

MP13 : MESURE DE TEMPÉRATURES

7/12/2021

Jean-Maxime Schlachter & Léa Bessonart

Commentaires du jury

Jusqu'en 2012, le titre était : *Thermométrie*. En 2013, il était : *Échelles et mesures de températures*. Précédemment, ce montage portait le numéro *MP05*.

2009 : On attend dans ce montage des manipulations plus pertinentes que l'étalonnage d'une résistance de platine par un thermomètre à mercure.

2012 : Ce montage est trop souvent réduit à un catalogue de capteurs thermométriques sans hiérarchie : la notion de points fixes est trop souvent inexploitée, ou mal exploitée. En 2013, il devient « Échelles et mesures de température ». Lors de l'utilisation de thermocouples, il faut en connaître le principe, la température de référence, et le domaine de validité.

2013 : Les candidats utilisent en général à bon escient les échelles secondaires de température (résistance de platine). Les mécanismes physiques mis en jeu dans les différents capteurs utilisés doivent être connus. La notion de point fixe est essentielle pour l'établissement d'une échelle thermométrique.

2014 : 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.

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 réfléchi de certains ouvrages. La question de la référence de température dans un thermomètre à thermocouple commercial ne doit pas surprendre les candidats.

Bibliographie

- ↗ *Techniques de l'ingénieur R2510 L'échelle internationale de température : EIT-90, Sadli* → Définition de la température dans l'ancien SI de 1990, les points fixes utilisés, et présentation de différents thermomètres.
- ↗ *Redéfinition du SI, Wikipédia* → La température dans le niveau système d'unités, consulté le 03/12.
- ↗ *Le SI, cea* → <https://www.cea.fr/multimedia/Documents/infographies/international-unites.pdf> Donne l'équivalence entre le kelvin et les constantes fondamentales.
- ↗ *Thermodynamique, Pérez* → Définition de la température, thermométrie. Utilisé en particulier pour le pyromètre.
- ↗ *BUP 827 Lampe à incandescence, corps noir, loi de Stefan et filtre passe-bas, Deiber¹, Kempf* → Bilan de puissance pour un filament dans une QI, techniques de mesures de sa température.
- ↗ **FLTCLD** (Frucharlidon ou Charlidon bleu) → Tube de Kundt (je suis tombé dessus pour mes oraux de 3/2, un grand moment).
- ↗ *Tome II : Thermodynamique et applications, Quaranta* → Effet Seebeck.
- ↗ *Les capteurs en instrumentation industrielle, Asch* → Fonctionnement des capteurs. J'aurais dû le lire mais je ne l'ai pas fait.
- ↗ *Electrical resistivity of selected elements, P. D. Desai, T. K. Chu, H. M. James, and C. Y. Ho. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 13(4) :1069–1096, 1984* → Culture : relations $R(T)$ pour quelques métaux (plus plusieurs bouquins de Touloukian si ça vous intéresse, mais vous n'y aurez pas accès à l'agreg).

Expériences

👉 Tube de Kundt

👉 Pyromètre optique

👉 Thermomètre à résistance de platine

👉 Thermocouple

Introduction

La température est une grandeur thermodynamique qui joue un rôle important dans de nombreux domaines de la physique, c'est pourquoi il est important de savoir la mesurer. Par exemple, pour un corps pur, elle détermine les points de transition de phase - qu'elle soit liquide/vapeur sous une certaine pression ou bien encore ferromagnétique/paramagnétique pour le fer. On peut également citer l'émission thermoionique² (ou thermoélectronique), qui est un phénomène régi par la température et qui fut mis à profit en mécanique quantique et est toujours utilisé en physique de plasmas³. Si la température est désormais définie par l'intermédiaire des grandeurs fondamentales comme $2.66665264011\Delta\nu_{Cs}h/k$, cette définition ne donne pas de façon pratique d'y accéder. Nous allons voir comment nous pouvons la déterminer expérimentalement ou la mesurer.

I Thermomètres primaires

Le premier type de thermomètres est le type dit *primaire*. Un thermomètre primaire repose sur une relation théorique qui lie la température d'un système à des observables mesurables. Nous allons en aborder deux.

I.A Tube de Kundt

Le tube de Kundt est un thermomètre primaire constitué d'un tube de longueur L rempli d'air entouré d'un bain d'eau thermostaté. L'air dans le tube est excité à la fréquence f par un haut-parleur (HP) à une extrémité, l'onde de surpression est captée par un microphone introduit à l'autre extrémité, à travers un bouchon qui ferme le tube. Le modèle adopté pour l'air dans le tube est celui du gaz parfait à l'équilibre thermodynamique, à la température du bain, soumis à une compression de faible amplitude de longueur d'onde petite devant le libre parcours moyen des "particules" d'air, et suivant une évolution isentropique quasi-statique (approximation acoustique). Dans ce cas, la température dans le tube est déterminée à partir de sa relation avec la célérité des ondes acoustiques en son sein :

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

où λ est la longueur d'onde des perturbations, f leur fréquence, γ le coefficient adiabatique de l'air, $M \simeq 28.8 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ sa masse molaire et $R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ la constante des gaz parfaits. La première relation est définie à partir de la relation de dispersion des ondes acoustiques dans la limite de faible perturbation, tandis que $\gamma = 7/5$ si l'air est assimilé à un gaz parfait. La détermination de T se fait alors par déduction à partir des mesures de λ et de f . Pour ce faire, il est utile de savoir à quel type d'ondes nous avons affaire.

L'équation d'ondes classique conduit, avec un terme de forçage sinusoïdal $v_{\text{HP}} \cos(2\pi ft)$, à des ondes stationnaires dans le tube d'expression :

$$v(x, t) = \frac{v_{\text{HP}}}{\sin(kL)} \sin(k[L - x]) \cos(2\pi ft)$$

On en déduit que dans ce modèle, le tube est siège d'ondes stationnaires pour laquelle l'amplitude diverge pour les fréquences $f_n = nc/2L$ dites de *résonance*. L'établissement d'ondes stationnaires permet une mesure simple de la longueur d'onde en repérant les positions des nœuds et/ou ventres de pression. En effet, les nœuds ou ventres sont distants de $\lambda/2$. La précision sur la détermination de ces positions est maximale aux fréquences de résonance car l'amplitude des ondes y est maximale : nous choisissons alors une fréquence proche de la résonance pour nos mesures⁴. Les positions sont repérées par un trait sur la tige du microphone. L'incertitude sur la mesure de la longueur d'onde est prise au mm.

Les données prises en préparation (4 points parce que le tube prend du temps à thermaliser) conduisent à une loi de puissance pour $c(T)$; si on admet la puissance 1/2, alors, avec les incertitudes sur les mesures, on obtient $\gamma \in [0.94; 3.1]$ ce qui n'est à la fois pas terrible d'un point de vue incertitudes, et ne permet pas de trancher sur le caractère diatomique de l'air (cf le Frucharlidon pour plus de détails, pour eux cette partie a bien marché). La relation linéaire entre λ et f à température ambiante est bien vérifiée ; ceci permet d'obtenir c et de remonter à T par les résultats de la manip précédente.

2. *Thermodynamics of electron emission*, O. W. Richardson. Proceedings of the Royal Society of London. Series A 105(732) :387–405, 1924 Le Dushman 1930 sur le phénomène pourrait aussi être cité mais environ 3 fois plus long.

3. cf thèse de Victor Désangles soutenue à l'ENSL en 2018 par exemple.

4. Deux remarques à ce stade : premièrement, le HP émettant une somme de sinus (GBF et HP sont physiques donc ne peuvent pas produire d'ondes monochromatiques), il n'y a pas d'ondes stationnaires dans le tube à proprement parler (cf cours d'onde de Benjamin Guiselin). Ensuite, le TOS n'est pas infini et donc l'amplitude au niveau des nœuds peut ne pas être nulle.

Le tube de Kundt est donc un thermomètre primaire, mais peu pratique : la température qu'il peut définir n'est que celle du bain thermostaté. Nous allons voir un autre type d'appareils de mesure, qui peut fournir la température de n'importe quel objet *a priori*.

I.B Pyromètre optique

Le pyromètre optique est un instrument permettant d'effectuer des mesures de température à distance, ce qui permet de déterminer la température de corps chauds ou célestes. En particulier, il est prescrit dans l'EIT-90 pour des mesures de températures supérieures à 961.78 °C. Le pyromètre optique bichromatique compare la luminance spectrale reçue à deux longueurs d'onde proches et donne la température du corps correspondant à partir de la loi de Planck. La particularité d'un pyromètre bichromatique est que, si les longueurs d'onde de travail sont suffisamment proches, la mesure de température est exempte de la sensibilité du capteur à la luminance, de l'absorption EM par les milieux traversés, de l'émissivité du corps⁵. En effet, la relation entre les tensions dues à λ_1 et λ_2 s'exprime grâce à la loi de Planck

$$\frac{U_2}{U_1} = \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right]^5 \exp \left(\frac{hc}{kT} \left[\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right] \right)$$

La mesure de la température par ce type de pyromètres semble donc d'une extrême justesse, ce qui justifie l'emploi de pyromètres bichromatiques en tant que thermomètres primaires et leur utilisation recommandée par l'EIT-90. La limite sur la justesse de la mesure repose sur la précision de la mesure de la tension induite par les ondes EM dans le pyromètre, et les gradients de sensibilité et d'absorption autour des longueurs d'onde de travail.

D'un point de vue expérimental, nous avons utilisé un pyromètre optique bichromatique ne pouvant fournir des températures qu'à partir de 1000 °C et une lampe QI qu'on peut alimenter avec une source de courant continue. Le produit de l'intensité et de la tension donne accès à la puissance électrique consommée par la lampe. Un bilan de puissance revient à considérer cette puissance comme étant totalement émise par rayonnement selon la loi de Stefan (à un terme linéaire en T près, cf BUP) :

$$UI = \sigma (T^4 - T_0^4)$$

T_0 représente ici la température initiale du filament, considérée comme la température ambiante. L'objectif de cette manipulation est de vérifier que le bilan de puissance est correct, soit que la puissance UI est bien transférée au filament et que la puissance reçue est totalement convertie en rayonnement.

En préparation, nous avons vu que la température indiquée dépend de la position visée, en particulier il faut prendre soin de bien viser le filament (si l'appareil affiche une erreur c'est probablement que l'appareil est pointé en direction du gaz *et* qu'il est trop froid). De plus, la régression linéaire $\ln(UI) = a \ln(T) + b$ donne des pentes différentes en fonction de l'endroit visé : pour le gaz chaud, on a obtenu $a_g \simeq 2.5$, pour le filament, c'est $a \simeq 3.2$. Ceci provient du fait que le bilan de puissance est valable seulement pour le filament, car c'est lui qui reçoit la puissance Joule. Concernant les incertitudes, on considère que le wattmètre donne une puissance à 0.05 W près et la température est estimée à plus ou moins 3 K près (légers changements de la température observés).

La résistance du filament de tungstène peut aussi être utilisée pour déterminer la température du filament (cf BUP), mais pour la caractériser il faut connaître la résistance du filament à une température bien déterminée. Mesurer la résistance du filament à température ambiante serait envisageable, mais dans la bibliographie les interpolations de $\rho(T)$ vers 23 °C et 1500-2500 °C sont différentes. Nous aurions donc des incertitudes liées à la température ambiante mal définie à l'intérieur de la QI, la mesure de la résistance du filament, et un gros écart de température avec les températures de travail pour l'interpolation. Le pyromètre optique donne *a priori* des résultats plus justes. On se focalisera donc sur la mesure avec seulement le pyromètre, d'autant plus que l'existence d'une relation $R(T)$ est utilisée juste après en thermométrie secondaire.

Maintenant que nous avons étudié des thermomètres primaires reposant uniquement sur un modèle théorique et donnant la température d'un système de façon absolue, nous allons voir comment on peut mesurer des températures à partir d'appareils dont nous ne connaissons *a priori* pas le comportement avec la température. Il s'agit des thermomètres secondaires.

5. Dans le cas général, un corps émet une certaine puissance lumineuse dans une intervalle $\delta\lambda$ autour d'une longueur d'onde λ comme $\varepsilon(\lambda, T)L_\lambda(T)$ produit de l'émissivité et de la luminance du corps noir.



II Thermomètres secondaires

Les thermomètres secondaires sont utilisés pour mesurer des températures après un étalonnage, car pour eux aucune loi théorique ne donne l'évolution de leur température en fonction de leurs caractéristiques de façon absolue. Pour étalonner un thermomètre, il faut utiliser des *points fixes*, qui sont des systèmes thermodynamiques stables durant une période longue par rapport au temps d'une mesure, dont la température est fixe. L'EIT-90 liste les points fixes à utiliser ; notamment, le point triple de l'eau servait de définition au kelvin. L'EIT-90 prescrit l'emploi du thermomètre à résistance de platine pour la mesure de températures entre environ 20 K et 1000 K.

II.A Thermomètre à résistance de platine

Le thermomètre à platine est un outil de mesure de la température préconisé par l'EIT-90. Ici, son étalonnage est réalisé à partir du point triple de l'eau (0.01 °C), du point d'ébullition de l'eau (100 °C à pression d'une atmosphère) et du point de fusion de l'étain (232 °C dans les mêmes conditions de pression). Un ajustement expérimental parabolique de la résistance en fonction de la température en °C dans notre gamme de travail est possible (cf l'EIT-90 pour plus de précision) :

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

On utilise une sonde pour laquelle la résistance à 0 °C R_0 est annoncée égale à 100 Ω, la valeur de la résistance est évaluée avec un montage 4 fils. L'ajustement (le coefficient de l'ordre 2 est obtenu avec une grande incertitude lors de la préparation) permet de remonter à la température d'un corps au contact avec la sonde, on a donc un autre thermomètre pratique permettant de mesurer la température de n'importe quel corps à son contact.



Le thermomètre à résistance de platine présente deux inconvénients : il est constitué d'un métal coûteux et peut être soumis à un auto-échauffement par effet Joule. Nous allons alors voir comment utiliser un thermomètre secondaire plus abordable.

II.B Thermocouple

Le thermocouple est un thermomètre secondaire dont le principe repose sur l'effet Seebeck : un conducteur dont le profil de température est inhomogène se voit imposer une différence de potentiel électrique entre les points d'inhomogénéité selon :

$$dU = -\epsilon dT$$

où ϵ est appelé *coefficient Seebeck*, de l'ordre du $\mu\text{V}/\text{K}$ pour des métaux. Un thermocouple est constitué d'au moins deux métaux mis au contact par une soudure. Une soudure est placée dans un bain de température connue, le plus pratique étant le bain eau/glace à 0 °C (soudure dite *froide*), la deuxième soudure est placée au contact du corps dont la température est à déterminer (soudure *chaude*). Dans cette expérience, le thermomètre utilisé est de type T, donc constitué de constantan (alliage 60% cuivre - 40% nickel) pour le premier métal et de cuivre pour le second (tout comme les fils électriques). Il apparaît alors une tension

$$U = (\epsilon_{Cu} - \epsilon_{const})(T_c - T_f)$$

Les valeurs tabulées sont $\epsilon_{Cu} = 2.7 \mu\text{V}/\text{K}$ et $\epsilon_{const} = -38 \mu\text{V}/\text{K}$. L'étalonnage du thermocouple se fait soudure froide dans un bain eau/glace, soudure froide dans un bain thermostaté ; la température du bain est relevée avec la sonde de platine préalablement étalonnée.

Sonde platine

Comme le coefficient sur l'ordre 2 du platine est très peu fiable, on ne tiendra pas compte du terme correspondant. En travaillant à des températures inférieures à 40 °C, on a une incertitude maximale sur la température de l'ordre de 4% avec les coefficients trouvés.

La résistance de la sonde de platine se fait avec un montage 4 fils tandis que la tension du thermocouple est mesurée avec un millivoltmètre (tensions relevées de l'ordre de 1 mV). On obtient une droite comme attendu, la pente est du bon ordre de grandeur. L'écart entre la pente théorique et celle observée peut être liée à un mauvais calibrage du thermocouple (on a pris seulement 3 points pour l'interpolation et on n'a pas pris en compte l'ordre 2 de la sonde de platine) ou à une composition du constantan différente de celle tabulée (les compositions peuvent varier de 10%).

Thermocouple utilisé

Attention, il existe plusieurs types de thermocouples ! Durant l'oral, j'ai utilisé un thermocouple de type K chromel/alumel (80% nickel - 20% chrome / 95% nickel - 2% aluminium, manganèse, silicium), $\epsilon_K = -39.5 \mu\text{V}/\text{K}$. On peut trouver des caractéristiques de thermocouples sur le site <https://avia-techno.net/thermo/thermo01.php>.

Conclusion

Nous avons vu que la température intervient dans différents phénomènes en physique et qu'elle peut par conséquent être mesurée de différentes façons. Nous avons étudié quatre outils pour la mesurer, et nous sommes loin de les avoir tous vus. Par exemple, un autre thermomètre primaire intéressant est le thermomètre à gaz, qui sert notamment à mesurer les températures de transition de phase de l'eau ; comme thermomètre secondaire il reste la thermistance... Enfin, nous pourrions aller plus loin dans les expériences mesurer les temps de réponse et la fiabilité des différents capteurs de température pour les comparer.

Questions

- Aller plus loin dans le lien entre la température et k_B .
- Définition du Kelvin et du Fahrenheit ?
- Justifier le choix de la fréquence utilisée pour le tube de Kundt. $\rightarrow f < 4$ kHz pour que seul le mode 1 se propage et λ petit pour qu'il y ait un maximum de nœuds.
- Vaut-il mieux repérer les nœuds ou les ventres ? \rightarrow Les nœuds car l'amplitude s'annule (dépend du TOS).
- Pourquoi y a-t-il résonance ? \rightarrow Tube de Kundt = guide d'ondes.
- Sources d'erreurs pour le tube ?
- Comment savoir si le tube est à l'équilibre thermique ?
- Rappeler la loi de Stefan. Est-ce que tous les corps rayonnent suivant cette loi ?
- Quel est l'intérêt d'utiliser un pyromètre ?
- Comment l'appareil mesure les luminances à λ_1 et λ_2 ? Comment être certain que le pyromètre bichromatique mesure directement T ?
- Pourquoi la température indiquée par le pyromètre varie-t-elle ? (environ 30 pour une mesure)
- Quels sont les critères pour choisir un capteur ? \rightarrow Temps de réponse, sensibilité, précision, justesse, ...
- Pourquoi la résistance d'un conducteur augmente avec la température ? \rightarrow La résistance est due aux collisions des électrons sur les impuretés du cristal dans le modèle de Drude, or augmenter T revient à augmenter l'agitation thermique donc la probabilité de chocs par unité de temps et par conséquent la résistance électrique.
- Pourquoi employer une sonde de platine plutôt qu'un autre conducteur ? \rightarrow Le platine est un métal inerte.
- Quel est l'intérêt du montage 4 fils ? \rightarrow Affranchit la mesure de la résistance des fils permettant ainsi que des connexions, notamment leur température peut varier d'une mesure à l'autre et on ne connaît pas la loi reliant leur résistance à leur température.
- Est-il pertinent de modéliser la résistance du platine avec un terme quadratique en T si on sait dès le départ qu'on ne l'utilisera pas ?
- Où est la soudure froide dans les thermocouples commerciaux ? \rightarrow La soudure froide est plongée soit dans un système au point triple contenu dans une petite enceinte à l'intérieur du boîtier du thermocouple, soit au contact de l'atmosphère. Dans le deuxième cas, un thermomètre à résistance de grande sensibilité autour de 25°C est ajouté et la tension à ses bornes va compenser celle apparaissant par effet Seebeck à la soudure froide lorsque la température ambiante n'est plus celle de référence (voir <https://www.omega.fr/prodinfo/thermocouples-soudure-froide.html>).
- Comment s'assurer de la température de la source froide ? \rightarrow En utilisant des points fixes, dont la température reste stable sur une durée supérieure au temps de réponse du capteur.
- Donner d'autres thermomètres. \rightarrow Thermomètre à gaz, thermistances (CTN/CTP).

Remarques

- Bon choix de thermomètres.
- Le pyromètre pourrait être utilisé juste pour mesurer une température comme par exemple, celle de la transition para/ferro (et comparer la valeur obtenue avec le dispositif du clou de Cachan) ; ou bien pour mesurer l'émissivité ε de la lampe (la notice du pyromètre peut fournir des valeurs de ce coefficient ; ne pas oublier d'utiliser le mode 1λ et que le préfacteur contient l'émissivité, la sensibilité et l'absorbance des milieux traversés).
- Faire attention à ce que les sondes ne touchent pas la paroi des béchers.
- Insister sur le temps de réponse long de la sonde de platine, qui est un autre inconvénient technique. Le thermocouple a un temps de réponse moindre.
- Discuter des caractéristiques de chaque capteur (pas fait par manque de temps).
- Conclure avec l'importance de la mesure de la température : chaîne du froid, chimie.