

Méthodes expérimentales

TP 3: Chaleur spécifique, calorimétrie

MENARD Alexandre
VIEILLEDENT Florent

21 février 2022

Introduction

Dans ce travail pratique, on s'intéressera à déterminer les coefficients thermiques, ainsi que les coefficients thermiques massiques et molaire de l'eau, du vase et de plusieurs métaux. On évaluera également les fuites thermiques du calorimètre pour mettre en avant de potentielles erreurs dans nos expériences précédentes.

On s'appuiera sur des modèles théoriques pour comparer nos mesures à la théorie, et pour effectuer nos comparaisons, on utilisera les outils numériques adéquats.

1 Première expérience : Détermination de la capacité thermique de l'eau et du vase calorimétrique

Le but de cette expérience est de déterminer la capacité thermique de l'eau. On va pour cela utiliser principalement un calorimètre et une résistance chauffante de 5Ω , pour pouvoir établir une relation entre la température de l'eau et le temps passé à chauffer de l'eau. On va pouvoir en même temps estimer la capacité thermique du vase calorimétrique.

1.1 Expérimentation

Nous allons effectuer la même expérience pour différentes masses d'eau et pour différents voltages. Pour la première série de mesure, on utilise $450g$ d'eau et une tension de $12V$. On remplit la cuve interne du calorimètre avec la masse d'eau souhaitée, qu'on a pesé avec une balance. On agite l'eau pour que cela soit homogène et on relève la température grâce au thermomètre. On met ensuite en place la résistance chauffante dans l'eau. La résistance est branchée à l'alimentation qui est elle même réglée sur $12V$. On lance le chronomètre et on relève la température toutes les minutes et ceci pendant 15 minutes. On mélange l'eau pendant 15 secondes avant la mesure pour s'assurer que la température soit homogène.

On recommence ensuite l'expérience avec la même masse d'eau mais une tension de $6V$. Pour la dernière série de mesure, on utilise une tension de $12V$ et une masse d'eau de $800g$.

1.2 Données

L'incertitude sur la température nous est donnée par le thermomètre et est de $\pm 0.5^\circ C$, on note donc $\delta T = 0.5^\circ C$. L'incertitude sur la masse est de $\pm 0.1g$ (donnée fourni par la balance). On estime l'incertitude sur le temps à $\pm 1s$, car c'est le temps que nous mettons pour lire le chronomètre puis le thermomètre. L'incertitude sur la tension nous est donnée par la dernière décimale affichée par le générateur, donc $\pm 0.1V$.

Données pour la première expérience, avec $m_{eau} = 450.0 \pm 0.1g$ et $U = 12.0 \pm 0.1V$:

Données pour la deuxième expérience, avec $m_{eau} = 450.0 \pm 0.1g$ et $U = 6.0 \pm 0.1V$:

Données pour la troisième expérience, avec $m_{eau} = 800.0 \pm 0.1g$ et $U = 12.0 \pm 0.1V$:

1.3 Exploitation des données

On peut tracer un graphique de la température en fonction du temps.

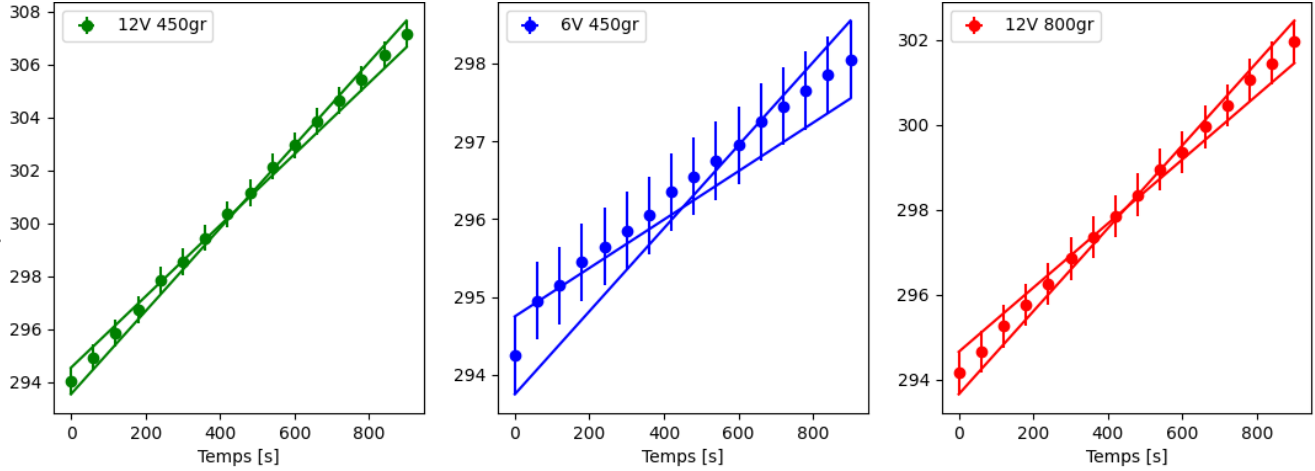


FIGURE 1 – Température (en Kelvin) en fonction du temps

On trouve une droite dont on peut calculer le coefficient directeur qu'on note a et son incertitude grâce à la méthode des pentes extrêmes.

Soit t_i, t_f, T_i, T_f , respectivement le temps initial, final et la température initiale et finale. On applique la formule suivante afin d'obtenir le coefficient directeur a ainsi que l'incertitude associée δa :

$$a_{max} = \frac{(T_f + \delta T) - (T_i - \delta T)}{(t_f - \delta t) - (t_i + \delta t)}$$

$$a_{min} = \frac{(T_f - \delta T) - (T_i + \delta T)}{(t_f + \delta t) - (t_i - \delta t)}$$

$$a = \frac{a_{max} + a_{min}}{2}$$

$$\delta a = \frac{a_{max} - a_{min}}{2}$$

On obtient donc les valeurs suivantes grâce à cette méthode pour les trois expériences :

- Expérience 1 : $a = 0.015 K.s^{-1}$ et $\delta a = 0.001 K.s^{-1}$
- Expérience 2 : $a = 0.004 K.s^{-1}$ et $\delta a = 0.001 K.s^{-1}$
- Expérience 3 : $a = 0.087 K.s^{-1}$ et $\delta a = 0.001 K.s^{-1}$

Il faut maintenant relier ce coefficient directeur à la capacité thermique C_V du système étudié, ici {eau+vase calorimétrique}. Le système étudié étant un liquide, il a un volume constant et une pression constante et on a :

$$\delta Q = C_V dT \quad (1)$$

avec δQ la chaleur fournie et C_V la capacité thermique. On suppose ici que C_V est constant sur la gamme de température utilisée, on a donc :

$$Q = C_V \Delta T \quad (2)$$

De même on a :

$$Q = P \Delta t \quad (3)$$

avec P la puissance fournie et Δt la durée pendant laquelle on a injecté du courant dans la résistance. Or $P = UI = \frac{U^2}{R}$ donc :

$$Q = \frac{U^2}{R} \Delta t = C_V \Delta T \Rightarrow \Delta T = \frac{U^2}{RC_V} \Delta t \quad (4)$$

On reconnaît ici notre coefficient directeur a , d'où :

$$a = \frac{U^2}{RC_V} \Rightarrow C_V = \frac{U^2}{Ra} \quad (5)$$

Pour calculer notre incertitude on utilise la méthode des dérivées partielles :

$$\begin{aligned} \Delta C_V &= \left| \frac{\partial C_V}{\partial a} \right| \Delta a + \left| \frac{\partial C_V}{\partial U} \right| \Delta U \\ &= \frac{U^2}{Ra^2} \Delta a + \frac{2U}{Ra} \Delta U \end{aligned}$$

Le système étudié est {eau+vase}, ainsi, en supposant que les capacités thermiques s'additionnent, on a :

$$C_V = C_{eau} + C_{vase} \quad (6)$$

On a calculé C_V pour différentes masses d'eau, on peut donc écrire ce système :

$$\begin{aligned}
\begin{cases} C_{V1} = C_{eau1} + C_{vase} \\ C_{V3} = C_{eau3} + C_{vase} \end{cases} &\Rightarrow \begin{cases} C_{vase} = C_{V1} - c_{eau} m_{eau1} \\ c_{eau} m_{eau3} = C_{V3} - C_{vase} \end{cases} \\
&\Rightarrow \begin{cases} C_{vase} = C_{V1} - \frac{(C_{V3} - C_{vase})}{m_{eau3}} \\ c_{eau} = \frac{C_{V3} - C_{vase}}{m_{eau3}} \end{cases} \\
&\Rightarrow \begin{cases} C_{vase}(m_{eau3} - m_{eau1}) = C_{V1} m_{eau3} - C_{V3} m_{eau1} \\ c_{eau} = \frac{C_{V3} - C_{vase}}{m_{eau3}} \end{cases} \\
&\Rightarrow \begin{cases} C_{vase} = \frac{C_{V1} m_{eau3} - C_{V3} m_{eau1}}{m_{eau3} - m_{eau1}} \\ c_{eau} = \frac{C_{V3} - C_{vase}}{m_{eau3}} \end{cases}
\end{aligned} \tag{7}$$

Calculs des incertitudes :

$$\begin{aligned}
\Delta C_{vase} &= \left| \frac{\partial C_{vase}}{\partial C_{V1}} \right| \Delta C_{V1} + \left| \frac{\partial C_{vase}}{\partial C_{V3}} \right| \Delta C_{V3} + \left| \frac{\partial C_{vase}}{\partial m_{eau3}} \right| \Delta m_{eau3} + \left| \frac{\partial C_{vase}}{\partial m_{eau1}} \right| \Delta m_{eau1} \\
&= \frac{|m_{eau3} - C_{V3} m_{eau1}| \Delta C_{V1} + |m_{eau3} C_{V1} - m_{eau1}| \Delta C_{V3}}{m_{eau3} - m_{eau1}} \\
&\quad + \frac{|m_{eau1}(C_{V3} - C_{V1})| \Delta m_{eau1} + |m_{eau1}(2C_{V3} - C_{V1}) - m_{eau3}(C_{V3} + C_{V1})| \Delta m_{eau3}}{(m_{eau3} - m_{eau1})^2} \\
&=
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta c_{eau} &= \left| \frac{\partial c_{eau}}{\partial C_V} \right| \Delta C_V + \left| \frac{\partial c_{eau}}{\partial C_{vase}} \right| \Delta C_{vase} + \left| \frac{\partial c_{eau}}{\partial m_{eau}} \right| \Delta m_{eau} \\
&= \frac{C_{vase}}{m_{eau}} \Delta C_V + \frac{C_V}{m_{eau}} \Delta C_{vase} + \frac{C_V - C_{vase}}{m_{eau}^2} \Delta m_{eau}
\end{aligned}$$

1.4 Interprétation

La valeur théorique de la capacité thermique massique de l'eau est $c_{vth} = 4185 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

2 Deuxième expérience : Capacités thermiques massiques de quelque solides

Le but de cette expérience est de déterminer la capacité massique du duralumin, du laiton, du téflon et du plexiglas. On utilisera pour cela la relation suivante :

$$T_f = \frac{C_0 T_0 + C_1 T_1}{C_0 + C_1} \quad (8)$$

avec C_0 la capacité thermique du système {eau+vase}, C_1 la capacité thermique du métal, T_0 la température initial de l'eau, T_1 la température initial du métal et T_f la température final de l'eau.

2.1 Expérimentation

On place 450g d'eau dans le calorimètre et on mesure sa température après avoir agité. On place un morceau du solide qu'on souhaite étudié dans de l'eau bouillante, dont on mesure aussi la température. Après quelques minutes, on retire le solide de l'eau bouillante et on le met dans le calorimètre. On agite en continue l'eau tout en surveillant la température. On note cette dernière lorsqu'elle atteint un maximum. On retire ensuite le solide et on le pèse après l'avoir séché.

2.2 Données

On reprend les notations de l'équation (8). Les incertitudes sont données par la balance et le thermomètre. Pour tous les solides, on a $T_1 = 94.6 \pm 0.5^\circ C$

Solide	$m_{eau} \pm 0.1g$	$m_{solide} \pm 0.1g$	$T_0 \pm 0.5^\circ C$	$T_f \pm 0.5^\circ C$
Laiton	451.1	82.7	21.1	22.4
Téflon	451.1	32.5	22.3	23.4
Plexiglas	450.0	47.8	22.3	23.4
Duralumin	452.5	77.2	21.1	24.0

TABLE 1 – Mesures pour les différents solides de l'expérience 2

2.3 Exploitation des données

On calcule d'abord la capacité thermique C_0 du système {eau+vase} :

$$C_0 = c_{eau} m_{eau} + C_{vase} \quad (9)$$

On utilise la capacité thermique massique théorique de l'eau et la capacité du vase que nous avons calculé précédemment. Calcul des incertitudes

$$\begin{aligned} \Delta C_0 &= \left| \frac{\partial C_0}{\partial m_{eau}} \right| \Delta m_{eau} + \left| \frac{\partial C_0}{\partial C_{vase}} \right| \Delta C_{vase} \\ &= c_{eau} \Delta m_{eau} + \Delta C_{vase} \end{aligned}$$

On cherche la capacité thermique molaire des matériaux. On va déterminer la capacité thermique du solide grâce à l'équation (8) :

$$\begin{aligned} T_f &= \frac{C_0 T_0 + C_1 T_1}{C_0 + C_1} \Rightarrow T_F C_0 + T_F C_1 = C_0 T_0 + C_1 T_1 \\ &\Rightarrow C_1 (T_F - T_1) = C_0 (T_0 - T_F) \\ &\Rightarrow C_1 = \frac{C_0 (T_0 - T_F)}{T_F - T_1} \end{aligned}$$

On calcule l'incertitude associée :

$$\begin{aligned} \Delta C_1 &= \left| \frac{\partial C_1}{\partial C_0} \right| \Delta C_0 + \left| \frac{\partial C_1}{\partial T_0} \right| \Delta T_0 + \left| \frac{\partial C_1}{\partial T_1} \right| \Delta T_1 + \left| \frac{\partial C_1}{\partial T_F} \right| \Delta T_F \\ &= \frac{T_0 - T_F}{T_F - T_1} \Delta C_0 + \frac{C_0 T_F}{T_1 - T_F} \Delta T_0 + \frac{|C_0 T_F (T_0 - T_F)|}{(T_F - T_1)^2} \Delta T_1 + \frac{|C_0 ((T_F - T_1) - T_1 (T_0 - T_F))|}{(T_F - T_1)^2} \Delta T_F \end{aligned}$$

On peut maintenant calculer la capacité thermique massique pour chaque solide :

$$c_{solide} = \frac{C_1}{m_{solide}} \quad (10)$$

Il faut maintenant calculer la masse molaire de chaque matériaux. On a déjà la formule brute du plexiglas ($C_5H_8O_2$) et du téflon (C_2F_4). On peut donc facilement calculer leur masse molaire :

$$\begin{aligned} M_{plexiglas} &= 5M_C + 8M_H + 2M_O & M_{teflon} &= 2M_C + 4M_F \\ &= 5 \times 12 + 8 + 2 \times 16 & &= 2 \times 12 + 4 \times 19 \\ &= 100 \text{ g.mol}^{-1} & &= 100 \text{ g.mol}^{-1} \end{aligned}$$

Pour le laiton et le duralumin, il faut calculer la masse molaire du matériaux à partir des proportions massique qu'on note w_i .

On fait l'application numérique pour le laiton et le duralumin, avec :

-les fraction massiques pour le laiton : $w_{zinc} = 0.4$, $w_{plomb} = 0.02$, $w_{cuivre} = 0.58$

-les fractions massiques pour le duralumin : $w_{silicium} = 0.005$, $w_{fer} = 0.0035$, $w_{cuivre} = 0.04$, $w_{manganese} = 0.007$, $w_{magnesium} = 0.007$, $w_{zinc} = 0.0025$, $w_{aluminium} = 0.935$

On utilise maintenant la relation : $c_{molaire} = c_{solide} M_{solide}$ et on regroupe nos résultats dans un tableau.

Solide	$C_0 (J.K^{-1})$	$C_1 (J.K^{-1})$	$c_{solide} (J.kg^{-1}.K^{-1})$	$M_{solide} (g.mol^{-1})$	$c_{molaire} (J.mol^{-1}.K^{-1})$
--------	------------------	------------------	---------------------------------	---------------------------	-----------------------------------