

## Chapitre 16

### Premier principe de la thermodynamique

EN mécanique, on a étudié des mouvements en ne tenant compte que des actions extérieures appliquées au système. En réalité, le système peut subir des variations internes d'énergie, notamment en fonction des variations de température et pression internes. L'étude de ces phénomènes est appelée la thermodynamique.

Le plan du chapitre est le suivant :

- Modèle du gaz parfait
- Énergie interne et premier principe de la thermodynamique

#### 16.1 Modèle du gaz parfait

##### 16.1.1 Grandeurs thermodynamiques

###### Grandeurs thermodynamiques

Pour définir un système thermodynamique, on utilise en général quatre grandeurs physiques :

- La pression  $P$  (en Pa)
- La température  $T$  (en K)
- Le volume  $V$  (en  $\text{m}^3$ )
- La quantité de matière  $n$  (en mol)

##### 16.1.2 Équation d'état d'un gaz parfait

###### Équation d'état d'un gaz parfait

Un gaz parfait est un gaz constitué d'entités ne présentant aucune interaction intermoléculaire, et dont le volume propre du gaz contenu est négligeable devant le volume du contenant. L'équation d'état d'un gaz parfait à la pression  $P$ , la température  $T$ , le volume  $V$  et la quantité de matière  $n$  est la suivante :

$$PV = nRT$$

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

#### 16.2 Énergie interne et premier principe de la thermodynamique

##### 16.2.1 Énergie interne

Lorsque l'on étudie un système thermodynamique, il présente une énergie mécanique  $E_{m(\text{macro})} = E_{c(\text{macro})} + E_{p(\text{macro})}$ , qui traduit le bilan d'énergie du système à l'échelle macroscopique, dépendant des actions extérieures appliquées au système. On considèrera dans ce qui suit que le système est immobile à l'échelle macroscopique.

En réalité, un système peut subir des variations d'énergie à l'échelle microscopique, que ce soit des variations d'énergie cinétique ou potentielle. L'énergie interne est la grandeur permettant de traduire

ces échanges d'énergie microscopique entre le système et le milieu extérieur.

### Énergie interne

L'énergie interne  $U$  (en J) d'un système thermodynamique est la résultante des énergies cinétique et potentielle à l'échelle microscopique.

## 16.2.2 Travail et chaleur

### Travail et chaleur

- Le travail  $W$  (en J) d'un système thermodynamique est l'énergie d'origine mécanique (donc de mouvement) échangée entre le système et le milieu extérieur.
- La chaleur  $Q$  (en J) d'un système thermodynamique est l'énergie d'origine thermique échangée avec le milieu extérieur.

Remarque :

- $W > 0$  et/ou  $Q > 0$  : énergie reçue par le système
- $W < 0$  et/ou  $Q < 0$  : énergie cédée par le système

## 16.2.3 Premier principe de thermodynamique

### Premier principe de la thermodynamique

Lorsqu'un système thermodynamique fermé (pas d'échange de matière avec l'extérieur) subit une transformation, sa variation d'énergie interne  $\Delta U$  entre l'état initial et l'état final, est égale à la somme de la quantité de travail  $W$  et de chaleur  $Q$  échangée avec le milieu extérieur :

$$\Delta U = W + Q$$

Remarque : Cette loi permet de généraliser le théorème de l'énergie mécanique quant à la conservation de l'énergie d'un système. La variation totale d'énergie d'un système, s'il est en mouvement, est donc :  $\Delta E = \Delta E_m + \Delta U$

## 16.2.4 Capacité thermique pour un système incompressible

Pour rappel, on dit qu'un système est incompressible lorsqu'il ne subit pas de variation de volume. On peut en général faire cette hypothèse pour les liquides et les solides. Dans ce cas, le travail  $W$  est nul et  $\Delta U = Q$ . Le système subit uniquement des transferts thermiques. On considèrera également que le système ne subit aucun changement d'état, transformation chimique ou nucléaire.

### Capacité thermique

Lorsqu'un système thermodynamique incompressible subit un transfert thermique, sa variation d'énergie interne  $\Delta U$  est proportionnelle à la variation de température  $\Delta T$  :

$$\Delta U = C\Delta T = mc\Delta T$$

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

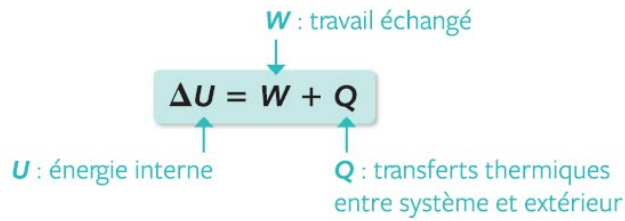
$\Delta T$  la variation de température (en K)

$m$  la masse (en kg)

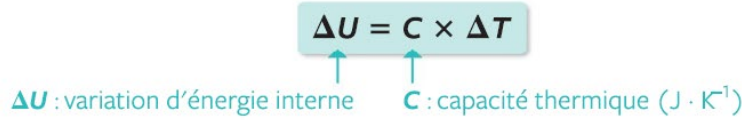
$C$  la capacité thermique (en  $\text{J.K}^{-1}$ )

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

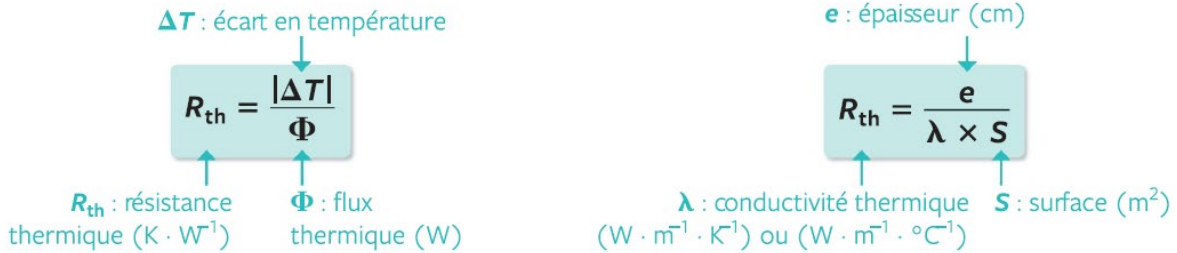
# Le premier principe de la thermodynamique



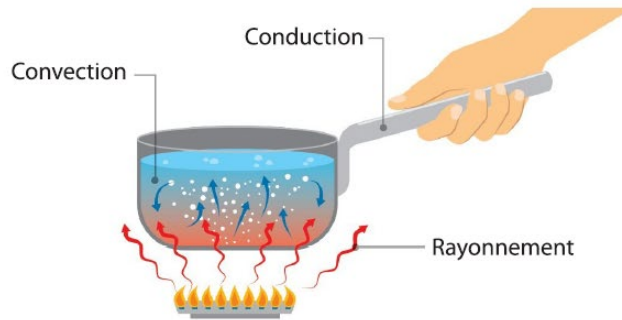
## Variation d'énergie interne pour une phase condensée



## Résistance thermique d'un matériau



## Le transfert thermique



## Évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat

Un **thermostat** est un système capable d'échanger de l'énergie sous forme de transferts thermiques sans que sa température ne soit modifiée.

La loi phénoménologique de Newton permet de caractériser les échanges thermiques élémentaires  $\delta Q$  d'une **phase condensée** (c'est-à-dire un solide ou un liquide) en contact avec un **thermostat** pendant une durée infinitésimale  $dt$  :

$h$  : coefficient d'échange conducto-convectif       $T_{ext}$  : température du thermostat

$$\delta Q(t) = h \times S \times (T_{ext} - T(t)) \times dt$$

$S$  : surface d'échange       $T$  : température du système

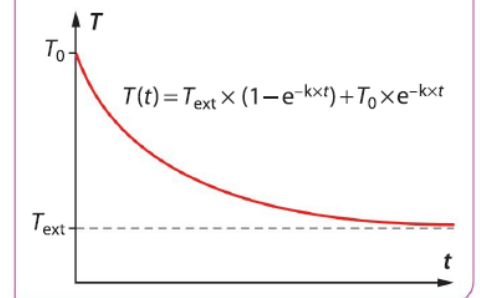
D'après le premier principe appliqué au système étudié (> Focus Maths) :

$$dU(T) = CdT(t) = \delta Q(t) \text{ soit } CdT(t) = h \times S \times (T_{ext} - T(t)) \times dt$$

d'où l'équation différentielle :  $\frac{dT(t)}{dt} + \frac{h \times S}{C} \times T(t) = \frac{h \times S}{C} \times T_{ext}$

La solution de cette équation est  $T(t) = (T_0 - T_{ext}) \times e^{-k \times t} + T_{ext}$

### 5 Température d'un système



## Chapitre 16

# Thermodynamique : Transferts thermiques

---

<b>16.1</b>	<b>Transfert thermique par conduction</b>	<b>96</b>
16.1.1	Définition	96
16.1.2	Résistance thermique et flux	96
<b>16.2</b>	<b>Transfert thermique par rayonnement</b>	<b>97</b>
<b>16.3</b>	<b>Transfert thermique conducto-convectif</b>	<b>97</b>
16.3.1	Définition	97
16.3.2	Loi phénoménologique de Newton	97
16.3.3	Loi d'évolution d'un système au contact d'un thermostat	97

---

CE chapitre est consacré à l'étude thermodynamique des transferts thermiques. Il existe en effet plusieurs mécanismes de transfert de chaleur :

- Transfert thermique par conduction
- Transfert thermique par rayonnement
- Transfert thermique conducto-convectif

#### Transfert thermique

Un **transfert thermique** est un transfert de chaleur, qui se fait toujours dans le sens **de la source chaude vers la source froide**.

Nous étudierons ces trois phénomènes dans chacune des trois parties qui suivent.

## 16.1 Transfert thermique par conduction

### 16.1.1 Définition

Dès lors que l'on met deux systèmes thermodynamiques de températures initiales respectives  $T_1$  (source chaude) et  $T_2$  (source froide), un transfert thermique se fait par **conduction**, de la source chaude vers la source froide.

#### Transfert thermique par conduction

Un **transfert thermique par conduction** est un transfert de chaleur qui se fait par contact direct entre deux systèmes thermodynamiques.

### 16.1.2 Résistance thermique et flux

#### Flux thermique par conduction

Le **flux thermique** (ou **puissance thermique**), noté  $\phi_{th}$ , à travers la cloison séparant deux milieux de températures  $T_1$  (source chaude) et  $T_2$  (source froide), est donné par la relation suivante, **analogue à la loi d'Ohm en électricité**, faisant intervenir la **résistance thermique**  $R_{th}$  de la cloison :

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

$\phi_{th}$  est la puissance thermique (flux thermique) (en W)

$T_1$  et  $T_2$  les températures respectives des milieux 1 et 2 (en K)

$R_{th}$  la résistance thermique de la cloison (en  $K \cdot W^{-1}$ )

Pour une cloison de géométrie parallélépipédique, d'épaisseur  $e$  (en m) et de surface  $S$  (en  $m^2$ ), la résistance thermique  $R_{th}$  est liée à la **conductivité thermique** du matériau  $\lambda$  (en  $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$ ) :

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

## 16.2 Transfert thermique par rayonnement

### Transfert thermique par rayonnement

Un **transfert thermique par rayonnement** se fait par l'intermédiaire d'une absorption de photons issus d'un rayonnement.

**PARTIE RETIRÉE POUR LE BAC 2020 - 2021**

## 16.3 Transfert thermique conducto-convectif

### 16.3.1 Définition

La convection est le phénomène qui survient dans un fluide lorsque celui-ci subit un changement local de température, la chaleur se transfère alors par déplacement des molécules. En effet, lorsque la température d'un fluide augmente, sa masse volumique diminue et le fluide s'élève à cause de la poussée d'Archimède.

### Transfert thermique conducto-convectif

Un **transfert thermique conducto-convectif** est un transfert de chaleur qui se fait par contact direct entre un système thermodynamique solide et un fluide.

### 16.3.2 Loi phénoménologique de Newton

#### Loi phénoménologique de Newton

Soit un système thermodynamique solide, en contact avec un fluide suivant une surface de contact  $S$  (en  $\text{m}^2$ ). La puissance thermique  $\phi(t)$  conducto-convective échangée à travers la surface  $S$  est donnée par la relation suivante :

$$\phi(t) = hS (T_{ext} - T(t))$$

$\phi(t)$  est la puissance thermique (flux thermique) (en W)

$h$  est le **coefficient de transfert conducto-convectif** (en  $\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ )

$S$  la surface de contact (en  $\text{m}^2$ )

$T_{ext}$  la température du fluide, constante, loi de l'interface (en K)

$T(t)$  la température du système à l'instant  $t$  (en K)

### 16.3.3 Loi d'évolution d'un système au contact d'un thermostat

Soit un système thermodynamique solide, de capacité thermique  $C$ , plongé dans un fluide de température constante  $T_{ext}$ , ayant une surface  $S$  de contact avec le fluide. On considère l'évolution de la température  $T$  de ce système entre un instant  $t$  et un instant plus tard  $t + \Delta t$ .

D'après le premier principe de la thermodynamique :  $\Delta U = W + Q$ . Le système étant solide, il est considéré incompressible donc  $W = 0$  et alors la variation d'énergie interne de ce système peut s'écrire :

$$\Delta U = C (T(t + \Delta t) - T(t))$$

Cette variation d'énergie interne pendant une durée  $\Delta t$  peut également se relier à la puissance thermique échangée :

$$\Delta U = \phi(t) \times \Delta t$$

Ainsi, on obtient en divisant par  $\Delta t$  :

$$C \times \frac{T(t + \Delta t) - T(t)}{\Delta t} = hS (T_{ext} - T(t))$$

Or par définition du nombre dérivé :

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{T(t + \Delta t) - T(t)}{\Delta t} = \frac{dT(t)}{dt}$$

On obtient ainsi l'équation différentielle de la température du solide plongé dans le fluide de température  $T_{ext}$ .

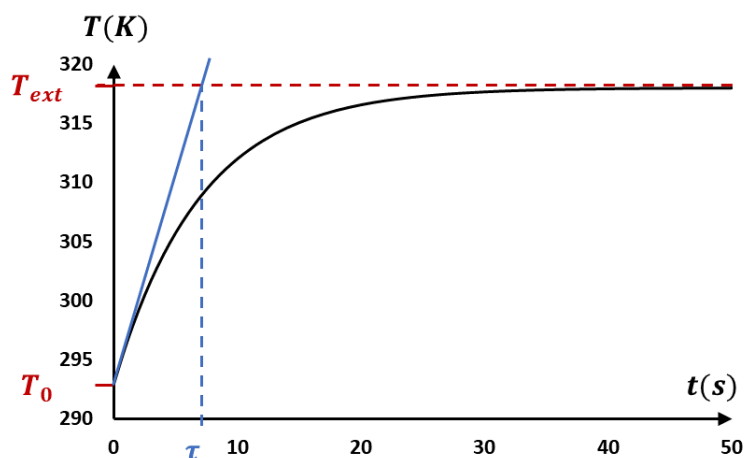
#### Loi d'évolution au contact d'un thermostat

L'équation différentielle vérifiée par la température  $T(t)$  du solide plongé dans un fluide de température constante  $T_{ext}$  est la suivante :

$$\frac{dT(t)}{dt} + \frac{hS}{C}T(t) = \frac{hS}{C}T_{ext}$$

La solution est donnée par la relation suivante, où  $T_0$  représente la température initiale du solide, et  $\tau = \frac{C}{hS}$  le temps caractéristique (en s) :

$$T(t) = T_{ext} + (T_0 - T_{ext}) e^{-t/\tau}$$



**Figure 16.1** – Exemple d'évolution de la température d'un solide au contact d'un fluide de température constante  $T_{ext}$