

# Chapitre 13 : Thermodynamique

## 1. L'énergie interne

Les particules qui composent la matière (molécules, atomes ou ions) ne sont jamais au repos : elles sont en vibration permanente et possèdent donc une certaine **énergie cinétique**<sup>(1)</sup>. Elles sont également en interaction, elles possèdent donc une **énergie potentielle d'interaction**<sup>(2)</sup>.

### Définition :

**L'énergie interne**, notée **U**, est égale à la somme de l'énergie cinétique (microscopique) de chaque entité élémentaire (de masse non nulle) et de toutes les énergies potentielles (microscopiques) d'interaction des entités élémentaires de ce système.

L'énergie interne est donc une composante de l'énergie totale d'un système qui s'écrit comme la somme de l'**énergie mécanique** et de l'**énergie interne** :

$$E_{\text{Totale}} = E_{\text{Cinétique (macroscopique)}} + E_{\text{Potentielle (macroscopique)}} + U$$

$$\text{(avec } U = E_{\text{Cinétique (microscopique)}} + E_{\text{Potentielle (microscopique)}})$$

### Remarques :

- La valeur de l'énergie interne n'est ni mesurable, ni calculable : on peut néanmoins avoir accès à des variations d'énergie interne  $\Delta U$  ;
- Pour décrire un système thermodynamique (ensemble de particules microscopiques), on utilise des grandeurs physiques appelées « **variables d'état** » du système : la température (T), la pression (P), la masse volumique ( $\rho$ ), etc.

### Variations d'énergie interne par transferts d'énergie à l'échelle macroscopique :

Dans le cas d'une réaction chimique, le système réactionnel sera au repos à l'échelle macroscopique (le réacteur n'est pas en mouvement dans les champs de gravitation, électriques et magnétiques). Son énergie macroscopique reste donc constante :

$$E_{\text{Totale}} = \text{Constante} + U$$

⇒ La variation d'énergie du système au cours de la réaction chimique est donc égale à la variation de son énergie interne :

$$\Delta E_{\text{Totale}} = \Delta U$$

## 2. Les échanges d'énergie

L'expérience montre que lorsqu'on met en présence deux corps pris à des températures différentes, ils échangent spontanément de l'énergie thermique et, au bout d'un certain temps, leur température finit par devenir la même : l'un des deux corps a des particules qui ont plus d'énergie cinétique et, en les mettant en contact, les chocs entre particules font que cette énergie cinétique microscopique se transmet d'un corps à l'autre. Le corps chaud a transféré de l'énergie thermique (ou énergie sous forme de **chaleur**) au corps froid.



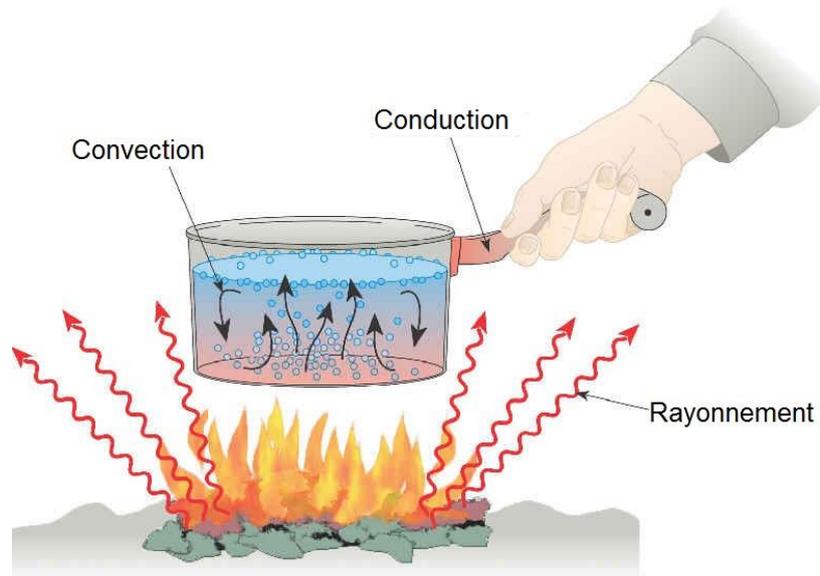
### Définition :

On appelle **transfert thermique**, un échange d'énergie sous forme de chaleur entre deux corps ayant des températures différentes.

<sup>1</sup> Les énergies cinétiques correspondant au mouvement du système dans son ensemble ainsi qu'aux mouvements des particules qui le constituent.

<sup>2</sup> Les énergies potentielles dues aux interactions du système avec le milieu extérieur par l'intermédiaire de champs (gravitationnel, électriques ou magnétiques) mais aussi dues aux interactions entre les molécules, ions, atomes, électrons, noyaux, nucléons... qui constituent ce système.

## Les modes de transferts thermiques :



### **Conduction**

C'est le mode de transfert qui apparaît toujours dans un fluide ou un solide dès qu'il y a un gradient de température. Il s'agit d'un transfert thermique de proche en proche par chocs microscopiques entre particules d'énergie différente, les particules les plus énergétiques transmettant de l'énergie cinétique à celles qui en ont moins.

Exemple : un métal que l'on chauffe à l'une de ses extrémités.

### **Convection**

C'est un mode de transfert observable dans un **fluide en mouvement**. Il est donc lié à un transfert de masse macroscopique.

Exemple : de l'eau que l'on fait chauffer.

### **Rayonnement**

Contrairement aux deux précédents, ce mode de transfert d'énergie ne nécessite pas de milieu matériel. Le transport se fait par des ondes électromagnétiques : le corps chaud émet des photons, donc une onde qui est absorbée par le corps froid qui s'échauffe.

Exemple : chauffage de la Terre par la lumière du Soleil.

Un transfert thermique peut avoir pour conséquence :

- Une variation de température des corps : la température du corps froid augmente, celle du corps chaud diminue ;
- Un changement d'état physique du corps sans variation de sa température.

### **A RETENIR :**

- **L'énergie échangée** au cours d'un transfert thermique se note **Q** (ou  $\Delta E$ ), et s'exprime, dans le système international d'unité, en **joule** (symbole : **J**) ;
- La **capacité thermique** (ou capacité calorifique) est l'énergie qu'il faut apporter à un corps pour augmenter sa température d'un kelvin. Elle se note **C** et s'exprime en **joule par kelvin** (symbole : **J.K<sup>-1</sup>**) ;
- La **capacité thermique massique** (ou chaleur spécifique) est la quantité d'énergie à apporter (par échange thermique) pour élever d'un kelvin la température d'un corps d'un kilogramme. Elle se note **c** et s'exprime en joule par kilogramme-kelvin (symbole : **J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>**) ;

→ Ces deux dernières grandeurs dépendent de la température et de l'état (physique) du système.

### **Remarques :**

- Plus la différence d'énergie cinétique entre 2 particules est grande, plus elles échangent de l'énergie ;

- La capacité thermique  $C$  s'exprime aussi en **joule par degré Celsius** (symbole :  $J \cdot ^\circ C^{-1}$ ) :

Symbole	$C$	$c$	$C_m$	Commentaire
Unité	$J \cdot ^\circ C^{-1}$	$J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	$J \cdot mol^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	$c = C_m \times \frac{n}{m} = \frac{C_m}{M}$ (M = masse molaire du corps en $g \cdot mol^{-1}$ )

- Par convention, l'énergie échangée est une grandeur **algébrique** :
  - L'énergie reçue par un système du milieu extérieur est **positive** ;
  - L'énergie cédée au milieu extérieur par un système est **négative**.



### 3. Premier principe de la thermodynamique

#### 3.1. Définition

##### Définition :

La variation de l'énergie totale d'un système fermé (pas d'échange de matière avec le milieu extérieur) au cours d'une évolution est égale à la somme des transferts d'énergie dus aux travaux  $W$ , autres que ceux des forces conservatives, et des transferts thermiques  $Q$  échangés avec le milieu extérieur :

$$\Delta E_{\text{totale}} = E_{\text{finale}} - E_{\text{initiale}} = \Delta U + \Delta E_m = W + Q$$

→ Si l'énergie du système se conserve alors :  $\Delta U = W + Q$  (**1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique**)

Remarque : A. Einstein a montré qu'il fallait y inclure l'énergie liée à la masse,  $E = mc^2$ .

##### Cas d'un système isolé

Un système est isolé lorsqu'il ne peut échanger ni matière, ni énergie avec le milieu extérieur. Néanmoins il possède déjà, en lui-même, de l'énergie.

L'énergie totale d'un système **isolé** est constante, bien que des transformations d'énergie d'un type en un autre type puissent avoir lieu à l'intérieur du système.

$$\Delta U = 0$$

Exemple : L'univers est un système isolé, son énergie totale est constante Elle est la somme de toutes les formes d'énergie : énergie cinétique macroscopique, énergie potentielle macroscopique, énergie électrique, énergie magnétique, énergie nucléaire, énergie interne, etc.

→ Faire le **bilan d'énergie** d'un système consiste à exprimer la variation de l'énergie totale du système lors de son évolution.

Pour établir un bilan énergétique, on doit :

- Définir le système macroscopique étudié ;
- Déterminer la nature des transferts énergétiques (Travail  $W$  ou chaleur  $Q$ ) entre le système et l'extérieur ;
- Déterminer le sens de ces transferts – l'énergie reçue par le système est comptée positivement, et celle cédée, négativement – puis en faire la somme ;
- Représenter ces transferts par une chaîne énergétique et conclure sur l'efficacité de la transformation en déterminant généralement un **rendement** (en %) noté  $\eta$  (êta) :

$$\eta = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie reçue}}$$

### 3.2. Énergie interne d'un système incompressible

#### Définition :

Dans le cas d'un système **incompressible** (= volume constant), la variation d'énergie interne  $U$  mise en jeu pour faire varier la **température** d'un corps de masse  $m$  de  $\Delta T$ , au cours d'un transfert thermique, est :

$$\Delta U = m \times c \times (T_{\text{finale}} - T_{\text{initiale}})$$

$m$  = masse (en kg)  
 $c$  = capacité thermique massique du corps (en  $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )  
 $\Delta T = T_{\text{finale}} - T_{\text{initiale}}$  = variation de température du corps au cours du transfert thermique (en K)  
 $\Delta U$  = énergie interne (en J)

→ Pour des températures en °C, la relation s'écrira :  $\Delta U = m \times c \times (\theta_{\text{finale}} - \theta_{\text{initiale}})$

#### À RETENIR :

Lorsque la température (en K) d'un corps solide ou liquide varie d'une valeur initiale  $T_{\text{initiale}}$  à une valeur finale  $T_{\text{finale}}$ , la quantité de chaleur  $Q$  (ou énergie thermique) transférée est égale à la variation d'énergie interne  $\Delta U$  :

$$Q = \Delta U = m \times c \times (T_{\text{finale}} - T_{\text{initiale}})$$

→ Cette relation n'est valable que si le travail  $W$  est nul, sinon :  $Q = \Delta U - W = m \times c \times (T_{\text{finale}} - T_{\text{initiale}}) - W$

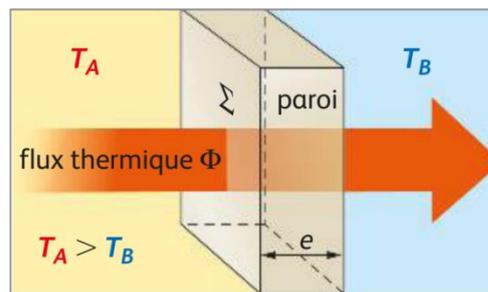
### 4. Les transferts thermiques

#### 4.1. Le flux thermique

#### Définition :

Le **flux thermique**  $\Phi$  (en  $\text{W}$  ou  $\text{J.s}^{-1}$ ) correspond au transfert thermique  $Q$  (en J) qui s'écoule entre les deux faces d'une paroi pendant une durée  $\Delta t$  (en s) :

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



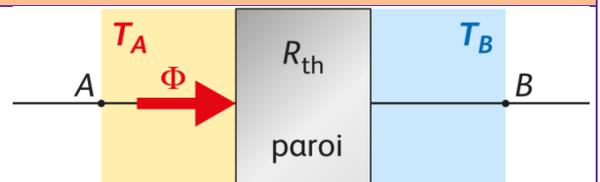
#### 4.2. La résistance thermique

#### Définition :

On nomme **résistance thermique** (noté  $R_{\text{th}}$ ) la caractéristique de la paroi qui mesure sa capacité à limiter le transfert thermique. Plus une paroi est isolante, plus sa résistance thermique est grande.

On montre que la résistance thermique d'un matériau est liée au flux thermique à travers la paroi et à la différence de température entre les 2 faces du matériau par :

$$R_{\text{th}} = \frac{\Delta T}{\Phi} \quad \begin{cases} \Delta T = T_A - T_B = \text{Variation de température (en K)} \\ \Phi = \text{Flux thermique (en W)} \\ R_{\text{th}} = \text{Résistance thermique du matériau (en K.W}^{-1}\text{)} \end{cases}$$



#### Remarques :

- On définit également la résistance **thermique surfacique**  $R_s$  (en  $\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$ ) comme étant la résistance thermique de la paroi pour une surface de  $1 \text{ m}^2$ .

$$R_s = S \times R_{\text{th}}$$

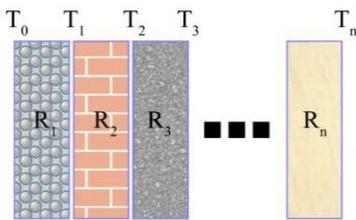
- Un bon isolant a donc une forte résistance thermique.
- Le flux thermique  $\Phi$  peut donc aussi s'écrire :

$$\Phi = \frac{S}{R_s} \times \Delta T \quad (\text{avec } S = \text{surface de la paroi, en m}^2)$$

- Il existe une relation entre la résistance thermique d'une paroi et ses caractéristiques :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S} \quad \begin{cases} e = \text{épaisseur de la paroi (en m)} \\ S = \text{surface de la paroi (en m}^2) \\ \lambda = \text{conductivité thermique de la paroi (en W.m}^2.\text{K}^{-1}) \end{cases}$$

- Dans le cas d'une paroi constituée de plusieurs couches de matériaux différents, les résistances thermiques s'additionnent.



La résistance totale de plusieurs parois accolées (ci-contre) est la somme des résistances thermiques de chaque paroi :

$$R_{totale} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

## 5. La loi phénoménologique<sup>(3)</sup> de Newton

### 5.1. Définition

#### Définition :

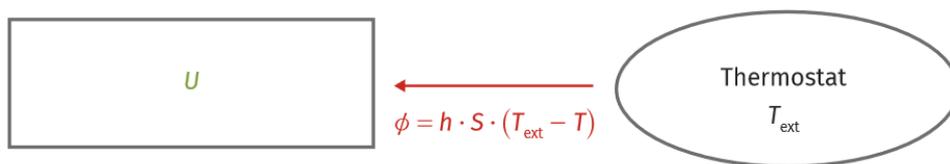
La **loi phénoménologique de Newton**, pour les transferts thermiques, est une loi qui exprime le flux thermique reçu par un système au travers d'une paroi en fonction de l'écart de température entre l'extérieur et le système :

$$\Phi = h \times S \times (T_{ext} - T)$$

$$\begin{cases} h = \text{coefficient de Newton ou de transfert thermique de la paroi (en W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}) \\ S = \text{surface de contact entre les deux milieux (m}^2) \\ T_{ext} \text{ et } T : \text{températures extérieure et du système (en K)} \\ \Phi = \text{flux thermique (en W)} \end{cases}$$

→ h dépend de nombreux paramètres (rugosité de la paroi, nature du fluide, etc.) et ne peut être déterminé que par des mesures expérimentales (d'où le terme « phénoménologique »).

### 5.2. Évolution d'un système au contact d'un thermostat<sup>(4)</sup>



❶ D'après le premier principe de la thermodynamique, la variation d'énergie interne est égale à l'énergie Q reçue ou cédée à l'extérieur :

$$\Delta U = Q \Leftrightarrow m \times c \times (T_{ext} - T) = Q \quad (\text{système incompressible})$$

❷ D'après l'expression du flux thermique, on peut écrire :

$$Q = \Phi \times \Delta t \Rightarrow m \times c \times \Delta T = \Phi \times \Delta t$$

Pour des durées très petites ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) :

$$\delta Q = \Phi \times dt$$

<sup>3</sup> Signifie : basée sur l'observation des phénomènes, sur des données expérimentales.

<sup>4</sup> Un thermostat est un système dont la température reste constante et qui peut échanger de l'énergie sous forme de chaleur.

③ Dérivons par rapport au temps :

$$m \times c \times \frac{dT}{dt} = \Phi$$

④ En utilisant la loi phénoménologique de Newton on obtient :  $m \times c \times \frac{dT}{dt} = h \times S \times (T_{\text{ext}} - T)$

$$\Leftrightarrow \frac{dT}{dt} = \frac{h \times S}{m \times c} (T_{\text{ext}} - T) \Leftrightarrow \frac{dT}{dt} + \frac{h \times S}{m \times c} T = \frac{h \times S}{m \times c} \times T_{\text{ext}}$$

(équation différentielle du premier ordre)

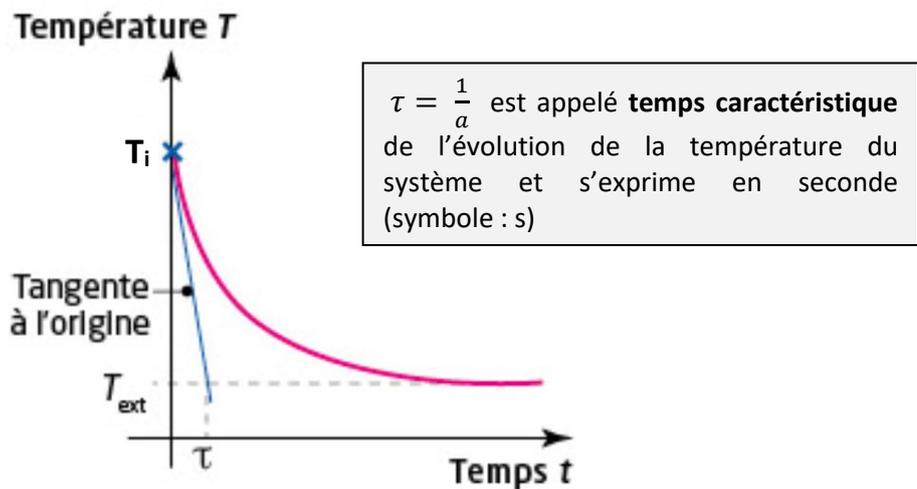
⑤ Résolution de l'équation différentielle :

Si on note  $T_i$  la température initiale du système et  $T_{\text{ext}}$  celle du thermostat, alors l'évolution la température  $T$  du système en fonction du temps  $t$ , solution de l'équation différentielle, est donnée par :

$$T(t) = (T_i - T_{\text{ext}}) \times e^{-at} + T_{\text{ext}} \quad (\text{avec } a = \frac{h \times S}{m \times c})$$

Rappel :  $\lim_{x \rightarrow +\infty} \exp(-x) = 0$

Allure de la courbe dans le cas d'un refroidissement ( $T_{\text{ext}} < T_i$ ) :

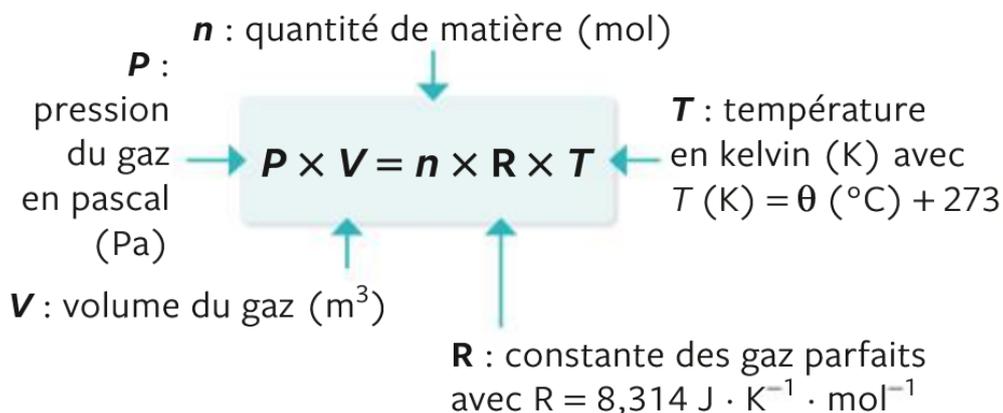


On peut donc aussi écrire :

$$T(t) = (T_i - T_{\text{ext}}) \times e^{-\frac{t}{\tau}} + T_{\text{ext}} \quad (\text{avec } \tau = \frac{m \times c}{h \times S})$$

## 6. Le modèle du gaz parfait

### Équation d'état du gaz parfait



## 2. Effectuer des bilans d'énergie sur un système : le premier principe de la thermodynamique

<p>Énergie interne d'un système. Aspects microscopiques.</p> <p>Premier principe de la thermodynamique. Transfert thermique, travail.</p>	<p>Citer les différentes contributions microscopiques à l'énergie interne d'un système.</p> <p>Prévoir le sens d'un transfert thermique.</p> <p>Distinguer, dans un bilan d'énergie, le terme correspondant à la variation de l'énergie du système des termes correspondant à des transferts d'énergie entre le système et l'extérieur.</p>
<p>Capacité thermique d'un système incompressible. Énergie interne d'un système incompressible.</p>	<p>Exploiter l'expression de la variation d'énergie interne d'un système incompressible en fonction de sa capacité thermique et de la variation de sa température pour effectuer un bilan énergétique.</p> <p><i>Effectuer l'étude énergétique d'un système thermodynamique.</i></p>
<p>Modes de transfert thermique. Flux thermique. Résistance thermique.</p>	<p>Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection, rayonnement.</p> <p>Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant donnée.</p>
<p>Bilan thermique du système Terre-atmosphère. Effet de serre.</p>	<p>Effectuer un bilan quantitatif d'énergie pour estimer la température terrestre moyenne, la loi de Stefan-Boltzmann étant donnée.</p> <p>Discuter qualitativement de l'influence de l'albédo et de l'effet de serre sur la température terrestre moyenne.</p>
<p>Loi phénoménologique de Newton, modélisation de l'évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat.</p>	<p>Effectuer un bilan d'énergie pour un système incompressible échangeant de l'énergie par un transfert thermique modélisé à l'aide de la loi de Newton fournie. Établir l'expression de la température du système en fonction du temps.</p> <p><i>Suivre et modéliser l'évolution de la température d'un système incompressible.</i></p> <p><b>Capacité mathématique</b> : Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant.</p>