée sous forme de rayonnement solaire ou de flux de particules. Ces particules sont essentiellement des photons, la chaleur du Soleil étant convertie en lumière à sa surface. Ce flux de photon forme des ondes électromagnétiques qui se propagent sans perte d'énergie dans toutes les directions de l'espace, et notamment vers la Terre.*

2. Repérer la longueur d'onde approximative du maximum dans le spectre solaire. Délimiter la partie visible du spectre.

*Le maximum d'émission lumineuse du Soleil se situe à une longueur d'onde d'environ 0.5 µm. La partie visible du spectre est comprise entre 0.38 et 0.78 µm (du violet au rouge). Le Soleil émet donc la plus grande partie de son rayonnemement dans le visible (le jaune plus exactement).*

3. En évaluant la surface sous cette courbe, on estime la constante solaire C, qui représente l'éclairement produit par le Soleil sur une surface de $1m^2$ placée au sommet de l'atmosphère terrestre perpendiculairement au rayon lumineux.
   On peut également la déterminer de façon plus approximative : Le Soleil émet un rayonnement thermique qui peut être modélisé par celui d'un corps noir à une température Ts. La longueur d'onde du maximum d'émission se situe vers $\lambda$max = 0.50 µm.

   La loi de Wien rend compte du fait que le maximum d'émission se déplace sur le spectre en fonction de la température (plus une étoile est chaude, et plus elle est bleu; plus elle est froide, et plus elle apparaît rouge). On a $\lambda$max .Ts = 2900 µm.K.

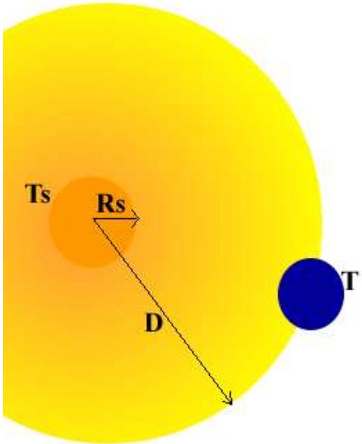
   Que vaut Ts ?

*D'après la loi de Wien, $\lambda$max .Ts = 2900 µm.K*
*On connait $\lambda$max, elle vaut environ 0.5 µm.*
*On a donc Ts = 2900/$\lambda$max = 2900 / 0.5 (la constante est exprimée en µm.K, $\lambda$max doit être exprimée en µm aussi)*
*D'ou Ts = 5800 K*

- Le rayon du Soleil vaut 700 000 km, la distance Venus-Soleil D est d'environ $1.08.10^{11}$m. Quelle est la puissance rayonnée par le soleil, par unité de surface, tout d'abord à la surface du Soleil, puis au niveau de la planète Venus (Aidez vous d’un dessin) ? On obtient ainsi la constante solaire venusienne Cv.

*On veut déterminer la puissance par unité de surface (donc en $W.m^{-2}$) reçue à une distance de 108 000 000 km du Soleil.*
*On procède par étape.*
*Afin de calculer la puissance émise par le Soleil, par unité de surface, on utilise la loi de Stefan, qui donne la puissance émise par un corps noir, pour chaque m2 de sa surface (c'est exactement ce qu'on cherche)*
*On a $Es=\sigma.Ts^4$.*
*Ts = 5800 K d'après la question précédente.*
*D'où $Es = 5.67.10^{-8} . 5800^4 = 6.4.10^7 W.m^{-2}$.*

*Regardons maintenant le schéma suivant (la planète bleue appelée T est Venus), il faut bien sur le voir en 3d.*




*La surface du Soleil étant une sphère, sa puissance est émise dans toutes les directions de l'espace, à partir de la surface solaire ou elle vaut 6.4.107 $W.m^{-2}$.*
*Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique, par conséquent cette puissance ne se dissipe pas pendant sa propagation dans l'espace.*
*La puissance totale émise par le Soleil, celle qui sort du Soleil de rayon 700 000 km, est donc la même que celle qui sort de la sphère géante qui a pour rayon la distance Terre-Soleil. Par contre, cette mégasphère ayant une surface plus grande que la surface du Soleil, la puissance totale émise par le Soleil sera distribuée sur une surface plus grande, et donc la valeur de la puissance par unité de surface (en $W.m^{-2}$) sur cette mégasphère sera plus faible (Voyez la couleur qui diminue). C'est cette valeur que l'on veut calculer.*

*Commencons donc par calculer la puissance totale émise par le Soleil.*

$P_{totale} = Es \,.\, Surface_{Soleil} = Es \,.\, 4 \,.\, \pi \,.\, R_{Soleil}{}^{2}$

$= 6.4.10^{7} \,.\, 4 \,.\, \pi \,.\, (700\,000 \,.10^{3})^{2}$

$= 3.94.10^{26}$ W *ce qui fait environ 400 YottaWatts.*

*Le Soleil émet une puissance totale de 400 YottaWatts.*

*Cette puissance étant émise à la surface d'une sphère, ellle va se propager sous forme de sphère de plus en plus grande. A la distance Terre-Soleil d, cette puissance totale sera donc distribuée sur une sphère de rayon d. La valeur de cette puissance pour chaque mètre carré de la surface de cette sphère de rayon d sera donc :*

$C = P_{totale} \,/\, Surface_{Mégasphère}$

$= P_{totale} \,/\, (4 \,.\, \pi \,.\, D_{2})$

$= 3.94.10^{26} \,/\, (4.\, \pi \,.\, (1.08.10^{11})^{2})$

$= 2688\ W.m^{-2}$

*Cette valeur est la constante solaire venusienne.*

*On obtenait directement le bon résultat en faisant le rapport des surfaces des sphères (c'est finalement la même idée) :*

$C = Es \,.\, Surface_{Soleil} \,/\, Surface_{Mégasphère}$

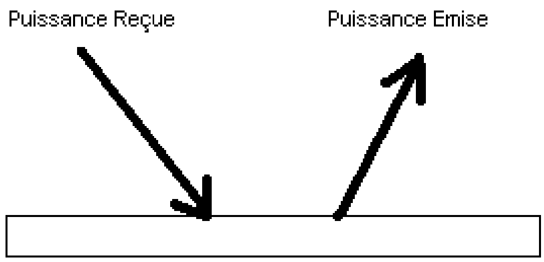
$= Es \,.\, (4 \,.\, \pi \,.\, Rs^{2}) \,/\, (4 \,.\, \pi \,.\, D^{2})$

$= Es \,.\, (Rs/D)^{2}$

**Le Bilan Radiatif de Venus**

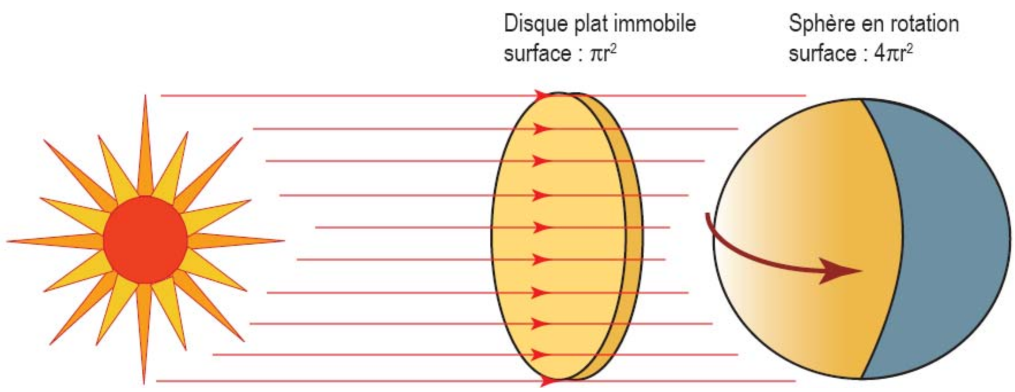
1. Faire un schéma très simplifié du bilan énergétique d'une planète sans atmosphère en considérant que l'équilibre radiatif est atteint (i.e. que l'énergie rayonnée est égale à l'énergie reçue).

*La puissance émise est égale à la puissance reçue, le bilan radiatif d'une planète ssansa*




*atmosphère est très simple.*

2. Le flux solaire reçu au sommet de l'atmosphère venusienne par une surface perpendiculaire aux rayons solaires a pour valeur Cv = 2800 W.m$^{-2}$.
   Calculer la valeur de la constante solaire par unité de surface venusienne. (Faire un schéma serait plus simple)




*Comme le montre la figure, Venus intercepte un disque de rayonnement solaire. Ce disque est de rayon égal à celui de Venus. A la surface de ce disque, situé à la distance Venus-Soleil du Soleil, on sait que la puissance reçue du Soleil est Cv (2800 W.m$^{-2}$), la puissance totale reçue par Venus vaut donc Cv multipliée par la surface de ce disque. Cette puissance va être répartie sur la totalité de la surface de Venus. La valeur de la constante solaire par unité de surface terrestre sera donc :*

$CV = Cv.\ Surface_{Disque} / Surface_{Venus}$

$= Cv\ .\ \pi\ .\ R_T^2\ /(4.\ \pi.\ Rv^2)$

$= Cv / 4$

$= 700\ W.m^{-2}$

*La constance solaire par unite de surface venusienne vaut donc 700 W.m$^{-2}$.*

3. L'ensemble Venus-Atmosphère présente vis à vis du rayonnement solaire l'albédo moyen A = 0.70.
   - Qu'est-ce que l'albédo ?
   - Calculer le flux moyen réellement absorbé par Venus.

*La fraction du rayonnement solaire incident réfléchie sans être absorbée est appelée l'albédo. Sur Terre par exemple, 30 % du rayonnement solaire est donc réfléchi sans être absorbé (~20 % par les nuages, 10 % par les surface gelées environ).*

*Considérant un albédo de 0.7, le flux solaire réellement absorbé par Venus est donc:*
$F_{abs} = CV - CV . A = CV. ( 1 - A ) = 700 . 0.3 = 210 W.m^{-2}$
*Le flux moyen réellement absorbé par Venus est donc de 210* $W.m^{-2}$.

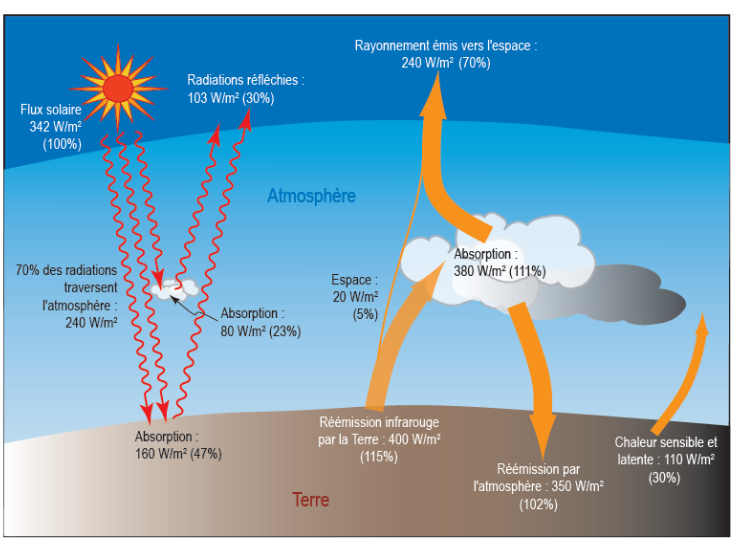
4. Le flux d'énergie rayonnée par le soleil reçu par la surface de Venus vaut : P = 210 $W.m^{-2}$. Comme tout corps de température non nulle, Venus perd de l'énergie par rayonnement.
   - Calculer la température moyenne à la surface de Venus en la considérant comme un corps noir. On suppose que l'équilibre radiatif est atteint.
   - Que pensez vous du résultat ? Quelle est la « vraie » température moyenne à la surface de Venus ? Quel ingrédient avons nous oublié ?

*Venus est en équilibre radiatif, ce qui signifie qu'elle émet autant de rayonnement qu'elle en absorbe. Elle émet donc vers l'espace 210* $W.m^{-2}$*. Si on la considère comme un corps noir, on peut utiliser la loi de Stefan (*$E=\sigma T^4$*) pour determiner sa température.*
*On a* $T_T = (E/\sigma)^{1/4} = (210/5.67.10^{-8})^{1/4}$ *=246K soit environ -26°C.*
*La Température d'équilibre de la Terre est donc de -26°C*

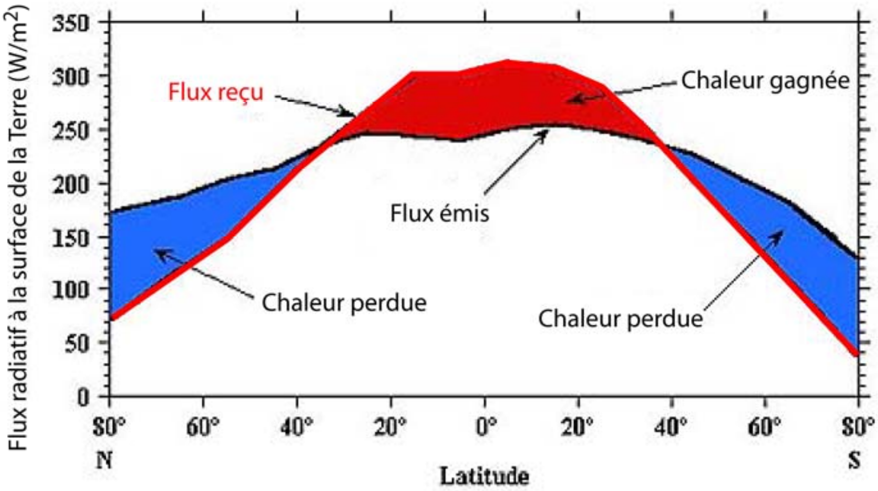
*Ce résultat implique une Venus totalement gelée en surface, ce qui n'est pas le cas. La température moyenne à la surface de Venus est d'environ 450 °C. La différence s'explique par l'effet de serre.*

5. Faire un schéma simplifié du bilan radiatif de Venus en tenant compte des questions précédentes.

*Voila le bilan radiatif de la Terre (C'est la meme chose pour Venus, mais avec les valeurs calculées dans cet exercice).*



**Inégalité de l'apport d'énergie solaire**




*Distribution latitudinale moyenne annuelle des flux radiatifs émis et reçu à la surface de la Terre*

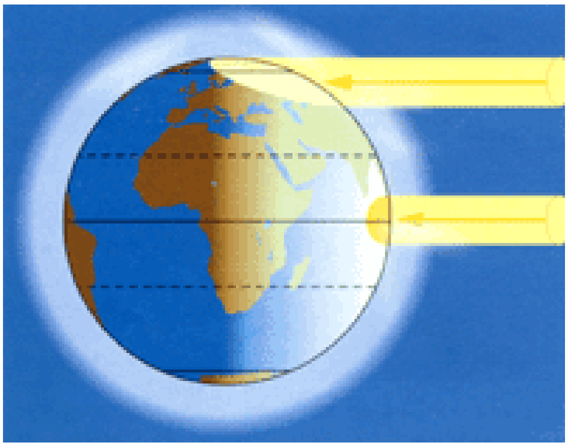
Toutes les données exprimées précédemment sont des données moyennes, applicables au système atmosphérique global. Les équilibres dynamiques globaux (flux entrant et sortant, transfert d'énergie), constituent la somme d'une infinité de déséquilibres locaux constamment en évolution.

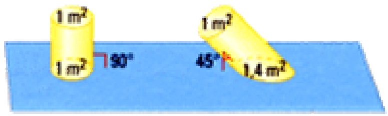
1. Observez la distribution latitudinale moyenne annuelle de l'insolation reçue par le système Sol-Océan-Atmosphère. Qu'observe-t-on ?

*On constate une inégalité de la distribution. La zone comprise entre 40°N et 40°S reçoit beaucoup plus d'énergie que les zones de plus grande latitude.*

2. Quelles peuvent être selon vous les causes des variations latitudinales des entrées d'énergie solaire dans le système atmosphérique (encore une fois il va être plus facile de visualiser la réponse à l'aide d'un schéma très simple) ?

*Les variations latitudinales des entrées d'énergie solaire dans le système atmosphérique sont principalement dues à la valeur de l'angle d'incidence du rayonnement solaire à la surface de la Terre. D'une part, la quantité d'énergie reçue aux poles est moindre car la surface sur laquelle est reçue une même quantité de radiations aux poles et à l'équateur est plus grande aux poles (cf schéma). D'autre part, le rayonnement doit traverser une plus grande quantité d'atmosphère, par conséquent la réflexion et l'absorption-réémission augmentent dans les régions polaires contribuant largement au caractère glacé du climat.*



| **Localisation** | **Équateur** | **Bordeaux** | **Oslo** | **Pôle Nord** |
|---|---|---|---|---|
| Latitude | 0° | 45°N | 60°N | 90°N |
| Angle d'incidence* | 90°N | 45° | 30° | 1° |
| Surface recevant l'énergie | 1 $m^2$ | 1,4 $m^2$ | 2 $m^2$ | 57 $m^2$ |
| **Le faisceau de lumière** |  | | | |

3. Observez à présent la distribution du flux infrarouge émis par la planète. Proposez un phénomène responsable des différences de distribution latitudinales entre ce flux et le flux entrant.

*Le flux infrarouge émis par la Terre ne présente pas autant de variations entre les poles et l'équateur. L'inégale répartition de l'énergie solaire reçue par la Terre, à l'origine des climats, provoque un déplacement de la chaleur des zones excédentaires équatoriales vers les plus hautes latitudes déficitaires. Ce transfert d'énergie calorifique est assuré par les vents et le cycle de l'eau. De plus, les océans, importants régulateurs thermiques, emmagasinent, transportent et restituent en partie leur chaleur à l'atmosphère. Cette circulation générale de l'air est compliquée par la rotation de la Terre.*

**Atmosphère, Atmosphère …**

La pression atmosphérique à la surface de la Terre vaut $P_0=10^5$ Pa et la densité moyenne de l'air $\rho_{air}=1.2$ $kgm^{-3}$. On rappelle que la pression exercée à la profondeur h par un fluide au repos s'écrit :

$$\Delta P = \rho g H$$

1. Estimez l'épaisseur de l'atmosphère.

*D'après la formule donnée plus haut on a $\Delta P=\rho.g.h$*
*A la base de l'atmosphère, $P_0 = 10^5$ Pa, au sommet de l'atmosphère P = 0 Pa.*
*Par conséquent, considérant la colonne atmosphérique, on a $\Delta P = P-P_0 = 10^5$ Pa.*
*g est l'accélération de gravité et vaut 9.81 $m.s^{-2}$*
*On a donc $h = \Delta P / ( \rho.g )$*
*$= 10^5 / (1.2 . 9.81)$*
*= 8494 m*
*D'après ce calcul, l'atmosphère aurait une épaisseur de 8.5 km.*

2. Comparez avec le rayon de la Terre.

*Le rayon de la Terre est de 6370 km.*
*L'épaisseur de l'atmosphère correspond donc a 0.1% du rayon terrestre.*

3. L'épaisseur de la couche atmosphérique varie en fait entre 50 et 100 Km. Quel effet avons nous négligé dans notre calcul ?

*Ce calcul ne permet effectivement pas de déterminer la véritable épaisseur de l'atmosphère mais plutôt ce qu'on appelle <u>la hauteur d'échelle de l'atmosphère.</u>*
*Dans ce calcul très simple, nous avons négligé la variation de g avec l'altitude.*

4. Le tableau ci-dessous donne la composition de l'atmosphère. Calculer la masse de gaz à effets de serre contenue dans l'atmosphère, sachant que la masse de cette dernière est $5,13.10^{18}$kg.

| GAZ | Concentration en volume (ppmv) | Concentration en masse (ppm) |
|---|---|---|
| $N_2$ | 781000 | 755000 |
| $O_2$ | 209500 | 231500 |
| Ar, Ne et Kr | 94000 | 13000 |
| $CO_2$ | 370 | 616 |
| He | 5 | 1 |
| $CH_4$ | 1 | 1 |
| $H_2$ | 0,5 | 0,05 |

*Calculons la masse totale de CH4 dans l'atmosphère :*
*$M_{CH4}=[CH_4]_{masse} . Masse_{Atmosphère}$*
*$= 1.10^{-6} . 5.13.10^{18} = 5.13.10^{12}$kg*
*La masse totale de $CH_4$ dans l'atmosphère est de l'ordre de $5.10^{12}$ kg*

*De la même façon on peut calculer la masse totale de CO2 dans l'atmosphère*
*$M_{CO2}=[CO_2]_{masse} . Masse_{Atmosphère}$*
*$= 616.10^{-6} . 5.13.10^{18} = 3.16.10^{15}$kg*
*La masse totale de $CO_2$ dans l'atmosphère est de l'ordre de $3.10^{15}$ kg, soit 1000 fois plus que le $CH_4$.*