MODULE ⇒ MOUVEMENTS ET INTERACTIONS 2

Leçon 7

NOTION DE QUANTITÉ DE CHALEUR

ACTIVITÉS

Activité

Pour préparer un thé vert à la menthe, on souhaite faire bouillir un volume V d'eau dans une théière en fonte.

Le gaz de ville, principalement constitué de méthane, est le combustible utilisé. L'énergie libérée par la combustion du gaz sert à chauffer l'eau et la théière.

- Quel nom-t-on à l'énergie libérée ?
- Quel mode de transfert d'énergie a-t-on mis en évidence ici ?

Objectifs

- Expliquer chaque mode de transfert d'énergie
- Montrer que la chaleur est une forme d'énergie
- Mesurer les quantités de chaleur échangées
- Énoncer et appliquer le principe des échanges de chaleur.
- Déterminer expérimentalement les capacités thermiques massiques de solides et de liquides.

1. Généralité

- Les **échangeurs** de chaleur sont des dispositifs qui assurent l'échange de chaleur entre deux fluides à des températures différentes sans qu'ils soient mélangés.
- En physique, un corps possède de l'énergie s'il est capable de fournir un travail au milieu extérieur.
- On appelle **travail**, le mode de transfert d'énergie qui s'effectue macroscopiquement de manière ordonnée.
- Lorsqu'un corps fournit du travail au milieu extérieur, son énergie **diminue** et dans le cas contraire, elle **augmente**.

2. Les formes d'énergie et leur(s) sources(s)

a) Énergie mécanique E_M

Il existe trois formes d'énergie mécanique :

- L'énergie potentielle de pesanteur E_{PP} : C'est l'énergie que possède un corps soumis à la seule action de son poids.

Exemple

Chute libre d'un corps.

- L'énergie potentielle élastique E_{Pe} : C'est l'énergie que possède un corps capable de se déformer.

Exemple

Le ressort ; un arc tendu ; un fil de torsion ; etc.

- L'énergie cinétique E_C : C'est l'énergie que possède un corps à cause de sa vitesse dans son mouvement.

Exemple

Voiture défonçant un mur lors d'un accident ; choc élastique ou mou.

NB : L'énergie mécanique E_M d'un système, est la somme algébrique des énergies potentielle et cinétiques :

$$E_M = E_{PP} + E_{Pe} + E_C \qquad (7.1)$$

b) L'énergie électrique

C'est l'énergie produit par un générateur (pile, alternateur, dynamo ou génératrice, accumulateur,…). Cette énergie permet de faire fonctionner des équipements (appareils électriques) tels que des lampes à incandescence, des moteurs électriques, etc.

c) Énergie calorifique ou thermique

C'est la transformation partielle de la chaleur en travail. Cas du moteur thermique à combustion interne.

d) Énergie rayonnante

C'est par exemple l'énergie fournie par le soleil.

e) Énergie chimique

C'est l'énergie produite lors des transformations chimiques.

Exemple

Les combustibles dans les réactions de combustion vive (exothermique).

Combustible + comburant → Produit + chaleur.

Remarque

Un comburant est un corps qui provoque la combustion d'un autre corps.

f) Énergie nucléaire

C'est l'énergie produite au cours des réactions nucléaires i.e. celles qui affectent les noyaux des atomes.

Remarque

Les modes de transfert d'énergie sont :

- La chaleur : C'est le mode de transfert d'énergie qui s'effectue microscopiquement par chocs et de manière désordonnée.
- La conduction et convection thermiques
- Le rayonnement : C'est le mode de transfert microscopique dû à la réception ou l'émission des rayons lumineux. Il s'effectue microscopiquement de manière désordonnée.
- Le travail : C'est le mode de transfert d'énergie qui s'effectue macroscopiquement de manière ordonnée. Il peut être mécanique ou électrique.

3. La notion de chaleur

3.1. Les sources de chaleur

Les sources de chaleur sont nombreuses et variées. Nous pouvons citer :

- Les **combustions vives** (réactions chimiques)

Exemple

- Combustion du bois ou du charbon de bois
- Combustion du pétrole et dérivés : pétrole lampant, butane, essence, kérosène, gasoil, etc.

- Le **courant électrique** : L'effet calorifique transforme l'énergie électrique en chaleur.

Exemple

ALUCAM (Édéa). Température au bord des cuves d'électrolyse 1000°C pour produire de l'aluminium à partir de l'alumine ce qui nécessite des courants électriques très intenses.

- Le **rayonnement solaire**…

3.2. Les modes de transfert de chaleur

(a) Mise en évidence de la chaleur

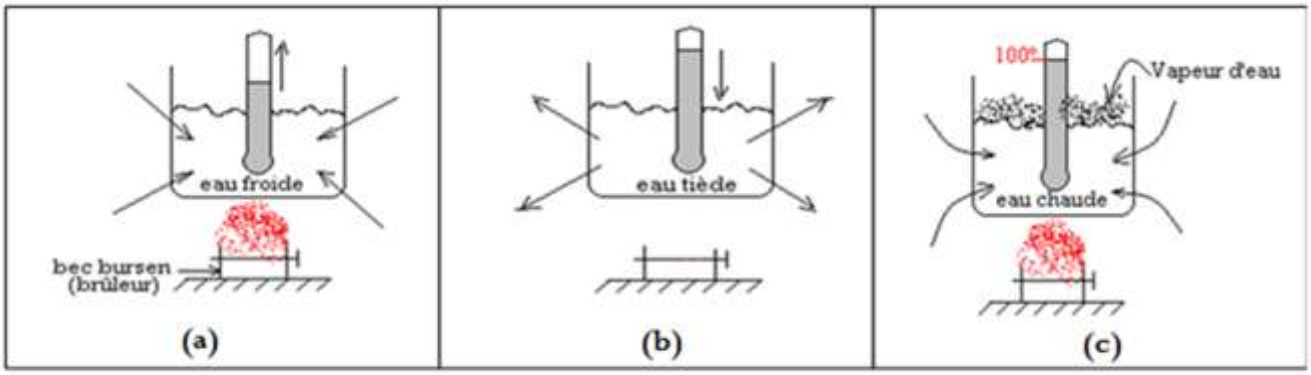


Figure 7.1 : Les états de l'eau

- **Expérience 1**

- On chauffe de l'eau placée dans un bocal à l'aide d'un bec bunsen. Comme le montre la figure 7.1 (a) ci-dessus.
- L'eau s'échauffe car la température augmente dans le thermomètre.

Conclusion 1

L'eau s'échauffant, reçoit de la chaleur du milieu extérieur (feu).

- On éteint le brûleur. Figure 7.1 (b).
- L'eau se refroidie car la température diminue dans le thermomètre.

Conclusion 2

L'eau en se refroidissant cède de la chaleur au milieu extérieur.

- **Expérience 2**

Chauffons l'eau jusqu'à ébullition (100°C). Elle se vaporise et sa température reste constante jusqu'à la fin de l'ébullition. Figure 7.1 (c).

Conclusion 3

Lorsque l'eau change d'état physique (liquide à gaz), sa température reste constante. On parle de transformation isotherme.

- **Conclusion (récapitulatif)**

Un corps qui reçoit ou cède de la chaleur subit :
- Soit une variation de température sans changement d'état (a) et (b),
- Soit un changement d'état sans variation de température (c).

(b) Chaleur et travail

- Un cycliste sur une pente désire garder constante sa vitesse. Il est nécessaire pour lui de freiner ce qui crée des frottements au niveau des pneus et donc apparition de la chaleur :
  Freinage (travail) → frottements (chaleur).
- Fonctionnement d'un moteur à explosion à 4 temps :
  Combustion au 3e temps (chaleur) → rotation de l'arbre moteur au 4e temps (travail).

- **Récapitulatif 1**

- Chaleur et travail se transforment mutuellement.
- La transformation totale du travail en chaleur est possible mais celle de la chaleur en travail est impossible d'où la notion de rendement dans les machines.
- Lorsqu'un système fournit du travail au milieu extérieur, son énergie diminue et dans le cas contraire, son énergie augmente.
- Travail et chaleur se transforment mutuellement.

- **Récapitulatif 2**

Chaleur et travail sont deux modes de transfert d'énergie entre un système et son milieu extérieur.

(c) Les transferts de chaleur

- **Propagation par conduction**

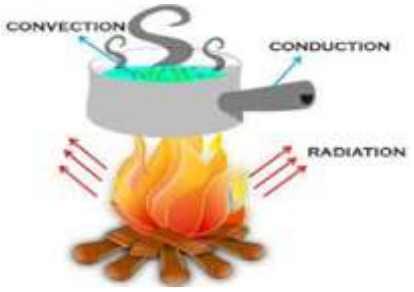
Lorsque deux corps sont en contact, la chaleur se propage du corps de température la plus élevée (corps chaud) vers celui de plus basse température (corps froid). Ceci jusqu'à ce que leur température soit égale : C'est l'équilibre thermique.

NB

Le temps mis pour atteindre l'équilibre thermique dépend de la nature des corps en contact :
- Rapidité : les bons conducteurs thermiques (cas des métaux)
- Lenteur : isolants ou mauvais conducteurs thermiques (cas des matières plastiques, bois sec, laine, etc.).

- **Propagation par convection**

La convection est le mouvement pris par un fluide dû aux différences de températures entre les différentes parties de ce fluide. Les parties chaudes (masse volumique basse) montent au-dessus et les parties froides (masse volumique élevée) descendent. Ceci crée dans le fluide le phénomène de courant de convection. Figure 7.2.



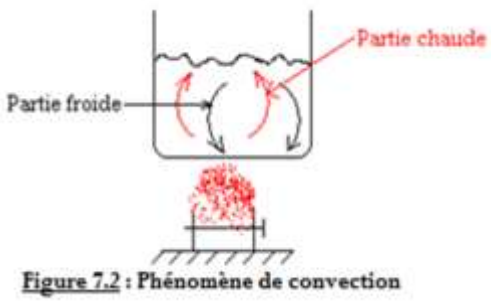
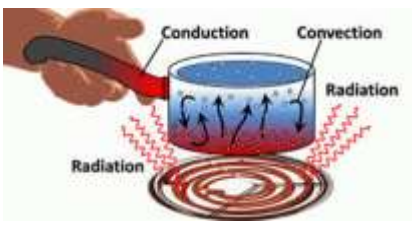


Figure 7.2 : Phénomène de convection



- Propagation par rayonnement

Exemple *chaleur..du..soleil* $\xrightarrow{transfert..à..travers..le..cos\,mos}$ *vide..interplanétaire* *Terre*

Le transfert de chaleur par rayonnement ne fait pas intervenir l'agitation des particules.

4. Mesurage des quantités de chaleur

4.1. La calorimétrie

La calorimétrie est la partie de la thermodynamique(1) qui a pour objet, la mesure de la quantité de chaleur. Ce sont par exemple les quantités de chaleur nécessaires pour augmenter la température d'un corps, pour changer son état, ou encore les quantités de chaleur cédées par un corps qui refroidit (changement d'état physique des corps).

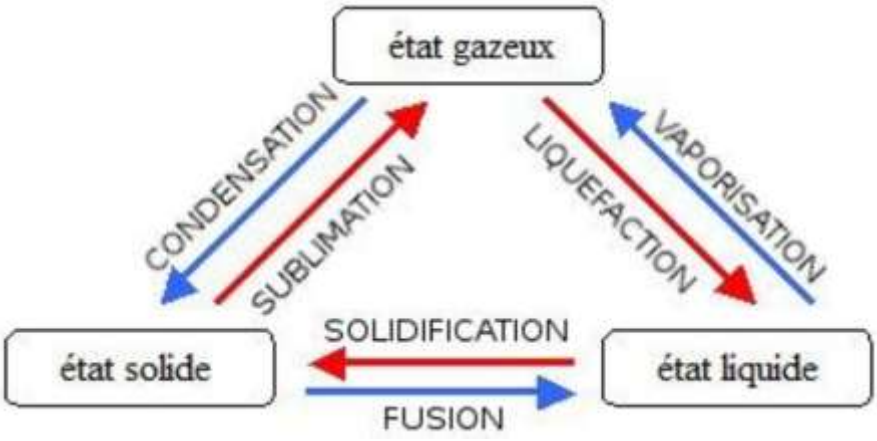


Figure 7.3 : Changement d'état physique de l'eau

4.2. Les types de calorimètres

- Le calorimètre est un appareil destiné à mesurer les quantités de chaleur (énergie calorifique, du latin calo = chaleur).
- Le calorimètre constitue un système thermodynamique isolé, ce qui implique qu'il n'y a pas d'échange de matière et d'énergie (travail ou chaleur) avec le milieu extérieur : c'est un milieu adiabatique. Cela ne signifie cependant pas qu'il n'y a pas des transferts de chaleur entre les différentes parties de l'ensemble calorimétrique (composés objets de l'étude, accessoires et paroi du calorimètre…)
- Comme calorimètre, on peut citer :

- Le calorimètre de réaction (figure 7.4)
- Le calorimètre de Rumford(2) ;
- Le calorimètre de Lavoisier(3) (figure 7.5)
- Le calorimètre de Tewarson(4)
- Le calorimètre de Berthelot (figure 7.6)
- Le calorimètre de Dewar-d' Arsonval (figure 7.7)

Figure 7.4 : Calorimètre de réaction

Figure 7.5 : Calorimètre à glace d'Antoine Lavoisier et Pierre Laplace en 1783

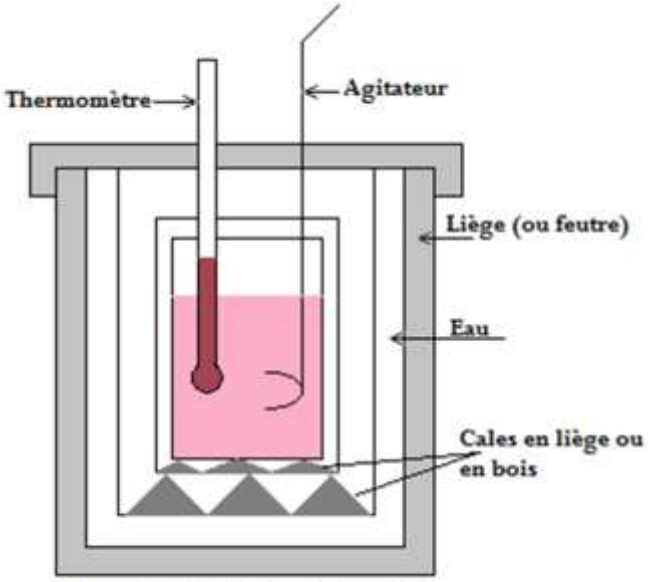


Figure 7.6 : Calorimètre de Berthelot

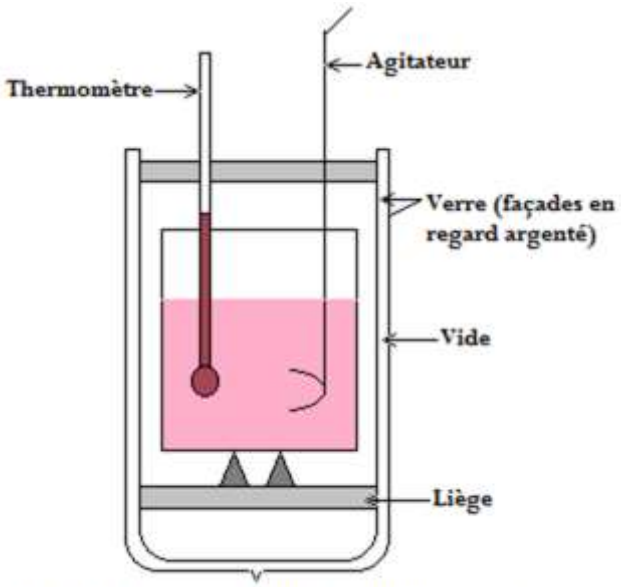


Figure 7.7 : Calorimètre de Deward-d'Arsonval

4.3. Principe des échanges de chaleur

- On note **Q**, la quantité de chaleur reçue ou cédée et s'exprime en joules (J).
- Notons cependant que :
- Si **Q > 0**, le système reçoit la chaleur du milieu extérieur
- Si **Q < 0**, le système cède de la chaleur au milieu extérieur
- Si **Q = 0**, il n'y a pas d'échange de chaleur.
- Énoncé du principe :
  « Lorsque plusieurs corps sont en contact dans une enceinte adiabatique, la somme algébrique des quantités de chaleur échangées par ces corps pour atteindre l'équilibre thermique, est nulle :

$$\sum_{i=1}^{n} Q_i = Q_1 + Q_2 + \cdots + Q_n = 0 \qquad (7.2)$$

»

Remarque

On utilise parfois comme unité d'énergie, la **calorie** (**cal**) : **1 cal = 4,186 J**.

5. Définition de la chaleur massique d'un corps

5.1. Notion de capacité calorifique

- La **chaleur massique C** (ou **capacité thermique massique**) d'un corps, représente la quantité de chaleur à fournir à 1 kg de ce corps pour élever sa température à 1°C (ou 1 K). Elle s'exprime en $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ou $J.kg^{-1}.°C^{-1}$.
- La **capacité calorifique K**, est liée à la chaleur massique C d'un corps de masse m par la relation :

$$K = m \times C \qquad (7.3)$$

Unités : m (kg) ; C (J/kg/K ou J/kg/°C) ; **K** ($J.K^{-1}$ ou $J.°C^{-1}$)

5.2. Valeur en eau du calorimètre

L'**équivalent en eau** (ou **valeur en eau**) d'un système de masse **m** et de capacité thermique **C**, est la masse d'eau μ échangeant la même quantité de chaleur avec l'extérieur quand il subit la même variation de température :

$$\mu = \frac{m \times C}{C_e} = \frac{K}{C_e} \qquad (7.4)$$

Unités : m (kg) ; C (J/kg/K ou J/kg/°C) ; K (J/K ou J/°C) ; C_e (chaleur massique de l'eau) = 4190 J/kg/K.

Remarque

Dans certains manuels, $C_e = 4180$ J/kg/°C.

5.3. Chaleurs latentes de changement d'état

5.3.1. Chaleur latente de fusion L_f

- La **fusion** est le passage de l'eau de l'état solide à l'état liquide (fig. 7.3). Au cours de ce passage, il y a échange de chaleur.
- **Chaleur latente de fusion L_f** : C'est la quantité de chaleur à fournir à 1kg du corps pris à sa température de fusion pour l'amener entièrement à l'état liquide à la même température et sous la même pression :

$$Q = m.L_f \quad \text{où} \begin{cases} -\ L_f\ ..en..J/kg \\ -\ m..en..kg \\ -\ Q..en..J \end{cases} \qquad (7.5)$$

5.3.2. Chaleur latente de vaporisation L_V

- La **vaporisation** est le passage de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux (fig. 7.3). Au cours ce passage, on assiste à un échange de chaleur.
- **Chaleur latente de vaporisation L_V** : C'est la quantité de chaleur à fournir à 1kg d'un corps liquide pris à sa température de vaporisation sous une pression donnée pour l'amener entièrement à l'état vapeur à la même température et sous la même pression :

$$Q = m.L_V \quad \text{où} \begin{cases} -\ L_V\ ..en..J/kg \\ -\ m..en..kg \\ -\ Q..en..J \end{cases} \qquad (7.6)$$

6. Expression de la quantité de chaleur échangée

Variation de température sans changement d'état :

$$\Delta\theta = \theta_f - \theta_i \text{ avec } \begin{cases} \theta_f : température..finale \\ \theta_i : température..initiale \end{cases} en..(°C)..ou..en..(K) \qquad (7.7)$$

$$Q = m \times C \times \Delta\theta = m \times C \times (\theta_f - \theta_i) \qquad (7.8)$$

- En posant $K = m.C$ (en J/°C ou J/K) la capacité thermique ou calorifique du corps, la relation (7.8) devient dans ce cas :

$$Q = K \times \Delta\theta \qquad (7.9)$$

- Le calorimètre intervenant dans les échanges de chaleur ou thermiques, on tient donc compte de sa capacité calorifique que l'on note K_C et qui vaut :

$$K_C = \mu \times C_e \text{ où } \begin{cases} \rightarrow \mu : valeur..en..eau..du..calorimètre..et..ses..accessoirs.(g) \\ \rightarrow C_e : chaleur..massique..de..l'eau = 4190.J/kg/K \end{cases} \qquad (7.9)$$

Exemple 1

Un calorimètre est constitué d'un vase en aluminium de masse 60 g, d'un agitateur en aluminium de masse 10 g et d'un thermomètre de capacité calorifique 20 $J.°C^{-1}$.

Sachant que la chaleur massique de l'aluminium vaut 900 $J.kg^{-1}.K^{-1}$:

- Déterminer la capacité calorifique du calorimètre
- En déduire sa valeur en eau.

Solution

Données : vase : $m_V = 60g$; agitateur : $m_a = 10$ g ; thermomètre : $K_{th} = 20$ $J.°C^{-1}$; $C_{Al} = 900$ J/kg/K.

- Déterminons la capacité calorifique K_{cal} du calorimètre

Par définition, $K_{cal} = K_{Vase} + K_{agitateur} + K_{th} = m_V \times C_{Al} + m_a \times C_{Al} + K_{th}$ (car le vase et l'agitateur son en aluminium), on a alors :

$$K_{cal} = (m_V + m_a) \times C_{Al} + K_{th}$$

AN : $K_{cal} = 83$ $J.K^{-1}$.

- Déduisons-en la valeur en eau μ du calorimètre

On sait par définition que : $K_{cal} = \mu \times C_e \Rightarrow \mu = \dfrac{K_{cal}}{C_e}$

AN : $\mu = 0{,}02$ kg $= 20$ g.

Exemple 2

Quels volumes d'eau respectivement à 20°C et à 75°C faut-il mélanger pour obtenir dans une baignoire 100 litres d'eau à 37°C ?

Solution

Données :

- Eau 1 : $m_1 = \rho V_1$; $\theta_1 = 20°C$; $Q_1 = m_1 C_e \Delta\theta = \rho \times V_1 \times C_e \times (\theta_f - \theta_1)$ (*)
- Eau 2 : $m_2 = \rho V_2$; $\theta_2 = 75°C$; $Q_2 = m_2 C_e \Delta\theta = \rho \times V_2 \times C_e \times (\theta_f - \theta_2)$ (2*)
- Eau finale : $V = V_1 + V_2 = 100$ L (3*) ; $\theta_f = 37°C$.

Déterminons les volumes V_1 et V_2.

En utilisant le principe des échanges de chaleur, on aura :

$$Q_1 + Q_2 = 0 \Rightarrow V_1 \times (\theta_f - \theta_1) = V_2 \times (\theta_2 - \theta_f)$$

Soit $17V_1 = 38V_2 \Rightarrow V_1 = 2{,}24 \times V_2$ (4*)

(4*) Dans (3*), $3{,}24 \times V_2 = 100 \Rightarrow V_2 = 30{,}86$ L et $V_1 = 69{,}14$ L.

Corps	c ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	Corps	c ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
eau	$4{,}1855.10^3$	Aluminium	$0{,}92.10^3$
glace	$2{,}1.10^3$	Fer	$0{,}75.10^3$
eau vapeur	$1{,}9.10^3$	Air	1.10^3

Tableau 7.1 : **Chaleur massique de quelques corps**

7. Jeu bilingue

Expression française	English expression
Chaleur	Heat
Calorimètre	Calorimeter
Capacité calorifique	Calorific capacity
Capacité thermique massique	Specific heat capacity

Sentence: When several bodies are in contact in an adiabatic enclosure, the algebraic sum of the quantities of heat exchanged by these bodies to reach thermal equilibrium, is null.

(1) **Thermodynamique** : Discipline de la physique qui étudie l'énergie physique et les changements d'état de la matière.
(2) **Rumford : Benjamin Thompson**, Comte de Rumford, physicien américain, fut le premier physicien à déterminer la puissance calorifique des combustibles.
(3) Le calorimètre de Lavoisier Antoine est aussi appelé **calorimètre à glace de Lavoisier – Laplace**.
(4) Le calorimètre de Tewarson est aussi appelé **Fire Propagation Apparatus** (FPA)