

**Expérience n°3 – EQUIVALENT ELECTROMECHANIQUE DE LA CHALEUR**

Domaine: Chaleur

Lien avec le cours de Physique Générale:

Cette expérience est liée au chapitre suivant du cours de Physique Générale:

- Physique I, Chapitre 9: La Thermodynamique : température et énergie thermique

**Objectif général de l'expérience**

L'objectif de cette expérience est de **mesurer le facteur de conversion A** entre les unités d'énergie mécanique ou électrique, exprimées en joule, et l'énergie calorifique (quantité de chaleur), exprimée en calorie. La grandeur A est appelée **l'équivalent électromécanique de la chaleur**.

Dans un deuxième temps, il s'agira de **mesurer la chaleur spécifique de l'aluminium** et d'en déduire sa chaleur spécifique molaire.

**1 Introduction****1.1) Equivalence d'énergie**

Dans tous les processus de la nature, l'énergie ne peut que se transformer d'une forme dans une autre; elle ne peut ni disparaître ni être créée. La notion d'énergie englobe par conséquent aussi bien la chaleur que l'énergie de nature mécanique et électromécanique.

L'équivalence de la chaleur et de l'énergie mécanique a été reconnue dès 1842 par R. Mayor et démontrée expérimentalement par J.P. Joule (1847) au moyen de mesures très précises. Toute mesure physique consiste en une comparaison entre une grandeur observée et une unité de mesure appropriée, qui joue le rôle d'étalon. Suivant le choix des unités (par ex. mètre ou centimètre pour la longueur), on aura différents systèmes d'unités (CGS, MKSA, etc., voir ci-dessous).

Pour une même grandeur, par exemple l'énergie, il peut donc exister différentes unités et par conséquent différentes valeurs numériques, qui pourtant seront entre elles dans des rapports déterminés et fixes. Dans le système CGS (Centimètre-Gramme-Seconde), l'unité d'**énergie mécanique** vaut **1 erg**. L'unité d'**énergie calorifique**, c'est-à-dire celle de la quantité de chaleur, a été définie comme étant **1 calorie** (1 cal). Dans le système MKSA (Mètre-Kilogramme-Seconde-Ampère), l'unité d'**énergie électrique** vaut **1 joule** :  $1 \text{ J} = 1 \text{ W}\cdot\text{s}$ . Cette unité n'est évidemment qu'un multiple de l'erg puisque  $1 \text{ joule} = 10^7 \text{ erg}$ . Par suite de l'équivalence de toutes les formes d'énergie, on doit pouvoir également exprimer une énergie mécanique ( $E_{méc}$ ) ou électrique ( $E_{él}$ ) mesurée en erg ou en joule, en calories (Q) ce qui exprimerait la quantité de chaleur correspondante:

$$E_{él}, E_{méc} [\text{J}] = A \cdot Q [\text{cal}] . \quad (\text{Eq. 1})$$

Il est évident que si l'on exprime  $E_{méc}$  et  $E_{él}$  dans le même système d'unité (joule), le facteur de conversion A sera le même et on pourra l'appeler **équivalent mécanique ou électrique de la chaleur**.

Expérimentalement, la détermination de l'équivalent A est donnée par l'équation:

$$A = \frac{E_{él}}{Q} \left[ \frac{\text{J}}{\text{cal}} \right] . \quad (\text{Eq. 2})$$

Cette détermination se fera en **comparant l'énergie électrique  $E_{el}$**  fournie par un corps de chauffe parcouru par un courant  $I$  [A] sous une tension  $U$  [V] **et la quantité de chaleur  $Q$**  absorbée par un corps de masse  $m$  [g] et de chaleur spécifique  $c$  [cal/(g·K)] dont la température  $T$  s'élève de  $\Delta T$  [K] :

$$\begin{aligned} E_{el} \text{ [J]} &= U \cdot I \cdot t \\ Q \text{ [cal]} &= m \cdot c \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (\text{Eq. 3})$$

Le rapport  $E_{el}/Q$  donne la grandeur cherchée  $A$ , soit:

$$A = \frac{U \cdot I \cdot t}{m \cdot c \cdot \Delta T} \left[ \frac{\text{J}}{\text{cal}} \right] \quad (\text{Eq. 4})$$

Remarquons que si  $A$  est connu, la relation (Eq. 4) permet de déterminer la chaleur spécifique  $c$  d'un corps en cal/(g·K). Ceci fera l'objet de la 3<sup>ème</sup> partie de ce TP.

## 1.2) Chaleur spécifique

Si l'on communique à un corps de masse  $m$  une petite quantité de chaleur  $dQ$ , il s'ensuivra un petit accroissement de sa température  $dT$  tel que:  $dQ = m \cdot c \cdot dT$ .

La **chaleur spécifique  $c$**  représente donc la **quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré un gramme de la substance considérée**. La définition de la calorie est directement liée à la chaleur spécifique de l'eau à 15°C qui a été posée arbitrairement égale à un, donc **1 cal est la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer un gramme d'eau pure de 15°C à 16°C** (à pression atmosphérique standard).

Si l'on considère une mole de la substance (de masse molaire  $M$  en g/mole), la quantité de chaleur  $dQ_{mole}$  à fournir pour produire un accroissement de température de  $dT$  est donnée par:

$$dQ_{mole} = M \cdot c \cdot dT = C \cdot dT \quad (\text{Eq. 5})$$

où  $C = M \cdot c$  est la **chaleur spécifique molaire** en cal/(mole·K).

En principe, il est nécessaire de distinguer la chaleur spécifique  $c_v$  (respectivement la chaleur spécifique molaire  $C_v$ ) mesurée à volume constant et la chaleur spécifique  $c_p$  (resp.  $C_p$ ) mesurée à pression constante, c'est-à-dire lorsqu'une dilatation de la substance est possible. Comme dans ce cas il est nécessaire de fournir du travail pour l'augmentation du volume, la quantité de chaleur correspondant à un  $dT$  donné sera plus grande qu'à volume constant. On a donc toujours  $c_p > c_v$ . La différence est surtout marquée pour les gaz, où, dans le cas des gaz parfaits, on a:

$$C_p - C_v = R \quad (\text{Eq. 6})$$

avec  $R = 1.986$  cal/(mole K) est la constante des gaz parfaits.

La chaleur spécifique molaire de toutes les substances dépend fortement de la température et s'annule au zéro absolu. Pour des températures suffisamment élevées,  $C_v$  est approximativement constante et est approximée pour les substances simples solides (par exemple les métaux) par la loi de Dulong et Petit:

$$C_v = 6 \left[ \frac{\text{cal}}{\text{K} \cdot \text{mole}} \right] \quad (\text{Eq. 7})$$

Remarque: généralement, indiquer une chaleur spécifique sans mentionner la température à laquelle elle a été mesurée n'a pas de sens.

## 2 Principe général de l'expérience

L'idée générale est de mesurer l'accroissement de température d'une substance (généralement un liquide, parfois un solide) dû à l'apport d'une énergie électrique connue. Les mesures se feront dans un **calorimètre** (ou dewar), qui est un récipient idéalement parfaitement isolant destiné à **mesurer les échanges de chaleur**.

Cependant, un calorimètre n'est jamais parfait et l'énergie fournie au système n'est pas uniquement transmise au liquide, mais aussi aux parois du récipient, au thermomètre et à l'agitateur. Il faut tenir compte de cette énergie, qui ne va pas contribuer à l'échauffement de la substance étudiée et qui constitue donc des pertes du système, en déterminant la **capacité thermique  $K_t$**  (en cal/K) de l'appareillage (calorimètre, agitateur, thermomètre, etc.), donnée par la relation suivante:

$$K_t = \sum_i m_i c_i = m_{\text{calor}} c_{\text{calor}} + m_{\text{agit}} c_{\text{agit}} + m_{\text{therm}} c_{\text{therm}} .$$

A partir de la capacité thermique, on peut déterminer l'**équivalent en eau** (ou **valeur en eau**) du calorimètre, qui représente une **masse d'eau fictive  $\mu$**  qui a la même capacité thermique que le calorimètre, de sorte que  $K_t = \mu c_{\text{eau}}$ . En d'autre terme, cela représente la masse d'eau  $\mu$  qui échangerait la même quantité de chaleur avec l'extérieur quand elle subit la même variation de température.

L'énergie électrique fournie au calorimètre par l'intermédiaire d'un corps de chauffe plongé dans un liquide est déterminée en mesurant la tension  $U$  aux bornes du corps de chauffe et le courant  $I$  qui le parcourt selon le schéma de la Figure 1.

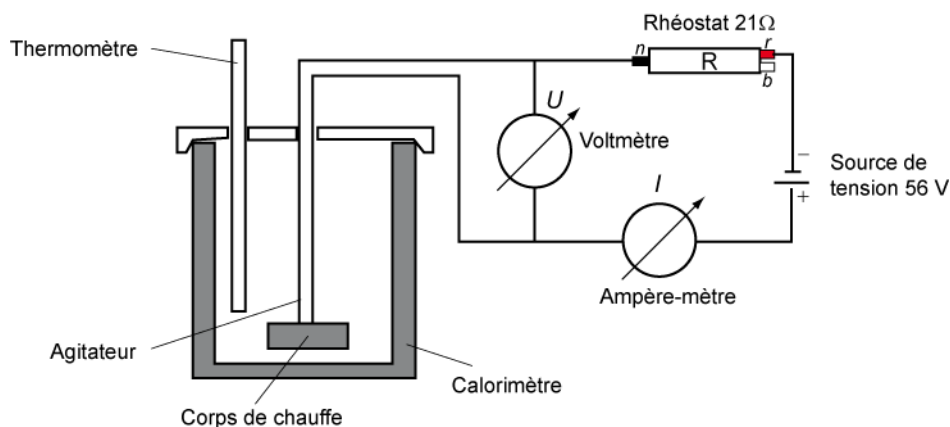


Figure 1: Schéma de principe de l'expérience.

## 3 Marche à suivre

L'expérience se déroulera en trois parties distinctes décrites ci-dessous.

### 3.1) Capacité thermique et équivalent en eau du calorimètre

Dans un premier temps, il s'agit de mesurer la **capacité thermique  $K_t$  du calorimètre** qui sera nécessaire pour les étapes suivantes, et d'en déduire l'équivalent en eau  $\mu$ .

Dans ce but, le calorimètre est rempli à moitié environ par une masse  $m_1$  d'eau (env. 200 g) qu'on chauffe au moyen du corps de chauffe (**50° au maximum**). Agiter régulièrement le récipient durant le chauffage pour homogénéiser le mélange. Après avoir arrêté le corps de chauffe et attendu quelques minutes en agitant le récipient pour que l'équilibre thermique soit atteint (ceci est très important pour obtenir une valeur correcte de  $K_t$ ), on mesure la température  $T_1$  du liquide. On ajoute ensuite rapidement une masse  $m_2$  d'eau froide (env. 200 g à température  $T_2 \leq 10^\circ\text{C}$ ) et on mesure après agitation la température finale  $T_3$  du mélange. Sachant que la chaleur soustraite à l'eau chaude et au calorimètre sert à réchauffer l'eau froide, le bilan d'énergie s'écrit pour ce mélange:

$$m_1 c (T_1 - T_3) + K_t (T_1 - T_3) = m_2 c (T_3 - T_2) , \quad (\text{Eq. 8})$$

où  $c = 1 \text{ cal}/(\text{g}\cdot\text{K})$  est la chaleur spécifique de l'eau.

On en tire la capacité thermique du calorimètre: 
$$K_t = m_2 c \frac{(T_3 - T_2)}{(T_1 - T_3)} - m_1 c \left[ \frac{\text{cal}}{\text{K}} \right] , \quad (\text{Eq. 9})$$

ainsi que son équivalent en eau : 
$$\mu = \frac{K_t}{c} [\text{g}] . \quad (\text{Eq. 10})$$

#### Précautions à prendre:

- On peut se convaincre facilement que  $K_t$  sera déterminé d'autant plus précisément que  $(T_1 - T_2)$  est grand et que  $(T_3 - T_2)$  est voisin (de  $T_1 - T_3$ ). C'est pourquoi on veillera à ce que  $T_2$  soit  $\leq 10^\circ\text{C}$ .
- L'introduction de l'eau froide se fera de manière à ce que les pertes thermiques soient aussi faibles que possible. Dans ce but, il n'y a pas besoin de soulever le couvercle du calorimètre; il suffit de déboucher le petit trou dans ce dernier et d'y introduire un petit entonnoir.
- Utiliser tout le temps **le même thermomètre** pour toutes les mesures pour éviter des erreurs systématiques.
- Le corps de chauffe ne doit être mis en service **que** lorsqu'il est plongé entièrement dans le liquide.

La mesure de  $K_t$  sera répétée trois fois successivement et on en calculera la valeur moyenne  $\bar{K}_t$  avec son incertitude statistique  $\sigma_{\bar{K}_t}$  (déviation standard sur la moyenne). Le résultat final sera mis sous la forme  $\bar{K}_t \pm \sigma_{\bar{K}_t}$  et on en déduira l'équivalent en eau  $\bar{\mu} \pm \sigma_{\bar{\mu}}$ .

### 3.2) Détermination de l'équivalent électromécanique de la chaleur A

On remplit le calorimètre d'une masse  $m_1$  d'eau froide (env. 350 g) et on mesure la température initiale  $T_1$  en s'assurant que l'équilibre thermique soit atteint. Au moyen du corps de chauffe, on chauffe le liquide jusqu'à la température  $T_2$  ( $T_2 < 45^\circ\text{C}$ ) avec un courant d'environ 1.1-1.2 A. On relève le courant  $I$  et la tension  $U$  aux bornes du corps de chauffe et on mesure la température du liquide en fonction du temps  $t$  (chaque minute, en prenant garde d'agiter régulièrement le liquide) pendant 20 min (remplir toutes les cases du tableau dans la feuille Excel de l'expérience).

L'équation indiquant l'équivalence de l'énergie, compte tenu de la capacité thermique  $K_t$  du calorimètre, s'écrit:

$$IUt = A [mc(T_2 - T_1) + K_t(T_2 - T_1)] , \quad (\text{Eq. 11})$$

d'où on tire: 
$$A_1 = \frac{IUt}{(T_2 - T_1)(mc + K_t)} \left[ \frac{\text{J}}{\text{cal}} \right] . \quad (\text{Eq. 12})$$

On reporte ensuite les points mesurés sur un graphique  $T = f(t)$  ( $T =$  température,  $t =$  temps) avec des barres d'incertitudes. La pente  $p$  de la droite, déterminée sur la partie linéaire du graphique, peut être utilisée pour déterminer une valeur plus précise de  $A$ :

$$A_2 = \frac{IU}{p \cdot (mc + K_t)} . \quad (\text{Eq. 13})$$

Calcul d'erreur: calculer l'incertitude sur la valeur de  $A$  obtenue d'une part à partir des températures initiale et finale (Eq. 12) et d'autre part à partir du graphique (Eq. 13). Dans le premier cas, on prendra en compte les incertitudes sur  $U$  (2%), sur  $I$  (2%), sur  $\Delta T$  (à estimer) et sur  $K_t$  (donnée par l'erreur statistique  $\sigma_{\bar{K}_t}$ ). Dans le 2<sup>ème</sup> cas, on tiendra compte des incertitudes sur la pente  $p$  et sur les valeurs de  $K_t$ ,  $U$  et  $I$  (comme ci-dessus). Justifier pourquoi les autres incertitudes peuvent être négligées.

On comparera la valeur de  $A$  obtenue avec la valeur réelle (à trouver dans une table numérique).

### 3.3) Détermination de la chaleur spécifique de l'aluminium

Un cylindre creux d'aluminium de masse  $M$ , immergé dans le calorimètre dans un bain d'eau de masse  $m$  (350 g environ), est chauffé de la température  $T_1$  à la température  $T_2$  (environ 50°C) à l'aide du corps de chauffe. Puisque le courant de chauffage passe dans le chauffe-eau pendant  $t$  secondes, l'équivalence des énergies s'exprime par l'équation:

$$IUt = A(mc + K_t + Mc_{Al})(T_2 - T_1), \quad (\text{Eq. 14})$$

d'où l'on tire la chaleur spécifique cherchée  $c_{Al}$ . On la comparera avec la valeur réelle (à trouver dans une table numérique).

Précaution : le cylindre doit être entièrement immergé dans le liquide, mais ne doit pas être en contact direct avec le corps de chauffe (le cylindre doit être suspendu au-dessus du corps de chauffe).

Avec la masse molaire de l'aluminium (26.97 g/mole), en déduire la chaleur spécifique molaire. Comparer avec la valeur donnée par la loi de Dulong-Petit.

## 4 Préalable

Cette partie est à **préparer en avance**, avant la séance de TP, afin de gagner du temps lors de celle-ci. Les points concernant le calcul d'incertitude ne sont à considérer qu'à partir du moment où le calcul d'erreur a été introduit.

Partie	Descriptif
3.2)	Trouver la valeur réelle de $A$ dans une table de référence.
3.3)	Déterminer l'expression de la chaleur spécifique de l'aluminium $c_{Al}$ à partir de (Eq. 14). Trouver la valeur réelle de la chaleur spécifique $c_{Al}$ de l'aluminium, dans une table de référence

# Travaux Pratiques de Physique

## Expérience N°3 : Equivalent électromécanique de la chaleur

### 3.1) Capacité thermique et valeur en eau du calorimètre

#	$m_1$ [g]	$T_1$ ( $\leq 50^\circ\text{C}$ )	$m_2$ [g]	$T_2$ ( $\leq 10^\circ\text{C}$ )	$T_3$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$K_t$ [cal/K]
1						
2						
3						

$K_t =$	[cal/K]
$\sigma_{K_t} =$	[cal/K]

$\mu =$	[g]
$\Delta\mu =$	[g]

Faire varier les incertitudes et observer les contributions individuelles à l'erreur sur  $K_t$  !

Incertitude sur $(T_3 - T_2)$ :		[ $^\circ\text{C}$ ]
Incertitude sur $(T_1 - T_3)$ :		[ $^\circ\text{C}$ ]
Incertitude sur $m_1$ :		[g]
Incertitude sur $m_2$ :		[g]

Contribution de $\Delta(T_3 - T_2)$ :		[cal/K]
Contribution de $\Delta(T_1 - T_3)$ :		[cal/K]
Contribution de $\Delta m_1$ :		[cal/K]
Contribution de $\Delta m_2$ :		[cal/K]
Incertitude totale:		[cal/K]

# Travaux Pratiques de Physique

## Expérience N°3 : Equivalent électromécanique de la chaleur

### 3.2) Détermination de A (J/cal)

Capacité thermique du calorimètre:

Masse d'eau:

Source:  $I =$    $\pm$   [A]

$K_t =$    $\pm$   [cal/K]

$m_{eau} =$    $\pm$   [g]

$U =$    $\pm$   [V]

Incertitude sur les temps mesurés:

[s]

Incertitude sur les températures mesurées:

[°C]

$t$ [s]	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
$T$ [°C]	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

$t$ [s]	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
$T$ [°C]	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Représentation graphique :  $T = T(t)$

insérer graphique ici

Résultats:

<b>Valeur de référence:</b>	$A =$ <input type="text"/>	$\pm$ <input type="text"/>	[J/cal]
<b>Valeur expérimentale obtenue à partir des deux points extrêmes:</b>	$A_1 =$ <input type="text"/>	$\pm$ <input type="text"/>	[J/cal]
<b>Valeur expérimentale obtenue par la pente du graphique:</b>	$A_2 =$ <input type="text"/>	$\pm$ <input type="text"/>	[J/cal]

# Travaux Pratiques de Physique

## Expérience N°3 : Equivalent électromécanique de la chaleur

### 3.3) Chaleur spécifique de l'aluminium

#### Détermination de la capacité calorifique:

Capacité thermique du calorimètre:	$K_t =$	<input type="text"/>	[cal/K]	
Facteur de conversion:	$A =$	<input type="text"/>	[J/cal]	
Masse du cylindre en alu:	$M_{\text{cyl alu}} =$	<input type="text"/>	[g]	
Masse d'eau:	$m =$	<input type="text"/>	[g]	
Températures:	$T_1 =$	<input type="text"/>	[°C]	
	$T_2 =$	<input type="text"/>	[°C]	
Source électrique:	Courant:	$I =$	<input type="text"/>	[A]
	Tension:	$U =$	<input type="text"/>	[V]
Temps:		$t =$	<input type="text"/>	[s]

<b>Valeur de référence:</b>	$c_{Al} =$	<input type="text"/>	
<b>Valeur expérimentale:</b>	$c_{Al} =$	<input type="text"/>	

#### Détermination de la capacité calorifique molaire:

Masse molaire de l'Aluminium:  $M_{M,Al} =$

<b>Valeur de référence:</b>	$C_{Al} =$	<input type="text"/>	
<b>Valeur Dulong-Petit:</b>	$C_{Al} =$	<input type="text"/>	
<b>Valeur expérimentale:</b>	$C_{Al} =$	<input type="text"/>	