

En cas de **surchauffe** il faut évacuer !

ANNEXES

Annexe 1

Capacité thermique massique et enthalpie massique de vaporisation de l'eau

De l'énergie thermique apportée à l'eau permet d'augmenter sa température ou d'effectuer la transition de phase liquide-vapeur (vaporisation). On se propose dans cette partie de mesurer la capacité thermique massique et la chaleur latente massique de vaporisation (ou enthalpie massique de vaporisation) de l'eau pour mieux comprendre leurs effets.

L'expérience

On place une masse $m_{eau} = 1,00$ kg d'eau dans une bouilloire et on mesure à la fois la température de l'eau et la masse de l'ensemble au cours du temps.

La bouilloire est calorifugée par de la laine de verre afin de minimiser toute perte thermique à l'extérieur. Elle dispose d'une résistance chauffante $R = 40 \Omega$ dissipant de l'énergie thermique par effet Joule. La puissance thermique moyenne dissipée vaut :

$$P_{th} = RI^2 = \frac{U^2}{R} = 1,3 \cdot 10^3 \text{ W}$$

(en prenant $U = 230$ V la tension efficace du secteur)



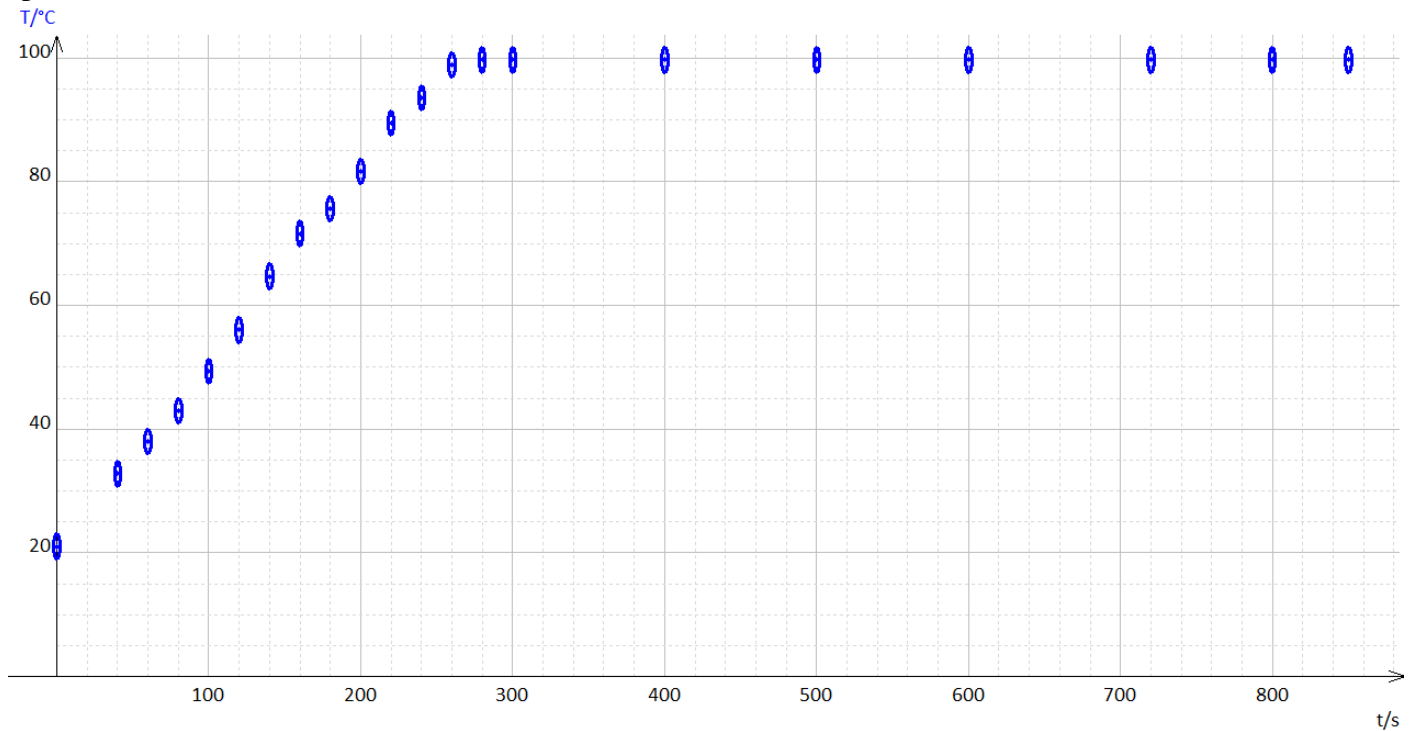
Bouilloire vue de dessus. On distingue la résistance chauffante et la couche d'isolation thermique.

Les résultats

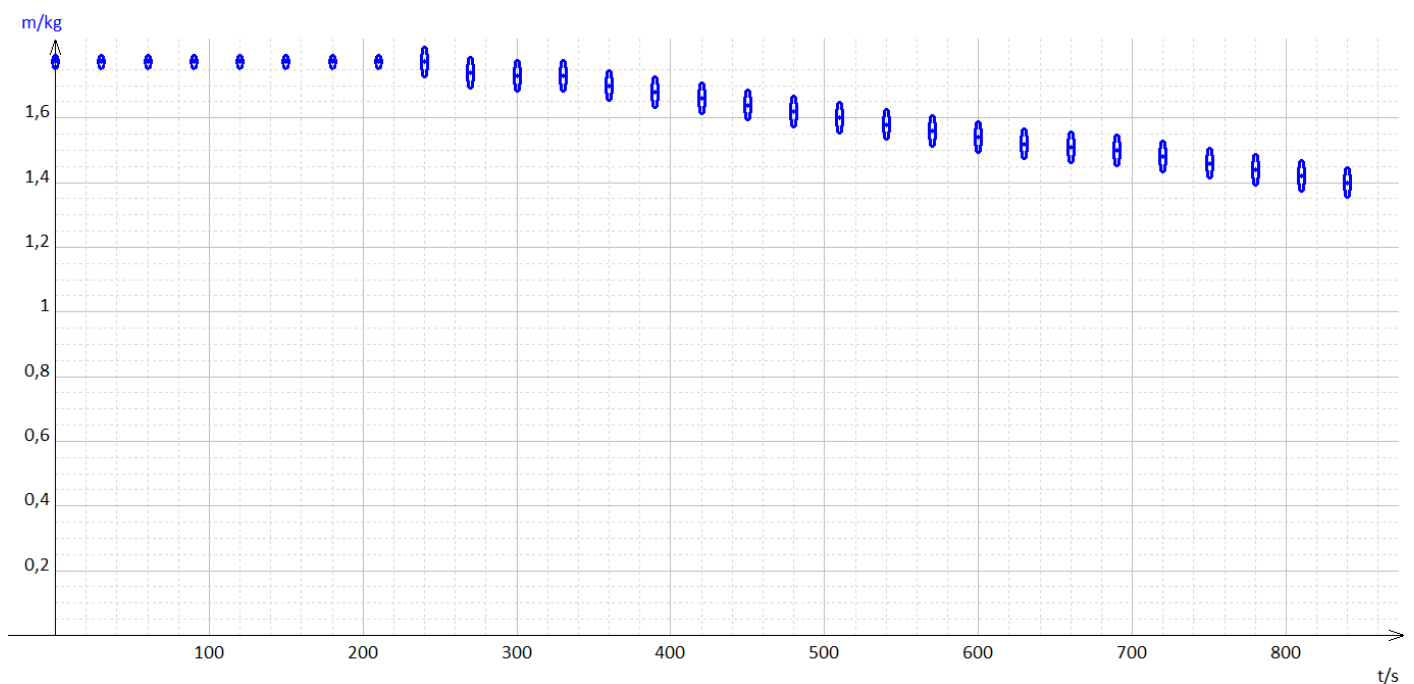
La température de l'eau augmente rapidement au cours du temps. Il faut bien mélanger l'eau dans la bouilloire pour homogénéiser la température. Pendant ce temps, la masse d'eau dans la bouilloire reste constante.

À partir de 240 s, l'eau se met à bouillir. La température se stabilise alors au voisinage de 100°C, tandis que la masse d'eau dans la bouilloire diminue. Les remous dus à l'ébullition de l'eau font trembler la bouilloire sur la balance, ce qui rend plus difficile la mesure de la masse et tend à augmenter les incertitudes. On utilise un ventilateur qui permet d'évacuer la vapeur d'eau produite et éviter qu'elle ne se condense dans la bouilloire.

Les évolutions de la température et de la masse de l'eau au cours du temps sont présentées sur les graphes ci-après.



Évolution de la température de l'eau au cours du temps :
la température augmente jusque 100°C puis reste constante durant l'ébullition



Évolution de la masse de l'eau au cours du temps :
la masse reste d'abord constante pendant la phase de chauffe, puis diminue au cours de l'ébullition

Interprétation et modélisation

On suppose que les pertes thermiques vers l'extérieur peuvent être négligées.

Durant la phase de chauffe, l'énergie thermique apportée par la résistance chauffante permet d'augmenter la température de l'eau. La conservation de l'énergie permet d'écrire :

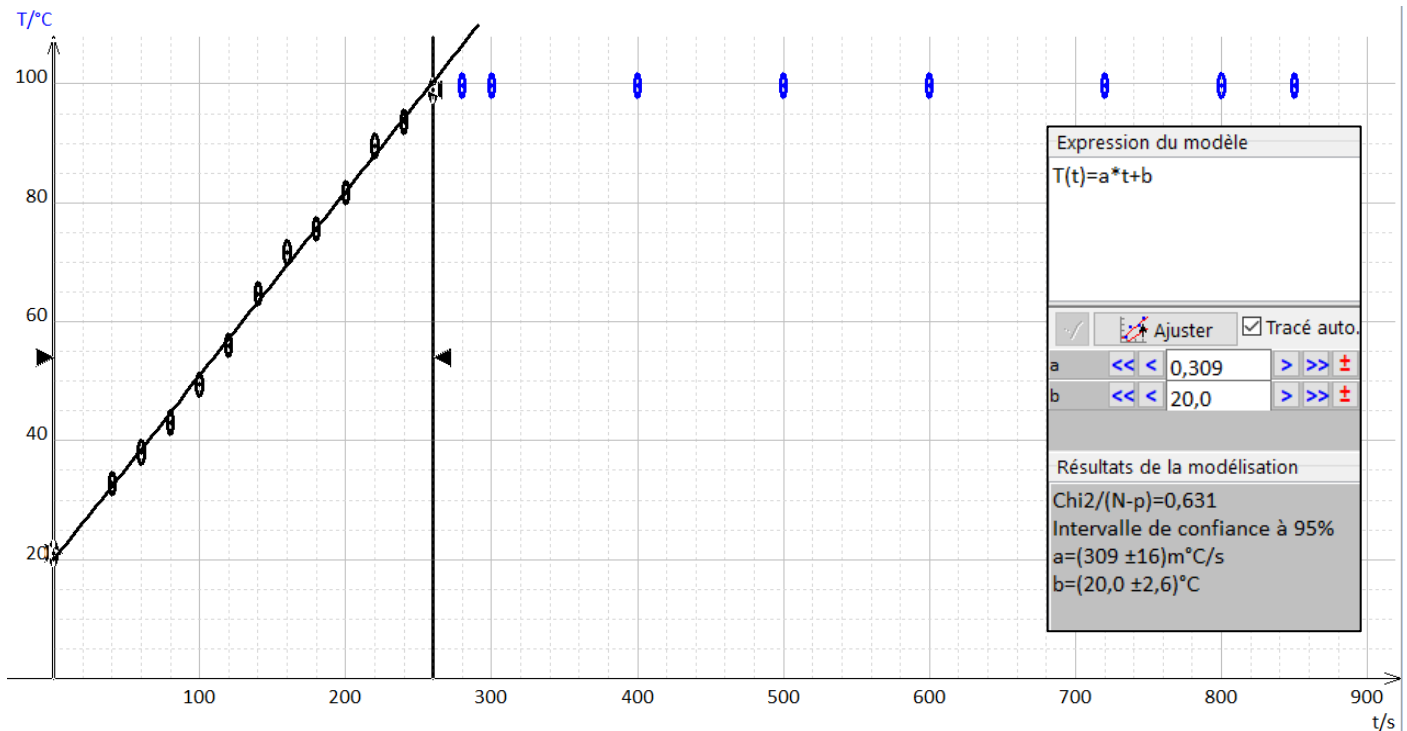
$$m_{\text{eau}} c_{\text{eau}} (T(t) - T_0) = RI^2 t$$

où c_{eau} est la capacité thermique massique de l'eau.

Dans ce modèle, la température de l'eau évolue de façon affine avec le temps :

$$T(t) = T_0 + \frac{RI^2}{m_{\text{eau}} c_{\text{eau}}} t$$

Ce résultat est bien en accord avec les points expérimentaux.



Une régression linéaire pendant la phase de chauffe permet d'obtenir :

$$a_1 = \frac{RI^2}{m_{\text{eau}} c_{\text{eau}}} = 0,31 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1} \text{ avec l'incertitude } \Delta a_1 = 0,02 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$$

On en déduit :

$$c_{\text{eau}} = \frac{RI^2}{m_{\text{eau}} a_1} = 4,2 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \text{ avec l'incertitude relative : } \frac{\Delta c_{\text{eau}}}{c_{\text{eau}}} = \frac{\Delta a_1}{a_1} = 6,5 \%$$

La capacité thermique massique de l'eau vaut donc expérimentalement : $c_{\text{eau}} = (4,2 \pm 0,3) 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

On retrouve bien aux incertitudes près la valeur tabulée $c_{\text{eau, tabulée}} = 4,18 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Durant la phase d'ébullition, l'énergie thermique apportée permet la vaporisation de l'eau sous la pression atmosphérique constante. La conservation de l'énergie s'écrit dans ce cas :

$$m_{\text{eau vaporisée}} l_{\text{vap}} = RI^2 (t - t_0)$$

où l_{vap} est l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau et t_0 l'instant de début de l'ébullition.

La masse d'eau vaporisée s'écrit en fonction de la masse d'eau initiale et de la masse d'eau restante :

$$m_{\text{eau vaporisée}} = m_{\text{eau, i}} - m_{\text{eau}}(t)$$

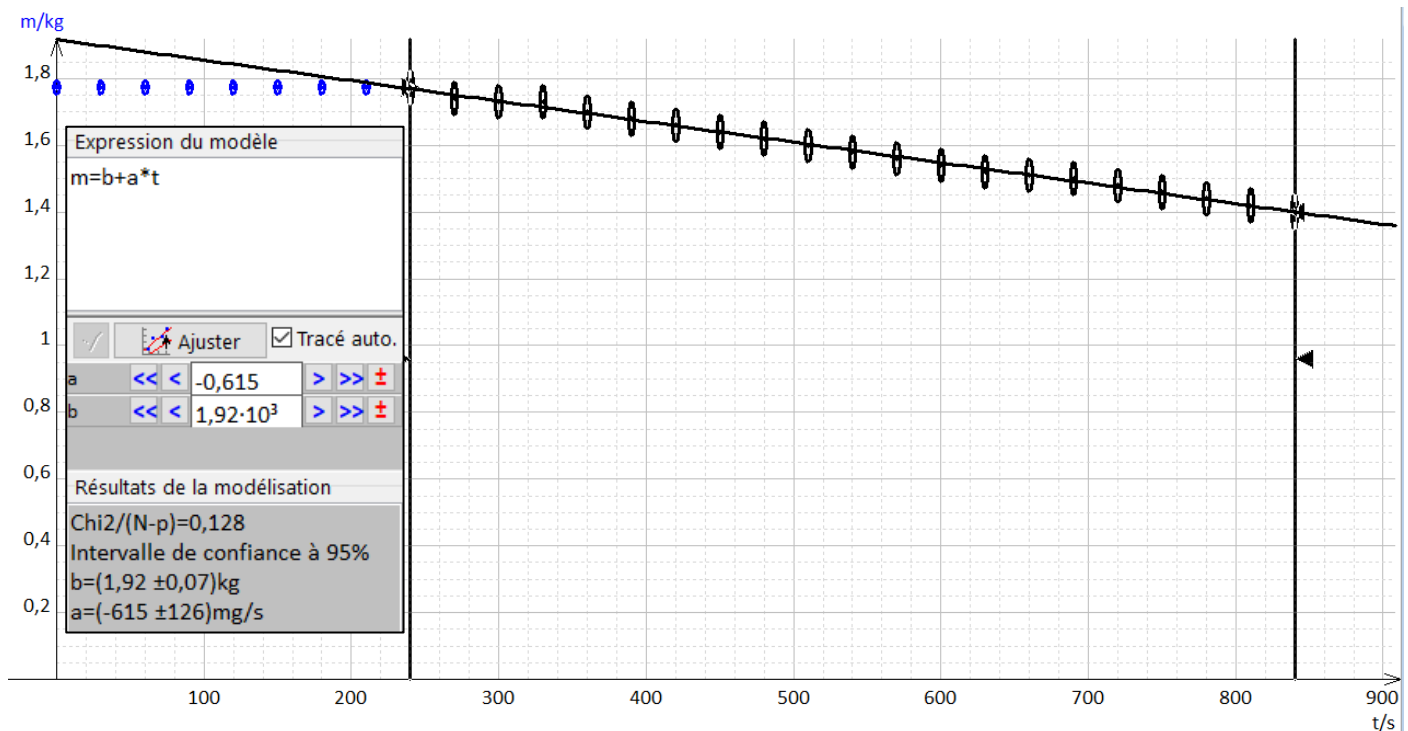
Dans ce modèle, la masse d'eau dans la bouilloire varie de façon affine avec le temps :

$$m_{\text{eau}}(t) = m_{\text{eau},i} - \frac{RI^2}{l_{\text{vap}}}(t - t_0)$$

Ce résultat est à nouveau en accord avec les mesures expérimentales.

Une régression linéaire pendant l'ébullition permet d'obtenir :

$$a_2 = \frac{RI^2}{l_{\text{vap}}} = 6,1 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \text{ avec l'incertitude } \Delta a_2 = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$



On en déduit :

$$l_{\text{vap}} = \frac{RI^2}{a_2} = 2,2 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ avec l'incertitude relative : } \frac{\Delta l_{\text{vap}}}{l_{\text{vap}}} = \frac{\Delta a_2}{a_2} = 21 \%$$

L'enthalpie massique de vaporisation de l'eau vaut donc expérimentalement : $l_{\text{vap}} = (2,2 \pm 0,4) 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$

La valeur tabulée de cette enthalpie massique de vaporisation vaut : $l_{\text{vap, tabulée}} = 2,1 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

On retrouve la valeur tabulée aux incertitudes de mesure près. Celles-ci sont particulièrement importantes pour cette expérience à cause de la mesure de la masse à la balance au cours de l'ébullition.

Après $\Delta t = 600 \text{ s}$ d'ébullition, on a arrêté la bouilloire et laissé l'eau se refroidir. On a alors mesuré la masse d'eau restante : $m_{\text{eau},f} = (665 \pm 5) 10^{-3} \text{ kg}$.

La masse d'eau vaporisée pendant cette durée vaut donc : $m_{\text{eau vaporisée}} = m_{\text{eau},i} - m_{\text{eau},f} = (335 \pm 5) 10^{-3} \text{ kg}$

On en déduit une autre mesure de l'enthalpie de vaporisation de l'eau :

$$l_{\text{vap}} = \frac{RI^2 \Delta t}{m_{\text{eau vaporisée}}} = 2,33 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ avec l'incertitude relative } \frac{\Delta l_{\text{vap}}}{l_{\text{vap}}} = \frac{\Delta m_{\text{eau vap}}}{m_{\text{eau vap}}} = 1,5 \%$$

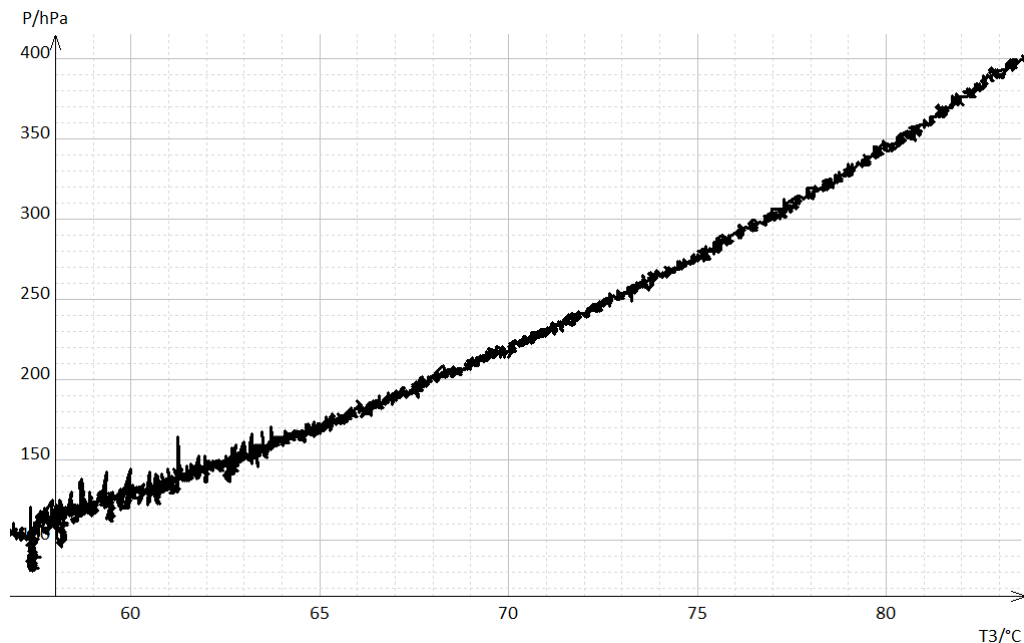
D'où la nouvelle mesure de l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau : $l_{\text{vap}} = (2,33 \pm 0,03) 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$

L'incertitude sur la mesure de l_{vap} a été grandement améliorée.

Annexe 2

Diagramme de phase expérimental de l'eau

Une fois la vaporisation passée, la pression diminue lentement dans le tube à mesure que la température diminue et que la vapeur se liquéfie sur les parois. On peut alors tracer la pression dans le tube en fonction de la température de l'eau dans un état proche de l'équilibre car l'évolution du système est très lente.



Pression dans le tube en fonction de la température

On reconnaît en fait un morceau de la courbe d'équilibre liquide-vapeur du diagramme de phase de l'eau que l'on a donc tracé expérimentalement !

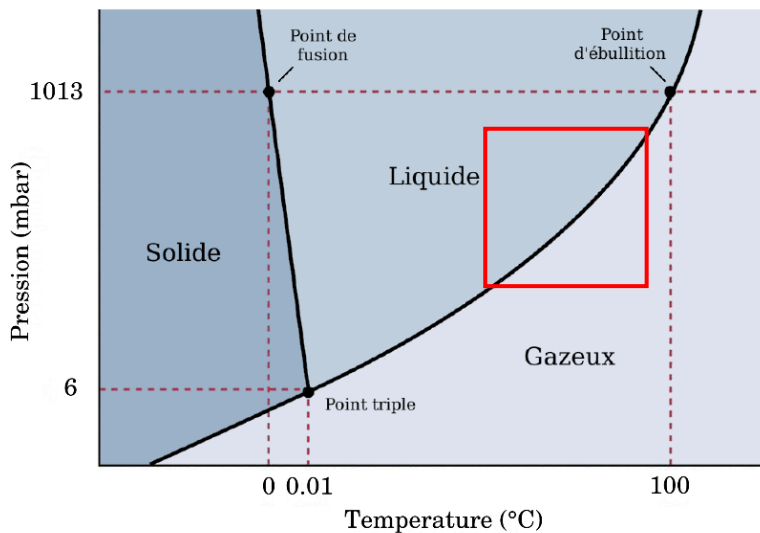
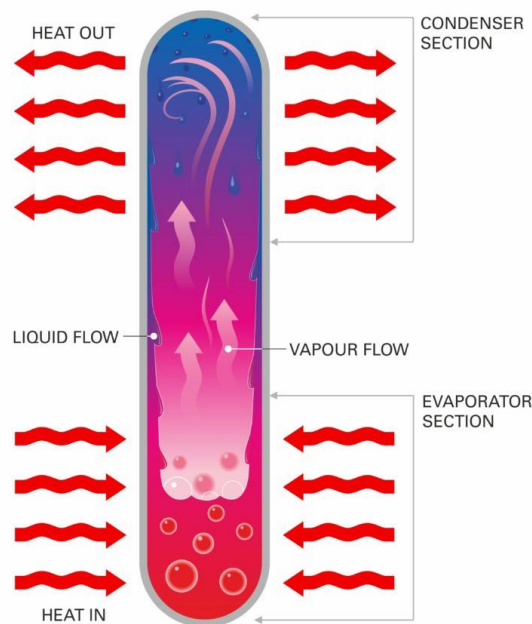


Diagramme de phase de l'eau.
En rouge : zone explorée expérimentalement

Annexe 3

Principe de fonctionnement d'un caloduc

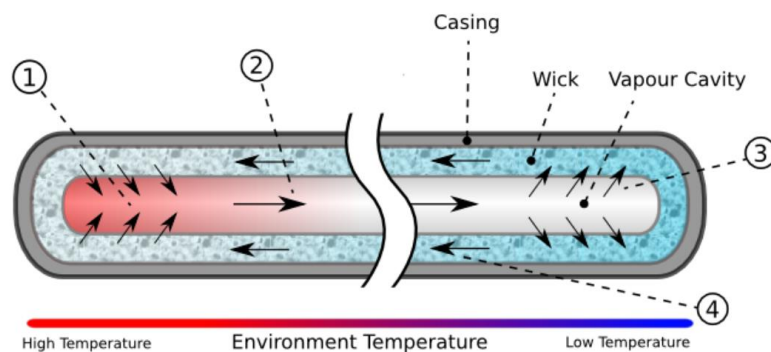
Au début de l'expérience, l'eau dans le calorimètre a une température comprise entre 95°C et 85°C. Cela réchauffe rapidement le tube et l'eau à l'intérieur...qui se met à bouillir ! Cette ébullition de l'eau à une température inférieure à 100°C (température d'ébullition de l'eau sous la pression atmosphérique) est rendue possible car la pression initiale dans le tube est très faible ! La puissance thermique absorbée par le caloduc permet la transition de phase de l'état liquide à l'état vapeur. La vapeur d'eau monte alors dans le tube, se refroidit à cause du courant d'air créé par le ventilateur, se liquéfie sur les bords intérieurs et retombe pour être à nouveau vaporisée... Notre caloduc « maison » utilise la gravité pour assurer la circulation du fluide à l'intérieur selon le principe des thermosiphons, employés notamment dans les systèmes de chauffage solaire.



Principe d'un caloduc à thermosiphon (source : www.etekina.eu)

le liquide (en bas) se vaporise au contact de la source de chaleur en absorbant de l'énergie ;
la vapeur ainsi créée monte, se liquéfie en libérant de l'énergie et redescend sous forme liquide par gravité

Un caloduc commercial fonctionne sur le même principe, mais le retour de la vapeur est assuré par capillarité dans une poudre ou une grille très fine au lieu d'utiliser la gravité. Un tel système peut être utilisé en principe dans tous les sens.



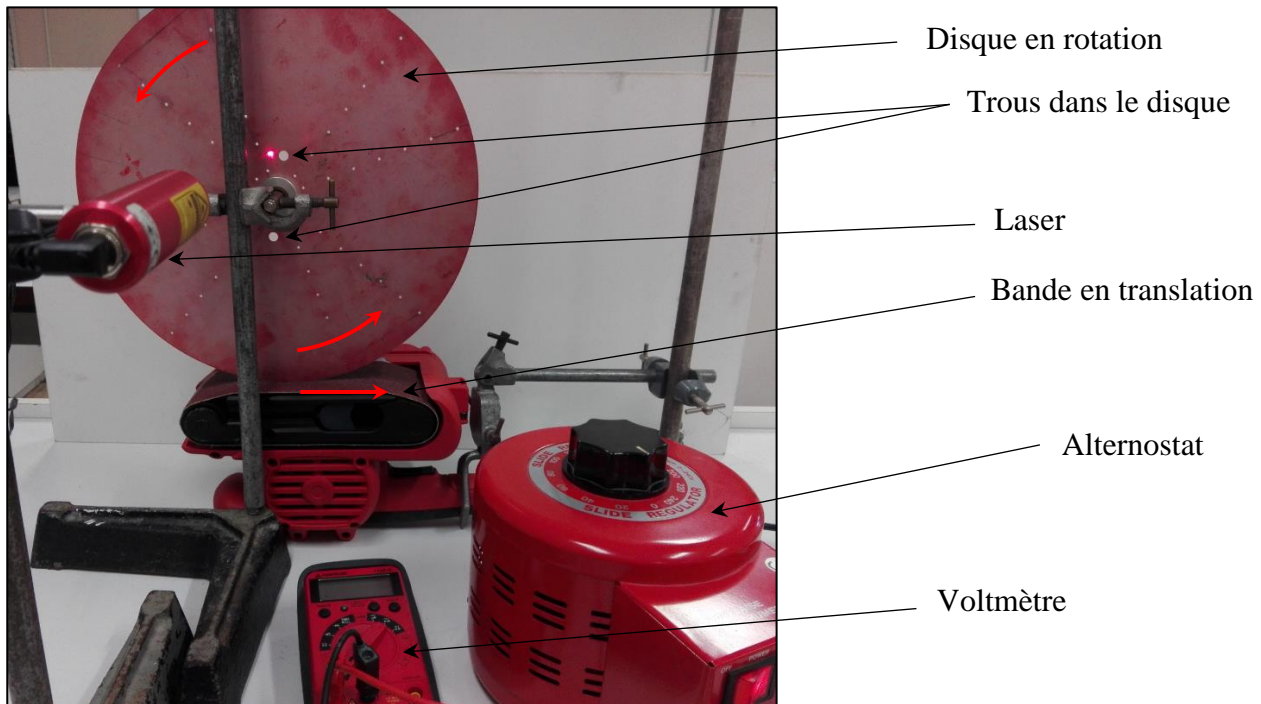
Principe d'un caloduc commercial (source : en.wikipedia.org/wiki/Heat_pipe)

Le liquide se vaporise au contact de la source de chaleur (1) ; la vapeur migre dans le tube vers l'extrémité froide (2) et se liquéfie au contact du milieu extérieur (3) ; le retour du liquide se fait par capillarité (4).

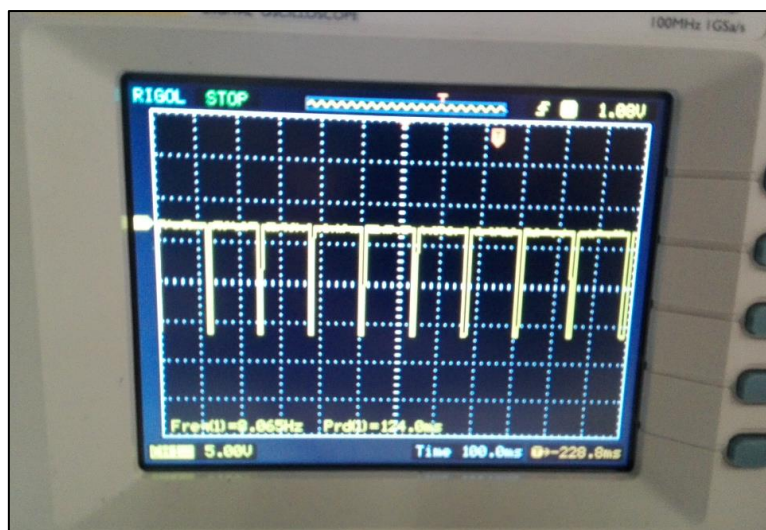
Annexe 4

Étalonnage de la vitesse de déplacement de la bande

Afin de connaître la vitesse de déplacement de la bande, on a tout d'abord réalisé un étalonnage du montage. Un disque est mis en rotation par le contact avec la bande. On mesure sa vitesse de rotation en déterminant la fréquence de clignotement d'un faisceau laser passant par deux trous du disque. Le faisceau laser est en effet envoyé sur un montage à photodiode relié à un oscilloscope numérique.



Montage d'étalonnage de la vitesse de la bande

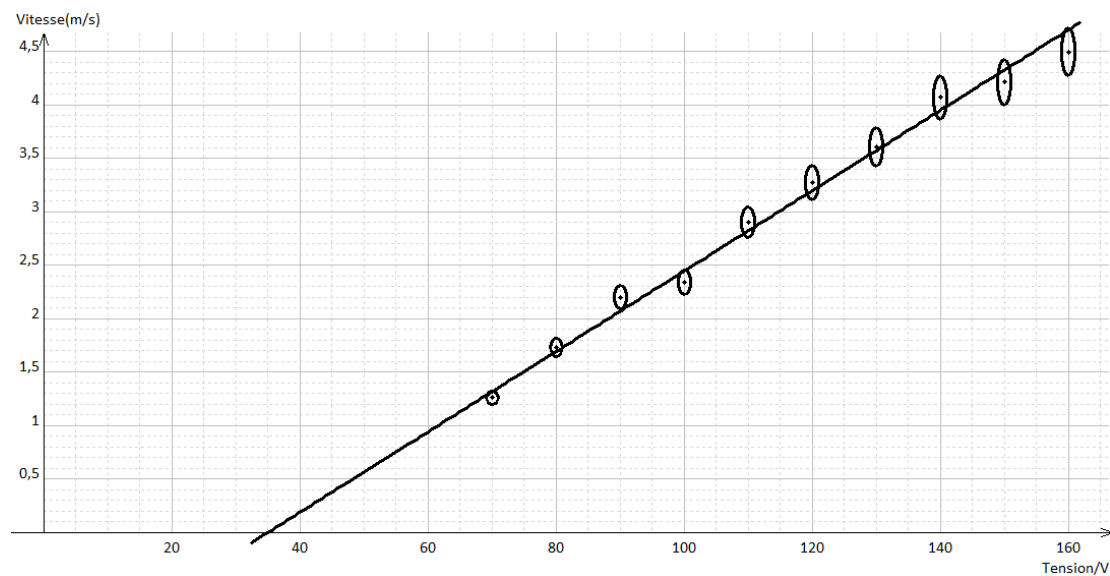


Capture d'écran de l'oscilloscope numérique avec le signal délivré par la photodiode

On note f_{laser} la fréquence de clignotement du laser. Puisque le disque comporte deux trous, la fréquence de clignotement est deux fois plus grande que la fréquence de rotation. La vitesse de rotation Ω du disque vaut alors simplement $\Omega = \pi f_{laser}$. La vitesse V de la bande s'obtient ainsi par la relation : $V = R\Omega = \pi R f_{laser}$ où $R = 14,9$ cm est le rayon du disque utilisé.

Par exemple, pour une fréquence $f_{laser} = 8,0$ Hz (voir capture d'écran ci-dessus), on obtient : $V = 3,7$ m/s.

On mesure ainsi la vitesse de translation de la bande en fonction de la tension d'alimentation. Notons que nous avons limité la tension d'alimentation à 160 V pour cet étalonnage, car au-delà le disque tournait vraiment très vite et cela pouvait devenir dangereux...



Vitesse de translation de la bande en fonction de la tension d'alimentation

On peut considérer une relation affine entre la vitesse V et la tension d'alimentation u :

$$V(\text{m.s}^{-1}) = -1,3 + 0,038 u (\text{V})$$

En extrapolant cette relation à tout le domaine d'utilisation de la ponceuse, on peut déterminer la vitesse maximale de la bande, obtenue pour $u = 240 \text{ V}$: $V_{max} = 7,8 \text{ m/s}$ (soit 28 km/h).