
MP05 : MESURES DE TEMPÉRATURES

Niveau

Commentaires du jury

- 2017 : Les caméras infrarouges entrent parfaitement dans le cadre de ce montage. Certains candidats font une erreur sur la mesure de la résistance par la méthode 4 fils à cause d'une copie non réfléchie de certains ouvrages. La question de la référence de température dans un thermomètre à thermocouple commercial ne doit pas surprendre les candidats.
- 2014, 2015, 2016 : De nombreux candidats utilisent à bon escient les échelles secondaires de température (résistance de platine) et ont compris que la notion de point fixe est essentielle pour l'établissement d'une échelle thermométrique. En revanche, certains ignorent encore les mécanismes physiques mis en jeu dans les différents capteurs qu'ils utilisent et ne réfléchissent pas suffisamment à la précision requise lors de l'utilisation d'un thermomètre « de référence ». Enfin, il serait intéressant de faire intervenir des capteurs de température plus modernes, comme des caméras infra-rouge.

Bibliographie

—

pré-requis

Expériences

- Tube de Kundt pour une mesure absolue
- thermomètre à résistance de platine, avec montage 4 fils et étalonnage
- Etude de thermocouples (linéarité, temps de réponse qui ont leur place dans ce montage)
- caméra infrarouge ? Le jury a l'air de bien aimer (ca veut dire pyromètre).
-

Table des matières

1	Thermomètre absolu : le tube de Kundt	2
2	Thermomètres secondaires	3
2.1	Thermomètre à résistance de platine	3
2.2	Thermocouple	4
2.2.1	Linéarité du thermocouple	5
2.2.2	Temps de réponse	5

Introduction

La température est un paramètre physique qui est très intuitif au premier abord : les notions de chaud et de froid semblent évidentes, et les thermomètres sont assez présents et utilisés dans la vie de tous les jours.

Cependant, ce ne sont pas des mesures simples. La définition même de température, faisant appel à l'entropie, est difficile à interpréter.

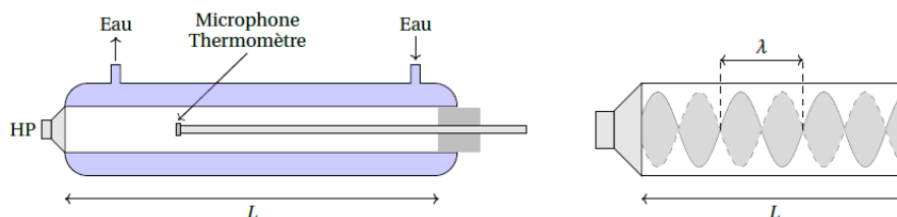


FIGURE 1 – Schéma de principe du tube de Kundt

On différencie 2 types de thermomètres :

- les thermomètres primaires ou absolu : ce sont des thermomètres délivrant une mesure absolue, sans référence. Cela est effectué à partir d'un modèle physique faisant intervenir directement la température. Exemple : la célérité des ondes sonores.
- Les thermomètres secondaires : ces thermomètres ne sont pas capables de mesurer la température absolument. Ils mesurent un paramètre dépendant d'une échelle de température et nécessitent un étalonnage.

Par ailleurs, les appareils de mesure de température sont des capteurs, qui ont diverses propriétés : finesse, justesse, précision, discrétion, temps de réponse, le caractère actif, passif,...

Enfin, l'unité du système international de la température est le Kelvin. 1 K est égal à $\frac{1}{273.16}$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau. C'est une mesure absolue : le zéro absolu correspond à 0 K.

1 Thermomètre absolu : le tube de Kundt

Des exemples de thermomètres absolus sont le thermomètre à gaz (basé sur le modèle du gaz parfait), le thermomètre à rayonnement (basé sur la loi de Stefan-Boltzmann) et le thermomètre acoustique, qu'on présente ici.

Dans le cadre de l'acoustique linéaire (fluide parfait et incompressible, équations linéarisées et phénomènes dissipatifs négligés), la propagation du son vérifie l'équation de d'Alembert. En considérant que l'air est un gaz parfait, on écrit que :

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

avec $\gamma = 1.4$ le coefficient adiabatique de l'air pris comme gaz parfait diatomique, $R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. On va se servir de cette relation pour mesurer une température.

Le tube de Kundt est un tube que l'on thermalise. Pour mettre en évidence que la mesure est correcte, on va thermaliser l'eau du tube et mesurer la célérité des ondes dans le tube. On le fait à l'aide d'ondes stationnaires dans le tube.

Poly de TP p. 53 et Fruchart p.528

Placer le micro à une certaine position, que l'on repère à l'aide de la longueur de tige qui dépasse du tube. On envoie des ondes sonores avec un haut parleur. En plaçant des verres en plastique derrière c'est moins désagréable. En faisant varier la fréquence du haut parleur, on observe des variations d'intensité au niveau du micro. Si ce n'est pas le cas, déplacer un peu le micro.

Une fois que l'on a repéré une fréquence pour laquelle l'amplitude est maximale, il s'agit de repérer les ventres ou les noeuds des ondes stationnaires en bougeant le micro. Les ventres (ou les noeuds) sont espacés de $\lambda/2$, et pour des ondes stationnaires la longueur d'onde est donnée par :

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad \text{donc} \quad f_n = \frac{c(n+1)}{2L}$$

Pour repérer la résonnance : Méthode de Lissajou!

Pour mesurer la fréquence : On regarde le signal du micro à l'oscillo.

Attention : on travaille vers $f = 3\text{Hz}$, mais pas au dessus de 4 Hz : il faut s'assurer que l'on ne propage que le mode longitudinal.

Une fois qu'on connaît λ et f , on remonte à $c = \lambda f$. On peut tracer c^2 en fonction de T . Le modèle est validé.

Remarque :

- Le tube de Kundt a une fréquence de coupure basse de l'ordre de 4 kHz. Rester en dessous de cette valeur est crucial pour garantir qu'il n'y a qu'un seul mode dans le tube.
- Le HP n'impose pas un ventre de vibration à l'entrée du tube ??
- On se place à la résonance pour que λ ne dépende pas de T .

Les thermomètres absolus sont utilisés pour étalonner des thermomètres relatifs, plus simples d'utilisation : on détermine des points fixes qui servent à étalonner d'autres thermomètres.

2 Thermomètres secondaires

Les thermomètres secondaires nécessitent un étalonnage : on va illustrer l'étalonnage sur le thermomètre à résistance de platine, et ensuite tester un thermocouple en terme de linéarité et de temps de réponse.

2.1 Thermomètre à résistance de platine

Le thermomètre à résistance de platine est un thermomètre de référence entre 0 et 850 °. Sachant que la résistance d'un métal dépend de la température (modèle de Drude Sommerfeld page wiki anglais), la mesure d'une résistance est liée à la température.

Entre 0 et 850 °, le modèle utilisé est :

$$R(T) = R_0(1 + aT + bT^2)$$

avec T en °C (c'est la loi de Callendar-Van Dusen. Loi trouvée par Callendar et raffinée par Dusen en 1925. En 1968 le Comité International des Poids et Mesures change cette définition par une interpolation polynomiale au 20ème ordre. Depuis 1990, l'interpolation est encore plus raffinée cela permet d'avoir l'évolution de la résistance en température pour T entre 13.8033 K et 273.16 K. Un polynôme d'ordre 9 permet d'avoir une relation valide entre 0°C et 961.78 °C).

Le choix du platine est basé sur le fait qu'on peut l'obtenir très pur, et sur la stabilité de ses propriétés électroniques.

Le thermomètre de la collection vérifie $R_0 = 100 \Omega$, et s'appelle donc PT100. Les valeurs de a et b sont alors fixées par convention : $a = 3.908 02 \times 10^{-2} \text{ °C}^{-1}$ et $b = -5.775 \times 10^{-7} \text{ °C}^{-2}$.

On va ici chercher à étalonner un tel thermomètre, c'est-à-dire remonter aux valeurs de a et b . Pour cela, on va réaliser des mesures de résistance. Ces mesures doivent être précises, c'est pourquoi on va utiliser un montage 4 fils. De plus, le courant traversant la résistance sera assez faible ($\approx 10 \text{ mA}$), pour limiter l'échauffement par effet Joule.

Etalonnage du thermomètre L'ohmmètre utilisé est le Fluke 8846A P.69.35, la sonde de platine est P102.120. Relier les 2 bornes du haut à l'entrée HI, les 2 autres à l'entrée LOW. Activer la fonction 4 fils (4-wire).

Voir la notice du multimètre pour activer sa fonction mémoire, cela permet de mieux repérer les plateaux.

On va utiliser les 3 points fixes suivants : ébullition de l'eau (373K), fusion de l'eau (273.15 K) et fusion de l'étain (505.01 K).

Il faut faire fondre l'étain dans un creuset. Il faut arriver à le faire fondre sans gaz, parce qu'apparemment y'en a pas aux oraux. Pour le bain eau-glace, il ne faut pas se placer contre un glaçon ; on doit mesurer 100Ω .

Ajuster les 3 points par un polynôme d'ordre 2. Si on s'est pas fourrés, on retrouve les bonnes valeurs de a et b . Une fois qu'on a étalonné le capteur, on peut faire une mesure ? Ou se servir de la sonde de platine comme d'une référence pour les thermocouples ?

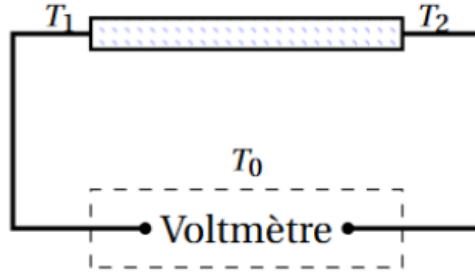


FIGURE 2 – Schéma de principe du thermocouple.

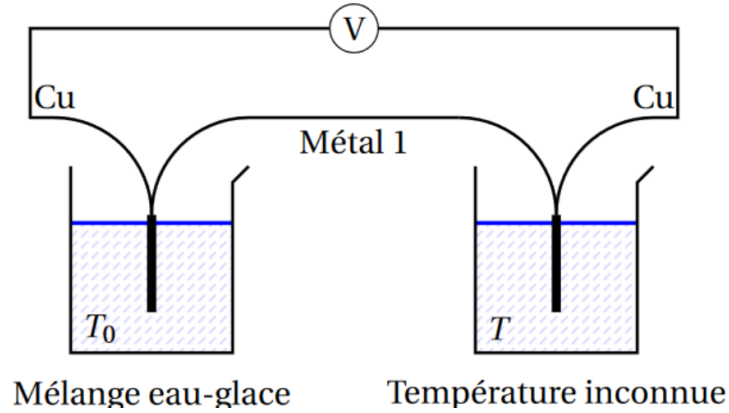


FIGURE 3 – Schéma du montage de mesure au thermocouple.

Le montage d'une sonde de platine est pas aisé, et n'est pas à la portée de toutes les bourses : ça n'est pas un thermomètre grand public. On va donc étudier un thermomètre plus utilisé, le thermocouple.

2.2 Thermocouple

Duffait p. 109

Les thermocouples fonctionnent grâce à l'effet Seebeck : un matériau soumis à un gradient de température permet de générer un champ électrique :

$$\mathbf{E} = -\epsilon \nabla T \iff dU = -\epsilon dT$$

On peut utiliser cela pour mesurer une température en mesurant une différence de potentiel (modulo un étalonnage). Mais attention : il faut prendre en compte les jonctions thermocouple-fil de cuivre, où l'effet Seebeck existe également. Ainsi,

$$U = Q_0(T_2 - T_1) + Q_{Cu}(T_1 - T_0) + Q_{Cu}(T_0 - T_2)$$

donc

$$U = (Q_0 - Q_{Cu})(T_2 - T_1)$$

Le montage de mesure pour le thermocouple est représenté sur la figure 3.

On utilise une source à température connue et étalonnée, et si le thermomètre de platine a bien été étalonné, on l'utilise pour mesurer la température inconnue.

Il existe plusieurs types de thermocouples, en fonction des matériaux qui les composent. Les plus courants sont ceux de type K (chromel (chrome + nickel)/alumel(aluminium + nickel) et T (Cuivre/constantan (cuivre + nickel)).

2.2.1 Linéarité du thermocouple

Utiliser un thermocouple de type T.

En faisant varier la température inconnue, on trace la courbe $U = f(T)$ pour le thermocouple. Sa sensibilité est définie comme :

$$s = \frac{\partial U}{\partial T}$$

2.2.2 Temps de réponse

Une autre caractérisation possible est le temps de réponse. Il peut être important d'avoir des mesures rapides de température.

On suit l'évolution de la tension avec Latis pro lorsqu'on plonge le thermocouple dans le b cher (le thermaliser dans l'eau froide juste avant ?)

On suppose que l'évolution de la tension délivrée par le capteur est exponentielle :

$$U(t) = U_{\infty} \left(1 - e^{-t/\tau} \right)$$

On peut mesurer τ à l'aide d'un ajustement sur regressi. Le temps de réponse est très court : il faut surement prendre beaucoup de points.

Conclusion

On a vu quelques contraintes des mesures de température : la nécessité d'avoir des thermomètres primaires, qui sont toutefois assez peu commodes d'utilisation. A partir de là, on peut mesurer des températures repères grâce à des points fixes, ce qui permet d'étalonner des thermomètres secondaires. Enfin, il existe un très grand nombre de thermomètres : chacun s'adapte à certaines contraintes : précision, rapidité, commodité, finesse,...

On n'a pas quantifié l'auto-échauffement de nos thermomètres, ni leurs capacités thermiques qui peuvent déranger la mesure.