

# Laboratoire de Physique E7

---

*Rapport de laboratoire*

COLIN BAIROCH, JULIA COSANDIER, ALEXANDRE LAFAYE  
HEIG-VD – 2016

julia.cosandier@heig-vd.ch colin.bairoch@heig-vd.ch  
alexandre.lafaye@epfl.ch

Supervisé par :

Ioan Balin – HEIG-VD  
<http://heig-vd.ch/>

Mirko Croci – HEIG-VD  
<http://heig-vd.ch/>

heig-vd

Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion  
du Canton de Vaud

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>2</b>
0.1 Introduction . . . . .	3
0.2 Théorie . . . . .	3
0.2.1 Chaleur massique . . . . .	3
0.2.2 Chaleur latente de vaporisation . . . . .	3
0.2.3 Chaleur latente de fusion . . . . .	4
0.2.4 Incertitudes . . . . .	4
0.3 Manipulation . . . . .	6
0.3.1 Détermination de la chaleur massique d'un solide . . . . .	6
0.3.2 Chaleur latente de vaporisation . . . . .	10
0.3.3 Chaleur latente de fusion . . . . .	11
0.4 Conclusion . . . . .	12
<b>Table des figures</b>	<b>13</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>13</b>

## 0.1 Introduction

### Objectifs du Laboratoire

Dans ce travail pratique les buts suivants ont été visés :

- Détermination de la chaleur massique de différentes substances
  - Cuivre
  - Plomb
  - Verre
- Détermination de la chaleur latente de fusion et de vaporisation de l'eau

## 0.2 Théorie

### 0.2.1 Chaleur massique

Lors ce que l'on chauffe ou on refroidit un corps, l'énergie absorbée sous forme de chaleur  $\Delta Q$  est proportionnelle au changement de température  $\Delta\theta$  et la masse  $m$  du corps :

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta \quad (1)$$

Où  $c$  représente la chaleur massique, un coefficient dépendant de la nature du matériau. Pour le déterminer,

Quantité de chaleur cédée par la grenaille :

$$\Delta Q_1 = m_1 \cdot c_1 \cdot (\theta_1 - \theta_M) \quad (2)$$

qui est égale à celle absorbée par l'eau.

$$\Delta Q_2 = m_2 \cdot c_2 \cdot (\theta_M - \theta_2) \quad (3)$$

On suppose ici qu'on connaît déjà la valeur de la chaleur massique de l'eau  $c_2$ , et  $\theta_1 \approx 98^\circ\text{C}$  est égal à la température de la vapeur d'eau. En utilisant les deux formules précédentes :

$$c_1 = c_2 \cdot \frac{m_2 \cdot (\theta_M - \theta_2)}{m_1 \cdot (\theta_1 - \theta_M)} \quad (4)$$

Il faut aussi prendre en compte que le vase calorimétrique dans lequel le mélange va être fait. La quantité de chaleur qu'il va absorber peut être donnée en masse équivalente d'eau :  $m_{cal} = 0.023\text{kg}$ .

$$\Delta Q_2 = (m_2 + m_{cal}) \cdot c_2 \cdot (\theta_M - \theta_2) \quad (5)$$

Ce qui donne donc :

$$c_1 = c_2 \cdot \frac{(m_2 + m_{cal}) \cdot (\theta_M - \theta_2)}{m_1 \cdot (\theta_1 - \theta_M)} \quad (6)$$

### 0.2.2 Chaleur latente de vaporisation

Quand un corps plongé dans un milieu où la pression est fixe est réchauffé, sa température augmente. Sauf si la substance du corps est dans une transition entre deux phases, toute l'énergie apportée est alors dissipée pour passer d'une phase à l'autre. Dès que le chauffage est terminé, la température va de nouveau augmenter. Une bonne manière d'observer ce phénomène est en

La chaleur est donc partagée entre la partie absorbée par (2).

$$\Delta Q_2 = m_1 \cdot L_v \quad (7)$$

$$\Delta Q_3 = m_2 \cdot c_e \cdot (\theta_M - \theta_2) \quad (8)$$

$$\Delta Q_4 = m_{cal} \cdot c_e \cdot (\theta_M - \theta_2) \quad (9)$$

$$\Delta Q_3 + \Delta Q_4$$

$$m_1 \cdot c_e \cdot (\theta_V - \theta_M) + m_1 \cdot L_V = (m_2 + m_{cal}) \cdot c_e \cdot (\theta\theta) \quad (10)$$

$$L_V = c_e \cdot \frac{(m_2 + m_{cal}) \cdot (\theta_M - \theta_2) - m_1 \cdot (\theta_V - \theta_M)}{m_1} \quad (11)$$

### 0.2.3 Chaleur latente de fusion

$$\Delta Q_1 = m_1 \cdot c_e \cdot (\theta_M - \theta_1) \quad (12)$$

$$\Delta Q_2 = m_1 \cdot L_F \quad (13)$$

$$\Delta Q_3 = m_2 \cdot c_e \cdot (\theta_2 - \theta_M) \quad (14)$$

$$\Delta Q_4 = m_{cal} \cdot c_e \cdot (\theta_2 - \theta_M) \quad (15)$$

$$L_F = c_e \cdot \frac{(m_2 + m_{cal}) \cdot (\theta_2 - \theta_M) - m_1 \cdot (\theta_M - \theta_1)}{m_1} \quad (16)$$

### 0.2.4 Incertitudes

Une mesure expérimentale est toujours accompagnée de son *incertitude de mesure*. On peut qualifier cette incertitude selon différentes caractéristiques :

- La résolution
- La précision
- La reproductibilité

Cette incertitude a de multiples sources, humaines ou liées au matériel, qui la rendent inévitable mais pas pour autant non-quantifiable. On la calcule en générale de deux manières, sous forme *d'incertitude absolue* ou *d'incertitude relative*.

#### Notation

Un résultat s'écrit donc sous la forme :

$$a \pm \Delta a$$

tel que  $\Delta a$  soit l'incertitude absolue et  $\frac{\Delta a}{a} \%$  soit l'incertitude relative.

**Chiffres significatifs**

Pour noter correctement les résultats avec leur incertitude, il faut être attentif aux *chiffres significatifs*, les mesures et résultats de calculs doivent être exprimés avec un ou x chiffres dont la valeur n'est pas certaine.

Par exemple, pour une mesure au gramme près  $m = (2.3 \pm 0.1)kg$ .

**Propagation des erreurs**

Une fois l'incertitude estimée, il faut encore la propager à tous les calculs qui suivront. Dans le cas d'une fonction à une seule variable, on peut utiliser sa différentielle :

$$dg = \left| \frac{df}{dx} \right| dx \quad (17)$$

Ce qui donne pratiquement :

$$\Delta g = \left| \frac{df}{dx} \right| \Delta x \quad (18)$$

Pour propager les erreurs durant les calculs, les formules suivantes sont utilisées :  
Addition/Soustraction :

$$\begin{aligned} g &= a \pm b \\ \Delta g &= \Delta a + \Delta b \end{aligned} \quad (19)$$

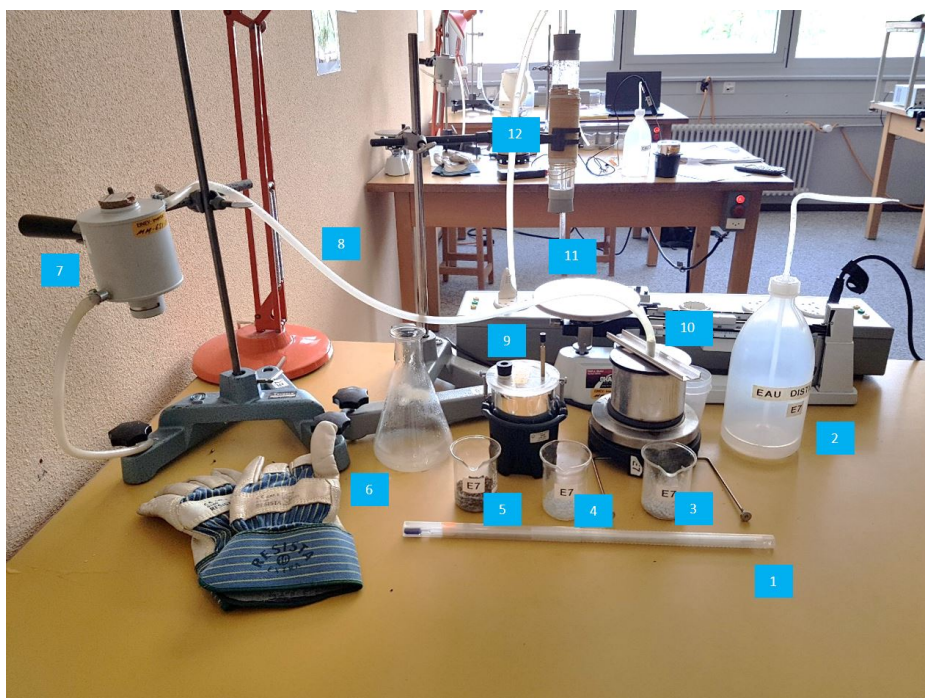
Multiplication/Division :

$$\begin{aligned} g &= k \cdot ab \quad k = \text{constante} \\ \frac{\Delta g}{|g|} &= \frac{\Delta a}{|a|} + \frac{\Delta b}{|b|} \end{aligned} \quad (20)$$

## 0.3 Manipulation

### 0.3.1 Détermination de la chaleur massique d'un solide

FIGURE 1 – Photo Montage chaleur massique



1. Thermomètre
2. Pipette d'eau distillée
3. Grenaille de plomb
4. Grenaille de verre
5. Grenaille de cuivre
6. Bécher
7. Étuve
8. Tuyau en silicone
9. Vase calorimétrique
10. Générateur de vapeur
11. Balance
12. Piège à eau

Pour cette partie de l'expérience, il s'agit de faire chauffer trois matériaux différents à une température fixée (celle de la vapeur d'eau), et de les plonger ensuite dans un calorimètre rempli d'eau. La différence de température de l'eau permettra ensuite de savoir quelle quantité de chaleur était stockée dans le matériau en question.

Les trois matériaux proposés sont :

1. Le cuivre
2. Le plomb
3. Le verre

De l'eau est placée dans un récipient fermable de manière étanche, ce récipient est ensuite relié à une étuve à l'aide d'un tuyau en silicone. L'étuve est elle-même branchée sur un autre récipient permettant de récupérer l'eau de la condensation.

Après avoir été soigneusement pesé, une certaine quantité du matériau est déposée dans l'étuve grâce à un panier prévu à cet effet. Le récipient contenant l'eau est alors chauffé jusqu'à ce que toute l'eau se soit évaporée. Le matériau devrait être aux alentours de 98°C°.

Durant la période de chauffe, le calorimètre a été rempli avec 100g d'eau désionisée à température ambiante. Finalement, le matériau a été versé dans le calorimètre, ce dernier refermé hermétiquement le temps que la température interne arrive à son point d'équilibre. La température finale du mélange entre eau et matériau a été relevée.

Pour calculer la chaleur massique dans chaque cas, la formule (6) a été utilisée. Quand aux incertitudes, la méthode des dérivées partielles s'est révélée utile pour les calculer :

$$\Delta c_1 = \left| \frac{\delta c_1}{\delta m_1} \right| \cdot \Delta m_1 + \left| \frac{\delta c_1}{\delta m_2} \right| \cdot \Delta m_2 + \left| \frac{\delta c_1}{\delta \theta_m} \right| \cdot \Delta \theta_m + \left| \frac{\delta c_1 \theta_2}{\delta \theta_2} \right| \cdot \Delta \theta_2$$

Donc :

$$\begin{aligned} \Delta c_1 = & c_2 \frac{(m_2 + m_{cal}) \cdot (\theta_m - \theta_2)}{m_1^2 \cdot (\theta_1 - \theta_m)} \cdot \Delta m_1 \\ & + c_2 \frac{(\theta_m - \theta_2)}{m_1 \cdot (\theta_1 - \theta_m)} \cdot \Delta m_2 \\ & + c_2 \frac{(m_2 + m_{cal}) \cdot ((\theta_1 - \theta_m) + (\theta_m - \theta_2))}{m_1 \cdot (\theta_1 - \theta_m)^2} \Delta \theta_m \\ & + c_2 \frac{(m_2 + m_{cal})}{m_1 \cdot (\theta_1 - \theta_m)} \Delta \theta_2 \end{aligned}$$

Avec nos mesures, les résultats suivants ont été obtenus :

TABLE 1 – Résultats Cuivre

Mesure	Valeur	$\Delta$
$m_1$ [kg]	0.0627	10e-5
$m_2$ [kg]	0.1	10e-5
$m_{cal}$ [kg]	0.023	0
$\theta_1$ [C°]	98	0
$\theta_2$ [C°]	20.8	0.2
$\theta_m$ [C°]	23.8	0.2
$c_2$ [J/ (kg*K)]	4180	0

La valeur de la chaleur massique de l'eau ainsi que celles de la masse du calorimètre  $m_{cal}$  et celle de la température de la vapeur d'eau ont été considérées comme étant parfaites, car ne provenant pas de nous, mais de tables ou du manuel d'expérience.

Avec la formule (6) et celles présentées ci-dessus pour les incertitudes, la valeur suivante a été obtenue pour la chaleur massique du cuivre :

$$c_1 = 331.53 \pm 45.18[J/(kg * K)] \quad (21)$$

L'incertitude sur ce résultats est assez grande (plus de 13%) mais en comparant avec la valeur de la table CRM, l'observation est plutôt que cette dernière est relativement éloignée de notre résultat :

$$\text{Valeur tabulée : } c_1 = 390[J/(kg * K)] \quad (22)$$

Les grosses sources d'erreurs sur cette manipulation viennent probablement de la fuite de chaleur que représentent les tuyaux de silicone. En effet, une partie de l'eau est restée condensée dans les tuyaux et leur température a grandement augmenté durant l'expérience. Une autre source est que le cuivre a du refroidir au contact du panier et lui communiquer une partie de sa chaleur. Le calorimètre devant laisser entrer le thermomètre, il n'est pas étanche, et un phénomène de convection de l'air à l'intérieur de ce dernier est probablement une source de fuite d'énergie. Il est aussi impossible de savoir à quelle température se trouvait exactement le cuivre en sortant de l'étuve, la valeur de 98°C n'étant qu'une supposition raisonnable.

Pour toutes les mesures qui vont suivre,  $m_{cal}$  est la masse équivalent en eau du calorimètre.

Pour le plomb les mesures ont été :

TABLE 2 – Résultats Plomb

Mesure	Valeur	$\Delta$
$m_1$ [kg]	0.0265	10e-5
$m_2$ [kg]	0.1001	10e-5
$m_{cal}$ [kg]	0.023	0
$\theta_1$ [C°]	98	0
$\theta_2$ [C°]	21.2	0.2
$\theta_m$ [C°]	22.6	0.2
$c_2$ [J/ (kg*K)]	4180	0

En réutilisant la formule (6) :

$$c_1 = 360.53 \pm 104.13[J/(kg * K)] \quad (23)$$

Mais la valeur tabulée reste relativement loin de notre résultat :

$$\text{Valeur tabulée : } c_1 = 129[J/(kg * K)] \quad (24)$$

En plus des des sources d'incertitudes évoquées lors du cas du cuivre, lors de cette manipulation deux billes de plomb se sont échappées lors du transfert dans le calorimètre, provoquant ainsi probablement la grande différence entre les valeurs 'officielles' trouvées dans le CRM et notre mesure.



Et finalement pour le verre :

TABLE 3 – Résultats Verre

Mesure	Valeur	$\Delta$
$m_1$ [kg]	0.0153	10e-5
$m_2$ [kg]	0.1	10e-5
$m_{cal}$ [kg]	0.023	0
$\theta_1$ [C°]	98	0
$\theta_2$ [C°]	21.2	0.2
$\theta_m$ [C°]	23.8	0.2
$c_2$ [J/ (kg*K)]	4180	0

Les mesures ici semblent un peu meilleure, car :

$$c_1 = 1177.49 \pm 185.19[J/(kg * K)] \quad (25)$$

Et :

$$Valeur \text{ tabulée} : c_1 = [830, 1450][J/(kg * K)] \quad (26)$$

Ne sachant pas de quel type de verre il s'agit exactement, on ne dispose pas de mieux qu'une certaine portée de résultats possibles dans lequel est compris le résultat de ce laboratoire. Les sources d'erreurs sont les même que pour les cas précédents.

### 0.3.2 Chaleur latente de vaporisation

Pour cette partie de la manipulation, la but est d'observer le phénomène de vaporisation et de mesurer la quantité d'énergie échangée lors de cette transformation afin de pouvoir calculer la valeur de la chaleur latente de vaporisation de l'eau. Pour ce faire, le montage expérimental suivant a été utilisé :

FIGURE 2 – Photo montage vaporisation



Le générateur de vapeur a préalablement été rempli d'eau distillée et soigneusement refermé. Il a été ensuite relié au piège à eau avec un tube en silicone assurant l'étanchéité du système.

Dans un premier temps le piège à eau a été placé au dessus d'un bûcher, le temps que le système se stabilise un peu, permettant ainsi d'éviter les éclaboussures de vapeur.

Dans un second temps, le piège à eau a été plongé dans le calorimètre rempli de 150g d'eau préalablement pesé. La balance ayant été réglée pour une valeur du poids du calorimètre plus 20g elle arrive à l'équilibre au moment où cette masse d'eau s'est condensée dans le calorimètre.

La température a alors été mesurée.

Une fois de plus les dérivées partielles ont été exploitées pour connaître les incertitudes ainsi que la formule (11) :

$$\Delta L_v = \left| \frac{\delta L_v}{\delta m_1} \right| \cdot \Delta m_1 + \left| \frac{\delta L_v}{\delta m_2} \right| \cdot \Delta m_2 + \left| \frac{\delta L_v}{\delta \theta_m} \right| \cdot \Delta \theta_m + \left| \frac{\delta L_v}{\delta \theta_2} \right| \cdot \Delta \theta_2$$

Donc :

$$\begin{aligned}\Delta L_v &= c_e \frac{(m_2 + m_{cal}) \cdot (\theta_m - \theta_2)}{m_1^2} \cdot \Delta m_1 \\ &+ c_e \frac{(\theta_m - \theta_2)}{m_1} \cdot \Delta m_2 \\ &+ c_e \frac{(m_2 + m_{cal})}{m_1} \Delta \theta_m \\ &+ c_e \left( \frac{(m_2 + m_{cal})}{m_1} + 1 \right) \Delta \theta_2\end{aligned}$$

Les mesures suivantes ont été relevées :

TABLE 4 – Résultats Chaleur latente vaporisation

Mesure	Valeur	$\Delta$
$m_1$ [kg]	0.02	10e-4
$m_2$ [kg]	0.15	10e-5
$m_{cal}$ [kg]	0.023	0
$c_e$ [J/ (kg*K)]	4180	0
$\theta_2$ [C°]	23.6	0.2
$\theta_m$ [C°]	82.5	0.2
$\theta_v$ [C°]	98	0

En effectuant les calculs, on trouve :  $L_v = 2'064'857.30 \pm 121'904.27 [J/(kg * K)]$ , la valeur tabulée étant :  $L_v = 2'300'000 [J/(kg * K)]$  Malgré la taille de l'intervalle d'incertitude, les deux valeurs ne se recoupent pas. Il existe toujours pour cette manipulation le problème de la prise de température dans le calorimètre qui permet à la chaleur de s'échapper. Il est aussi possible que le temps nécessaire à attendre pour éviter les éclaboussures de vapeur ne se soit pas écoulé. La mesure devant être prise rapidement

### 0.3.3 Chaleur latente de fusion

Cette manipulation est analogue à celle sur la vaporisation dans son principe, mais il s'agit ici d'observer un autre changement d'état qui est la fusion. Dans ce but, le vase calorimétrique a été rempli de 200g d'eau chaude à environ 50C°. Environ 50g de glaçon ont été ajoutés et la mesure de la température du mélange a été effectuée une fois la glace fondue.

Une fois de plus pour les incertitudes. En utilisant la formule (16) :

$$\Delta L_f = \left| \frac{\delta L_f}{\delta m_1} \right| \cdot \Delta m_1 + \left| \frac{\delta L_f}{\delta m_2} \right| \cdot \Delta m_2 + \left| \frac{\delta L_f}{\delta \theta_m} \right| \cdot \Delta \theta_m + \left| \frac{\delta L_f}{\delta \theta_2} \right| \cdot \Delta \theta_2$$

Donc :

$$\begin{aligned}\Delta L_f = & c_e \frac{(m_2 + m_{cal}) \cdot (\theta_2 - \theta_m)}{m_1^2} \cdot \Delta m_1 \\ & + c_e \frac{(\theta_2 - \theta_m)}{m_1} \cdot \Delta m_2 \\ & + c_e \frac{(m_2 + m_{cal})}{m_1} \Delta \theta_m \\ & + |c_e \left( \frac{-(m_2 + m_{cal})}{m_1} - 1 \right) \Delta \theta_2\end{aligned}$$

Les mesures obtenues :

TABLE 5 – Résultats Chaleur latente fusion

Mesure	Valeur	$\Delta$
$m_1$ [kg]	0.0539	10e-5
$m_2$ [kg]	0.1986	10e-5
$m_{cal}$ [kg]	0.023	0
$c_e$ [J/(kg*K)]	4180	0
$\theta_1$ [C°]	0	0
$\theta_2$ [C°]	55.8	0.2
$\theta_m$ [C°]	32.9	0.2

Ici aussi, la chaleur latente trouvée est inférieure à celle des tables :

$$\begin{aligned}L_f &= 256'021.51 \pm 7800.89[J/(kg * K)] \\ \text{Valeur tabulée : } L_f &= 330'000[J/(kg * K)]\end{aligned}$$

Ici aussi, il a peut être été attendu un peu trop longtemps avant de faire le relevé de la mesure, afin d'être certain que l'entier de la glace ait fondu, provoquant une légère hausse de température de l'eau restée au contact avec l'air ambiant.

## 0.4 Conclusion

On a pu observer dans ce laboratoire que les résultats obtenus se sont révélés relativement imprécis et les incertitudes mal estimées. Il est toutefois bon de noter que le décalage par rapport aux valeurs tabulées et toujours dans le même sens (sauf pour le plomb pour les raisons expliquées plus haut) c'est à dire qu'elles sont systématiquement trop petites. Cette observation laisse à penser que les sources d'inexactitudes évoquées tout le long de la manipulation agissent dans le même sens et que ces erreurs auraient pu être corrigées avec du meilleur matériel ou une marche à suivre différente. Les résultats sont tout de même du bon ordre de grandeur, avec même dans le cas du verre la possibilité qu'il soit exact.

## Table des figures

1	Photo Montage chaleur massique . . . . .	6
2	Photo montage vaporisation . . . . .	10

## Liste des tableaux

1	Résultats Cuivre . . . . .	7
2	Résultats Plomb . . . . .	8
3	Résultats Verre . . . . .	9
4	Résultats Chaleur latente vaporisation . . . . .	11
5	Résultats Chaleur latente fusion . . . . .	12