

## Chapitre III : *CALORIMETRIE et THERMOMETRIE*

Module : Thermodynamique 1  
Filière SMI/A (S1)

### II.1. Notion de température

La première sensation de température apparaît comme une sensation au chaud et au froid que ressent un être humain au toucher des corps. Par exemple, un bloc d'acier en équilibre thermique avec un bloc de bois vous paraîtra à coup sûr plus froid. Cette sensation manque de fidélité et de sensibilité. Or, l'expérience montre qu'un très grand nombre de grandeurs physiques varient constamment en fonction de la température.

**Exemples:**

- Pression d'un gaz à volume constant.
- Dilatation d'un gaz ou liquide.
- Résistance électrique.
- Force électromotrice (f.é.m) d'un thermocouple.

Cette dépendance, entre la température et ces grandeurs physiques a été exploitée pour fabriquer des dispositifs capables de repérer la température.

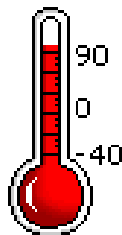
3

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

**II.2 Principe zéro de la thermodynamique**

C'est le principe qui définit l'équilibre thermique.

- Deux corps, mis en contact prolongé, se mettent en équilibre thermique.
- Deux corps en équilibre thermique avec un troisième, se trouvent en équilibre thermique entre eux. De ce fait, les trois corps ont la même température.

**Le thermomètre à liquide: un bon exemple d'équilibre thermique**

4

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

### II.3. Echelles de température

Lorsqu'une grandeur physique  $g(\theta)$  peut être reliée à la température  $\theta$  par une théorie à la fois simple et sûre, le repérage de  $\theta$  peut se déduire directement de la mesure de la grandeur  $g$ . Une échelle de température est, donc définie par une application bijective de l'ensemble des nombres  $\theta$  sur l'ensemble des grandeurs thermométriques  $g(\theta)$


Cela signifie que si  $\theta_1 \neq \theta_2$  implique que  $g(\theta_1) \neq g(\theta_2)$ .

Pour construire une échelle de température, il faut nécessairement:

- Une relation liant la température  $\theta$  à la grandeur thermométrique  $g(\theta)$ .
- Des points fixes constituant des repères thermométriques.

Il existe différentes d'échelles de température.

Celsius	Fahrenheit	Kelvin
100	212	373
0	32	273
-273	-459	0



5Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

### II.3.2 Echelle Fahrenheit:

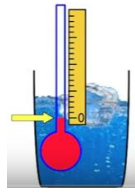
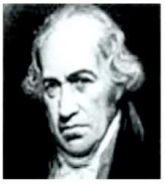
Vers 1714, le physicien allemand Daniel Farenheit invente le thermomètre à mercure et définit son échelle de température.

Il utilise une échelle de température prenant pour référence :

- un mélange eau-glace-sel à l'équilibre pour le **point bas**
- l'ébullition de l'eau pour le **point haut**

le point bas : 32°F

le point haut : 212°F.



6Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

II.3.1 Echelle centésimale

Le degré thermodynamique de cette échelle est la centième (1/100) partie de la distance entre le terme de la glace fondante et celui de l'eau bouillante sous la pression atmosphérique normale. L'équation thermométrique de cette échelle peut s'écrire sous la forme :

$$x = a\theta + b$$

où **x**: grandeur thermométrique, **θ** :la température dans cette échelle, **a , b**: des constantes à déterminer à partir des points fixes correspondant à 0° de la glace fondante et 100° de l'eau bouillante.

Remarques:

1) Il y a autant d'échelles centésimales que de phénomènes thermométriques:  
x peut être un volume (V), une pression (P), une longueur (l),...

2) les différents types d'échelles centésimales ne coïncident qu'en 0° et 100°.

II.3.1 Echelle centésimale

⇒

Pour θ = 0°, on a

Pour θ = 100°, on a

$x_0 = b$

$x_{100} = 100a + x_0$

⇒  $a = \frac{x_{100} - x_0}{100}$

Donc  $x = \frac{x_{100} - x_0}{100}\theta + x_0$

D'où  $x = x_0(1 + \frac{x_{100} - x_0}{100x_0}\theta)$

Alors  $x = x_0 (1 + \alpha\theta)$

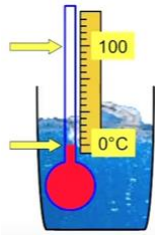
Avec  $\alpha = \frac{x_{100} - x_0}{100x_0}$  : coefficient thermoélastique

Exemple d'échelle centésimale: *échelle Celsius*

L'échelle Celsius est un exemple de l'échelle centésimale. Elle est construite sur un phénomène particulier qui est la variation de la pression d'un gaz parfait à volume constant. Le degrés de cette échelle est le Celsius noté °C et on lui attribue le symbole  $\theta$ .



Anders Celsius  
~1742



Exercice 1:

Trouver la relation entre l'échelle Celsius et l'échelle Fahrenheit. Quelle est la température pour laquelle les échelles donnent la même indication?

Solution:

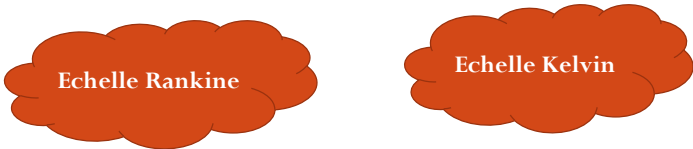
Relation entre Fahrenheit et Celsius

$$T(^{\circ}\text{F}) = 32 + T(^{\circ}\text{C}) \times 9 / 5$$
$$T(^{\circ}\text{C}) = [ T(^{\circ}\text{F}) - 32 ] \times 5 / 9$$

➡ la température pour laquelle les échelles donnent la même indication est **-40**

II.3.3 Echelles absolues:

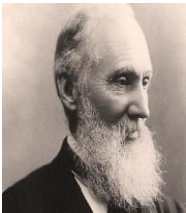
Elles ont une réalité physique et représentent l'énergie d'agitation thermique des molécules. Ces échelles permettent donc une vraie mesure de la température.



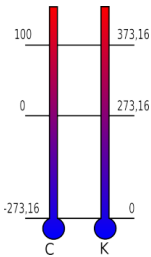
Echelle Kelvin:

A la fin du 19<sup>e</sup>, les lois de la thermodynamique font apparaître une idée nouvelle : il faut une échelle de température qui a une limite inférieure "théorique et absolue" infranchissable.

Le physicien anglais Lord Kelvin suggère donc d'utiliser une échelle de température où le zéro serait **un zéro en dessous duquel on ne peut pas descendre : le "zéro absolu"**. Il s'agit d'une température à laquelle plus rien ne bouge dans les atomes.



William Thomson  
(Lord Kelvin)  
1848



L'idée fondamentale de cette échelle est basée sur la loi des gaz parfaits:

$$PV = nRT \quad \longrightarrow \quad P = \frac{nR}{V}T$$

Si  $\dot{V} = V_0 = Cste \quad \longrightarrow \quad \frac{nR}{V_0} = K = Cste$

$\longrightarrow \quad P = KT = f(T)$

la pression est une fonction linéaire de la température à volume constant.

➤ Pour déterminer la constante K, on aura besoin d'un seul point arbitraire. C'est le point triple de l'eau (coexistence de l'eau, glace et vapeur) défini à :

$$P = 612 \text{ Pa} \quad T_0 = 273.15\text{K}.$$

Cette échelle est liée à l'échelle Celsius par la relation:


$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273,15$$
$$T(^{\circ}C) = T(K) - 273,15$$

13


Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

**II.4 Thermomètres:**


On appelle thermomètre un dispositif dont le principe est basé sur le phénomène de dépendance de la température et les grandeurs thermométriques d'une substance. Il existe différents types de thermomètres:




Thermomètre à  
dilatation de liquide



Thermomètres  
à gaz



Thermomètre  
à résistance



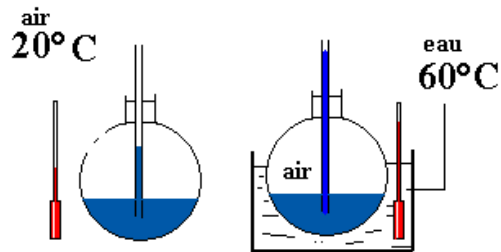
Thermocouples

14

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

✓ Thermomètres à dilatation de liquide et de gaz

- Thermomètre à dilatation de liquide ou gaz: le liquide ou gaz, de volume  $V(\theta)$ , est contenu dans un réservoir de verre prolongé par tube capillaire scellé. L'équation de ce type thermomètre est de la forme  $V(\theta) = V_0(1 + \alpha\theta)$ .



Liquide: Mercure ; Alcool                      Gaz: Hydrogène

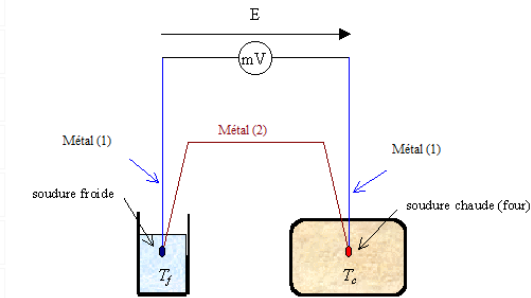
15

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

✓ Thermocouples:

Ce sont des dipôles constitués de trois conducteurs montés en série: le premier et le troisième sont de même nature, le second est de nature différente.

Ces dipôles présentent une force électromotrice (f.é.m) qui ne dépend que de la température



En général, la f.é.m. est de la forme :

$$E = a + bt + ct^2$$

16

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3



### II.5. Notion de chaleur

Soit deux corps A et B de températures respectivement  $T_A$  et  $T_B$  ( $T_A > T_B$ ), mis en contact dans une enceinte parfaitement adiabatique. Après quelques instants, les deux corps ont la même température  $T_e$ .



#### Equilibre thermique

Le transfert de chaleur du corps A vers le corps B est sous forme d'énergie cinétique des molécules telle que:

- la température du corps B augmente jusqu'à la température d'équilibre  $T_e$ .

- la température du corps A diminue jusqu'à la même température  $T_e$ .

➡ Par évolution irréversible, en état d'équilibre, la température est uniforme pour les systèmes (A et B). Si les deux corps n'échangent pas de travail utile, la conservation de l'énergie permet d'écrire:

$$Q_A \text{ (chaleur perdue par le corps A)} + Q_B \text{ (chaleur reçue par le corps B)} = 0$$

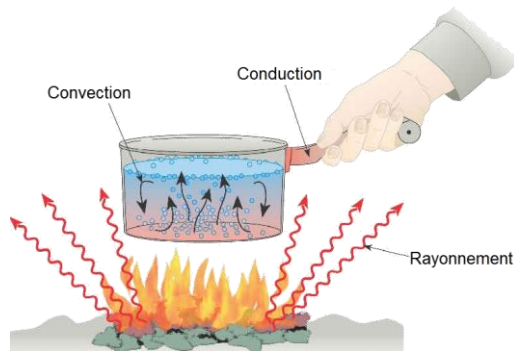
Equation calorimétrique

17

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

### II.6. Transferts de chaleur

Le transfert de la chaleur d'un corps chaud vers un corps froid est un processus par lequel l'énergie est échangée sous forme de chaleur entre des corps ou des milieux de températures différentes. La chaleur peut être transmise par conduction, convection ou rayonnement...



18

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

II.6.1 Conduction:

✖ La conduction implique un contact physique entre les corps ou les parties des corps échangeant de la chaleur.


✖ la conduction dans les solides découle surtout du mouvement des électrons libres dans le corps, enclenché dès que s'y établit une différence de température.

✖ les bons conducteurs de chaleur sont en général de bons conducteurs électriques. La conduction est, donc, un transfert de chaleur, dans la matière, sans transfert de matière.

La conduction permet un transfert de chaleur efficace à travers les solides opaques.

Exemple:

En chauffant l'une des extrémités (A) d'une barre métallique, la chaleur se transmet par conduction à l'autre extrémité plus froide (B).



19

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

II.6.2 Convection

La convection se produit lorsqu'un liquide ou un gaz sont en contact avec une source plus chaude. Un mouvement produit de l'ensemble des molécules du fluide transporte la chaleur vers les zones plus froides. Elle se fait par transfert de la matière chauffée.

Explication:

Différence de température dans un liquide ou un gaz

→

Modification de la densité des particules

↓ Gravitation

Poussée d'Archimède : les parties les plus chaudes du fluide ont tendance à s'élever et les parties froides et denses à descendre.

↓

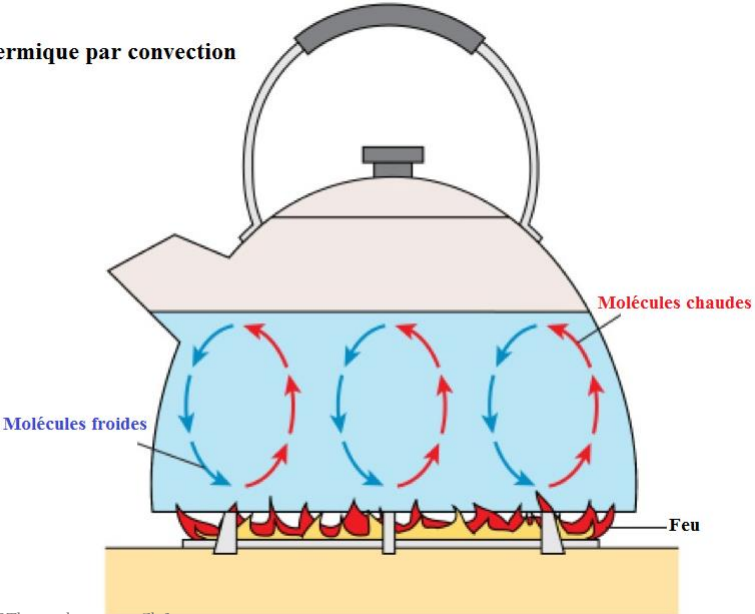
Convection naturelle

La convection forcée est obtenue en soumettant le fluide à une augmentation de pression, le mouvement se déclenchant alors selon les lois de la mécanique des fluides.

20

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

Transfère thermique par convection



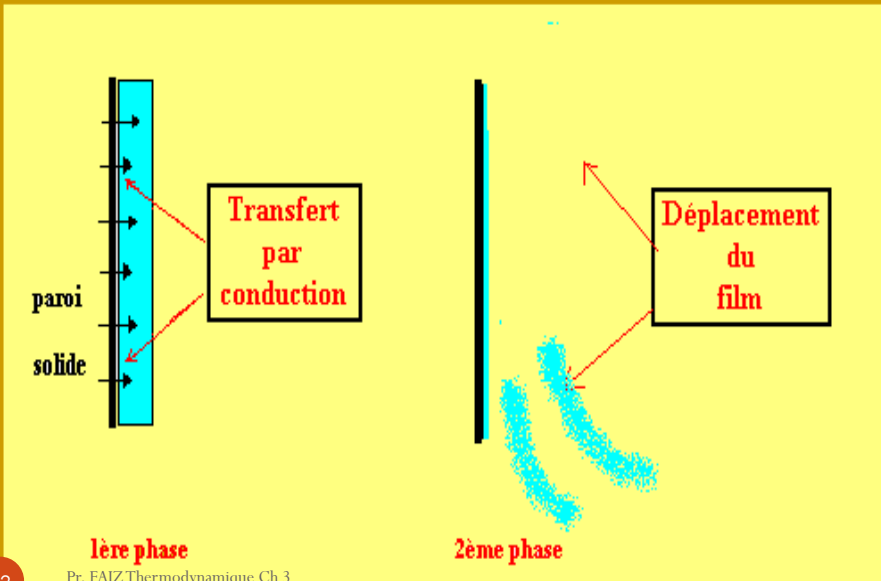
Molécules chaudes

Molécules froides

Feu

21

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3



paroi solide

Transfert par conduction

Déplacement du film

1ère phase

2ème phase

22

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

### II.6.3. Rayonnement

Les corps chauds émettent des radiations électromagnétiques de différentes longueurs d'onde permettant un transfert de chaleur entre la source et les corps récepteurs. Le rayonnement est fondamentalement différent des deux autres types de transfert de chaleur, en ce qu'il ne nécessite ni contact ni présence d'aucune matière entre les deux corps (ils peuvent même être séparés par le vide).



23

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

#### Remarque:

Bien que les trois processus puissent avoir lieu simultanément, l'un des mécanismes est généralement prépondérant.

#### Exemple:

- ✓ la chaleur est principalement transmise par conduction à travers les murs en brique d'une maison;
- ✓ l'eau dans une casserole placée sur une cuisinière est surtout chauffée par convection;
- ✓ la Terre reçoit sa chaleur du Soleil en grande partie par rayonnement.

24

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

## II.7. Chaleurs spécifiques

### II.7.1. Chaleur massique

On appelle chaleur massique d'un corps la quantité de chaleur nécessaire pour élever de  $1^\circ$  la température de l'unité de masse de ce corps.

Soit un corps de masse  $m$ , dont la température s'élève de  $\theta_1$  à  $\theta_2$ ; la quantité de chaleur nécessaire est :

$$Q = m c (\theta_2 - \theta_1)$$

Où  $c$  est la **chaleur massique**, en  $\text{J kg}^{-1}^\circ\text{C}^{-1}$  (appelée aussi capacité thermique massique).

Elle peut dépendre de la température (on considérera alors sa valeur moyenne entre  $\theta_1$  et  $\theta_2$ ).

Si ce n'est pas le cas, on écrit:

$$Q = m \int_{\theta_1}^{\theta_2} c d\theta$$

25

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

### **Remarques:**

- 1)  $C = mc$  est la capacité calorifique (en  $\text{J }^\circ\text{C}^{-1}$ ).
- 2)  $C_M = Mc$  est la capacité calorifique molaire (en  $\text{J.mol}^{-1}.^\circ\text{C}^{-1}$ ), où  $M$  est la masse molaire
- 3) Si l'échange de chaleur se produit à volume constant ou à pression constante, on précise alors s'il s'agit de la chaleur massique à volume constant ou à pression constante  $c_v$  ou  $c_p$ . Cependant, dans le cas de substances pratiquement incompressibles telles que les liquides et les solides, il n'est pas nécessaire de distinguer ces différentes chaleurs spécifiques car elles sont sensiblement égales. Par ailleurs, la chaleur spécifique d'un corps à volume constant ou à pression constante dépend de la température.

26

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

Exercice 2

On verse 3 Kg de soupe à 60°C dans une soupière en porcelaine de masse 1.5 Kg à la température de 20 °C. La soupe se refroidit au contact de soupière. Si on néglige les pertes thermiques avec l’extérieur, calculer la température d’équilibre de l’ensemble (soupe + soupière).

On donne : Chaleur massique de la soupe = 3.9 KJ /Kg/°C

Chaleur massique de la porcelaine = 1.1 KJ /Kg/°C

Solution

On a une soupière dont  $\begin{cases} m_s = 1.5 \text{ Kg} \\ T_s = 20^\circ\text{C} \end{cases}$

On ajoute la soupe dont  $\begin{cases} m_{so} = 3 \text{ Kg} \\ T_{so} = 60^\circ\text{C} \end{cases}$

Par définition, la quantité de chaleur est :

$$Q = mc(T_f - T_i) \text{ (J)}$$

Ce qui donne pour les deux éléments, on écrit :

$$\begin{cases} Q_s = m_s c_s (T_f - T_s) \\ Q_{so} = m_{so} c_{so} (T_f - T_{so}) \end{cases}$$

A l’équilibre thermique :  $Q_s + Q_p = 0$ , ce qui donne :

$$m_s c_s (T_f - T_s) + m_{so} c_{so} (T_f - T_{so}) = 0$$

A partir de cette équation on tire la température d’équilibre (température finale) :

$$T_f = \frac{m_s c_s T_s + m_{so} c_{so} T_{so}}{m_s c_s + m_{so} c_{so}}$$

AN :

$$T_f = 54.56^\circ\text{C}$$

II.7.2. Chaleur latente L ( $L_v$  ou  $L_f$ )

✓ La variation de la température d'un corps entraîne certains changements de ses propriétés physiques.

✓ Tous les corps se dilatent lorsqu'ils sont chauffés et se contractent en se refroidissant (la glace constitue néanmoins une exception de taille).

✓ En chauffant suffisamment un corps, il subit un changement d'état. Il peut passer de l'état solide à l'état liquide (**fusion**), de l'état liquide à l'état gazeux (**vaporisation**), ou encore directement de l'état solide à l'état gazeux (**sublimation**).

✓ Les changement d'état d'un corps ( $P=Cste$ ) ont toujours lieu à la même température.

Chaleur latente: la quantité de chaleur requise pour réaliser l'un de ces trois changements d'état:

chaleurs latentes de vaporisation

chaleurs latentes de fusion

chaleurs latentes de sublimation

29

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

A la pression atmosphérique, la température de l'eau bouillante ne dépasse pas 100°C, même si l'on augmente la quantité de chaleur.

↓

la chaleur absorbée par l'eau est utilisée pour transformer l'eau en vapeur : cette chaleur correspond à la chaleur latente. D'une manière similaire, si on chauffe la glace fondante, sa température ne change pas tant que toute la glace n'a pas fondu, car la chaleur absorbée est utilisée pour faire fondre la glace. À titre d'exemple, il faut fournir 19 kJ pour faire fondre 1 kg de glace, et 129 kJ pour convertir 1 kg d'eau en vapeur à 100°C.

D'une manière générale, pour faire subir un changement d'état à un corps pur de masse m il faut apporter la quantité de chaleur:

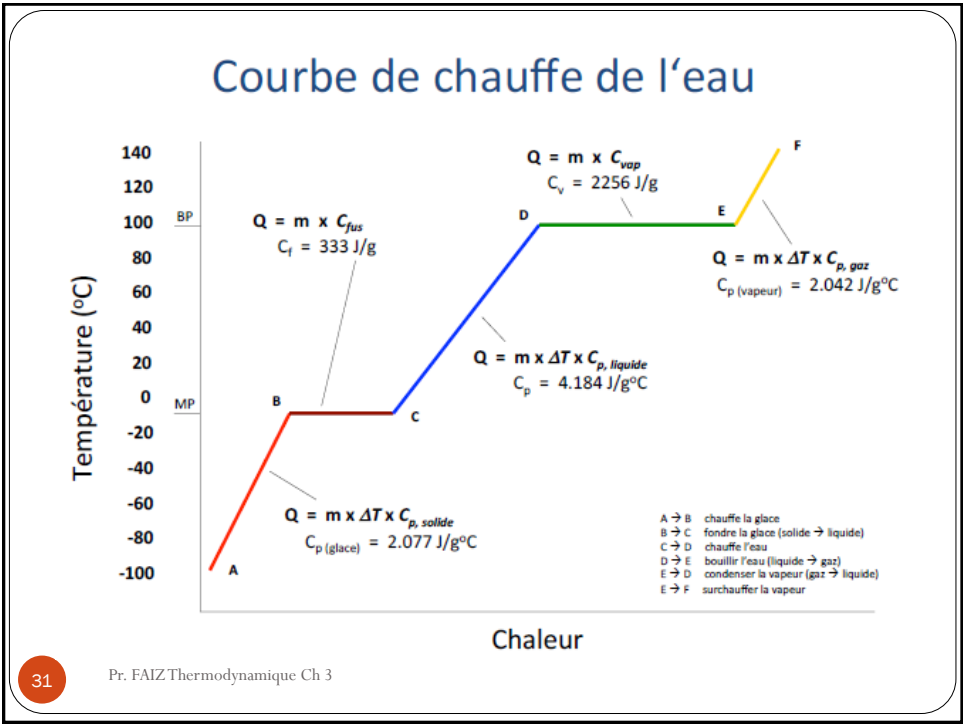
$Q = m L$  (chaleur latente)

30

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

Pr.FAIZ

15



### II.8. Calorimétrie

✓**Définition:**

La calorimétrie est la partie expérimentale permettant, en général, de mesurer les quantités d'énergie thermique impliquées dans les transferts de chaleur et, en particulier, les chaleurs massiques, les chaleurs latentes et les chaleurs des réactions.

✓**Conditions expérimentales:**

La mesure des quantités de chaleur fournies ou cédées par les corps sera toujours supposée faite dans un calorimètre adiabatique: **pas de fuites thermiques**.

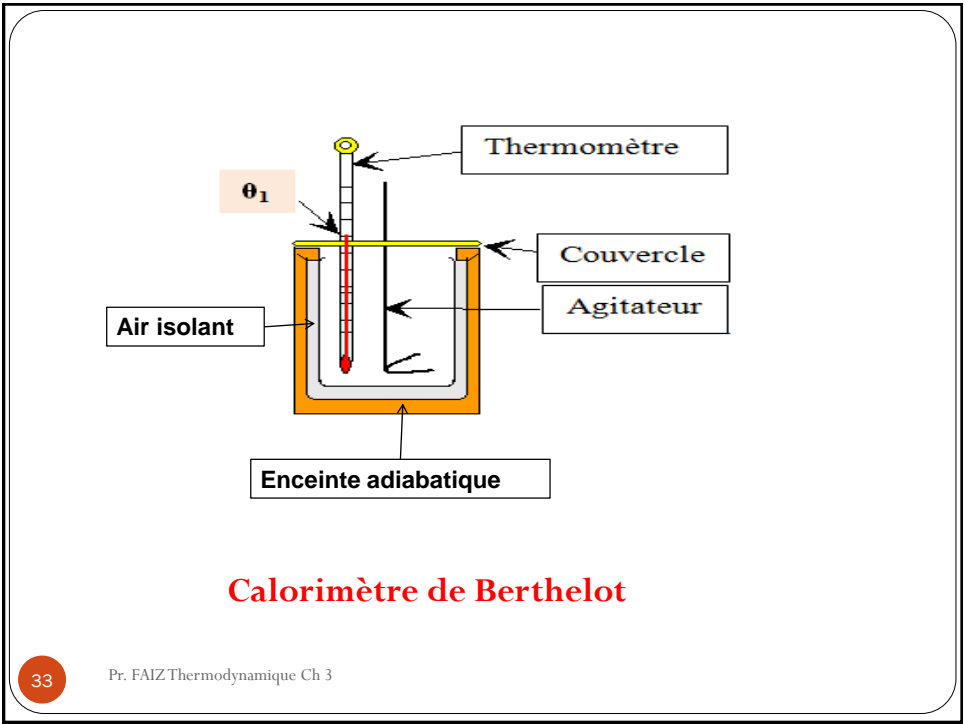
Le calorimètre utilisé est **le calorimètre de Berthelot**. Il est constitué de:

- **une vase calorifugée,**
- **un agitateur** permettant d'uniformiser la température
- **un thermomètre** pour la mesure des températures.

32

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3





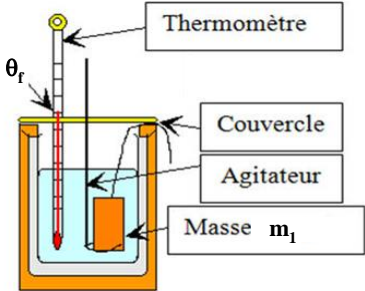
**II.8.1. Mesures calorimétriques par la méthode des mélanges**

Par contact ou mélange de deux corps à températures différentes, il y a transfert de chaleur : à l'équilibre les deux corps ont la même température (température finale du mélange). Cette méthode permet de mesurer dans des conditions adiabatiques, la valeur en eau du calorimètre et de ses accessoires, la chaleur massique  $c_p$  d'un solide,...

34 Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

II.8.1.1. Valeur en eau du calorimètre et de ses accessoires

Soit un calorimètre de valeur en eau  $\mu_0$ , contenant une quantité d'eau de masse  $m_0$ , l'ensemble a une température  $\theta_0$ . On y introduit une masse  $m_1$  d'eau, à la température  $\theta_1$ . A l'équilibre thermique le système atteint la température  $\theta_f$ .



l'équation calorimétrique est alors :

$$(m_0 + \mu_0) (\theta_f - \theta_0) + m_1 (\theta_f - \theta_1) = 0$$

(II.2)

soit 
$$\mu_0 = - \frac{\theta_f - \theta_1}{\theta_f - \theta_0} m_1 - m_0$$

(II.3)

II.8.1.2. Chaleur massique d'un solide

Soit un solide de masse  $m_1$  de température  $\theta_1$ . Il est alors plongé dans un calorimètre, de valeur en eau  $\mu_0$ , contenant une masse  $m_0$  d'eau à la température  $\theta_0$  ( $\theta_0 < \theta_1$ ). Les échanges thermiques pour l'ensemble (calorimètre eau solide) conduisent à un équilibre thermique à la température  $\theta_f$ .

Le bilan énergétique relatif à cet ensemble s'écrit :

$$(m_0 + \mu_0)c_0 (\theta_f - \theta_0) + m_1 c (\theta_f - \theta_1) = 0$$

(II.4)

Soit 
$$c = - \frac{(m_0 + \mu_0)(\theta_f - \theta_0)c_0}{m_1 (\theta_f - \theta_1)}$$

(II.5)

$c_0$  : la chaleur massique de l'eau, avec  $c_0 = 1 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ .

II.8.2. Mesures calorimétriques par la méthode électrique

✓ **Objectif:**

On se propose de déterminer le coefficient  $J = W_e/Q$  par la méthode électrique, où  $W_e$  est l'énergie électrique exprimée en joule et  $Q$  est la quantité de chaleur équivalente exprimée en calorie.

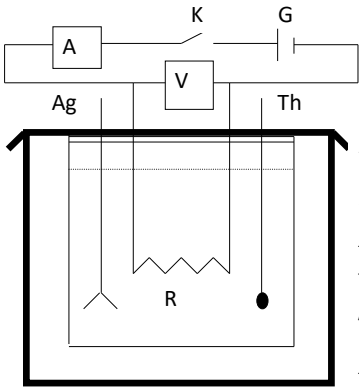
✓ **Protocole expérimentale:**

Une résistance électrique chauffante  $R$  est immergée dans un calorimètre contenant une masse  $m_0$  d'eau. Cette résistance est traversée par un courant  $I$  sous une tension continue  $U$  dont les valeurs sont indiquées respectivement par l'ampèremètre (A) et le voltmètre (V).



37

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3



- G: générateur de tension continue
- K: interrupteur
- A: ampèremètre
- V: voltmètre
- Th : thermomètre
- Ag : Agitateur

**Principe de la méthode électrique**

38

Pr. FAIZ Thermodynamique Ch 3

L'énergie électrique dissipée dans la résistance est:

$$W_e = UI\Delta t = RI^2\Delta t \quad (\text{II.6})$$

Soit  $\mu_0$  est la valeur en eau du calorimètre et de ses accessoires, la quantité de chaleur absorbée par l'ensemble calorimètre + eau, est:

$$Q = c_0 (m_0 + \mu_0)(\theta_f - \theta_0) \quad (\text{II.7})$$

D'où

$$J = \frac{UI\Delta t}{c_0(m_0 + \mu_0)(\theta_f - \theta_0)} \quad (\text{II.8})$$