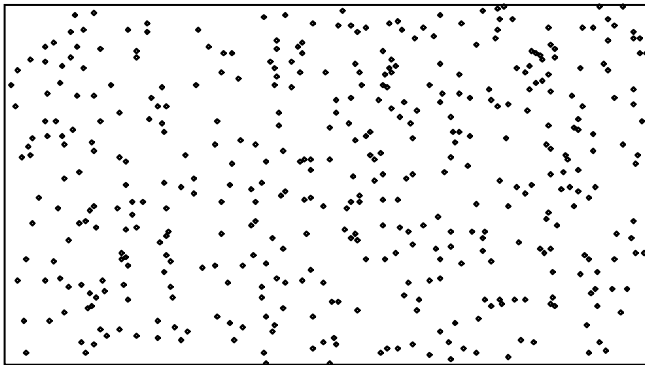


### 3 L'énergie : conversions et transferts

#### 3.1 Décrire un système thermodynamique

##### 3.1.1 Modèle du gaz parfait

###### 3.1.1.1 Description microscopique d'un gaz parfait au repos



les particules du gaz (molécules ou atomes) sont très éloignées les unes des autres

La taille des particules est négligeable par rapport à la distance moyenne entre deux particules

Les particules se déplacent rectilignement à très grande vitesse

Des chocs avec d'autres particules ou avec une paroi se produisent fréquemment

Les particules n'interagissent pas entre elles en dehors des chocs

###### 3.1.1.2 Description macroscopique d'un gaz parfait au repos

Pour décrire le comportement d'un gaz au repos à l'échelle macroscopique, on utilise les grandeurs d'état :

$\rho$  : masse volumique du fluide ; en  $\text{kg.m}^{-3}$

$T$  : température absolue du fluide ; en K

$P$  : pression du fluide ; en Pa

La masse volumique «  $\rho$  » d'un gaz pur est liée à son volume «  $V$  » et à sa quantité «  $n$  » de particules :

$$\rho = \frac{n * M}{V}$$

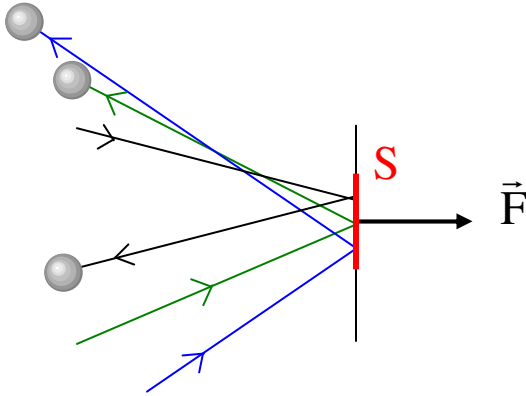
$n$  : quantité de particules (ou nb. de mol. de particules) ; en mol.

$V$  : volume du gaz ; en  $\text{m}^3$

$M$  : masse molaire du gaz ; en  $\text{kg.mol.}^{-1}$

$\rho$  : masse volumique du fluide ; en  $\text{kg.m}^{-3}$

### 3.1.1.3 Liens entre grandeurs macroscopique et microscopique



plus le nombre de particules par unité de volume est grand plus la **masse volumique** est grande.

Plus le gaz a une **température** élevée, plus la vitesse des particules est grande.

Les chocs des particules sur une paroi de surface S se traduisent à l'échelle macroscopique par une force  $\vec{F}$  normale.

La **pression** est égale à cette force divisée par la surface :  $P = F / S$ .

### 3.1.1.4 Equation d'état du gaz parfait

Les grandeurs macroscopiques d'état d'un gaz parfait sont liées par l'équation :

$$P * V = n * R * T$$

P : pression du gaz ; en Pa (Pascal)

V : volume du gaz ; en  $\text{m}^3$

n : quantité de matière (ou nombre de moles) du gaz ; en mol.

R : constante des gaz parfaits ;  $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}$

T : température absolue du gaz ; en Kelvin  
(symbole K ;  $T = \theta^\circ\text{C} + 273$ )

### 3.1.1.5 Limites du modèle du gaz parfait

Tous les gaz se comportent comme le gaz parfait si :

- la pression est faible (les particules du gaz sont suffisamment éloignées les unes des autres pour que l'on puisse négliger les interactions entre elles)
- la température est supérieure à la température de liquéfaction (à basse température tous les gaz se liquéfient)

## 3.2 Bilans d'énergie sur un système

### 3.2.1 Les transferts d'énergie

Il existe deux modes de transfert d'énergie à un système : le transfert thermique (noté  $Q$ ) et le travail (noté  $W$ ).

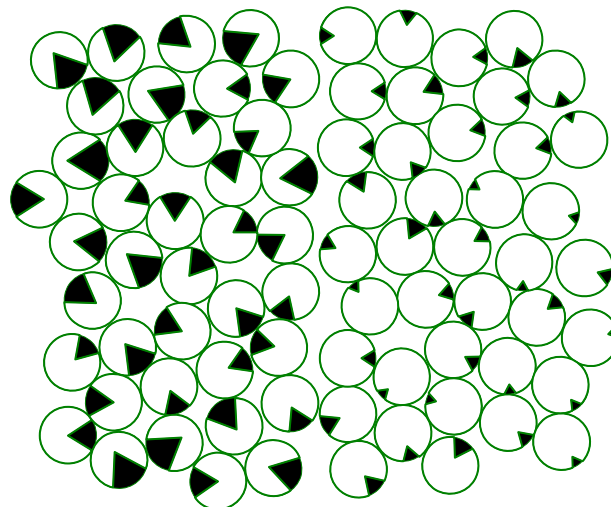
#### 3.2.1.1 Le transfert thermique $Q$

Ce transfert d'énergie existe quand il y a une différence de température entre deux systèmes. Le transfert thermique ne change pas la position des systèmes (ni leur forme).

Remarque le transfert thermique est souvent nommé la chaleur

#### Exemple

transfert thermique par conduction



la longueur de chaque flèche est proportionnelle à la vitesse de sa particule

système chaud : la vitesse des particules est, en moyenne, plus grande

système froid : la vitesse des particules est, en moyenne, plus petite

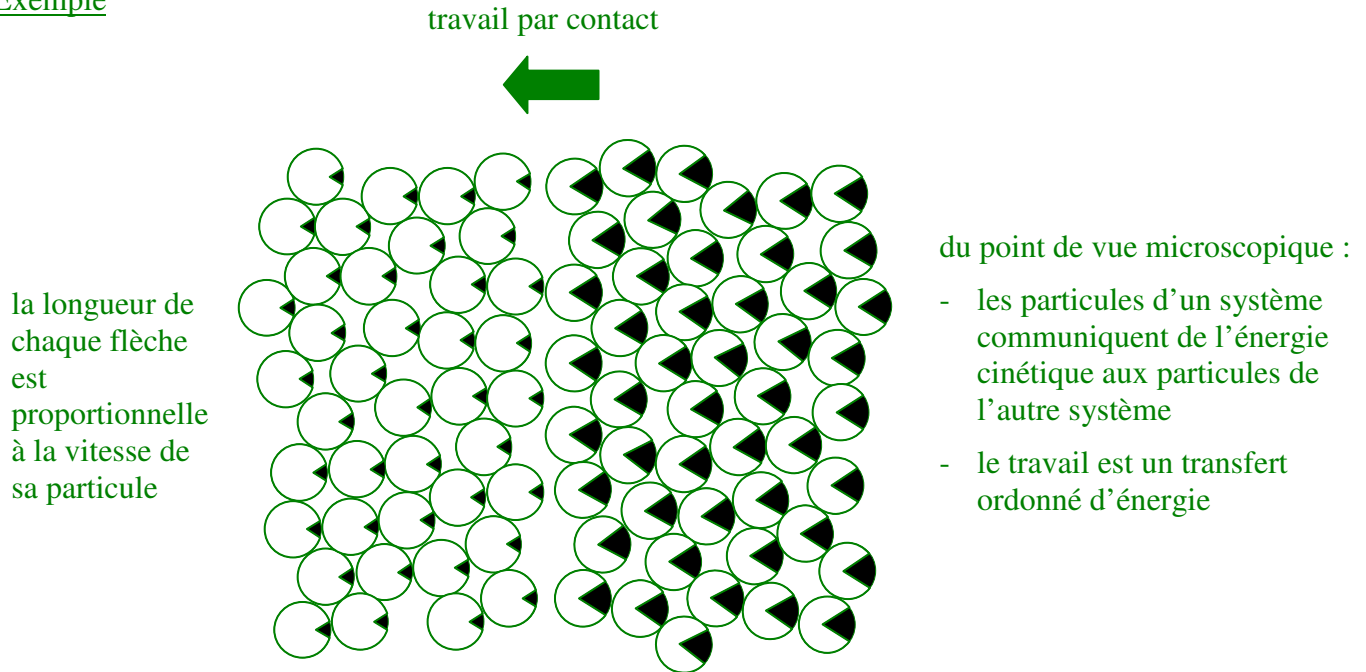
du point de vue microscopique :

- lors de chocs, les particules du système chaud communiquent de l'énergie cinétique aux particules du système froid
- le transfert thermique est un transfert désordonné d'énergie entre deux systèmes

#### 3.2.1.2 Le travail $W$

Ce transfert d'énergie existe quand le point d'application d'une force exercée sur le système se déplace. Le travail change la position du système (ou sa forme).

## Exemple



### 3.2.2 Energie interne d'un système

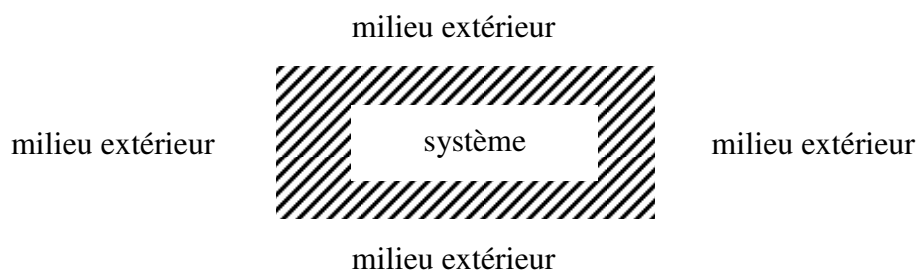
L'énergie interne «  $U$  » est une grandeur macroscopique d'un système (comme la température ou la pression) égale à la somme de :

- l'énergie cinétique de chaque particule du système (liée à la vitesse de la particule)
- l'énergie potentielle des interactions entre les particules (comme les liaisons de Van der Waals)

$$U = \sum E_c (\text{particule}) + \sum E_p (\text{interaction})$$

### 3.2.3 Le système isolé

Il n'y a pas de transferts d'énergie (et de matière) entre le système et le milieu extérieur.



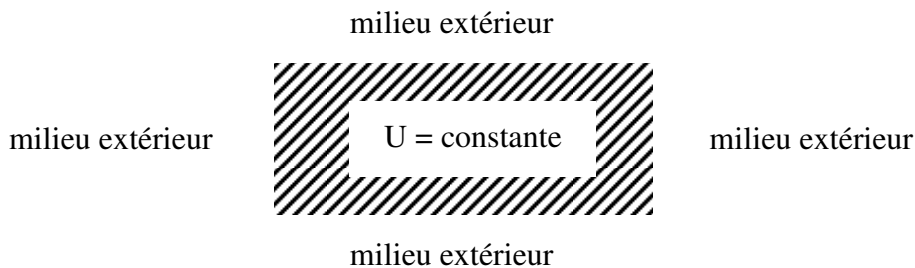
### 3.2.4 Premier principe de la thermodynamique

#### 3.2.4.1 La thermodynamique

La thermodynamique est une partie de la physique qui étudie les relations entre l'énergie, le travail et la chaleur au niveau macroscopique.

#### 3.2.4.2 Premier principe de la thermodynamique

L'énergie interne d'un système isolé est constante.



#### 3.2.4.3 Conséquences du premier principe de la thermodynamique

La variation d'énergie interne d'un système isolé est nulle ( $\Delta U = 0$ ) et donc l'énergie interne d'un système ne peut varier que si le système échange du travail ou de la chaleur avec le milieu extérieur :

$$\Delta U = W + Q$$

$\Delta U$  : variation de l'énergie interne du système ; en J

$W$  : transfert d'énergie par travail entre le système et le milieu extérieur ; en J

$Q$  : transfert d'énergie par chaleur entre le système et le milieu extérieur; en J

### 3.2.5 Capacité thermique d'un système incompressible

On suppose qu'un système incompressible transfère uniquement de la chaleur avec le milieu extérieur (pas de transfert par travail).

Une variation d'énergie interne du système qui a pour seule conséquence un changement de température (pas de changement d'état et pas de réaction chimique) est quantifiée par l'équation :

$$\Delta U = c * \Delta T$$

$\Delta U$  : variation de l'énergie interne du système ; en J

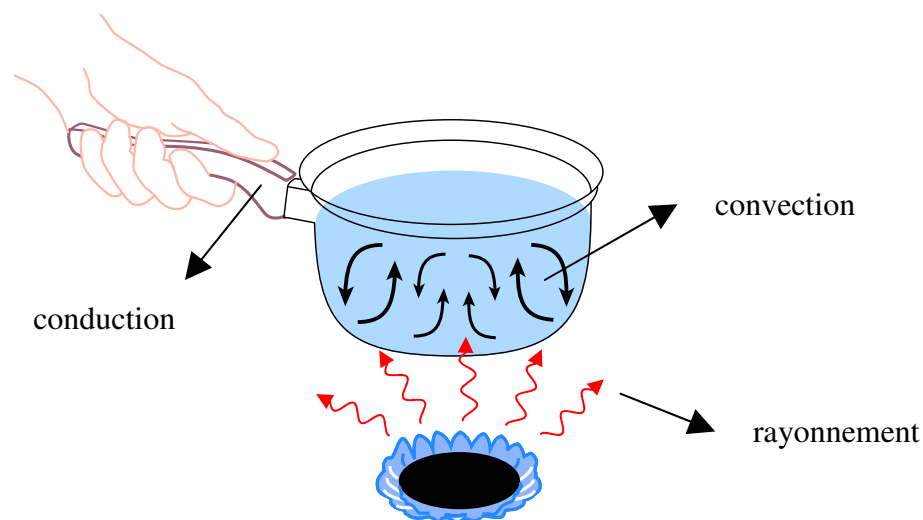
$c$  : capacité thermique du système incompressible ; en  $J.K^{-1}$

$\Delta T$  : variation de la température du système ; en K

### 3.2.6 Modes de transfert thermique

On distingue 3 modes de transfert thermique :

- par **conduction** ; le mouvement désordonné des particules se propage à l'occasion de chocs entre particules voisines
- par **convection** ; un fluide qui se déplace transporte des particules en mouvement désordonné
- par **rayonnement** ; le système émet un rayonnement électromagnétique qui peut se propager dans le vide ou dans un milieu transparent



Il est rare qu'un transfert thermique ne concerne qu'un seul des transferts précédents. Le plus souvent, les deux sinon les trois transferts entrent en jeu.

Exemple dans une chaudière la chaleur dégagée par la combustion est transférée à de l'eau qui circule dans des tuyaux en métal.

La paroi externe des tubes est chauffée par les produits de combustion, à la fois par rayonnement et par convection. La chaleur traverse l'épaisseur des tubes par conduction. L'eau circulant à l'intérieur des tubes est chauffée par convection, au contact de la paroi interne.

### 3.2.7 Flux thermique

Le flux thermique évalue la vitesse du transfert thermique :

$$\Phi = \frac{\delta Q}{dt}$$

$\Phi$  : flux thermique ; en Watt (symbole W)

$\delta/dt$  : opérateur de dérivation par rapport au temps

Q : transfert thermique entre le système et le milieu extérieur; en J

### 3.2.8 Résistance thermique

La relation entre le flux thermique  $\Phi$  et l'écart de température  $\Delta T$  entre le système chaud et le système froid est :

$$\Delta T = R_h * \Phi$$

$\Delta T$  : écart de température entre le système chaud et le système froid ; en K

$R_h$  : résistance thermique du milieu séparant les deux systèmes (plus sa valeur est grande, plus le milieu de séparation s'oppose au transfert thermique) ; en  $K.W^{-1}$

$\Phi$  : flux thermique ; en W

### 3.2.9 Loi phénoménologique de Newton

Le flux thermique entre une surface solide et un fluide en mouvement est proportionnel à leur différence de température :

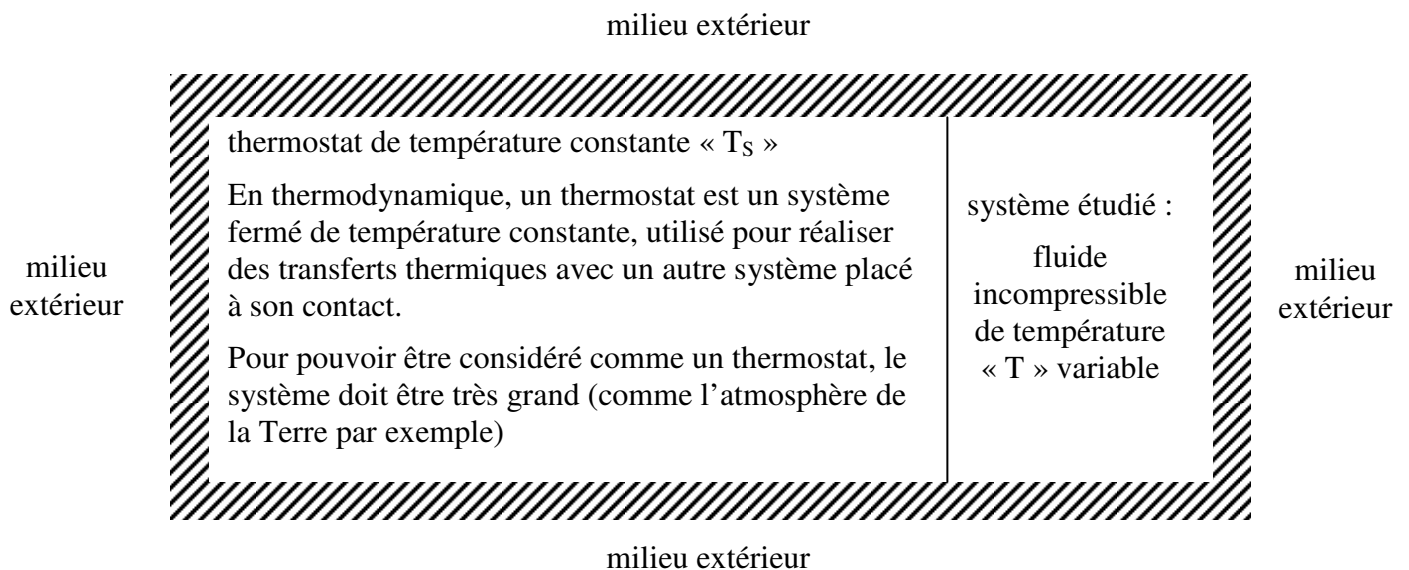
$$\phi = h * S * (T_S - T_F)$$

$\Phi$  : flux thermique ; en W

- $h$  : coefficient de convection thermique ; en  $W.m^{-2}.K^{-1}$
- $S$  : surface d'échange entre le solide et le fluide ; en  $m^2$
- $T_S$  : température de la surface solide ; en K
- $T_F$  : température du fluide en mouvement ; en K

### 3.2.10 Evolution de la température d'un système

On place un système fluide incompressible, de température « T » variable, au contact d'un thermostat. L'ensemble est isolé du milieu extérieur.



Entre le système (fluide incompressible) et le thermostat, il n'y a qu'un transfert d'énergie par chaleur (pas de transfert par travail) :

$$\Delta U = Q$$

Ce transfert thermique n'implique qu'un changement de température du système (pas de changement d'état et pas de réaction chimique) :

$$Q = c * \Delta T$$

On dérive cette équation par rapport au temps :



$$\frac{\delta Q}{dt} = c * \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

On modélise le flux thermique entre le thermostat et le système fluide par la loi phénoménologique de Newton

$$\frac{\delta Q}{dt} = h * S * (T_s - T) \quad (2)$$

(1) et (2) :  $c * \frac{dT}{dt} = h * S * (T_s - T)$

En posant  $\tau = \frac{c}{h * S}$  on obtient  $\tau * \frac{dT}{dt} + T = T_s$

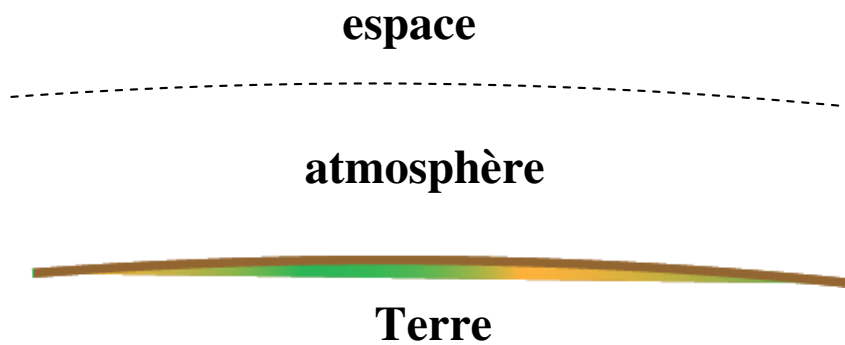
C'est une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant.

La résolution de cette équation permet d'établir l'expression de la température du système en fonction du temps :

$$T = (T_0 - T_s) * \exp (-t/\tau) + T_s$$

Avec «  $T_0$  » la température initiale du fluide incompressible.

### 3.2.11 Bilan thermique du système Terre-atmosphère



#### 3.2.11.1 Loi de Stéphan

Tous les corps absorbent et émettent simultanément de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique.

La loi de Stephan permet de connaître la puissance rayonnée par la surface d'un corps en fonction de sa température :

$$P = \sigma * S * T^4$$

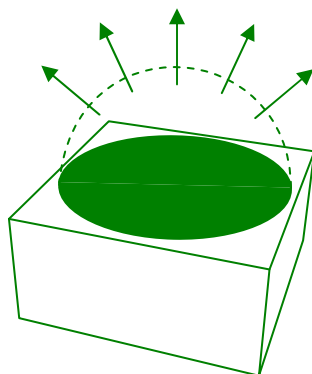
P : puissance rayonnée ; en W

$\sigma$  : constante de Stephan (sigma) ;  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

T : température absolue ; en Kelvin (symbole K ;  $T = \theta^{\circ}\text{C} + 273$ )

S : surface du corps qui rayonne ; en  $\text{m}^2$

#### Exemple



température de la surface  $T = 2000 \text{ K}$

surface qui rayonne  $S = 10 \text{ cm}^2$

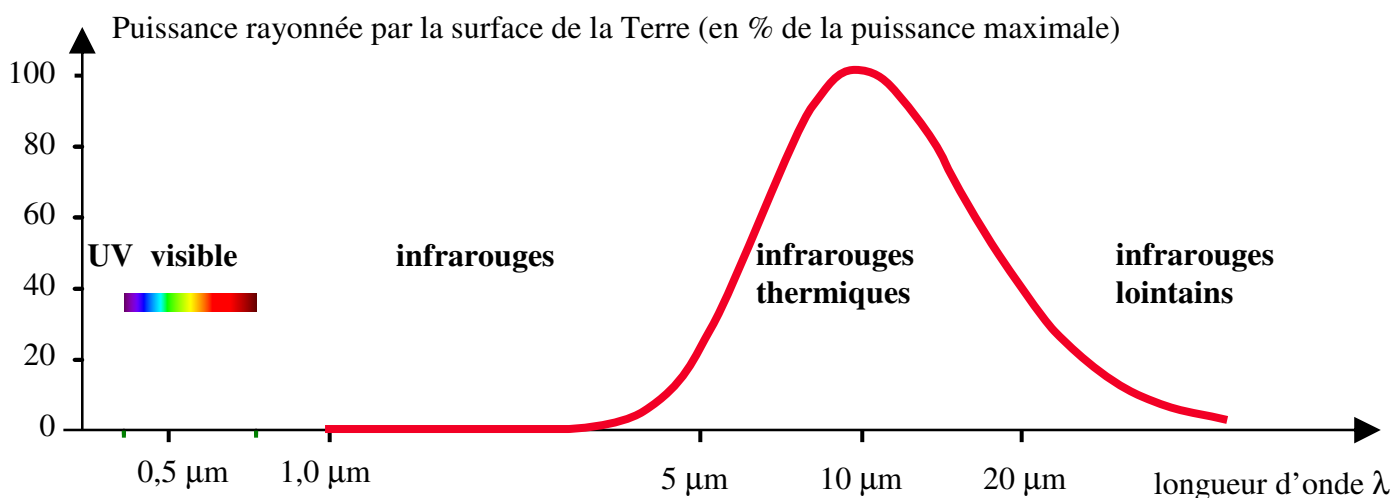
puissance rayonnée  $P = 912 \text{ W}$

#### 3.2.11.2 La surface de la Terre émet un rayonnement

La température moyenne de la surface de la Terre est de  $15^{\circ}\text{C}$ .

Comme tout corps chaud ( $15^{\circ}\text{C} = 288\text{ K}$ ), la Terre émet donc un rayonnement.

Ce rayonnement est invisible à nos yeux : c'est un rayonnement infrarouge.



### 3.2.11.3 Albédo

Une fraction du rayonnement solaire atteignant le système Terre-atmosphère est directement réfléchi vers l'espace :

$$\text{albédo} = \frac{E (\text{rayonnement solaire réfléchi vers l'espace})}{E (\text{rayonnement solaire atteignant la surface de la Terre})}$$

#### Exemples

albédo (neige fraîche) = 0,90

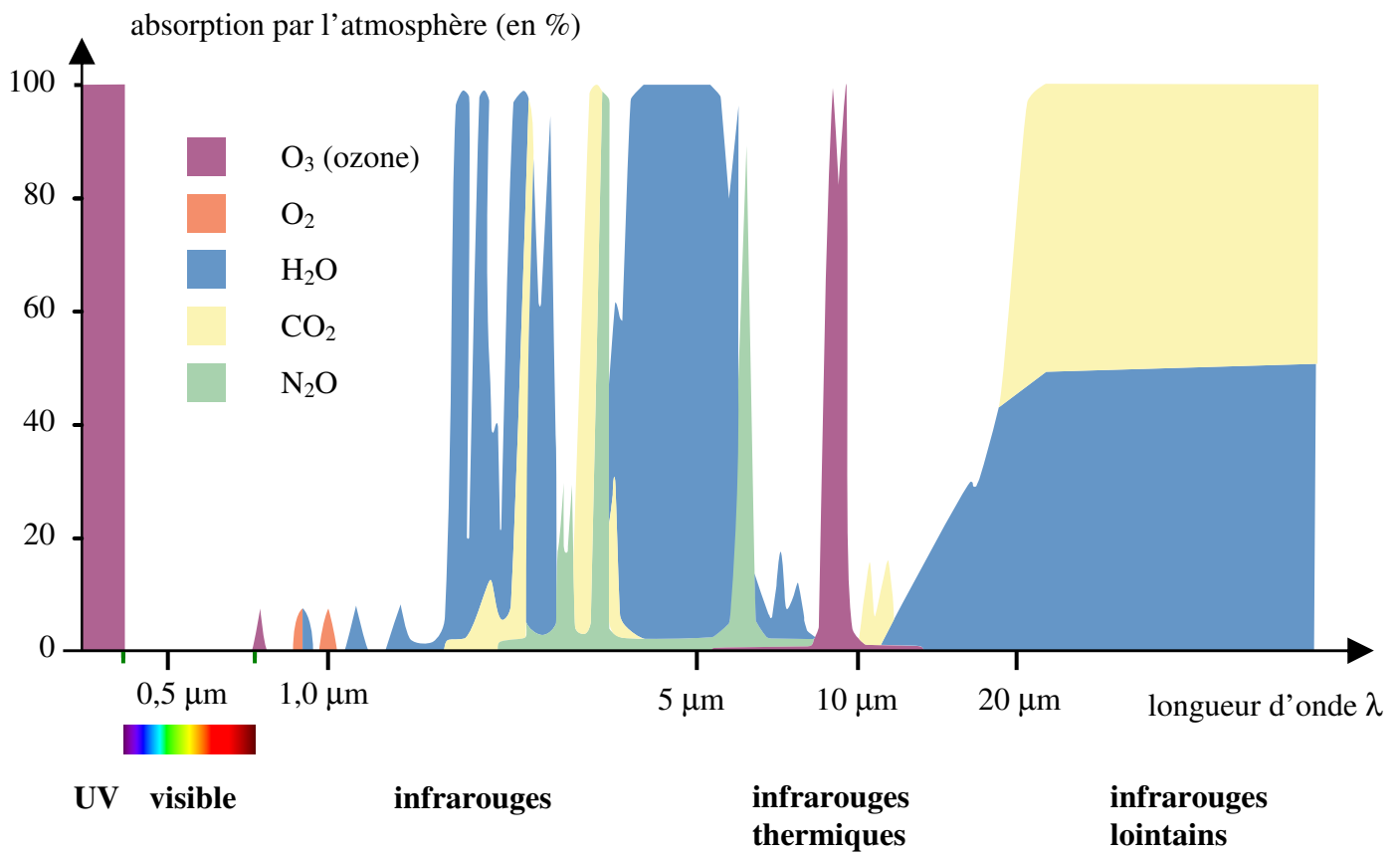
albédo (sol nu) = 0,30

albédo (océan) = 0,07

albédo (système Terre-atmosphère) = 0,30

### 3.2.11.4 L'atmosphère agit comme une serre

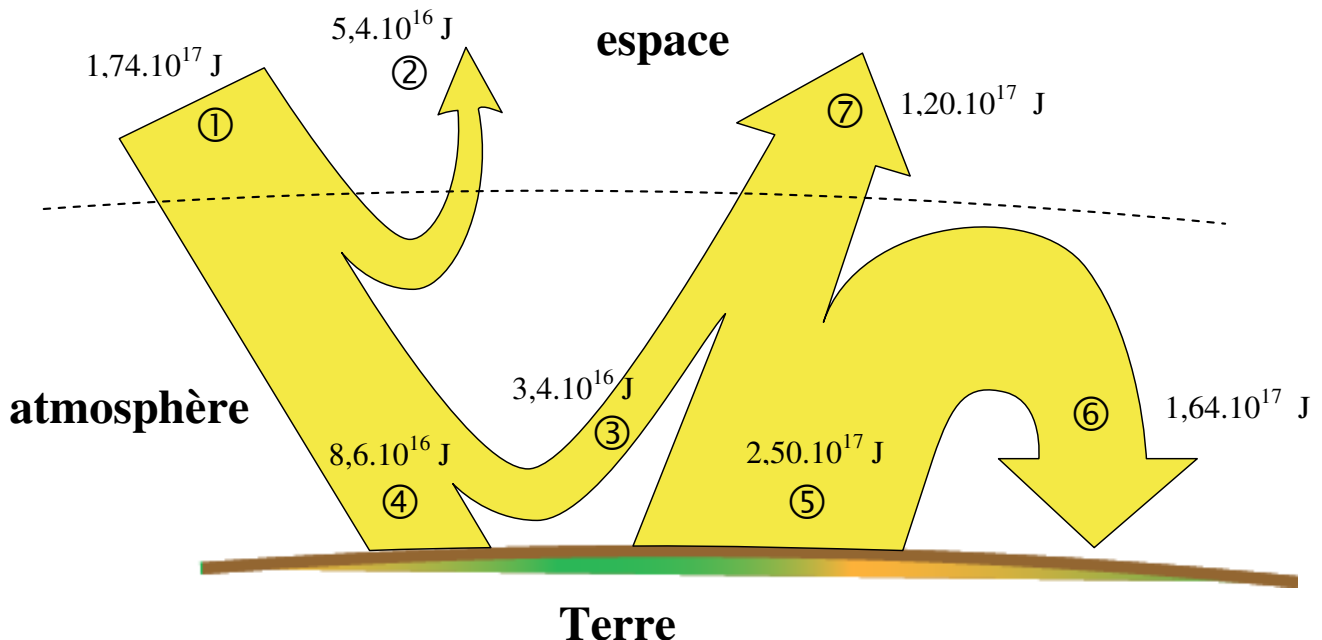
L'atmosphère absorbe une partie du rayonnement qu'elle reçoit du Soleil ou de la surface de la Terre.



L'atmosphère évacue l'énergie qu'elle absorbe en émettant à son tour un rayonnement infrarouge vers le sol et vers l'espace : c'est l'effet de serre.

### 3.2.11.5 Le système Terre-atmosphère est en équilibre thermique

Le schéma ci-dessous montre les transferts d'énergie qui s'effectuent chaque seconde entre l'espace, l'atmosphère et la surface de la Terre :



- 1 : transfert d'énergie d'origine solaire atteignant le système Terre-atmosphère
- 2 : transfert d'énergie d'origine solaire réfléchi par l'atmosphère vers l'espace
- 3 : transfert d'énergie d'origine solaire absorbée par l'atmosphère
- 4 : transfert d'énergie d'origine solaire absorbée par la surface de la Terre
- 5 : transfert d'énergie émise par la surface de la Terre
- 6 : transfert d'énergie, piégée par les gaz à effet de serre, absorbée par la surface de la Terre
- 7 : transfert d'énergie, émise par le système Terre-atmosphère, rejetée vers l'espace

Le système Terre-atmosphère est toujours en équilibre thermique : l'énergie, d'origine solaire, reçue par le système est égale à l'énergie émise vers l'espace.