

## Transferts thermiques

La thermodynamique est la science qui traite des échanges et conversions d'énergie entre systèmes contenant un grand nombre de molécules.

Un système thermodynamique est un ensemble d'entités (atomes, ions, molécules). Son état est caractérisé par des grandeurs macroscopiques, appelées **variables d'état** :

- la **masse volumique  $\rho$**  en  $kg \cdot m^{-3}$  ;
- la **température  $T$**  en  $K$  qui mesure l'agitation des entités ;
- la **pression  $P$**  en **Pascal** qui mesure l'action mécanique que le système exerce sur une surface plane  $S$  :  $P = \frac{F}{S}$  avec  $F$  la force pressante.

### I/ Le modèle du gaz parfait

#### 1. Le modèle du gaz parfait

Les grandeurs macroscopiques de description du gaz parfait reflètent le comportement microscopique des entités qui le constituent.

À l'échelle macroscopique	Comportement à l'échelle microscopique
Le gaz parfait est au repos à la température $T$ (en $K$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mouvement incessant et désordonné des entités du gaz assimilées à des points matériels</li> <li>- Pas d'interaction entre les entités</li> </ul>
La pression $P$ (en $Pa$ ) est faible	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de choc entre les entités</li> <li>- Choc uniquement avec la paroi</li> </ul>
la masse volumique $\rho$ (en $kg \cdot m^{-3}$ ) est très faible	Les entités sont très éloignées les unes des autres.

On parle de gaz parfait lorsque les entités sont suffisamment éloignées les unes des autres pour ne pas être en interaction et lorsque le volume propre des entités est négligeable devant le volume occupé par le gaz.

Ce modèle est valable pour de faibles pressions et pour des températures éloignées de la température d'ébullition de ce gaz.

#### 2. L'équation d'état du gaz parfait

Les variables d'état, pression  $P$ , volume  $V$ , température  $T$  et quantité de matière  $n$  sont liées par l'équation d'état :

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

avec

$P$  pression du gaz (en  $Pa$ )

$V$  volume du gaz (en  $m^3$ )

$T$  température (en  $K$ )

$n$  quantité de matière (en  $mol$ )

$R$  constante des gaz parfaits ( $R = 8,314 \ J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ )

## II/ Premier principe de la thermodynamique

### 1. Énergie interne d'un système

Tout système est constitué d'entités qui possèdent :

- une énergie cinétique microscopique liée à l'agitation thermique
- une énergie potentielle microscopique liée aux interactions entre les entités

L'énergie interne  $U$  d'un système est égale à la somme des énergies microscopiques :

$$U = E_{c,micro} + E_{p,micro} \quad \text{avec } U, E_{c,micro} \text{ et } E_{p,micro} \text{ en J}$$

### 2. Énergie totale d'un système

L'énergie totale  $E$  d'un système est la somme de ses énergies macroscopiques et de son énergie interne :

$$E = \underbrace{E_c + E_p}_{E_m} + U$$

$E_c$  énergie cinétique macroscopique (J)  
 $E_p$  énergie potentielle macroscopique (J)

### 3. Deux modes de transfert de l'énergie

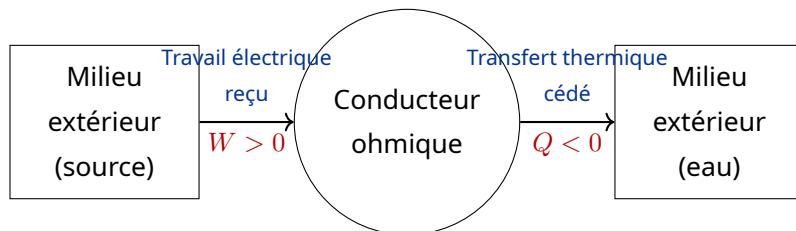
Un système peut échanger de l'énergie avec l'extérieur par :

- transfert d'énergie mécanique sous forme de travail  $W$  ;  
Il résulte d'une action mécanique macroscopique exercée sur le système ;
- transfert thermique  $Q$ . Il s'effectue microscopiquement lorsqu'il existe une différence de température entre le système et l'extérieur. Il a pour conséquence une modification de la température et/ou un changement d'état.

Par convention, le travail et le transfert thermique sont comptés :

- positivement s'ils sont reçus par le système ;
- négativement s'ils sont cédés par le système.

Exemple : résistance chauffante d'une bouilloire :



### 4. Premier principe

Pour un système immobile, la variation de son énergie interne  $\Delta U$  est égale à : la somme des énergies échangées par le système avec l'extérieur par travail  $W$  et/ou par transfert thermique  $Q$ .

$$\Delta U = W + Q$$

(échelle macroscopique)

$\Delta U$  variation d'énergie interne (J)  
 $W$  travail (J)  
 $Q$  transfert thermique (J)

## 5. Énergie interne d'un système incompressible

La variation d'énergie interne  $\Delta U$  d'un système incompressible (solide ou liquide), non soumis à un changement d'état, est proportionnelle à la variation de température :

$$\Delta U = Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$\Delta U$  variation d'énergie interne (en J)

$m$  masse du système (en kg)

$c$  capacité thermique massique (en  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )

$\Delta T$  (K) =  $\Delta\theta$  ( $^{\circ}C$ ) variation de température

La capacité thermique massique  $c$  dépend de la nature du corps.

Exemple :  $c_{eau} = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  signifie qu'il faut fournir 4,18 kJ à 1 kg d'eau pour éléver sa température de 1 K.

Lorsque  $\Delta T > 0$ ,  $\Delta U > 0$  : le système **reçoit** de l'énergie ;

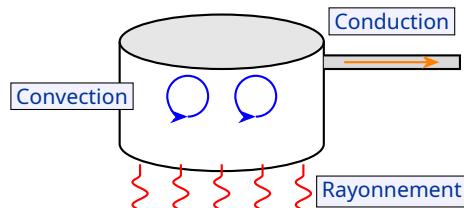
Lorsque  $\Delta T < 0$ ,  $\Delta U < 0$  : le système **cède** de l'énergie à l'extérieur.

## III/ Transferts thermiques

### 1. Les différents modes de transferts thermiques

Il existe 3 modes de transfert thermique :

<b>CONDUCTION</b>	L'agitation thermique se transmet de <b>proche en proche</b> dans la matière, mais <b>sans déplacement</b> d'ensemble de celle-ci. Elle se produit principalement dans les <b>solides</b> .
<b>CONVECTION</b>	Le transfert thermique est porté par un <b>mouvement de matière</b> . Elle se produit dans les <b>fluides</b> (liquides et gaz).
<b>RAYONNEMENT</b>	L'absorption ou l'émission de rayonnement modifie <b>l'agitation thermique</b> . Ce mode de transfert ne nécessite pas de <b>milieu matériel</b> . $\Delta E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$



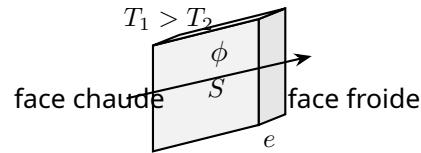
Un transfert thermique ne peut se faire que dans un seul sens : de la source chaude vers la source froide.

Le transfert cesse lorsque l'**équilibre thermique** est atteint.

## 2. Transfert thermique par conduction

La conduction est un mode de transfert thermique par contact entre deux systèmes n'ayant pas la même température. Elle peut aussi s'établir à travers une cloison.

Le transfert thermique peut se faire plus ou moins rapidement. Pour évaluer cette vitesse de transfert, on détermine le flux thermique.



### a) Le flux thermique $\phi$

Le flux thermique  $\phi$  correspond au transfert thermique  $Q$  qui s'écoule entre deux milieux par unité de temps :

$$\phi = \frac{Q}{\Delta t}$$

$Q$  énergie thermique échangée (en  $J$ )  
 $\Delta t$  durée de l'échange (en  $s$ )  
 $\phi$  flux thermique (en  $W$  ou  $J \cdot s^{-1}$ )

### b) La résistance thermique $R_{th}$

Le flux thermique est proportionnel à l'écart de température entre les deux faces d'une paroi :

$$\phi = \frac{\Delta T}{R_{th}}$$

$\Delta T$  écart de température ( $K$  ou  $^{\circ}C$ )  
 $R_{th}$  résistance thermique (en  $K \cdot W^{-1}$ )

La résistance thermique  $R_{th}$  traduit l'opposition plus ou moins forte du matériau au flux thermique. Plus  $R_{th}$  est élevée plus le flux thermique sera faible.

## 3. Transfert thermique par rayonnement

Le transfert thermique par rayonnement est l'échange de photons par émission ou absorption entre deux corps. C'est le seul mode de transfert thermique possible dans le vide.

### a) Loi de Stefan-Boltzmann

Tout corps à température  $T$  émet un rayonnement électromagnétique, de flux thermique rayonné :

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

Donnée

$\phi$  flux thermique (en  $W$ )  
 $\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ )  
 $S$  aire de la surface du corps ( $m^2$ )  
 $T$  température de surface du corps (en  $K$ )

### b) Bilan radiatif terrestre

Considérons le système {Terre-atmosphère}.

- Le système reçoit un rayonnement solaire de flux thermique surfacique  $P_0 = 342 W \cdot m^{-2}$ . Environ 30 % de ce rayonnement est réfléchi par l'atmosphère : c'est l'**albédo**.

- Donc la Terre reçoit  $P_T = (1 - 0,30) \cdot P_0 = 239,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Si on applique la loi de Stefan-Boltzmann  $P_T = \frac{\phi}{S} = \sigma \cdot T^4$ , on en déduit la température de surface de la Terre :  $T = \left(\frac{P_T}{\sigma}\right)^{1/4} = 254,9 \text{ K} = -18,2^\circ\text{C}$ .

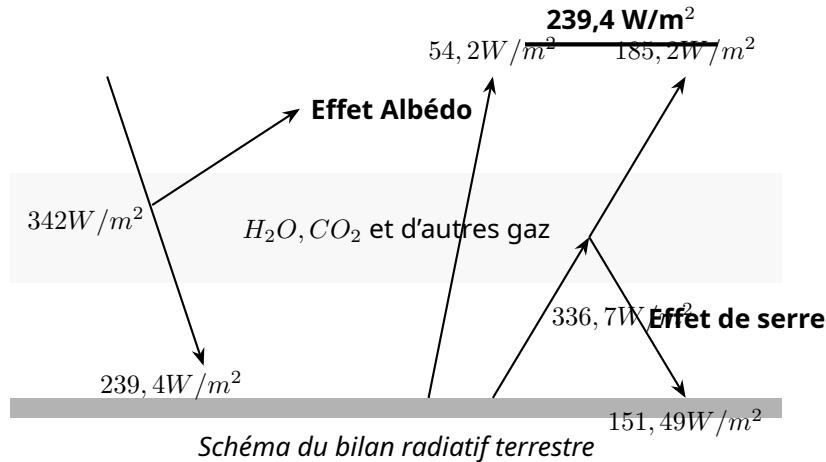
- En fait la température de surface de la Terre est d'en moyenne  $15^\circ\text{C}$ . C'est l'absorption, par l'atmosphère, d'une partie du rayonnement (IR) émis par la Terre qui est responsable de cette différence de température : c'est **l'effet de serre**.

Cet effet de serre naturel permet à la surface de la Terre de récupérer une partie de l'énergie thermique qu'elle rayonne, contribuant ainsi à son réchauffement.

En tenant compte de l'effet de serre, la Terre reçoit un flux surfacique thermique  $P = \sigma \cdot T^4$  :  $P = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (273,15 + 15)^4 = 390,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

$239,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  proviennent du rayonnement solaire et  $390,9 - 239,4 = 151,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  proviennent de l'effet de serre.

- L'atmosphère absorbe environ 45 % du rayonnement terrestre. Donc les  $151,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  proviennent d'un rayonnement incident égal à  $151,5 / 0,45 = 336,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .  $336,7 - 151,5 = 185,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  repartent vers l'espace.
- La température de la surface de la Terre étant constante, il y a donc un équilibre entre le rayonnement reçu ( $239,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) et le rayonnement émis ( $185,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} + 54,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  de rayonnement émis par la Terre sans effet de serre).



## 4. Transfert thermique conducto-convectif

### a) Loi phénoménologique de Newton

Soit un système incompressible de température initiale  $T$ , en contact sur une surface d'aire  $S$  avec un fluide de température constante  $T_e$ , appelé **thermostat**. Un transfert thermique s'effectue entre le système et le fluide par conduction (contact) et par convection.

Le flux thermique conducto-convectif transféré à travers la surface d'aire  $S$  du système vaut :

$$\phi = h \cdot S \cdot (T_e - T)$$

Donnée

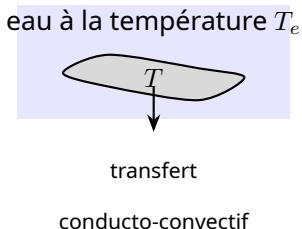
$\phi$  flux (en  $W$ )

$h$  coefficient d'échange convectif (en  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )

$S$  surface d'échange (en  $m^2$ )

$T$  température initiale du système (en  $K$ )

$T_e$  température du thermostat (en  $K$ )



$$S = 1,7 \text{ } m^2 ; \theta = 30 \text{ } ^\circ C.$$

$$\theta_e = 10 \text{ } ^\circ C ; h = 500 \text{ } W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}.$$

Flux thermique transféré :

$$\phi = 500 \cdot 1,7 \cdot (10 - 30) = -17000 \text{ } W \simeq -17 \text{ } kW$$

$\phi < 0$  car le système **cède** de l'énergie à l'eau.

### b) Évolution d'un système au contact d'un thermostat

On plonge un corps solide (surface  $S$ , cap. thermique  $c$ , masse  $m$ , temp. initiale  $T_0$ ) dans un thermostat à  $T_e$ . Pendant  $dt$ , la température varie de  $dT = T(t + dt) - T(t)$ .

D'après le 1er principe :  $\Delta U = W + Q \implies dU = \delta Q$  (car  $\delta W = 0$ )

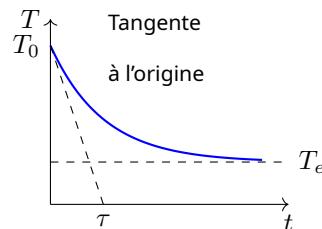
Or  $\delta Q = m \cdot c \cdot dT$  et  $\delta Q = \phi \cdot dt = h \cdot S \cdot (T_e - T) \cdot dt$

$$\implies m \cdot c \cdot dT = h \cdot S \cdot (T_e - T) \cdot dt$$

$$\implies m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} + h \cdot S \cdot T = h \cdot S \cdot T_e$$

$$\frac{dT}{dt} + \frac{1}{\tau} T = \frac{1}{\tau} \cdot T_e$$

avec  $\tau = \frac{m \cdot c}{h \cdot S}$  (en  $s$ )



Solution de l'équation différentielle :  $T(t) = A + B \cdot e^{-t/\tau}$

À  $t = 0, T(0) = T_0 \implies A + B = T_0$

À  $t \rightarrow \infty, T \rightarrow T_e \implies A = T_e$

D'où  $B = T_0 - T_e$  et  $T(t) = T_e + (T_0 - T_e) \cdot e^{-t/\tau}$