

MP05 – MESURES DE TEMPÉRATURE

3 avril 2020

Aurélien Goerlinger & Yohann Faure

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.
- **2014-2016** : 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

↗ <i>Asch</i> , Les capteurs	→ fonctionnement interne
↗ <i>BFR</i> , Thermo	→ ch2 p45-53
↗ <i>Quaranta II</i> ,	→ Trop détaillé
↗ <i>Perez</i> , Thermo	→ pyrometre p392
↗ <i>BUP 827</i> ,	→ pyrometre
↗ <i>FLTCID</i> ,	→ Kunt

Expériences

- ☞ tube de Kundt
- ☞ sonde à résistance de platine
- ☞ thermocouple/thermorésistance
- ☞ pyromètre optique
- ☞ caméra infrarouge

Table des matières

1 Les références de température	2
2 Le tube de Kundt	2
2.1 Principe	2
2.2 Expérience	3
3 Thermomètres secondaires	3
3.1 Sonde à résistance de platine	4
3.2 Thermistance et thermocouple	4
4 Pyromètre optique	5
5 Caméra infrarouge (qualitatif)	6

Introduction

La mesure de température est primordiale en physique car elle permet d'évaluer le sens dans lequel les échanges thermiques se font. Dans la vie de tous les jours elle est aussi un bon indicateur pour la santé d'un individu, ou l'état d'une machine comme un moteur.

Les thermomètres les plus simples sont les thermomètres à dilatation, au mercure ou plus récemment au galinstan, un alliage de gallium, indium et d'étain, ou à l'alcool coloré, mais il en existe toute une zoologie !

Définitions :

- On nomme thermomètre primaire un thermomètre qui se base directement sur une loi physique pour faire une mesure absolue de température.
- On nomme thermomètre secondaire un thermomètre qui doit être étalonné et mesure une température relative.

Commençons par parler de référence de température :

1 Les références de température

Pour obtenir des références absolues de température, on utilise généralement des températures de changement d'état, car on sait qu'elles arrivent, pour les composés purs, à une température fixée (à pression bien définie). Ainsi on définit le degrés centigrade à partir des températures de fusion et d'ébullition de l'eau à pression ambiante au niveau de la mer.

L'idée reste bien sûr de prendre des expériences reproductibles afin que l'échelle soit utilisable et définie proprement. L'anti-exemple d'une échelle bien définie est le Fahrenheit, basé sur "0 c'est la température la plus froide de l'hiver 1708-1709 dans la ville de Dantzig, et 100 c'est la température dans la bouche d'un homme en bonne santé (ou du sang d'un cheval, ça marche aussi)".



Bain eau-glace



⊖ 1mn

Matériel : Glace, eau, cristalliseur, 3-4 thermomètres à alcool.

Montrer un bain d'eau et de glace, avec dedans plusieurs thermomètres.

Eau-Glace à l'ambiante, c'est 0C par définition.

Les thermomètres doivent tous indiquer 0 à peu près, ce qui permet de dire que les thermomètre qui sont là sont relatifs, et ont été étalonnés il y a fort fort longtemps.

Passons à une mesure absolue de température

2 Le tube de Kundt

⚡ FLTCLD

Correction 2017 C'est un thermomètre primaire effectivement utilisé pour la définition de l'échelle de température et il est basé sur un principe physique simple. Son défaut est qu'il ne permet pas d'illustrer la notion de point fixe. Le but ici est donc plutôt de montrer comment un principe physique peut permettre une mesure de température sans étalonnage. Il aurait alors été préférable de réaliser plusieurs mesures de célérité du son en préparation et de représenter $c^2 = f(T)$ afin de montrer la validité du modèle. Préférez utiliser des valeurs de M et de γ tirées d'un Handbook.

2.1 Principe

Le tube de Kundt est un exemple de *thermomètre primaire* car il se base sur une loi physique pour obtenir une température. Pour cela, il suffit de considérer l'air dans le tube de Kundt comme un GP et de supposer qu'on a des transformations isentropiques pour écrire

$$T = \frac{M}{\gamma R} c^2$$

Pour l'air, $M = 29$ g/mol et $\gamma = 1.4$ à 20°C.

2.2 Expérience

On veut mesurer c . Pour cela, on utilise le fait qu'on crée des ondes stationnaires dans le tube de Kundt. L'idée est donc de mesurer c en déterminant la longueur d'onde de l'onde stationnaire via le comptage des distances entre noeuds et ventres de pression.



Tube de Kundt

↗ Jolidon p258



Matériel :

- tube de Kundt
- GBF (+ ampli?)
- microphone
- oscilloscope
- thermocouple
- bain thermostaté
- casques anti-bruit

Thermaliser le tube de Kundt en préparation. On se place à une fréquence non encore explorée, et on place la tige de manière à repérer un maximum. Ensuite on joue sur la molette du GBF pour trouver l'amplitude maximale, ce qui signifie qu'on a trouvé une fréquence de résonance. Ensuite, se déplacer entre des maxima (c'est mieux qu'entre des minima pour la précision, à cause que nos ondes ne sont pas tout à fait planes), compter le nombre de DEMI-longueurs d'onde ainsi parcourues, mesurer la longueur parcourue sur la tige grâce aux petits traits de crayon préalablement tracés, et voilà. Tracer f en fonction de $\frac{1}{\lambda}$, la pente donne c la célérité du son, qui permet de remonter à T via la formule.

Remarque : le tube de Kundt agit comme un guide d'onde : il faut choisir une fréquence inférieure à 4 kHz environ pour avoir propagation. Il est préférable de repérer le maximum de noeuds et de ventres pour minimiser l'incertitude sur la mesure de la longueur d'onde : il faut alors choisir une petite longueur d'onde donc une grande fréquence.

Résultats expérimentaux : On trace la fréquence en fonction de l'inverse de la longueur d'onde, on obtient une droite de pente c . On détermine alors la température grâce à la première relation.

Incertitudes :

- Fréquence : 1 kHz ?
- Longueur d'onde : règle et imprécision sur la position de l'ordre de 1 cm

$$\left(\frac{u(T)}{T}\right)^2 = 4 \left(\frac{u(c)}{c}\right)^2$$

Incertitudes très importantes.

Thermocouple dans le tube qui donne la température dans le tube.

Pas besoin d'étalonnage, ce qui est pas mal mais peu pratique à mettre en place (on va pas s'amuser à faire propager une onde sonore et à la détecter quand on veut connaître la température du bain). Les thermomètres primaires permettent néanmoins de déterminer la température thermodynamique de points fixes, qui sont ensuite utilisés dans l'EIT-90. Une fois la température des points fixes connue, on peut alors étalonner les thermomètres secondaires tel que la sonde à résistance de platine.

3 Thermomètres secondaires

Comme déjà dit, un thermomètre secondaire ça s'étalonne, et c'est exactement ce que l'on va faire !

3.1 Sonde à résistance de platine

La sonde à résistance de platine fonctionne sur le principe de la variation de résistance du matériaux platine en fonction de la température. Pour l'étalonner on va utiliser des points fixes connus, à savoir la fusion de l'étain et du Gallium, la vaporisation et solidification de l'eau, et l'ébullition du diazote, le tout à l'ambiante.

La théorie

On se base sur le modèle de Drude Sommerfeld, et on modélise empiriquement la température par un modèle quadratique, $R = R_0(1 + bT + cT^2)$.

On a donc 3 paramètres à fixer, ce qui nécessite au minimum trois mesures pour étalonner.

Étalonnage de la résistance de platine

Matériel : Fluke en montage à 4 fils, résistance de platine, azote liquide (195.79°C), eau, bouilloire, alliages spécifiques, étain (231.9°C), chalumeau, creuset.

Mode opératoire :

Étalonner en préparation avec l'eau glacée et l'azote, et faire le point de l'étain devant le jury (ou permuter, oseb).

Modéliser par un quadratique.

Mesurer la température de l'eau bouillante à l'aide de la modélisation.

Discussion sur les incertitudes et les détails de montage

- **4 fils :** La résistance des appareils de mesure n'est pas négligeable. La résistance de ce capteur est de l'ordre de la centaine d'ohms. Afin de ne pas parasiter la mesure de résistance, nous utiliserons donc un montage 4 fils qui permet de s'affranchir de la résistance de l'appareil de mesure : on imposera un courant par une première voie et on mesurera la tension au borne du capteur par la seconde voie. Ce montage est également appelé montage courte-dérivation. On se débarrasse aussi de la résistance des soudures.
- **Problèmes de mesures :** Le montage fait chauffer la résistance, donc on fausse un peu la mesure. Il faut se placer à très faible intensité, genre 10mA.
- **Incertitudes :** Horribles. On a une bonne précision sur la mesure de résistance, par contre on a une précision archinulle sur les points de fusion du métal (surfusion) et d'ébullition de l'eau (homogénéité).

↓
Le thermomètre à résistance de platine est bien sympa, mais il coûte quand même assez cher (c'est du platine). On va donc le comparer à des thermomètres d'usage plus courant, comme les thermistances ou les thermocouples.

3.2 Thermistance et thermocouple

↗ Duffait p109, Thermomètre secondaire

Thermistance : sa résistance électrique dépend de la température. Par exemple, la thermistance CTN (coefficient de température négatif) est un oxyde métallique semi-conducteur dont la bande de conduction se peuple quand on augmente la température, il faut donc s'attendre à ce que la résistance diminue quand on chauffe, ce qui est effectivement le cas. En pratique, on cherche une régression de la forme :

$$R(T) = A \exp \frac{B}{T}$$

Thermocouple : constitué de deux soudure de deux types de métaux (par exemple le type T avec du cuivre et du constantan (=cuivre+nickel) ou le type K avec du nickel et du chrome) à des températures différentes, ce qui induit une ddp entre les deux soudures par effet Seebeck :

$$dU = -\epsilon dT$$

avec ϵ le coefficient Seebeck ou *pouvoir thermoélectrique* qui peut être positif ou négatif et est de l'ordre du $\mu\text{V}/\text{K}$.

On mesure la température par rapport à une température connue, comme par exemple un bain d'eau glacée. On a alors une réponse affine

$$U = (\epsilon_{\text{métal 1}} - \epsilon_{\text{métal 2}})(T - T_0) = aT + b$$

La température mesurée dépend donc de la nature des 2 conducteurs et de la température des jonctions. La jonction soumise à la température inconnue est appelée soudure chaude, celle maintenue à la température connue (souvent 0°C) est nommée soudure froide.

Remarque

On pourrait discuter leur réponse temporelle et la comparer à celle du thermomètre à dilatation, mais on ne va probablement pas le faire (on a essayé, et ce n'est pas simple, leur temps de réponse est beaucoup trop court par rapport au thermomètre à dilatation ou à la Pt100). C'est possible qualitativement, mais comme ça ne vaut rien, on ne va pas s'embêter à le faire.

Dans ce montage, on s'intéresse en revanche à leur sensibilité (ou leur coefficient de température) définie comme suit :

$$\alpha = \frac{1}{U} \frac{\partial U}{\partial T}$$

Elle exprime, en $^\circ\text{C}^{-1}$ ou K^{-1} , les variations relatives de la grandeur mesurée (tension U pour le thermocouple, résistance R pour la thermistance) lorsqu'on change la température. On constate qu'à température ambiante elles sont comparables, mais qu'à de plus hautes températures la thermistance est la plus sensible.

Étalonnage de thermocouples de type T (préparation)

☞ Duffait p109

⊖

Utiliser deux thermocouples de type T pour réaliser l'expérience présentée en figure 6.5 du Duffait. Dans ce cas, le métal 1 est du constantan (alliage de cuivre et de nickel). On utilisera le dispositif P102.12M. Mettre une des sondes dans un mélange eau-glace. Remplir d'eau un bécier, le disposer sur un agitateur chauffant P101.16. Y placer un barreau aimanté, la deuxième sonde, ainsi que le thermomètre à résistance de platine. Pour plusieurs températures entre 0°C et 60°C mesurées au moyen de la Pt100 P102.12 (et du ohmmètre 4-fils Fluke 8846A P69.35), mesurer la tension U correspondante au multimètre.

Tracer $U = f(T)$ et en déduire la sensibilité $s = \frac{\partial U}{\partial T}$ du thermocouple.

Incertitudes : • pour la température, cf notice de la sonde à résistance de platine ou les incertitudes obtenues précédemment • pour la tension, cf la notice du multimètre

Temps de réponse

☞

⊖

On place à $t=0$ la sonde de platine et le thermocouple dans l'eau bouillante en partant de l'eau gelée. On fait l'acquisition sur Latis-Pro, on modélise par $U(t) = U_\infty(1 - \exp(-\frac{t}{\tau}))$. On obtient les τ pour les deux capteurs et on voit que le thermocouple est plus rapide.

On peut faire cette manip à différentes températures en préparation et montrer que le temps de réponse dépend peu de la température.

4 Pyromètre optique

C'est un thermomètre primaire, puisqu'il mesure la densité spectrale du flux lumineux incident et en déduit la température. Nous pouvons l'utiliser pour vérifier la loi de Stefan : $\mathcal{P} = \sigma T^4$. On utilise pour cela une lampe Quartz-Iode dont on fait varier la puissance (on mesure ladite puissance $\mathcal{P} = UI$ avec un wattmètre), et on mesure la température avec le pyromètre. Évidemment, une fois que l'alignement est fait il faut fixer tout le montage pour éviter que le flux incident varie autrement que par variation de la puissance électrique en entrée. On trace en échelle log et on vérifie que la puissance varie comme $\mathcal{P} \propto T^4$.

Vérification de la loi de puissance du pyromètre



Matériel : QI que l'on puisse mesurer avec un Wattmètre, pyromètre.
Fixer les deux appareils, et tracer P en fonction de T .
Pro tip : tracer en log.

Remarques Utiles

- **Ce que l'on vérifie :** On vérifie que la mesure est correcte et qu'on retrouve la loi de Stefan $\mathcal{P} \propto T^4$, mais on ne vérifie pas la loi de Stefan, car c'est la base de la mesure.
- **Constante de Stefan :** On ne peut pas la mesurer ainsi, car on ne sait pas quelle quantité de flux arrive sur le pyromètre.
- **Choix de la QI :** Certaines lampes Quartz-Iode ont un support avec une molette pour faire varier l'intensité lumineuse. Il semblerait qu'il vaille mieux éviter de s'en servir et prendre un générateur de puissance qu'on branche directement sur la lampe. Cette astuce présente un double avantage : d'une part, on évite de faire claquer l'alimentation à l'intérieur du support (je dis ça au hasard, ça ne nous est évidemment pas arrivé) ; d'autre part, on peut fixer la QI à une puissance, ce qui est infiniment plus pratique que de la laisser sur son socle.

5 Caméra infrarouge (qualitatif)

Le principe de la caméra IR repose sur le modèle du rayonnement de corps noir. Elle mesure le flux d'infrarouges émis par un corps et à l'aide de la loi de Stefan permet de remonter à la température de ce corps.



Caméra IR :

Comparer au pyromètre optique, mesurer des températures.