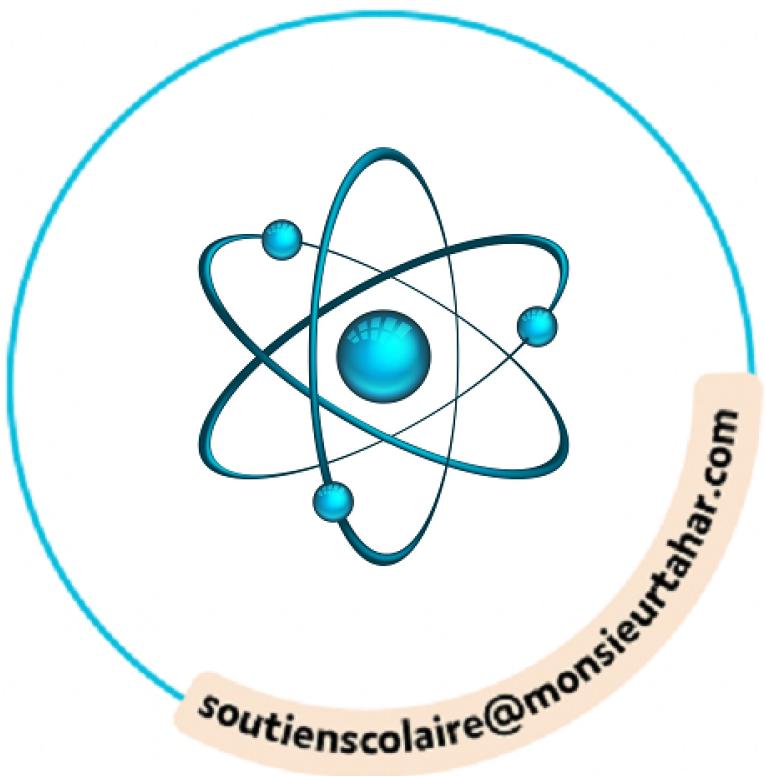


# PHYSIQUE-CHIMIE



## CHAPITRE 13

## Le modèle du gaz parfait et quelques limites

( VU DANS LE CHAPITRE 5 VOIR FICHE BILAN CHAPITRE 5 )

- Ce modèle est limité à des gaz à faible pression et dont les entités ponctuelles n'interagissent pas.
- Le volume  $V$  du gaz, sa pression  $P$ , sa température  $T$  et sa quantité de matière  $n$  sont liés par l'**équation d'état** :

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

Constante des gaz parfaits  
en  $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$n$  en mol  
 $P$  en Pa  
 $V$  en  $\text{m}^3$   
 $T$  en K

Grandeur macroscopique	Propriété microscopique
Température $T$ (en K)	Agitation des entités du gaz
Pression $P$ (en Pa) faible	Peu de chocs et uniquement entre entités et parois
Massé volumique $\rho = \frac{m}{V}$ (en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) faible	Entités éloignées les unes des autres

## I. VARIATION D'ENERGIE INTERNE D'UN SYSTEME:

### 1) Energie interne d'un système U :

L'énergie interne  $U$  d'un système est son propre énergie.

Elle correspond à la somme **de toutes les énergies** qui existent à l'intérieur de ce système, au niveau microscopique du fait de ses constituants (atomes, molécules, ions)

Les énergies présentes au niveau microscopique sont les énergies cinétiques microscopiques et les énergies potentielles d'interactions microscopiques.

$$U = E_c(\text{microscopique}) + E_p(\text{microscopique})$$

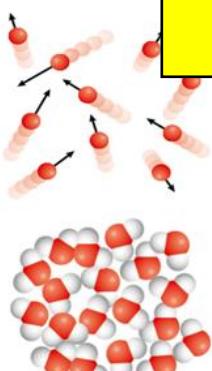
Unité d'énergie : le joule (J)

- **Du fait de l'agitation thermique**, chaque constituant possède une énergie cinétique

Cette agitation augmente lors d'une augmentation de la température.

Les **énergies potentielles d'interaction** sont liées aux interactions entre les constituants qui constituent le système.

Elles peuvent être des intermoléculaires ou intramoléculaires.



Il est quasiment impossible de mesurer toutes ces énergies, c'est pourquoi nous nous intéresserons à la variation de l'énergie interne  $\Delta U$

### 2) Énergie totale d'un système

L'énergie totale  $E_{\text{tot}}$  d'un système est égale à la somme de :

- l'énergie mécanique macroscopique  $E_m$  du système,  $E_m = E_c$  (macroscopique) +  $E_p$  (macroscopique)
- l'énergie interne  $U$

$$E_{\text{tot}} = E_m + U$$

Unité : le joule (J)

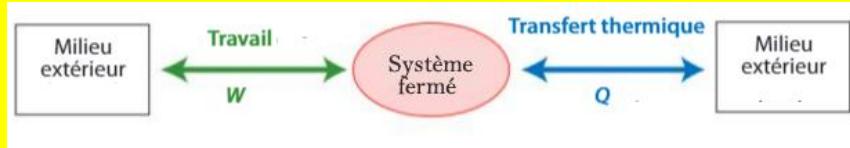
## II. LE PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE:

### 1) Enoncé du principe:

Le premier principe de la thermodynamique énonce que la variation d'énergie interne  $\Delta U$  d'un système, qui est au repos macroscopique  $\Delta E_m = 0$ , qui n'échange pas de matière avec l'extérieur (système fermé) et qui évolue d'un état initial à un état final est égale à la somme des énergies échangées par le système avec l'extérieur, sous forme de travail  $W$  et / ou sous forme d'énergie thermique  $Q$

$$\Delta U = W + Q$$

- $W$  travail exprimé en Joule ( J )
- $Q$  transfert thermique exprimé en Joule ( J )
- $\Delta U$  variation d'énergie interne exprimée en en Joule ( J )



Remarque importante :

Par convention,  $W$  et  $Q$  sont comptés POSITIVEMENT quand le système **reçoit** cette énergie et NEGATIVEMENT quand il **cède** à l'extérieur.

### 2) Le travail $W$

#### a) travail électrique:



La bouilloire reçoit de l'énergie électrique  $W_e$  et cède de l'énergie thermique  $Q$  à l'eau.

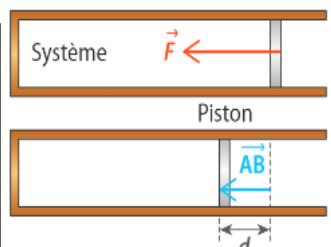


Résistance chauffant de l'eau. Le travail électrique  $W$  est positif pour la résistance chauffante. Le transfert thermique  $Q$  est négatif pour la résistance chauffante et positif pour l'eau. On parle de « convention porte-monnaie ».

#### b) travail mécanique

Un gaz, dit compressible, est placé dans un cylindr, muni d'un piston mobile d'aire  $S = 10 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ . La force pressante  $\vec{F}$  exercée par l'air extérieur à la pression  $P_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  sur le piston est constante et sa norme vaut  $F = P \times S$ . Le piston se déplace de  $d = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$  dans le sens de la diminution de volume du gaz. Calculer le travail recu par le système {piston-gaz}

$$W_{AB}(\overrightarrow{AB}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = F \cdot AB \cdot \cos 0 = P \cdot S \cdot AB \cdot \cos 0 = 1,0 \text{ J}$$



Le travail  $W$  est recu par le système. Il est donc **POSITIF**.

Dans de nombreux exercices, le système sera dit **INCOMPRESSIBLE** ( solide ou liquide )

Ce qui entraîne que le travail  $W = 0$

La variation d'énergie interne  $\Delta U = W + Q$  ne sera due, dans **ce cas de système incompressible**, qu'à un transfert thermique :

$$\Delta U = Q$$

### 3) Transfert thermique et énergie thermique transférée $Q$ :

#### a) Définitions :

Le **transfert thermique** est l'échange d'énergie à l'échelle microscopique entre un système au repos à l'échelle macroscopique et le milieu extérieur.

L'énergie thermique transférée  $Q$  mesure la quantité d'énergie échangée.  
Elle est exprimée en joules (J).

**Par convention**, comme on l'a déjà dit, elle est comptée **POSITIVEMENT** quand le système reçoit de l'énergie thermique, **NEGATIVEMENT** quand il en cède à l'extérieur.

#### b) Cas d'un système fermé et incompressible :

En l'absence de changement d'état, la variation d'énergie interne d'un système est **proportionnelle** à la variation de température

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

Avec  $\Delta T = T_{\text{finale}} - T_{\text{initiale}}$

Si  $C = m \cdot c$  alors

$$\Delta U = C \cdot \Delta T$$

$m$  : masse en kilogramme (kg)

$\Delta T$  : variation de température en kelvin (K) ou degré Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\Delta U$  : Variation d'énergie interne en joule (J)

$c$  : capacité thermique massique en joule par kelvin par kilogramme ( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

$C$  : capacité thermique en joule par kelvin ( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ )

Avec  $T(\text{K}) = T(\text{C}) + 273,15$

**Remarque :** Que signifie une capacité thermique massique  $c_{\text{eau}} = 4,18 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ?

La capacité thermique massique est l'énergie qu'il faut fournir à 1,0 kg d'eau pour éléver sa température de  $1^{\circ}\text{C}$ .

#### APPLICATION:

Calculer la variation d'énergie interne  $\Delta U$  de la marmite en fonte de masse  $m_f = 10 \text{ kg}$  remplie d'un volume d'eau  $V_{\text{eau}} = 150 \text{ mL}$  que l'on chauffe sans la « déplacer ». La température du système (marmite-eau) passe d'une température  $T_i = 20^{\circ}\text{C}$  à une température  $T_f = 95^{\circ}\text{C}$ .

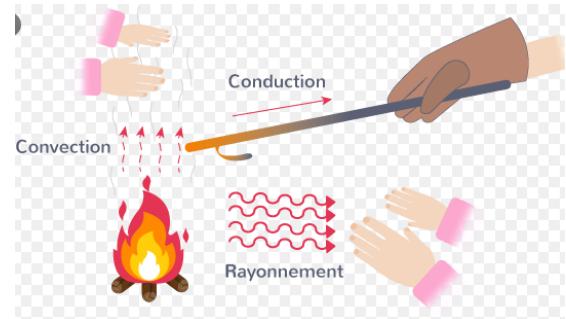
Données : capacité massique de l'eau et de la fonte :  $c_{\text{eau}} = 4,18 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  et  $c_{\text{fonte}} = 4,70 \cdot 10^2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$$\Delta U = m_e \cdot c_e \cdot \Delta T + m_f \cdot c_f \cdot \Delta T \quad \text{or} \quad \rho = \text{meau} / V_{\text{eau}} \quad \text{d'où} \quad \text{meau} = \rho \cdot V_{\text{eau}}$$

$$\Delta U = \rho_e V_{\text{eau}} \cdot c_e \cdot \Delta T + m_f \cdot c_f \cdot \Delta T = 1,0 \cdot 0,150 \cdot 4180 \cdot (95 - 20) + 10 \cdot 470 \cdot (95 - 20) = 4,0 \cdot 10^5 \text{ J}$$

### c) mode de transfert thermique:

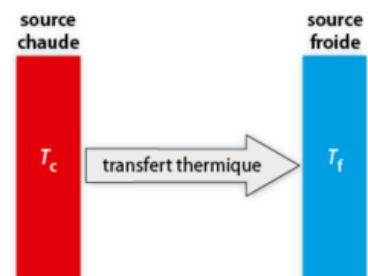
- **Par conduction thermique**, (l'agitation thermique, l'agitation des molécules ou atomes se transmet de proche en proche dans la matière, mais sans transport global de matière ; ce mode de transfert a principalement lieu dans les solides) ;
- **Par convection**, (l'agitation thermique se transmet de proche en proche dans la matière et avec déplacement d'ensemble de celle-ci) ; ce mode de transfert a lieu dans les fluides (liquides et gaz)
- **Par rayonnement**, (l'absorption ou l'émission d'ondes électromagnétiques modifie l'agitation thermique) ; ce mode de transfert a lieu quel que soit l'état, et se fait même au travers du vide.



### d) Sens du transfert thermique:

Un transfert thermique ne peut se faire que dans un seul sens.

Le sens du transfert thermique ne peut se faire que d'un milieu qui a la température la plus élevée (la source chaude) vers un milieu qui a la température la moins élevée (la source froide), jusqu'à ce que leurs températures soient égales.



## III. TRANSFERT THERMIQUE PAR CONDUCTION

### 1) Définition du flux thermique :

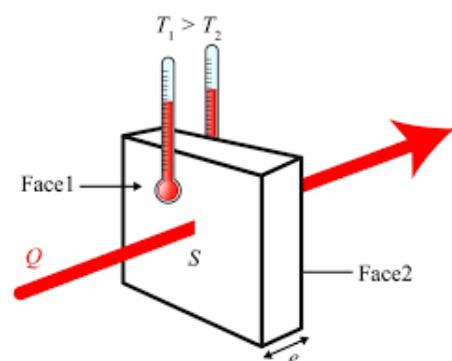
Pour une paroi plane, dont deux faces sont à des températures différentes  $T_1$  et  $T_2$ , en fonction du matériau constituant la paroi, l'énergie  $Q$  est transférée plus ou moins rapidement de la source chaude vers la source froide.

Le flux thermique  $\Phi$  (phi) traduit la vitesse de transfert thermique

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

$\Phi$  en watt (W)  
 $\Delta t$  en seconde (s)  
 $Q$  en joule (J)

Le flux thermique correspond à une énergie par unité de temps.



Exemple : le mur laisse passer, en 1h, une énergie de  $1,73 \cdot 10^5$  J.

Le flux thermique correspondant est :  $\Phi_{\text{mur}} = \frac{Q}{\Delta t} = 48 \text{ W}$

Rappels :

$$P = \frac{E}{\Delta t}$$

E énergie en J  
 P puissance en W  
 $\Delta t$  durée en s

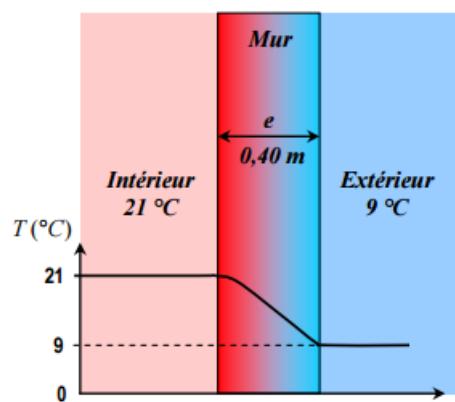
## 2) Définition de la résistance thermique :

La résistance thermique  $R_{th}$  d'un corps traduit sa capacité à s'opposer au transfert thermique.

Pour une paroi plane dont les deux faces sont à la température  $T_1$  et  $T_2$  avec  $T_1 > T_2$ , traversée par un flux thermique  $\Phi$ , la résistance thermique  $R_{th}$  est définie par :

$$\Phi = \frac{T_2 - T_1}{R_{th}}$$

$\Phi$  en W  
 T en K ou  $^{\circ}\text{C}$   
 $R_{th}$  en  $\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$



Pour une paroi plane, la résistance thermique dépend de son épaisseur  $e$ , sa surface  $S$ , sa conductivité thermique  $\lambda$  (qui est associée à la nature du matériau)

Ainsi

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \cdot S}$$

$e$  en m  
 $S$  en  $\text{m}^2$   
 $\lambda$  en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$   
 $R_{th}$  en  $\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$

Matériau	$\lambda$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
Air	0,026
Polystyrène	0,036
Bois	0,16
Béton	0,92
Verre	1,2
Acier	46
Aluminium	250
Cuivre	390

Conductivité de différents matériaux

Remarques :

- Plus la résistance thermique est importante plus le flux thermique est faible.
- Un matériau possédant une résistance thermique élevée est un bon conducteur.
- Plus la conductivité thermique est importante plus le matériau est conducteur de chaleur
- D'après le tableau précédent, le meilleur isolant est l'air (double vitrage utilisé pour les fenêtres)
- Si plusieurs paroies sont superposées leurs résistances thermiques se additionnent.

## IV) Transfert thermique par rayonnement:

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

### 1) Rayonnement et température :

Du fait de sa température T, tout corps émet un rayonnement électromagnétique, de flux thermique  $\varphi_E$  vérifiant la loi de Stefan-Boltzmann

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

$\varphi_E$  en watt par mètre carré (W)  
T en kelvin (K)  
S en mètre carré ( $m^2$ )

$\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{T}^{-4}$$

Remarque : Le flux thermique  $\varphi_E$  peut être défini comme une puissance : On parle alors d'une puissance thermique rayonnée.

#### HISTOIRE DES SCIENCES

Le physicien et philosophe autrichien **Ludwig Boltzmann** (1844-1906) est l'un des pères fondateurs de la thermodynamique moderne. Il est l'auteur des principes de base concernant l'irréversibilité.



#### Application:

Le Soleil est de forme sphérique de rayon  $R = 6,96 \times 10^8 \text{ m}$ , de surface S et de température de surface  $T_s = 5778 \text{ K}$ .

Calculer le flux thermique du Soleil :

$$\varphi_E = \sigma \cdot S \cdot T^4 = \sigma \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot T^4$$

Le soleil rayonne chaque seconde une énergie de  $3,85 \cdot 10^{26} \text{ J}$  chaque seconde.

### 2) Le cas de la terre : Albédo et effet de serre :

Après avoir atteint la terre et son atmosphère, une partie du rayonnement solaire  $\varphi_{S-reçu/T}$ , est réfléchi et diffusé vers l'espace :  $\varphi_{diff/T}$ . Le reste est absorbé par la terre (continents, océans, ...) et par son atmosphère.

L'albédo noté A du système {Terre, atmosphère} permet de quantifier ce phénomène.

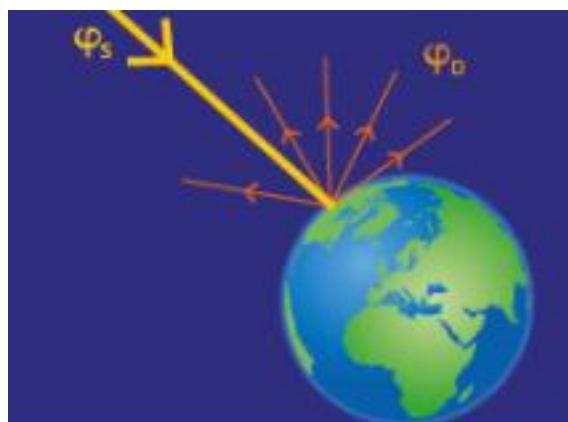
$$A = \frac{\varphi_{diff/T}}{\varphi_{S-reçu/T}}$$

#### Quelques valeurs d'albédo :

- Mer :  $0,05 < A < 0,15$
- Sable :  $0,25 < A < 0,45$

Forêt :  $0,05 < A < 0,20$

Neige : 0,8



## Application :

La **fonte des pôles** et les **gaz à effet de serre** dans l'atmosphère sont souvent utilisés pour expliquer le réchauffement climatique

Pour comprendre ce phénomène, effectuons un **bilan radiatif** sur le système {Terre ; atmosphère}. Il s'agit d'étudier les flux entrant et sortant du système.



**1 :** Une partie du flux thermique émis par le soleil est reçu par la terre. Il sera noté  $\varphi_{S-reçu/T}$

**2 :** Une partie de ce flux est diffusé par l'atmosphère dans l'espace

$$A = \frac{\varphi_{diff/T}}{\varphi_{S-reçu/T}} \quad \text{donc } \varphi_{diff/T} = A \cdot \varphi_{S-reçu/T}$$

**3 :** L'autre partie  $\varphi_{abs/T}$  est absorbée par la terre

$$\varphi_{absorbé/T} = \varphi_{S-reçu/T} - \varphi_{diff/T} \quad \text{donc } \varphi_{absorbé/T} = (1-A) \varphi_{S-reçu/T}$$

**4 :** La Terre est un corps possédant une température  $T_T$ , celle-ci émet un flux thermique qui d'après la loi de Stefan-Boltzmann, s'écrit:

$$\varphi_{émis/T} = \sigma \cdot S \cdot T_T^4$$

**5 :** Une partie de ce flux est renvoyé dans l'espace

**6 :** L'autre partie est absorbée par l'atmosphère puis une partie est renvoyé vers la terre et absorbée. C'est ce que l'on appelle l'**effet de serre**.

$$\text{avec } \varphi'_{absorbé/T} = \frac{\alpha}{2} \varphi_{émis/T} \quad \text{avec } \alpha \text{ (alpha)} = 0,75$$

## Effectuons un bilan radiatif du système

La 1<sup>ère</sup> loi de la thermodynamique nous permet d'écrire que :  $\Delta U = Q + W$

**Il n'y a pas de variation d'énergie interne du système** car la température  $T$  terre est constante.

$$\text{Donc } \Delta U = 0$$

De plus, le système étant incompressible  $W = 0$

On parle **d'équilibre radiatif** :

La somme des flux reçus  $Q_{reçu}$  est égale à la somme des flux émis  $Q_{émis}$

Donc  $Q = 0$  avec  $Q = Q_{\text{reçu}} - Q_{\text{émis}} = 0$

en divisant par  $\Delta t$

$$\varphi_{\text{reçu}} - \varphi_{\text{émis}} = 0$$

$$\varphi_{\text{absorbé/T}} + \varphi'_{\text{absorbé/T}} = \varphi_{\text{émis/T}}$$

$$(1-A) \varphi_{S-\text{reçu/T}} + \frac{\alpha}{2} \varphi_{\text{émis/T}} = \varphi_{\text{émis/T}}$$

$$\text{Or } \varphi_{\text{émis/T}} = \sigma \cdot S \cdot T_T^4 \quad \text{d'où en remplaçant: } (1-A) \varphi_{S-\text{reçu/T}} + \frac{\alpha}{2} \sigma \cdot S \cdot T_T^4 = \sigma \cdot S \cdot T_T^4$$

On isole la température de la Terre  $T_T$ :

$$T_T^4 = \frac{1-A}{\sigma \cdot S_T \cdot (1 - \frac{\alpha}{2})} \cdot \varphi_{S-\text{reçu/T}}$$

$$T_T = \left( \frac{1-A}{\sigma \cdot S_T \cdot (1 - \frac{\alpha}{2})} \cdot \varphi_{S-\text{reçu/T}} \right)^{1/4}$$

- La température  $T_T$  dépend bien sur de la température du soleil et donc du flux émis par celui-ci.

...

- Si l'albédo  $A$  diminue alors  $(1-A)$  augmente et  $T_T$  augmente.  
C'est le cas si les pôles disparaissent.

$$A_{\text{neige}} > A_{\text{sol}} \quad \text{d'où } A_{\text{total}} \text{ diminue.}$$

- Si  $\alpha$  augmente alors le dénominateur diminue donc  $T_T$  augmente.  
C'est le cas lorsque la concentration des gaz à effet de serre augmente.

...

## V. LOI THERMIQUE DE NEWTON



Un café est servi à une température  $T_0 = 80^\circ\text{C}$ . Au bout de combien de temps vais-je pouvoir le boire à une température de  $T=60^\circ\text{C}$  si celui-ci est posé dans une salle à température  $T_{\text{th}} = 20^\circ\text{C}$  ?

### 1) Milieu thermostaté

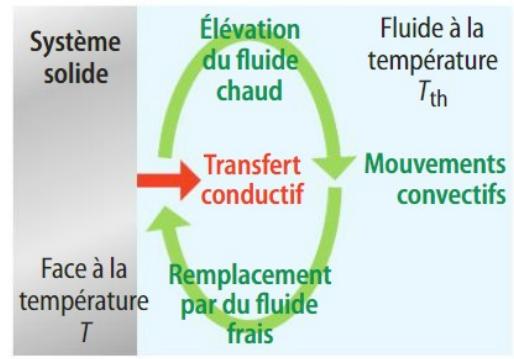
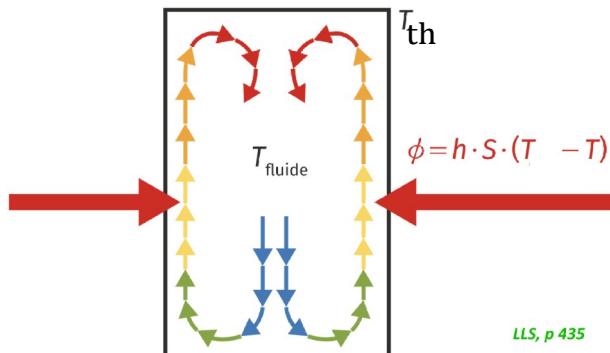
**Définition :** Un thermostat est un objet dont la température reste constante.

Le milieu extérieur peut souvent jouer le rôle de thermostat pour un système étudié.

### 2) Loi thermique de Newton

Newton avait remarqué qu'un objet se refroidissait d'autant plus rapidement que la température entre ce corps et l'extérieur était importante.

Lorsqu'un fluide est au contact d'une paroi fine thermostatée (un thermostat est un objet dont la température reste constante), le flux thermique conducto-convectif s'exprime en fonction de l'écart entre la température  $T$  du système et celle de la paroi (notée,  $T_{th}$ ).



**Doc. 19** Représentation schématique du transfert conducto-convectif : si  $T_{th} < T$ , le fluide s'échauffe au contact de la face, sa masse volumique diminue, il s'élève sous l'action de la poussée d'Archimède et est remplacé par du fluide frais.

Ce transfert « conducto-convectif » est modélisé par la loi phénoménologique de Newton :  
Le flux thermique (ou puissance thermique) conducto-convectif transféré à travers la surface d'aire  $S$  du système vaut :  $\Phi = h \times S \times (T_{th} - T)$

avec     $h$  : coefficient de transfert thermique (coefficient de Newton) en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$   
 $S$  : surface d'échange entre le système et la paroi (en  $\text{m}^2$ )

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

Lorsqu'un système incompressible de température  $T$  échange uniquement de l'énergie avec une paroi thermostatée à une température  $T_{paroi}$ , le premier principe de la thermodynamique s'écrit :  $\Delta U = Q$

L'expression du flux thermique est :  $\phi = \frac{Q}{dt}$

Au contact d'un thermostat et sans changement d'état du système, tout peut s'exprimer en fonction de la seule variable  $T$ , la température du système. En utilisant la capacité thermique massique  $c$  :  $\Delta U = Q = m \cdot c \cdot \Delta T$

On obtient :  $\phi = \frac{Q}{dt} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{dt} = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt}$  (1)

De même, le flux thermique, si on ne tient compte que du transfert conducto-convectif, s'exprime avec la loi de Newton :  $\Phi = h \cdot S \cdot (T_{th} - T)$  (2)

L'équation (1) devient en insérant (2) :  $h \cdot S \cdot (T_{th} - T) = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt}$

Soit :  $m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} + h \cdot S \cdot T = h \cdot S \cdot T_{paroi}$

$$\frac{dT}{dt} = \left( \frac{h \cdot S}{m \cdot c} \right) T + \left( \frac{h \cdot S \cdot T_{paroi}}{m \cdot c} \right) T_{th}$$

On pose  $\Upsilon = \frac{h \cdot S}{m \cdot c}$

En factorisant  $\Upsilon$  on obtient :

$$\frac{dT}{dt} = -\Upsilon \cdot (T - T_{th})$$

Le taux de variation de température d'un système, incompressible et échangeant de l'énergie par un transfert thermique, est proportionnel à la différence entre la température du corps  $T$  et celle extérieure qui joue le rôle de thermostat  $T_{th}$  :

$$\frac{dT}{dt} = -\gamma \cdot (T - T_{th})$$

$\gamma$  s'exprime en  $s^{-1}$ ,  $T_{th}$  est la température du thermostat ( K ) et  $T$  la température du système ( en K ).

$$\frac{dT}{dt} = -\gamma \cdot (T - T_{th}) = -\gamma T + \gamma T_{th}$$

La loi de Newton est une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec second membre constant du type :  $y' = a \cdot y + b$

$$\frac{dT}{dt} = -\gamma T + \gamma T_{th}$$

La résolution de ce type d'équation différentielle est la suivante :  $y(x) = C \cdot e^{a \cdot x} - \frac{b}{a}$

$$\text{d'où } T(t) = C \cdot e^{-\gamma \cdot t} - \frac{\gamma T_{th}}{-\gamma} = C \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{th}$$

On trouve  $C$  en utilisant la condition initiale  $T = T_0$

$$\text{A } t = 0 \text{ s, } T(0) = C \cdot e^{-\gamma \cdot 0} + T_{th} = T_0. \text{ D'où } C = T_0 - T_{th}$$

Donc :

$$T(t) = (T_0 - T_{th}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{th}$$

L'évolution de la température se traduit par une fonction exponentielle décroissante qui tend vers la température du thermostat  $T_{th}$

