

L2 Physique Fondamentale

## TP de Thermodynamique



Sofiane Aoudia  
2016-2017



# Table des matières

<b>Consignes et Rappels</b>	<b>5</b>
Le Thermoplongeur . . . . .	6
Les Incertitudes . . . . .	7
Compte-Rendu de Travaux Pratiques . . . . .	8
<b>1 Capacité Calorifique des Métaux et Chaleur Latente de Fusion de la Glace</b>	<b>9</b>
1.1 Motivations . . . . .	10
1.2 Introduction . . . . .	10
1.3 Théorie . . . . .	10
1.4 Détermination de la capacité calorifique du calorimètre . . . . .	13
1.4.1 Matériel utilisé . . . . .	13
1.4.2 Procédure . . . . .	13
1.4.3 Exploitation des résultats . . . . .	13
1.5 Détermination de la capacité thermique massique du cuivre et de l'aluminium . . . . .	13
1.5.1 Matériel utilisé . . . . .	13
1.5.2 Procédure . . . . .	14
1.5.3 Exploitation des résultats . . . . .	14
1.6 Détermination de la chaleur latente de fusion de la glace . . . . .	14
1.6.1 Matériel utilisé . . . . .	14
1.6.2 Procédure . . . . .	15
1.6.3 Exploitation des résultats . . . . .	15
1.7 Compte-rendu . . . . .	15
<b>2 Dilatation Thermique des Métaux</b>	<b>17</b>
2.1 Motivations . . . . .	18
2.2 Introduction . . . . .	18
2.3 Théorie . . . . .	18
2.4 Détermination des coefficients linaires de dilatation thermique du cuivre et de l'aluminium . . . . .	20
2.4.1 Matériel utilisé . . . . .	20
2.4.2 Procédure . . . . .	20
2.4.3 Exploitation des résultats . . . . .	21
2.5 Compte-rendu . . . . .	21
<b>3 L'équation d'Etat des Gaz Parfaits</b>	<b>23</b>
3.1 Motivations . . . . .	24
3.2 Introduction . . . . .	24
3.3 Théorie . . . . .	24
3.4 Vérification de la loi de Boyle . . . . .	26
3.4.1 Matériel utilisé . . . . .	26
3.4.2 Procédure . . . . .	26

3.4.3	Exploitation des résultats . . . . .	27
3.5	Vérification des lois de Charles et de Gay-Lussac . . . . .	27
3.5.1	Matériel utilisé . . . . .	27
3.5.2	Procédure . . . . .	27
3.5.3	Exploitation des résultats . . . . .	28
3.6	Compte-rendu . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Conductivité Thermique des Métaux</b>	<b>29</b>
4.1	Motivations . . . . .	30
4.2	Introduction . . . . .	30
4.3	Théorie . . . . .	30
4.4	Détermination de la capacité calorifique du calorimètre . . . . .	32
4.4.1	Matériel utilisé . . . . .	32
4.4.2	Procédure . . . . .	32
4.4.3	Exploitation des résultats . . . . .	32
4.5	Détermination du coefficient de conductivité thermique $\kappa$ dans le cas d'une barre de cuivre et une autre d'aluminium . . . . .	32
4.5.1	Matériel utilisé . . . . .	32
4.5.2	Procédure . . . . .	33
4.5.3	Exploitation des résultats . . . . .	34
4.6	Compte-rendu . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Capacité Thermique des Liquides</b>	<b>35</b>
5.1	Motivations . . . . .	36
5.2	Introduction . . . . .	36
5.3	Théorie . . . . .	36
5.4	Détermination de la capacité calorifique du calorimètre . . . . .	38
5.4.1	Matériel utilisé . . . . .	38
5.4.2	Procédure . . . . .	38
5.4.3	Exploitation des résultats . . . . .	38
5.5	Détermination de la capacité thermique massique de l'éthanol et du butanol . . . . .	39
5.5.1	Matériel utilisé . . . . .	39
5.5.2	Procédure . . . . .	39
5.5.3	Exploitation des résultats . . . . .	40
5.6	Compte-rendu . . . . .	40
<b>A</b>	<b>Feuilles de Mesures</b>	<b>41</b>
A.1	Feuille de mesure du TP 1 : capacité calorifique des métaux et chaleur latente de fusion de la glace . . . . .	43
A.2	Feuille de mesure du TP 2 : dilatation thermique des métaux . . . . .	45
A.3	Feuille de mesure du TP 3 : l'équation d'état des gaz parfaits . . . . .	47
A.4	Feuille de mesure du TP 4 : conductivité thermique des métaux . . . . .	49
A.5	Feuille de mesure du TP 5 : capacité thermique des liquides . . . . .	51

# Consignes et Rappels



## Le Thermoplongeur

Ne mettez jamais l'appareil en service s'il présente des détériorations au niveau du câble d'alimentation.

Veillez à ce que le câble d'alimentation n'entre jamais en contact avec des parties chaudes du thermoplongeur.

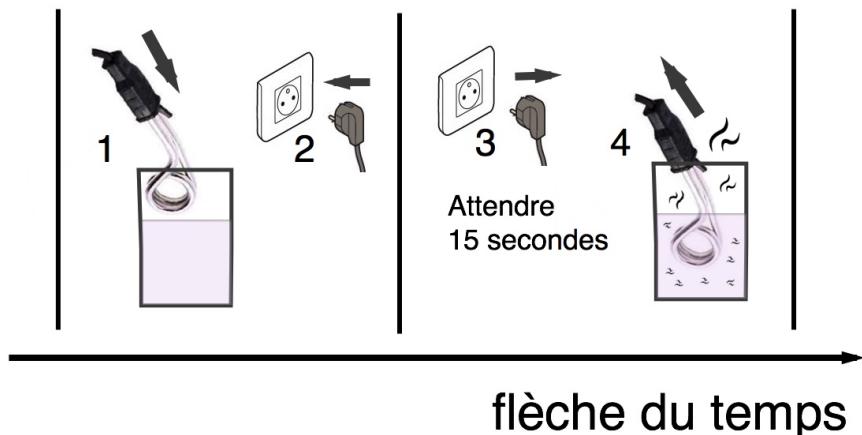
Le thermoplongeur devient très chaud lorsqu'on l'utilise. Saisissez-le uniquement par la poignée même si vous pensez qu'il s'est refroidi. **ATTENTION AUX RISQUES DE BRÛLURES.**

Ne laissez jamais le thermoplongeur sans surveillance pendant son utilisation.

Veillez à ne jamais brancher la fiche électrique du thermoplongeur avant que ce dernier ne soit déjà immergé dans une quantité suffisante d'eau (voir 1 et 2).

Dès que l'eau atteint la température désirée, débranchez la fiche de la prise de courant et **attendez 15 secondes** avant de retirer l'appareil de l'eau (voir 3 et 4).

Ne mettez jamais la sonde du thermomètre électronique en contact avec les parties chaudes du thermoplongeur. Ceci peut endommager sérieusement la sonde du thermomètre.





## Les Incertitudes

Toute mesure est affectée d'une erreur due à la précision limitée des appareils de mesure utilisés et/ou aux erreurs humaines. Le résultat d'une mesure n'est donc jamais une valeur  $a_{\text{mes}}$ , mais plutôt un intervalle des valeurs probables  $a = a_{\text{mes}} \pm \Delta a$ .

Dans le cas d'une mesure directe unique d'une grandeur physique simple (température, temps, longueur...), l'**erreur absolue**  $\Delta a$  est soit indiquée par le constructeur sur l'appareil de mesure ou sinon donnée par la plus petite unité que l'appareil est capable de fournir. (*Exemple :  $\Delta a = 1\text{mm}$  dans le cas d'une mesure de longueur effectuée par le biais d'une règle graduée en millimètres*). Cependant, si la mesure est répétée une énième fois (mesure répétitive), l'erreur absolue est donnée, dans ce cas, par l'écart type  $\Delta a_{\text{mes}}$  :

$$\Delta a_{\text{mes}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_{\text{mes}}^i - \bar{a}_{\text{mes}})^2} \quad \text{où} \quad \bar{a}_{\text{mes}} = \frac{\sum_{i=1}^n a_{\text{mes}}^i}{n} \quad (1)$$

Pour des grandeurs physiques composées, telles que  $a = q \times (r-s)/t$ , tout en supposant connues les incertitudes absolues  $\Delta q$ ,  $\Delta r$ ,  $\Delta s$  et  $\Delta t$ , l'incertitude absolue  $\Delta a$  est généralement déterminée par la méthode des dérivées partielles :

$$\begin{aligned} \Delta a &= \left| \frac{\partial a}{\partial q} \right| \Delta q + \left| \frac{\partial a}{\partial r} \right| \Delta r + \left| \frac{\partial a}{\partial s} \right| \Delta s + \left| \frac{\partial a}{\partial t} \right| \Delta t \\ &= \left| \frac{r-s}{t} \right| \Delta q + \left| \frac{q}{t} \right| (\Delta r + \Delta s) + \left| \frac{-q(r-s)}{t^2} \right| \Delta t \\ &= |a| \left( \frac{\Delta q}{|q|} + \frac{\Delta r + \Delta s}{|r-s|} + \frac{\Delta t}{|t|} \right). \end{aligned}$$

### Ecriture du résultat :

L'écriture du résultat de la mesure d'une grandeur physique simple ou composée doit impérativement intégrer l'incertitude absolue, sans oublier bien sûr de noter les unités appropriées

$$\mathbf{a} = (a_{\text{mes}} \pm \Delta a) \text{ unités} \quad (2)$$

où on prendra soin de limiter le nombre de chiffres significatifs de l'incertitude  $\Delta a$  à un seul chiffre significatif, tout en prenant comme dernier chiffre significatif de  $a_{\text{mes}}$  celui de même position que celui de l'incertitude.

*Exemple : dans le cas d'une mesure  $Q_{\text{mes}} = 23.2692 \text{ J}$  avec une incertitude absolue  $Q = 0.0921 \text{ J}$ , le résultat sera noté sous la forme :  $Q = (23.27 \pm 0.09) \text{ J}$*

La précision sur le résultat de la mesure sera, quant à elle, caractérisée par le rapport

$$\frac{\Delta a}{a_{\text{mes}}} \quad (3)$$

Plus ce rapport, dit **erreur relative**, est petit et plus la mesure est précise.



## Compte-Rendu de Travaux Pratiques

Un bon compte-rendu de travaux pratiques (TP) fait plus que présenter des résultats ; il démontre votre degré de compréhension des concepts qui se trouvent derrière les données. Il ne suffit donc pas de noter les résultats attendus (théoriques, bibliographiques) et/ou observés (mesurés, calculés) lors de l'expérience, mais il va falloir identifier l'origine des écarts éventuels, expliquer comment ils ont pu affecter le bon déroulement de votre expérience et montrer que vous avez bien compris les principes dont l'expérience a été conçue pour les examiner.

La structure globale d'un compte-rendu de TP est la suivante :

**Titre** pour informer les lecteurs du sujet de votre compte-rendu.

**Abrégé** afin de donner un résumé de tout le compte-rendu et inciter ainsi les lecteurs à le lire en sa totalité. Il devrait comporter les éléments suivants : les motivations, les résultats clés, le point le plus important de la partie discussion ainsi que la conclusion majeure. Il ne devrait nullement dépasser les 200 mots.

**Introduction** sert à donner aux lecteurs assez d'informations concernant le contexte ainsi que le but de l'expérience effectuée. Elle devrait être assez courte (environ 3 lignes).

**Méthodes** on y présente ce qui a été fait, le matériel utilisé ainsi que la procédure suivie. Pour le matériel, une simple liste suffit. Concernant la procédure expérimentale, elle devrait être écrite dans un ordre chronologique, en utilisant des paragraphes bien structurés, tout en décrivant les choses telles qu'elles se sont réellement produites et non telles qu'elles sont supposées se produire. Si vous rédigez bien cette partie, un autre expérimentateur sera dans la mesure de reproduire aisément vos résultats.

**Résultats** on y mentionne ce qui a été trouvé. Cette partie est généralement constituée de tableaux, de figures et de calculs, où les résultats principaux devraient être mentionnés explicitement sous forme verbale. Les graphes et les tableaux devraient être clairs, faciles à lire et bien identifiés.

**Discussion** sert à analyser et expliquer la signification de vos résultats. C'est la partie la plus importante de votre compte-rendu, car ici, vous allez montrer que vous avez bien assimilé l'expérience loin du simple fait de l'avoir réalisée. Vous devez donc expliquer et analyser tout ce qui ne saute pas aux yeux, en répondant en particulier aux questions suivantes : Qu'est-ce que vos résultats indiquent clairement ? Quelle est la signification de vos résultats ? Quelles sont les ambiguïtés qui existent ? Quelles sont les explications logiques pouvant interpréter les problèmes avec vos données ? Pour y répondre, vous devez comparer vos résultats avec les valeurs théoriques ou bibliographiques, si elles existent, puis chercher l'origine (non-humaine) des écarts éventuels. Si vous pensez que les problèmes viennent du schéma de l'expérience, expliquez comment ce schéma pourrait être amélioré afin d'avoir de bien meilleurs résultats.

**Conclusion** pour résumer vos résultats et interprétations. Elle est, en général, très courte (environ 2 lignes).

**Références** pour donner aux lecteurs l'origine des références citées dans le compte-rendu.

Le compte-rendu d'un TP a donc une structure bien claire qui sert à documenter vos résultats et communiquer leur signification, tout en permettant à tout un chacun de pouvoir les reproduire en suivant votre démarche.

L'introduction, la discussion ainsi que la conclusion sont, en général, les parties les plus difficiles à écrire, il est recommandé de les rédiger après avoir écrit la partie méthode et résultats. Si vous avez à rédiger un résumé, il est préférable de le faire en dernier.

# Chapitre 1

## Capacité Calorifique des Métaux et Chaleur Latente de Fusion de la Glace



FIGURE 1.1 – Dispositif de détermination de la chaleur spécifique de solides ainsi que de la chaleur latente de fusion de la glace.

## 1.1 Motivations

- Déterminer la capacité calorifique du calorimètre.
- Déterminer la capacité calorifique de l'aluminium et du cuivre.
- Déterminer la chaleur latente de fusion de la glace.

## 1.2 Introduction

La capacité calorifique  $C$  d'une substance est la grandeur physique qui détermine la quantité de chaleur  $Q$  nécessaire pour faire varier sa température d'une certaine valeur  $\Delta T$ . Nous savons, par expérience, que la capacité calorifique est une propriété extensive, dans le sens où la capacité calorifique d'un échantillon donné est directement proportionnelle aux dimensions de celui-ci (il est plus rapide de chauffer un verre d'eau qu'un baril d'eau en utilisant une même source de chaleur). La capacité thermique massique est la capacité calorifique rapportée à la masse de la substance. C'est une quantité intensive, parce qu'elle ne dépend que de la nature de la substance et non de ses dimensions.

Dans cette expérience, des techniques de calorimétrie et de mixture seront utilisées pour la détermination de la capacité thermique massique d'un échantillon de cuivre et un autre d'aluminium, ainsi que la chaleur latente de fusion de la glace.

## 1.3 Théorie

Quand un objet est mis en contact thermique avec un autre objet plus chaud, de l'énergie est transférée de l'objet le plus chaud à l'objet le plus froid. Il en résulte que la température de l'objet le plus froid va s'élèver d'une certaine quantité  $\Delta T$ . Cette variation de température est proportionnelle à la quantité de chaleur reçue (ou cédée) par la formule :

$$Q = C \Delta T \quad (1.1)$$

où la constante de proportionnalité  $C$  est la capacité calorifique de la substance dont les unités sont  $\text{J.K}^{-1}$ .

La quantité de chaleur nécessaire pour faire varier la température d'un objet est aussi proportionnelle à sa masse. La capacité thermique massique, ou chaleur spécifique, est donnée par

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m \Delta T} \quad (1.2)$$

où  $m$  est la masse de l'objet et les unités de  $c$  sont  $\text{J.K}^{-1}\text{kg}^{-1}$ .

La capacité thermique massique d'un matériau peut être déterminée expérimentalement en mesurant la variation de température, d'une masse donnée de ce matériau, due à l'échange d'une quantité connue de chaleur.

Dans cette expérience, un échantillon de métal chaud est ajouté à de l'eau distillée ambiante contenue dans le vase intérieur d'un calorimètre. Après un temps suffisant, l'échantillon de métal, l'eau distillée ainsi que le vase intérieur du calorimètre vont tous atteindre une température finale d'équilibre  $T_{\mathcal{E}}$ . Etant donné que le vase intérieur du calorimètre est sensé être isolé du milieu extérieur, la conservation de l'énergie implique que la quantité de chaleur cédée par l'échantillon de métal devrait être égale à la quantité de chaleur reçue par l'eau ainsi que le vase intérieur du calorimètre

$$\sum Q = 0 \quad (1.3)$$

$$Q_{\text{metal}} + Q_{\text{eau}} + Q_{\text{calorimètre}} = 0 \quad (1.4)$$

En termes de capacité calorifique et de capacités thermiques massiques, cette dernière équation s'écrit sous la forme

$$m_m c_m (T_{\mathcal{E}} - T_m) + m_e c_e (T_{\mathcal{E}} - T_e) + C_{\text{cal}} (T_{\mathcal{E}} - T_e) = 0 \quad (1.5)$$

où  $m_m$  et  $m_e$  sont les masses de l'échantillon de métal et de l'eau distillée, respectivement.  $c_m$  et  $c_e$  sont les capacités thermiques massiques correspondantes.  $C_{\text{cal}}$  est la capacité calorifique du calorimètre. L'échantillon de métal a une température initiale  $T_m$  et, avant que celui-ci ne soit introduit, l'eau distillée ainsi que le vase intérieur du calorimètre sont supposés être en équilibre thermique à la température  $T_e$ .

La méthode de mixture repose sur le fait que la capacité calorifique du calorimètre ainsi que la capacité thermique massique de l'eau sont supposées connues à l'avance<sup>1</sup>. Dans ce cas, il est expérimentalement possible de déterminer la capacité thermique massique de l'échantillon de métal

$$c_m = - \frac{(m_e c_e + C_{\text{cal}}) (T_{\mathcal{E}} - T_e)}{m_m (T_{\mathcal{E}} - T_m)} \quad (1.6)$$

Dans la deuxième partie de l'expérience, un échantillon de glace est ajouté à de l'eau distillée ambiante contenue dans le vase intérieur du calorimètre. Après un temps suffisant, l'échantillon de glace va fondre et l'eau qui en résulte, l'eau distillée ainsi que le vase intérieur du calorimètre vont tous atteindre une température finale d'équilibre  $T_{\mathcal{E}}$ . Vu que le vase intérieur du calorimètre est toujours sensé être isolé du milieu extérieur, la conservation de l'énergie implique que la quantité de chaleur reçue par l'échantillon de glace devrait être égale à la quantité de chaleur cédée par l'eau ainsi que le vase intérieur du calorimètre

$$\sum Q = 0 \quad (1.7)$$

1. En réalité, la capacité calorifique du calorimètre sera déterminée expérimentalement. Pour cela, une masse  $m_e$  d'eau sera portée à une température  $T_e$  avant d'être versée dans le calorimètre, initialement vide, afin de faire passer sa température de la température ambiante  $T_{\text{amb}}$  à la température d'équilibre  $T_{\mathcal{E}}$ . Dans les conditions idéales, l'énergie cédée par l'eau est complètement absorbée par le calorimètre :

$$m_e c_e (T_{\mathcal{E}} - T_e) + C_{\text{cal}} (T_{\mathcal{E}} - T_{\text{amb}}) = 0$$

d'où

$$C_{\text{cal}} = - \frac{m_e c_e (T_{\mathcal{E}} - T_e)}{(T_{\mathcal{E}} - T_{\text{amb}})}$$

$$Q_{\text{glace}} + Q_{\text{eau}} + Q_{\text{calorimètre}} = 0 \quad (1.8)$$

Cependant, cette fois-ci,  $Q_{\text{glace}}$  est la somme de  $Q_{\text{fusion}}$ , quantité de chaleur nécessaire pour faire fondre le morceau de glace, et de  $Q_{\text{chauffe}}$ , quantité de chaleur nécessaire pour faire varier la température de l'eau (résultant de la fonte de la glace) de la température  $0^{\circ}\text{C}$  à  $T_{\mathcal{E}}$ .

$$Q_{\text{glace}} = Q_{\text{fusion}} + Q_{\text{chauffe}} \quad (1.9)$$

$$= m_{\text{g}} \mathcal{L}_{\text{f}} + m_{\text{g}} c_{\text{e}} (T_{\mathcal{E}} - 0) \quad (1.10)$$

En termes de capacité calorifique, de capacité thermique massique et de chaleur latente de fusion, l'éq.(1.8) s'écrit sous la forme

$$m_{\text{g}} [\mathcal{L}_{\text{f}} + c_{\text{e}}(T_{\mathcal{E}} - 0)] + m_{\text{e}} c_{\text{e}} (T_{\mathcal{E}} - T_{\text{e}}) + C_{\text{cal}} (T_{\mathcal{E}} - T_{\text{e}}) = 0 \quad (1.11)$$

où  $m_{\text{g}}$  est la masse de l'échantillon de glace et  $\mathcal{L}_{\text{f}}$  la chaleur latente de fusion de la glace dont les unités sont  $\text{J.Kg}^{-1}$ .

Expérimentalement, la chaleur latente de fusion peut être déterminée par la relation

$$\mathcal{L}_{\text{f}} = - \frac{(m_{\text{e}} c_{\text{e}} + C_{\text{cal}}) (T_{\mathcal{E}} - T_{\text{e}}) + m_{\text{g}} c_{\text{e}} (T_{\mathcal{E}} - 0)}{m_{\text{g}}} \quad (1.12)$$

## 1.4 Détermination de la capacité calorifique du calorimètre

### 1.4.1 Matériel utilisé

- Calorimètre.
- Thermoplongeur.
- Bécher.
- Thermomètre.
- Balance.

### 1.4.2 Procédure

1. S'assurer que le calorimètre est bien propre, à défaut, le rincer avec de l'eau distillée.
2. Mesurer la température ambiante  $T_c$  du calorimètre.  $T_c = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C}$ .
3. Dans un bécher, verser environ 150 ml d'eau distillée, puis noter la masse  $M_e$  de l'eau utilisée.  
 $M_e = (\quad \pm \quad)\text{g}$ .
4. **S'assurer d'avoir bien lu les consignes d'utilisation du thermoplongeur page 6**, puis dans le bécher, chauffer cette eau distillée jusqu'à une température  $T_e$  d'environ 50°C.
5. En utilisant la sonde du thermomètre, mesurer cette température  $T_e$ .  $T_e = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C}$ .
6. Remettre la sonde du thermomètre dans le calorimètre, puis attendre quelques secondes, avant d'y verser l'eau chaude.
7. Tout en agitant le contenu du calorimètre, suivre la progression de la température du système (eau chaude + calorimètre). La température d'équilibre  $T_E$  correspond à la température maximale enregistrée par le thermomètre. Noter cette température d'équilibre.  $T_E = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C}$ .
8. En cas de doutes concernant les données ou le bon déroulement de la manipulation, refroidir le calorimètre en y versant un volume d'eau distillée à température ambiante, puis refaire les étapes 2 à 7.

### 1.4.3 Exploitation des résultats



- En négligeant les échanges d'énergie avec le milieu ambiant, faire le bilan des quantités de chaleur dans le système (eau + calorimètre), puis déduire la capacité calorifique du calorimètre utilisé  $C_{\text{cal}}$  ainsi que l'erreur absolue associée  $\Delta C_{\text{cal}}$ .
- Commenter les résultats.

## 1.5 Détermination de la capacité thermique massique du cuivre et de l'aluminium

### 1.5.1 Matériel utilisé

- Calorimètre.
- Thermoplongeur.
- Bécher.

- Thermomètre.
- Balance.
- Morceau de cuivre.
- Morceau d'aluminium.

### 1.5.2 Procédure

1. Peser le morceau de cuivre, puis noter sa masse  $M_{\text{Cu}}$ .  $M_{\text{Cu}} = ( \quad \pm \quad ) \text{ g}$ .
2. Dans un bécher, verser un volume d'eau distillée d'environ 400 ml, puis porter cette eau à ébullition en utilisant le thermoplongeur.
3. Mettre à chauffer le morceau de cuivre dans l'eau bouillante pendant une dizaine de minutes.  
 $T_{\text{Cu}} = (100.0 \pm 0.9)^\circ\text{C}$ .
4. Dans le calorimètre verser un volume d'environ 150 ml d'eau distillée à température ambiante après avoir bien pris le soin de peser et noter sa masse  $M_e$ .  $M_e = ( \quad \pm \quad ) \text{ g}$ .
5. Agiter le calorimètre, puis mesurer la température  $T_s$  du système (eau distillée + calorimètre).  
 $T_s = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$ .
6. Dans le calorimètre, y mettre la sonde du thermomètre, puis y introduire rapidement le morceau de cuivre préchauffé.
7. Tout en agitant le contenu du calorimètre, suivre la progression de la température du système (eau distillée + calorimètre + morceau de cuivre). La température d'équilibre  $T_{\mathcal{E}}$  correspond à la température maximale enregistrée par le thermomètre. Noter cette température d'équilibre.  $T_{\mathcal{E}} = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$ .
8. En cas de doutes concernant les données, refaire les étapes 1 à 7.
9. Refaire les étapes 1 à 8 en utilisant le morceau d'aluminium à la place du cuivre.  
 $M_{\text{Al}} = ( \quad \pm \quad ) \text{ g}$     $T_{\text{Al}} = (100.0 \pm 0.9)^\circ\text{C}$     $M_e = ( \quad \pm \quad ) \text{ g}$   
 $T_s = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$     $T_{\mathcal{E}} = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$ .

### 1.5.3 Exploitation des résultats



- En négligeant toujours les échanges d'énergie avec le milieu ambiant, faire le bilan des quantités de chaleur dans le système (eau + calorimètre + métal), dans les deux cas *Cu* et *Al*, puis déduire les capacités thermiques massiques du cuivre et de l'aluminium  $c_{\text{Cu}}$  et  $c_{\text{Al}}$ , respectivement, ainsi que les erreurs absolues associées  $\Delta c_{\text{Cu}}$  et  $\Delta c_{\text{Al}}$ .
- Commenter les résultats.

## 1.6 Détermination de la chaleur latente de fusion de la glace

### 1.6.1 Matériel utilisé

- Calorimètre.
- Bécher.
- Thermomètre.
- Balance.
- Capsule en porcelaine.
- Morceaux de glace.

### 1.6.2 Procédure

1. Dans le calorimètre verser un volume d'environ 150 ml d'eau distillée à température ambiante après avoir bien pris le soin de peser et noter sa masse  $M_e$ .  $M_e = ( \quad \pm \quad ) \text{ g}$ .
2. Agiter le calorimètre, puis mesurer la température  $T_s$  du système (eau distillée + calorimètre).  $T_s = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$ .
3. Peser la masse de la capsule en porcelaine vide et noter sa masse  $M_c$ .  $M_c = ( \quad \pm \quad ) \text{ g}$ .
4. Dans la capsule, mettre un morceau de glace fondante puis noter la masse de l'ensemble.  $M_T = ( \quad \pm \quad ) \text{ g}$ .
5. Calculer la masse du glaçon  $M_g$ .  $M_g = ( \quad \pm \quad ) \text{ g}$ .
6. Dans le calorimètre, y mettre la sonde du thermomètre, puis y introduire rapidement le morceau de glace.
7. Tout en agitant le contenu du calorimètre, suivre la progression de la température du système (eau distillée + calorimètre + glace fondante). La température d'équilibre  $T_E$  correspond à la température minimale enregistrée par le thermomètre. Noter cette température d'équilibre.  $T_E = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$ .
8. En cas de doutes concernant les données, porter le calorimètre à la température ambiante en y versant un volume d'eau distillée, puis refaire les étapes 1 à 7.

### 1.6.3 Exploitation des résultats



- En négligeant les pertes d'énergie avec le milieu ambiant, faire le bilan des quantités de chaleur dans le système (eau + calorimètre + glace), puis déduire la chaleur latente de fusion de la glace  $\mathcal{L}_f$ , ainsi que l'erreur absolue associée  $\Delta\mathcal{L}_f$ .
- Calculer l'enthalpie molaire de fusion de la glace  $\Delta H_{\text{fus}}$ .
- Comparer les valeurs trouvées avec celles de la littérature.
- Commenter les résultats ainsi que les conditions générales de l'expérience.

## 1.7 Compte-rendu

Le compte-rendu devrait être original et contenir au moins une introduction, une description de la procédure suivie comportant les valeurs exactes des quantités mesurées, une partie dédiée aux résultats et à leur analyse ainsi qu'une brève conclusion.



L'usage d'une documentation externe est permis, toutefois, **le plagiat est strictement interdit.**



- La capacité thermique massique de l'eau  $c_e = 4.18 \text{ J.K}^{-1}.\text{g}^{-1}$ .
- La masse molaire de la glace  $M = 18 \text{ g.mol}^{-1}$ .



## Chapitre 2

# Dilatation Thermique des Métaux



FIGURE 2.1 – Dispositif servant à l'étude de la dilatation linéaire des solides.

## 2.1 Motivations

- Etudier la dilatation linéaire du cuivre ainsi que de l'aluminium en fonction de la température.

## 2.2 Introduction

La majorité des métaux se dilatent quand leur température s'élève. Si cet effet est relativement faible, il est, néanmoins, d'une très grande importance dans diverses applications. Le négliger peut conduire à des dysfonctionnements ou à des accidents.

La dilatation thermique d'un métal dépend de sa composition ainsi que de sa structure interne. Du point de vue macroscopique, la dilation thermique est exprimée en fonction des coefficients de dilatation. Ces derniers sont des quantités expérimentales qui représentent la variation des dimensions d'un solide par degré de température. Dans cette expérience, nous allons étudier la dilation thermique de quelques métaux (aluminium et cuivre) et déterminer leurs coefficients de dilatation.

## 2.3 Théorie

La dilatation thermique est la conséquence directe de la variation de la distance moyenne séparant les atomes (ou molécules) d'une substance suite à la variation de la température. Plus précisément, ce sont les amplitudes de vibration des atomes, dans la structure cristalline des solides, qui changent. La variation dans une seule dimension d'un solide (longueur, largeur, ou épaisseur) est appelée dilatation linéaire. Celle-ci peut être différente suivant les différentes directions, toutefois, si la dilatation est la même dans toutes les directions, elle est dite isotrope.

Le rapport de variation de la longueur  $\Delta L/L_0$  est relié à la variation de la température  $\Delta T$  par

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \Delta T \quad \text{ou} \quad \Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (2.1)$$

$L_0$  est la longueur de l'objet à la température initiale  $T_0$ ,  $L$  sa longueur à la température  $T$ ,  $\Delta L = (L - L_0)$ ,  $\Delta T = (T - T_0)$  et  $\alpha$  le coefficient de dilatation linéaire ayant les unités de l'inverse de la température  $1/^\circ\text{C}$  ou  $1/\text{K}$ .

$\alpha$  est défini en fonction des quantités expérimentales mesurables par

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} \quad (2.2)$$

Par conséquent, en mesurant la longueur initiale  $L_0$  d'un objet (tige métallique) à une température initiale  $T_0$  ainsi que la variation de sa longueur  $\Delta L$  pour une variation correspondante de la température  $\Delta T$ , le coefficient  $\alpha$  peut être calculé à partir de la droite  $\Delta L = f(\Delta T)$  par simple calcul de sa pente  $a$

$$\alpha = \frac{a}{L_0} \quad (2.3)$$

## 2.4 Détermination des coefficients linaires de dilatation thermique du cuivre et de l'aluminium

### 2.4.1 Matériel utilisé

- Appareil de dilatation thermique Figure-2.1.
- Thermomètre.
- Tige en cuivre.
- Tige en aluminium.

### 2.4.2 Procédure



**Prendre ses précautions pour ne pas se brûler en manipulant l'eau ou les tiges chaudes.**  
**Faire très attention.**

1. Un montage typique qui sert à la détermination du coefficient linéaire de dilatation thermique est représenté sur la Figure-2.1.

2. S'assurer que le récipient est rempli d'eau distillée et que le thermostat est réglé sur la température 80 °C.

3. S'assurer que les tuyaux sont bien branchés et qu'aucune fuite n'est visible. A défaut, appeler votre enseignant.

4. Ajuster la longueur initiale de la tige du cuivre sur une des longueurs prédéfinies (600, 400 ou 200)mm.

$$L_0 = ( \quad \pm \quad ) \text{mm}.$$

5. Allumer la pompe pendant 10 secondes afin de permettre à l'eau de circuler dans la tige, puis l'éteindre.

6. Mettre le dilatomètre en contact avec l'une des extrémités de la tige, puis s'assurer du bon réglage du zéro avant de visser la vis qui sert à sa fixation.

7. S'assurer que les tuyaux en caoutchouc n'entrent pas en contact avec le dilatomètre afin de ne pas le surchauffer et fausser ainsi les mesures.

8. Noter la température initiale de l'eau.  $T_0 = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}.$

9. Remettre la pompe en marche, puis, en s'aidant du dilatomètre et du thermomètre, noter les variations de la longueur de la tige  $\Delta L$  correspondant à des variations de température  $(T_i - T_{i-1})$  comprises entre 5 et 10 °C,  $i = 1, \dots, 6$ .  $\Delta T$  étant défini, quant à lui, par  $\Delta T = T_i - T_0$ .

$\Delta L(\mu\text{m})$						
$\Delta T(\text{ }^\circ\text{C})$						

10. Remplacer l'eau du récipient par de l'eau distillée à température ambiante, puis refaire les étapes 2 à 9 en utilisant, cette fois-ci, la tige d'aluminium.  $L_0 = ( \quad \pm \quad ) \text{mm}$ ,  $T_0 = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}.$

$\Delta L(\mu\text{m})$						
$\Delta T(\text{ }^\circ\text{C})$						

### 2.4.3 Exploitation des résultats



- Tracer les graphes  $\Delta L = f(\Delta T)$  pour les deux tiges Al et Cu.
- Déduire les coefficients linéaires de dilatation thermique  $\alpha_{\text{Cu}}$  et  $\alpha_{\text{Al}}$  ainsi que les erreurs absolues correspondantes  $\Delta\alpha_{\text{Cu}}$  et  $\Delta\alpha_{\text{Al}}$ , respectivement.
- Comparer les valeurs trouvées avec celles de la littérature.
- Commenter les résultats.
- Quelles sont les principales sources d'erreurs dans cette expérience ?
- Pour une contraction caractérisée par un rapport de variation des longueurs  $\Delta L/L_0$  négatif, le coefficient  $\alpha$  est-il, lui aussi, négatif ? Expliquer.
- Si deux tiges de cuivre et d'aluminium, mesurant chacune d'elles 1m, sont soudées l'une à l'autre et que l'ensemble est chauffé pour faire éléver sa température de 50°C, que va-t-on observer ? Justifier.

## 2.5 Compte-rendu

Le compte-rendu devrait être original et contenir au moins une introduction, une description de la procédure suivie comportant les valeurs exactes des quantités mesurées, une partie dédiée aux résultats et à leur exploitation ainsi qu'une brève conclusion.



L'usage d'une documentation externe est permis, toutefois,  
**le plagiat est strictement interdit.**



- le coefficient de dilatation thermique du cuivre  $\alpha_{\text{Cu}} = 16 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .
- le coefficient de dilatation thermique de l'aluminium  $\alpha_{\text{Al}} = 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .



## Chapitre 3

# L'équation d'Etat des Gaz Parfaits

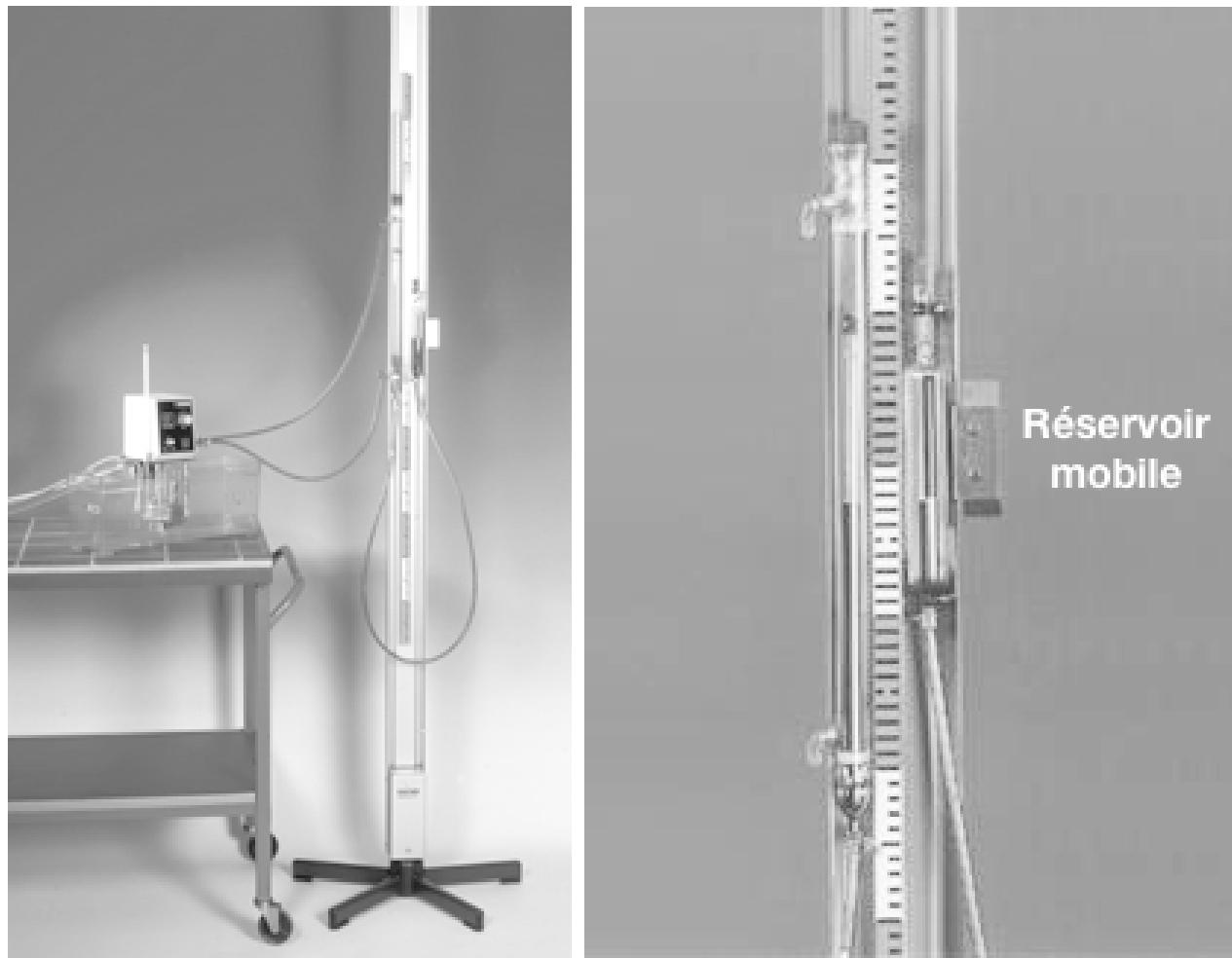


FIGURE 3.1 – Dispositif servant à l'étude des propriétés thermodynamiques des gaz parfaits.

### 3.1 Motivations

Pour une quantité constante d'un gaz (l'air), étudier la corrélation entre

- Le volume et la pression à température constante (loi de Boyle).
- Le volume et la température à pression constante (loi de Gay-Lussac).
- La pression et la température à volume constant (loi de Charles).

### 3.2 Introduction

Les lois des gaz sont des relations thermodynamiques qui expriment le comportement d'une quantité de gaz en fonction de la pression  $P$ , le volume  $V$  et la température  $T$ . En se basant sur les concepts de la mécanique statistique, il est facile de démontrer que le comportement des gaz parfaits est régi par la relation  $PV = nRT$ . Toutefois, cette dernière relation a été découverte bien avant. Elle est le fruit des observations empiriques, notamment, du savant anglais Robert Boyle et des français Jacques Charles et Joseph Gay-Lussac.

### 3.3 Théorie

Autour de 1660, Robert Boyle a établi une relation empirique entre la pression et le volume d'un gaz, connue sous le nom de la loi de Boyle : "*A température constante, le volume occupé par une masse donnée d'un gaz est inversement proportionnel à sa pression*". En notation mathématique

$$V = \frac{k}{P}, \quad (3.1)$$

où  $k$  est une constante de proportionnalité pour une température donnée.

La pression  $P$  d'un gaz confiné est généralement mesurée par le moyen d'un manomètre. Dans le cas d'un manomètre à tube ouvert (figure-3.1), celle-ci est la somme de la pression atmosphérique  $P_a$  et de la pression due à la différence de hauteur des deux niveaux du mercure  $\Delta h_m$

$$P = P_a + \rho_m \cdot g \cdot \Delta h_m \quad (3.2)$$

avec  $\rho_m$  la densité du mercure et  $g$  l'accélération de la pesanteur.

Le volume  $V$  du gaz enfermé est, quant à lui, la somme du volume  $V_c$  du segment de tube coloré en marron et du volume  $V_h$  calculé à partir de la hauteur  $h$  de la colonne d'air

$$V = V_h + V_c \quad (3.3)$$

$$= \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 h + V_c \quad (3.4)$$

où  $d$  est le diamètre du tube contenant le gaz à étudier.

En 1787, le physicien français Jacques Charles énonça les résultats d'une série d'expériences connue sous le nom de la loi de Charles : "*A volume constant, la pression exercée par une masse donnée d'un gaz est proportionnelle à sa température absolue*". En notation mathématique :

$$P = k' T \quad (3.5)$$

où  $k'$  est une constante de proportionnalité. La pression  $P$  est donnée par l'éq.(3.2) et la température  $T$  est exprimée en Kelvin.

En 1802, Gay-Lussac, en utilisant une différente approche expérimentale que celle de Charles, énonça la loi qui porte son nom (loi de Gay-Lussac) : "*A pression constante, le volume d'une masse donnée d'un gaz est proportionnel à sa température absolue*"

$$V = k'' T \quad (3.6)$$

où  $k''$  est une constante de proportionnalité pour une pression donnée. Le volume  $V$  est défini par l'éq.(3.4) et la température  $T$  est exprimée en Kelvin.

Dans ce TP, nous nous proposons de vérifier ces trois lois.



Robert Boyle



Jacques Charles



Joseph Gay-Lussac

## 3.4 Vérification de la loi de Boyle

### 3.4.1 Matériel utilisé

- Appareil pour la démonstration sur la loi des gaz, figure-3.1.
- Thermomètre.

### 3.4.2 Procédure

1. Durant cette expérience, la température devrait être maintenue constante. Veiller à ce que le thermoplongeur de la pompe soit éteint ou que son thermostat soit réglé sur la température ambiante. Noter cette température  $T_{\text{amb}} = ( \quad \pm \quad )\text{K}$ .
2. Enlever le bouchon de protection du réservoir mobile, puis faire lever ou descendre ce dernier jusqu'à ce que les deux niveaux du mercure soient égaux,  $\Delta h_m = ( 0 \pm 0,1)\text{cm}$ . Noter, en cette position, la hauteur  $h$  de la colonne d'air enfermée dans le tube d'essai.  $h = ( \quad \pm \quad )\text{cm}$ .
3. Faire déplacer le réservoir mobile vers le haut ou vers le bas, puis noter la différence entre les deux niveaux du mercure  $\Delta h_m$  ainsi que la hauteur de la colonne d'air  $h$ . Faire attention au signe de  $\Delta h_m$ .  
 $\Delta h_m = ( \quad \pm \quad )\text{cm}$ ,  $h = ( \quad \pm \quad )\text{cm}$ .
4. Refaire l'étape précédente plusieurs fois.

$\Delta h_m(\text{cm})$							
$h(\text{cm})$							

5. A la fin de l'expérience, remettre le bouchon de protection du réservoir mobile.

### 3.4.3 Exploitation des résultats



- En s'aidant des équations (3.2) et (3.4), calculer les pressions  $P$  ainsi que les volumes  $V$  correspondants aux différents  $\Delta h_m$  et  $h$  mesurés.

$\Delta h_m$ (cm)						
$P$ (kPa)						
$h$ (cm)						
$V$ (ml)						

- Tracer la courbe  $V=f(1/P)$  et calculer sa pente  $a_T$ .
- Discuter les résultats.

## 3.5 Vérification des lois de Charles et de Gay-Lussac

### 3.5.1 Matériel utilisé

- Appareil pour la démonstration sur la loi des gaz, figure-3.1.
- Thermomètre.

### 3.5.2 Procédure



Il est judicieux pour la deuxième partie de l'expérience de déterminer parallèlement la dépendance en température de la pression et du volume. Par conséquent, dans chaque cas, régler le thermostat sur la température désirée et attendre que le tube d'essai soit à la même température.

1. Régler la température du thermostat sur la température de la salle et attendre jusqu'à ce que le thermomètre vous indique la même valeur. Noter cette température initiale  $T_i = ( \quad \pm \quad )\text{K}$ .
2. Enlever le bouchon de protection du réservoir mobile, puis déterminer le volume  $V_0$  correspondant à la pression  $P = P_a$  en faisant déplacer le réservoir mobile jusqu'à ce que les deux niveaux du mercure soient égaux,  $\Delta h_m = 0$ . Marquer ce niveau et noter, en cette position, la hauteur  $h_0$  de la colonne d'air.  $h_0 = ( \quad \pm \quad )\text{cm}$ .
3. Incrémenter la valeur du thermostat de 5 K et attendre jusqu'à ce que le thermomètre vous indique la même valeur. Noter cette température  $T = ( \quad \pm \quad )\text{K}$ .
4. Pour déterminer le volume  $V$  correspondant à cette température  $T$ , à pression constante  $P = P_a$  (loi de Charles), ramener la pression du tube d'essai à la pression atmosphérique (en équilibrant les niveaux de mercure dans le tube d'essai ainsi que dans le réservoir mobile,  $\Delta h_m = 0$ ), puis mesurer la hauteur  $h$  de la colonne d'air. A partir de cette hauteur, le volume  $V$  est déterminé grâce à l'éq.(3.4).  $h = ( \quad \pm \quad )\text{cm}$ .
5. La pression  $P$  correspondant à cette même température  $T$ , à volume constant  $V = V_0$  ( $h = h_0$ ), est déterminée en déplaçant le réservoir mobile afin de ramener la hauteur de la colonne d'air à la position  $h_0$ . Une fois le volume  $V_0$  retrouvé, mesurer la différence entre les deux niveaux de mercure  $\Delta h_m$ . La pression correspondante est calculée à partir de l'éq.(3.2).  $\Delta h_m = ( \quad \pm \quad )\text{cm}$ .
6. Refaire plusieurs fois les étapes 3 à 5.

$T(K)$							
$h(cm)$							
$\Delta h_m(cm)$							

7. A la fin de la manipulation, remettre le bouchon de protection du réservoir mobile.

### 3.5.3 Exploitation des résultats



- En s'aidant des équations (3.2) et (3.4), calculer les pressions  $P$  ainsi que les volumes  $V$  correspondants aux différents  $\Delta h_m$  et  $h$  mesurés.

$T(K)$							
$h(cm)$							
$V(ml)$							
$\Delta h_m(cm)$							
$P(kPa)$							

- Tracer la courbe  $V=f(T)$  et calculer sa pente  $a_P$ .
- Tracer la courbe  $P=f(T)$  et calculer sa pente  $a_V$ .
- En extrapolant ces deux courbes, calculer les deux valeurs  $P_0$  et  $V_0$  correspondants, respectivement, à la pression et au volume du gaz étudié à la température  $T_0 = 273.15$  K.
- Calculer le coefficient de dilatation thermique  $\gamma_0 = 1/V_0 (\partial V / \partial T)_P = a_P/V_0$ .
- Calculer le coefficient de la tension thermique  $\beta_0 = 1/P_0 (\partial P / \partial T)_V = a_V/P_0$ .
- Vérifier, la loi de Gay-Lussac  $\beta_0 = \gamma_0 = 1/T_0$ .
- Discuter les résultats ainsi que les conditions générales de l'expérience.

## 3.6 Compte-rendu

Le compte-rendu devrait être original et contenir au moins une introduction, une description de la procédure suivie comportant les valeurs exactes des quantités mesurées, une partie dédiée aux résultats et à leur exploitation ainsi qu'une brève conclusion.



L'usage d'une documentation externe est permis, toutefois,  
**le plagiat est strictement interdit.**



- Le diamètre du tube d'essai  $d = 1.14$  cm.
- Le volume du segment coloré du tube d'essai  $V_c = 1.01$  ml.
- La densité du mercure  $\rho_m = 13.6$  g.cm $^{-3}$ .
- L'accélération de la pesanteur  $g = 980$  cm.s $^{-2}$ .
- La pression atmosphérique  $P_a = 101.3$  kPa.
- $1 \text{ Pa} = 10^{-3} \text{ kPa} = 1 \text{ kg.m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} = 10 \text{ g.cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ .
- $1 \text{ ml} = 1 \text{ cm}^3$ .
- $T(K) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15$ .

## Chapitre 4

# Conductivité Thermique des Métaux



FIGURE 4.1 – Appareil servant à l'étude de la conductivité thermique des métaux.

## 4.1 Motivations

- Détermination de la capacité calorifique du calorimètre.
- Détermination de la conductivité thermique du cuivre et d'aluminium.

## 4.2 Introduction

Le transfert de chaleur est la transition de l'énergie thermique d'un objet chaud à un autre plus froid. Quand une substance se trouve à une température différente de celle de son environnement immédiat, un transfert de l'énergie thermique, appelé aussi transfert de chaleur ou échange de chaleur, apparaît de telle sorte que la substance ainsi que son environnement atteignent l'équilibre thermique.

Les vecteurs principaux du transfert de l'énergie thermique sont la conduction, la convection, la radiation ou tout autre combinaison de ces dernières. Toutefois, dans tous ces cas, la force motrice du transfert de chaleur est la différence de température.

Dans ce TP, nous nous proposons d'étudier l'un de ces vecteurs de transfert, à savoir la conductivité thermique.

## 4.3 Théorie

La conductivité est le transfert de l'énergie thermique d'une région à température élevée vers une autre caractérisée par une température plus basse à travers une communication directe entre molécules d'un même milieu ou de milieux différents, sans toutefois qu'il y ait un flux de matière. Le transfert d'énergie s'effectue principalement par chocs élastiques, dans le cas des fluides ; ou par diffusion des électrons libres, dans le cas des métaux ; ou finalement par vibration des phonons, dans le cas des isolants. En d'autres termes, la chaleur est transmise par conduction quand les atomes vibrent les uns à côté des autres, ou quand les électrons passent d'un atome à un autre.

La conductivité est plus importante dans le cas des solides où les atomes sont constamment proches les uns des autres. De plus, les métaux sont, en général, d'excellents conducteurs de chaleur due à leur structure cristalline ainsi qu'au fait qu'il ont des électrons libres, ce qui favorise considérablement le transfert de l'énergie thermique. Toutefois, à mesure que la densité décroît, la conductivité décroît aussi.

Pour quantifier la facilité avec laquelle une substance transfert de la chaleur par conduction, un coefficient de conductivité  $\kappa$  est utilisé. Ce paramètre est défini comme étant la quantité de chaleur  $\delta Q$  transmise durant l'intervalle de temps  $\delta t$  à travers une épaisseur  $dx$ , dans une direction normale à la surface  $S$ , due à une différence de température  $d\Theta(x)$  :

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = -\kappa S \frac{d\Theta(x)}{dx} \quad (4.1)$$

En termes des données de l'expérience,  $\delta Q$  est en réalité la quantité de chaleur nécessaire pour faire varier de  $\Delta T_g = (T_f - T_i)$  la température d'un calorimètre, de capacité calorifique  $C_{\text{cal}}$ , contenant une quantité d'eau glacée de masse  $m_e$  durant l'intervalle de temps  $\delta t \sim \Delta t$  :

$$\delta Q \sim Q = (m_e c_e + C_{\text{cal}}) \Delta T_g \quad (4.2)$$

Quant à  $d\Theta(x) \sim \Delta\Theta(x) = [\Theta(x_2) - \Theta(x_1)]$ , c'est la différence de température entre deux points d'une barre métallique (de cuivre ou d'aluminium), de section  $S$ , séparés par une distance  $dx \sim \Delta x = (x_2 - x_1)$ . De ce fait,  $\Delta\Theta(x)/\Delta x$  est le gradient de température dans la barre métallique et  $Q/\Delta t$  est le courant de chaleur.

$$\frac{Q}{\Delta t} = -\kappa S \frac{\Delta\Theta(x)}{\Delta x} \quad (4.3)$$

## 4.4 Détermination de la capacité calorifique du calorimètre

### 4.4.1 Matériel utilisé

- Calorimètre.
- Thermoplongeur.
- Bécher.
- Thermomètre.
- Balance.

### 4.4.2 Procédure

1. S'assurer que le calorimètre est bien propre, à défaut, le rincer avec de l'eau distillée.
2. Mesurer la température ambiante  $T_c$  du calorimètre.  $T_c = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C}$ .
3. Dans un bécher, verser environ 150 ml d'eau distillée, puis noter la masse  $M_e$  de l'eau utilisée.  
 $M_e = (\quad \pm \quad)\text{g}$ .
4. S'assurer d'avoir bien lu les consignes d'utilisation du thermoplongeur page 6, puis dans le bécher, chauffer cette eau distillée jusqu'à une température  $T_e$  d'environ 50°C.
5. En utilisant la sonde du thermomètre, mesurer cette température  $T_e$ .  $T_e = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C}$ .
6. Remettre la sonde du thermomètre dans le calorimètre, puis attendre quelques secondes, avant d'y verser l'eau chaude.
7. Tout en agitant le contenu du calorimètre, suivre la progression de la température du système (eau chaude + calorimètre). La température d'équilibre  $T_E$  correspond à la température maximale enregistrée par le thermomètre. Noter cette température d'équilibre.  $T_E = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C}$ .
8. En cas de doutes concernant les données ou le bon déroulement de la manipulation, refroidir le calorimètre en y versant un volume d'eau distillée à température ambiante, puis refaire les étapes 2 à 7.

### 4.4.3 Exploitation des résultats



- En négligeant les échanges d'énergie avec le milieu ambiant, faire le bilan des quantités de chaleur dans le système (eau + calorimètre), puis déduire la capacité calorifique du calorimètre utilisé  $C_{\text{cal}}$  ainsi que l'erreur absolue associée  $\Delta C_{\text{cal}}$ . Pour la théorie, se référer à la section-1.3.
- Commenter les résultats.

## 4.5 Détermination du coefficient de conductivité thermique $\kappa$ dans le cas d'une barre de cuivre et une autre d'aluminium

### 4.5.1 Matériel utilisé

- Appareil de conductivité thermique Figure-4.1.
- Thermoplongeur.
- Thermomètre.

- Chronomètre.
- Balance.
- Pied à coulisse.
- Règle graduée.
- Morceaux de glace.

#### 4.5.2 Procédure

1. S'assurer que le montage de l'expérience est semblable à celui de la figure-4.1 et que la barre de cuivre est bien fixée.
2. Mesurer la masse du calorimètre inférieur (vide) et noter sa masse  $M_{\text{cal}}$ .  $M_{\text{cal}} = ( \quad \pm \quad ) \text{ g}$ .
3. S'assurer que la partie non protégée de la barre de cuivre est complètement immergée dans de l'eau distillée glacée afin de garantir un bon transfert de chaleur entre la barre et l'eau.
4. Mettre, respectivement, les deux sondes du thermomètre électronique au contact du premier  $x_1$  ainsi que du dernier trou  $x_{10}$  de la barre de cuivre afin de mesurer le gradient de température  $\Theta(x_{10}) - \Theta(x_1)$ .
5. Remplir le calorimètre supérieur avec de l'eau distillée, puis **après avoir lu les consignes de sécurité concernant la bonne utilisation du thermoplongeur page 6**, porter et maintenir cette eau à ébullition.



**Attention ! Garder un œil sur le niveau de l'eau distillée dans le calorimètre supérieur pour s'assurer que le thermoplongeur est toujours suffisamment immergé. Il va falloir remplacer constamment l'eau évaporée durant l'expérience. Le thermoplongeur sera détruit par surchauffe si jamais le niveau de l'eau est trop bas. Attention ! Rester à l'écart de la zone des récipients pour éviter d'être brûlé par des gouttes d'eau chaude qui peuvent être éjectées, aléatoirement, en dehors du calorimètre supérieur.**

6. S'assurer que le calorimètre supérieur est toujours rempli afin d'éviter une chute de température par un re-remplissage total du calorimètre.
7. Garder la température de l'eau dans le calorimètre inférieur proche de 0°C par le biais de morceaux de glace.
8. Les mesures peuvent commencer quand le gradient de température  $\Theta(x_{10}) - \Theta(x_1)$  commence à devenir constant. Ceci peut prendre, selon les conditions de l'expérience, 5 à 10 minutes.
9. Une fois le gradient stable, noter les deux température  $\Theta(x_1)$  et  $\Theta(x_{10})$ .  $\Theta(x_1) = ( \quad \pm \quad )^{\circ}\text{C}$ ,  $\Theta(x_{10}) = ( \quad \pm \quad )^{\circ}\text{C}$ .
10. Mettre une des sondes du thermomètre électronique dans le calorimètre inférieur, puis attendre jusqu'à ce que cette dernière s'équilibre thermiquement avec l'eau glacée.
11. Enlever tous les morceaux de glaces encore présents dans le calorimètre inférieur, puis tout en déclenchant le chronomètre, noter la température initiale  $T_i$  du calorimètre inférieur,  $T_i = ( \quad \pm \quad )^{\circ}\text{C}$ .
12. Après un intervalle de temps  $\Delta t$  de 180 sec, noter la température finale dans le calorimètre inférieur  $T_f = ( \quad \pm \quad )^{\circ}\text{C}$ .
13. Débrancher le thermoplongeur et appeler votre enseignant pour vous aider à dégager le calorimètre inférieur afin de le peser et de déduire la masse de l'eau glacée utilisée. Noter la masse totale  $M_{\text{Tot}}$  du calorimètre inférieur rempli d'eau glacée,  $M_{\text{Tot}} = ( \quad \pm \quad ) \text{ g}$ .

14. Calculer la masse  $M_e$  de l'eau glacée utilisée.,  $M_e = (\quad \pm \quad) \text{ g}$ .
15. Mesurer la distance  $\Delta x_{\text{Cu}}$  entre les deux points  $x_1$  et  $x_{10}$  de la barre de cuivre.  $\Delta x_{\text{Cu}} = (\quad \pm \quad) \text{ cm}$ .
16. Mesurer, avec le pied à coulisse, le diamètre de la barre de cuivre afin de calculer la section  $S$  de celle-ci.  $d_{\text{Cu}} = (\quad \pm \quad) \text{ cm}$ .
17. Refaire le montage de la figure-4.1 en mettant la barre d'aluminium à la place de celle du cuivre.
18. Refaire les étapes 3 à 16 en travaillant cette fois-ci avec la barre d'aluminium.  
 $\Theta(x_1) = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C}$ ,  $\Theta(x_{10}) = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C}$ ,  $T_i = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C}$ ,  $T_f = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C}$ .  
 $M_{\text{Tot}} = (\quad \pm \quad) \text{ g}$ ,  $M_e = (\quad \pm \quad) \text{ g}$ ,  $\Delta x_{\text{Al}} = (\quad \pm \quad) \text{ cm}$ ,  $d_{\text{Al}} = (\quad \pm \quad) \text{ cm}$ .

#### 4.5.3 Exploitation des résultats



- Calculer le gradient de température  $\Delta\Theta(x)/\Delta x$  pour les deux barres de cuivre et d'aluminium.
- Dans ces deux cas, faire le bilan d'énergie dans le calorimètre inférieur et calculer la quantité de chaleur  $Q$  reçue lors de l'intervalle de temps  $\Delta t = 180$  sec.
- Déduire les deux coefficients de conductivité thermique  $\kappa_{\text{Cu}}$  et  $\kappa_{\text{Al}}$  ainsi que les deux erreurs absolues associées  $\Delta\kappa_{\text{Cu}}$  et  $\Delta\kappa_{\text{Al}}$ .
- Comparer les valeurs trouvées avec celles de la littérature.
- Commenter les résultats ainsi que les conditions générales de l'expérience.

#### 4.6 Compte-rendu

Le compte-rendu devrait être original et contenir au moins une introduction, une description de la procédure suivie comportant les valeurs exactes des quantités mesurées, une partie dédiée aux résultats et à leur exploitation ainsi qu'une brève conclusion.



L'usage d'une documentation externe est permis, toutefois,  
**le plagiat est strictement interdit.**



- Le coefficient de conductivité thermique du cuivre est  $\kappa_{\text{Cu}} = 384 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ .
- Le coefficient de conductivité thermique de l'aluminium est  $\kappa_{\text{Al}} = 254 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ .
- La capacité thermique massique de l'eau  $c_e = 4.18 \text{ J.K}^{-1}.\text{g}^{-1}$ .

## Chapitre 5

# Capacité Thermique des Liquides

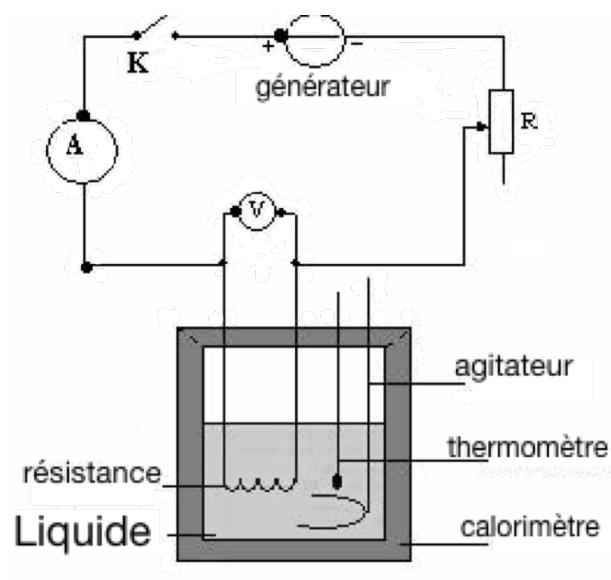


FIGURE 5.1 – Dispositif servant à la détermination de la chaleur spécifique des liquides.

## 5.1 Motivations

- Détermination de la capacité calorifique du calorimètre.
- Détermination de la capacité thermique massique de quelques liquides (l'éthanol et le butanol).

## 5.2 Introduction

La puissance dissipée par un dipôle de résistance électrique  $R$ , traversée par un courant  $I$  et une différence de potentiel  $U$  est donnée par

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R} = U I \quad (5.1)$$

Effet communément connu sous le nom d'effet Joule, où une quantité donnée d'énergie électrique absorbée par le dipôle produit une certaine quantité de chaleur qui va servir, dans cette expérience, à déterminer les capacités thermiques massiques de quelques liquides, à savoir l'éthanol et le butanol.

## 5.3 Théorie

Quand un dipôle électrique de résistance  $R$  est soumise à une différence de potentiel  $U$  et traversée par un courant électrique  $I$ , la puissance absorbée par le dipôle est donnée par l'éq.(5.1).

La puissance étant l'énergie par unité de temps, si la puissance est constante, alors l'énergie  $E_{\text{élec}}$  délivrée au cours du temps  $t$  est donnée par

$$E_{\text{élec}} = P t, \quad (5.2)$$

En remplaçant l'éq.(5.1) dans l'éq.(5.2), on trouve :

$$E_{\text{élec}} = \frac{U^2}{R} t \quad (5.3)$$

Toutefois, quand un dipôle absorbe une énergie électrique, il dissipe cette énergie sous forme de chaleur  $Q$ . Si le dipôle est placé dans un calorimètre contenant une masse  $m_{\text{liq}}$  d'un liquide, la quantité de chaleur produite va servir à éléver la température du système (calorimètre+liquide) d'une certaine quantité  $\Delta T$ , de telle sorte que, si on néglige les pertes d'énergie avec le milieu extérieur, nous allons avoir :

$$E_{\text{élec}} = \frac{U^2}{R} t = Q = (m_{\text{liq}} c_{\text{liq}} + C_{\text{cal}}) \Delta T \quad (5.4)$$

Il est donc possible, en connaissant la capacité calorifique du calorimètre  $C_{\text{cal}}$  ainsi que la quantité  $m_{\text{liq}}$  du liquide utilisé, de déterminer la chaleur spécifique  $c_{\text{liq}}$  de ce dernier à partir de la courbe  $Q = f(\Delta T)$ , dont la pente n'est autre que

$$a = m_{\text{liq}} c_{\text{liq}} + C_{\text{cal}}. \quad (5.5)$$

## 5.4 Détermination de la capacité calorifique du calorimètre

### 5.4.1 Matériel utilisé

- Calorimètre.
- Thermoplongeur.
- Bécher.
- Thermomètre.
- Balance.

### 5.4.2 Procédure

1. S'assurer que le calorimètre est bien propre, à défaut, le rincer avec de l'eau distillée.
2. Mesurer la température ambiante  $T_c$  du calorimètre.  $T_c = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$ .
3. Dans un bécher, verser environ 150 ml d'eau distillée, puis noter la masse  $M_e$  de l'eau utilisée.  
 $M_e = ( \quad \pm \quad )\text{g}$ .
4. **S'assurer d'avoir bien lu les consignes d'utilisation du thermoplongeur page 6**, puis dans le bécher, chauffer cette eau distillée jusqu'à une température  $T_e$  d'environ 50°C.
5. En utilisant la sonde du thermomètre, mesurer cette température  $T_e$ .  $T_e = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$ .
6. Remettre la sonde du thermomètre dans le calorimètre, puis attendre quelques secondes, avant d'y verser l'eau chaude.
7. Tout en agitant le contenu du calorimètre, suivre la progression de la température du système (eau chaude + calorimètre). La température d'équilibre  $T_{\mathcal{E}}$  correspond à la température maximale enregistrée par le thermomètre. Noter cette température d'équilibre.  $T_{\mathcal{E}} = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$ .
8. En cas de doutes concernant les données ou le bon déroulement de la manipulation, refroidir le calorimètre en y versant un volume d'eau distillée à température ambiante, puis refaire les étapes 2 à 7.

### 5.4.3 Exploitation des résultats



- En négligeant les échanges d'énergie avec le milieu ambiant, faire le bilan des quantités de chaleur dans le système (eau + calorimètre), puis déduire la capacité calorifique du calorimètre utilisé  $C_{\text{cal}}$  ainsi que l'erreur absolue associée  $\Delta C_{\text{cal}}$ . Pour la théorie, se référer à la section-1.3.
- Commenter les résultats.

## 5.5 Détermination de la capacité thermique massique de l'éthanol et du butanol

### 5.5.1 Matériel utilisé

- Calorimètre.
- Multimètre.
- Chronomètre.
- Générateur de tension alternative.
- Bécher.
- Balance.
- Thermomètre.
- Bocal d'éthanol.
- Bocal de butanol.

### 5.5.2 Procédure

1. Mesurer la valeur  $R$  de la résistance du boîtier du calorimètre,  $R = ( \quad \pm \quad ) \Omega$ .
2. Noter la valeur  $U$  de la différence de potentiel du générateur,  $U = ( \quad \pm \quad ) V$ .
3. Peser la masse  $M_b$  du bécher à vide et noter la,  $M_b = ( \quad \pm \quad ) g$ .
4. Dans le bécher, verser un volume  $V$  d'environ 150 ml d'éthanol, puis peser la masse totale  $M_T$  de l'ensemble. Noter cette masse,  $M_T = ( \quad \pm \quad ) g$ .
5. Déduire la masse du volume  $V$  de l'éthanol,  $M_{\text{éth}} = ( \quad \pm \quad ) g$ .
6. Verser ce volume d'éthanol dans le calorimètre, puis refermer légèrement le boîtier.
7. Agiter l'ensemble pour faciliter l'équilibre thermique, puis introduire la sonde du thermomètre et noter la température initiale  $T_i$  du système (calorimètre + éthanol),  $T_i = ( \quad \pm \quad ) ^\circ C$ .
8. Brancher les deux bornes de la résistance du calorimètre au générateur de tension continue.
9. Déclencher, au même moment, le chronomètre ainsi que le générateur de tension, puis noter les temps  $t$  de chauffage correspondants aux variations suivante de température de l'ensemble ( $\Delta T = T - T_i$ )

$\Delta T(K)$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
$t(s)$										

10. Eteindre les appareils électriques et verser l'éthanol chaud dans un bécher de remplacement afin qu'il refroidisse, puis le remettre dans son bocal.
11. En cas de doutes concernant les données ou le bon déroulement de la manipulation refaire les étapes 4 à 10 en utilisant de l'éthanol à température ambiante.
12. Refaire les étapes 4 à 11, en travaillant cette fois-ci avec du butanol au lieu de l'éthanol.

$$M_T = ( \quad \pm \quad ) g, \quad M_{\text{but}} = ( \quad \pm \quad ) g, \quad T_i = ( \quad \pm \quad ) ^\circ C$$

$\Delta T(K)$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
$t(s)$										

### 5.5.3 Exploitation des résultats



- En s'aidant de l'éq.(5.4) ainsi que des résultats de la manipulation, remplir les tableaux suivants :

éthanol

$\Delta T(K)$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
$t(s)$										
$E_{\text{elec}}(J)$										

butanol

$\Delta T(K)$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
$t(s)$										
$E_{\text{elec}}(J)$										

- Tracer la courbe  $Q = f(\Delta T)$  dans le cas de l'éthanol et calculer sa pente  $a_{\text{éth}}$ .
- Tracer la courbe  $Q = f(\Delta T)$  dans le cas du butanol et calculer sa pente  $a_{\text{but}}$ .
- Déduire, à partir de l'éq.(5.5), les capacités thermiques massiques de l'éthanol et du butanol, puis comparer les valeurs trouvées avec celles de la littérature.
- Commenter les résultats ainsi que les conditions générales de l'expérience.

## 5.6 Compte-rendu

Le compte-rendu devrait être original et contenir au moins une introduction, une description de la procédure suivie comportant les valeurs exactes des quantités mesurées, une partie dédiée aux résultats et à leur exploitation ainsi qu'une brève conclusion.



L'usage d'une documentation externe est permis, toutefois,  
**le plagiat est strictement interdit.**



- La capacité thermique massique de l'eau  $c_e = 4.18 \text{ J.K}^{-1}.\text{g}^{-1}$ .
- La capacité thermique massique de l'éthanol  $c_{\text{éth}} = 2.46 \text{ J.K}^{-1}.\text{g}^{-1}$ .
- La capacité thermique massique du butanol  $c_{\text{but}} = 2.65 \text{ J.K}^{-1}.\text{g}^{-1}$ .

## Annexe A

### Feuilles de Mesures



## A.1 Feuille de mesure du TP 1 : capacité calorifique des métaux et chaleur latente de fusion de la glace

Date de la manipulation  
... / ... / 2017

Date de la remise du CR  
... / ... / 2017

Nom	Prénom	Groupe	Observation

Signature de l'enseignant

### Détermination de la capacité calorifique du calorimètre

$$T_c = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C} \quad M_e = ( \quad \pm \quad )\text{g} \quad T_e = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C} \quad T_{\mathcal{E}} = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$$

### Détermination de la capacité thermique massique du cuivre et de l'aluminium

$$M_{\text{Cu}} = ( \quad \pm \quad )\text{g} \quad T_{\text{Cu}} = (100.0 \pm 0.9)^\circ\text{C} \quad M_e = ( \quad \pm \quad )\text{g}$$

$$T_s = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C} \quad T_{\mathcal{E}} = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$$

$$M_{\text{Al}} = ( \quad \pm \quad )\text{g} \quad T_{\text{Al}} = (100.0 \pm 0.9)^\circ\text{C} \quad M_e = ( \quad \pm \quad )\text{g}$$

$$T_s = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C} \quad T_{\mathcal{E}} = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$$

### Détermination de la chaleur latente de fusion de la glace

$$M_e = ( \quad \pm \quad )\text{g} \quad T_s = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C} \quad M_c = ( \quad \pm \quad )\text{g}$$

$$M_{\text{T}} = ( \quad \pm \quad )\text{g} \quad M_g = ( \quad \pm \quad )\text{g} \quad T_{\mathcal{E}} = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$$



## A.2 Feuille de mesure du TP 2 : dilatation thermique des métaux

Date de la manipulation  
... / ... / 2017

Date de la remise du CR  
... / ... / 2017

Nom	Prénom	Groupe	Observation

Signature de l'enseignant

### Détermination des coefficients linaires de dilatation thermique du cuivre et de l'aluminium

#### Cuivre

$$L_0 = ( \quad \pm \quad ) \text{mm} \quad T_0 = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$$

$\Delta L(\mu\text{m})$						
$\Delta T(\text{ }^\circ\text{C})$						

#### Aluminium

$$L_0 = ( \quad \pm \quad ) \text{mm} \quad T_0 = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$$

$\Delta L(\mu\text{m})$						
$\Delta T(\text{ }^\circ\text{C})$						



### A.3 Feuille de mesure du TP 3 : l'équation d'état des gaz parfaits

Date de la manipulation  
... / ... / 2017

Date de la remise du CR  
... / ... / 2017

Nom	Prénom	Groupe	Observation

Signature de l'enseignant

#### Vérification de la loi de Boyle

$$T_{\text{amb}} = ( \quad \pm \quad ) \text{K}$$

$$\Delta h_m = ( 0 \pm 0,1) \text{cm}, \quad h = ( \quad \pm \quad ) \text{cm}$$

$$\Delta h_m = ( \quad \pm \quad ) \text{cm}, \quad h = ( \quad \pm \quad ) \text{cm}$$

$\Delta h_m$ (cm)							
$h$ (cm)							

#### Vérification des lois de Charles et de Gay-Lussac

$$T_i = ( \quad \pm \quad ) \text{K} \quad h_0 = ( \quad \pm \quad ) \text{cm}$$

$$T = ( \quad \pm \quad ) \text{K} \quad h = ( \quad \pm \quad ) \text{cm} \quad \Delta h_m = ( \quad \pm \quad ) \text{cm}$$

$T$ (K)							
$h$ (cm)							
$\Delta h_m$ (cm)							



## A.4 Feuille de mesure du TP 4 : conductivité thermique des métaux

Date de la manipulation  
... / ... / 2017

Date de la remise du CR  
... / ... / 2017

Nom	Prénom	Groupe	Observation

Signature de l'enseignant

### Détermination de la capacité calorifique du calorimètre

$$T_c = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C} \quad M_e = (\quad \pm \quad) \text{g} \quad T_e = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C} \quad T_{\mathcal{E}} = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C}$$

### Détermination du coefficient de conductivité thermique $\kappa$

$$M_{\text{cal}} = (\quad \pm \quad) \text{g}$$

#### Cuivre

$$\Theta(x_1) = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C}, \quad \Theta(x_{10}) = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C}$$

$$T_i = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C} \quad T_f = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C}$$

$$M_{\text{Tot}} = (\quad \pm \quad) \text{g} \quad M_e = (\quad \pm \quad) \text{g}$$

$$\Delta x_{\text{Cu}} = (\quad \pm \quad) \text{cm} \quad d_{\text{Cu}} = (\quad \pm \quad) \text{cm}$$

#### Aluminium

$$\Theta(x_1) = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C}, \quad \Theta(x_{10}) = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C}$$

$$T_i = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C} \quad T_f = (\quad \pm \quad)^\circ\text{C}$$

$$M_{\text{Tot}} = (\quad \pm \quad) \text{g} \quad M_e = (\quad \pm \quad) \text{g}$$

$$\Delta x_{\text{Al}} = (\quad \pm \quad) \text{cm} \quad d_{\text{Al}} = (\quad \pm \quad) \text{cm}$$



## A.5 Feuille de mesure du TP 5 : capacité thermique des liquides

Date de la manipulation  
... / ... / 2017

Date de la remise du CR  
... / ... / 2017

Nom	Prénom	Groupe	Observation

Signature de l'enseignant

### Détermination de la capacité calorifique du calorimètre

$$T_c = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C} \quad M_e = ( \quad \pm \quad )\text{g} \quad T_e = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C} \quad T_{\mathcal{E}} = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$$

### Détermination de la capacité thermique massique de l'éthanol et du butanol

$$R = ( \quad \pm \quad )\Omega \quad U = ( \quad \pm \quad )V \quad M_b = ( \quad \pm \quad )\text{g}$$

#### Ethanol

$$M_T = ( \quad \pm \quad )\text{g}, \quad M_{\text{éth}} = ( \quad \pm \quad )\text{g}, \quad T_i = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$$

$\Delta T(\text{K})$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
$t(\text{s})$										

#### Butanol

$$M_T = ( \quad \pm \quad )\text{g}, \quad M_{\text{but}} = ( \quad \pm \quad )\text{g}, \quad T_i = ( \quad \pm \quad )^\circ\text{C}$$

$\Delta T(\text{K})$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
$t(\text{s})$										

