

### Conservation de l'énergie : bilan d'énergie

L'énergie est une grandeur qui se conserve.

Ainsi, on peut effectuer un bilan d'énergie sur tout système, sur une durée  $\Delta t$  :

$$\text{variation d'énergie} = E_{\text{finale}} - E_{\text{initiale}} = E_{\text{reçue}} - E_{\text{cédée}}$$

En divisant cette égalité par la durée  $\Delta t$  considérée, on obtient un bilan de puissance :

$$\frac{\text{variation d'énergie}}{\Delta t} = P_{\text{reçues}} - P_{\text{cédée}}$$

### Notion d'équilibre dynamique

Plusieurs cas sont alors possibles :

#### Le système est isolé.

Il ne reçoit pas d'énergie de la part de son environnement, et il n'en cède pas; alors sa variation d'énergie est nulle. Pour autant, il est possible que l'énergie qu'il contient change de nature, en raison de transformations physico-chimiques ou nucléaires : c'est le cas d'un bécher dans lequel se produit une réaction chimique, à l'échelle de quelques secondes.

Si le système ne subit aucune transformation, il est à l'équilibre thermodynamique : c'est le cas par exemple d'un liquide chaud dans une bouteille isotherme, à l'échelle de quelques minutes.

#### Le système n'est pas isolé, mais l'énergie cédée est égale à l'énergie reçue.

Alors sa variation d'énergie est nulle : son énergie est constante. Si de plus le système ne subit aucune transformation, l'énergie qu'il contient ne change pas de nature, et sa température reste constante. On peut parler d'**équilibre dynamique** : c'est dans l'ensemble le cas de la Terre, à l'échelle de quelques années.

#### Le système n'est pas isolé, et il y a déséquilibre entre l'énergie cédée et l'énergie reçue.

L'énergie du système varie. Dans certains cas, les transformations physico-chimiques ou nucléaires qui s'y produisent permettent de maintenir la température du système constante : on parlera là aussi d'**équilibre dynamique**. C'est le cas du Soleil, à l'échelle de millions d'années, ou du corps humain à l'échelle de quelques heures.

### Transformations et échanges d'énergie

#### Transformations

Un système peut subir différents types de transformation, induisant des changements dans la nature des énergies :

réactions chimiques ou changements d'état : de l'énergie chimique peut être convertie en énergie thermique et réciproquement ;

réactions nucléaires : de l'énergie de masse peut être convertie en énergie thermique.

#### Échanges d'énergie

Dans l'espace, deux corps peuvent échanger de l'énergie à distance via un transfert thermique radiatif.

Le corps émet alors un rayonnement électromagnétique lié à sa température (rayonnement de corps noir).

L'intensité de l'échange d'un corps A vers un corps B peut être quantifiée par l'énergie transférée de A vers B par unité de temps, c'est à dire par la puissance (en J/s = W) échangée. On peut aussi raisonner sur l'énergie échangée (en J) sur une durée donnée. Cette puissance échangée entre deux corps est donc un débit d'énergie, ou encore un flux d'énergie (en W).

Le **spectre d'un corps noir** est caractérisé par les propriétés suivantes :

- La longueur d'onde d'émission maximale est inversement proportionnelle à la température.  
C'est la **loi de Wien** :

$$\lambda_{max} \text{ (en m)} = \frac{k}{T \text{ (en K)}} \text{ avec } k = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$$

- La puissance émise par unité de surface est proportionnelle à la puissance quatrième de la température.

C'est la **loi de Stefan** :

$$P_{surface} \text{ (en W}\cdot\text{m}^{-2}) = \sigma \times T^4 \text{ avec } T \text{ en K et } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$$

### Puissance émise par rayonnement par la Terre

En considérant la Terre comme un corps noir de température moyenne 15°C, la puissance surfacique qu'émet sa surface est de  $3,9 \cdot 10^2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  d'après la loi de Stefan. Mais considérant l'effet de serre et l'absorption d'une partie de ce rayonnement par l'atmosphère :

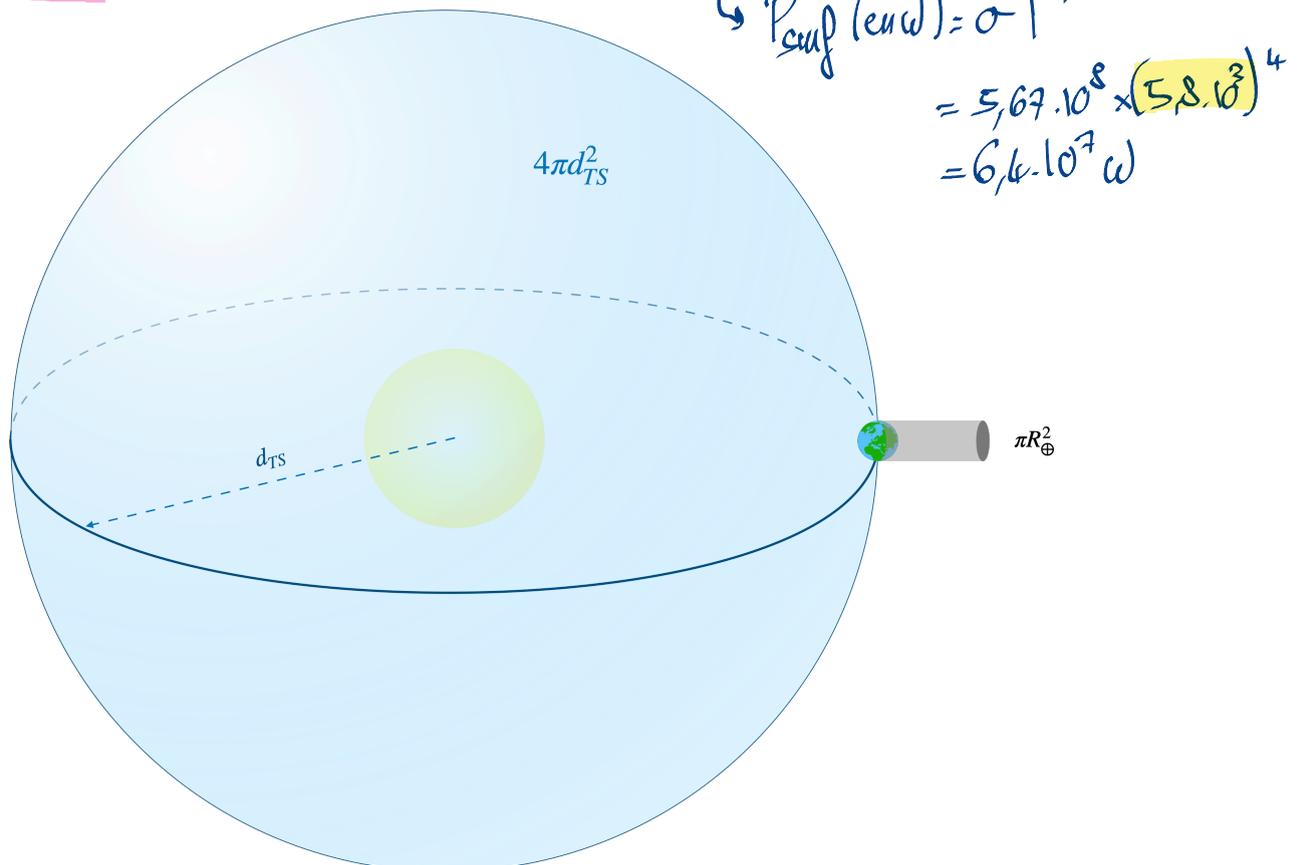
$$\text{puissance émise : } 2,4 \cdot 10^2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$$

### Puissance reçue du Soleil par rayonnement

Par une analyse spectrale de la lumière solaire en dehors de l'atmosphère terrestre, on détermine que le maximum d'émission du Soleil est d'environ  $\lambda_{max} = 5,0 \cdot 10^2 \text{ nm}$ .

1. En déduire la température de surface du Soleil.  $T \text{ (en K)} = \frac{k}{\lambda_{max} \text{ (en m)}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{5,0 \cdot 10^2 \times 10^{-9}} = 5,8 \cdot 10^3 \text{ K}$
2. Calculer la puissance par unité de surface rayonnée par le Soleil.

La surface du Soleil est d'environ  $4\pi R_{\odot}^2 = 6,1 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$  donc la puissance totale qu'il émet est de l'ordre de  $P_{\odot} = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$ .



Comme le montre la figure, seule une fraction de cette puissance parvient jusqu'à la Terre : à la distance  $d$  du Soleil, la puissance totale émise par le Soleil se répartit uniformément sur la surface de la sphère de rayon  $d$ , soit donc  $4\pi d^2$ . Pour la distance Terre-Soleil, la surface de la sphère vaut  $2,9 \cdot 10^{23} \text{ m}^2$ . La Terre intercepte le rayonnement solaire sur une surface de seulement  $\pi R_{\oplus}^2 = 1,3 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$ .

3. Calculer la puissance solaire totale reçue par la Terre.

$$P_{\oplus} = P_{\odot} \times \frac{\pi R_{\oplus}^2}{4\pi d^2} = 3,9 \cdot 10^{26} \times \frac{1,3 \cdot 10^{14}}{2,9 \cdot 10^{23}} = 1,7 \cdot 10^{17} \text{ W}$$

On regarde ici la proportion de puissance solaire qui atteint la Terre. C'est la puissance surfacique au niveau de la Terre:  $\frac{P_{\odot}}{4\pi d^2}$  multipliée par l'aire du disque terrestre  $\pi R_{\oplus}^2$

4. Calculer la puissance par unité de surface reçue par la Terre sachant que la surface terrestre est donnée par  $4\pi R_{\oplus}^2$ .

$$P_{\oplus \text{ surf}} = \frac{P_{\oplus}}{4\pi R_{\oplus}^2} = \frac{1,7 \cdot 10^{17}}{4 \times 1,3 \cdot 10^{14}} = 3,4 \cdot 10^2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

pour éviter les arrondis d'arrondis

En réalité, une partie du rayonnement est directement réfléchi par la Terre. Ce qui permet de quantifier ce phénomène est l'**albédo** : c'est le taux de puissance solaire réfléchi par la Terre (0,3 en moyenne).

5. Que vaut la puissance par unité de surface reçue par la Terre en tenant compte de l'albédo ?

$$\text{puissance reçue} : 3,4 \cdot 10^2 \times 0,7 = 2,4 \cdot 10^2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

6. Conclure quant à l'équilibre dynamique de la Terre.

La puissance surfacique reçue et environ égale à la puissance surfacique émise aux ondes d'arrondis près.

Vu la précision des données, on ne peut pas en dire plus. La Terre est donc approximativement en équilibre dynamique.

7. Comment cet équilibre est actuellement modifié ? Distinguer en particulier ce qui est fixe et ce qui peut varier dans le bilan qui a été fait.

La puissance reçue est fixe tant qu'on ne modifie pas l'albédo. Par contre, la puissance émise vers l'espace est diminuée par l'effet de serre qui empêche une partie du rayonnement de s'échapper!

La Terre vit ainsi actuellement un forçage radiatif (rupture de l'équilibre) qui  $\nearrow$  la température de surface.

Le forçage radiatif est actuellement d'environ  $3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  et c'est pour cela qu'on ne le "voit" pas dans nos calculs (il faudrait des données plus précises).