

MP05 - Mesures de température

Clément (de la Salle et Colléaux)

3 avril 2020

Niveau : TS

Bibliographie

- ✦ Jolidon tube de Kundt
- ✦ Quaranta II résistance de platine et thermistance à "Thermométrie"
- ✦ Duffait d'élec Pour les expériences de thermocouple
- ✦ *Thermoélectricité : des principes aux applications*, Leblois Théorie de l'effet SEEBECK
- ✦ *Thermodynamique*, Perez approche un peu rapide mais il fait tout (dont le pyromètre) **Les capteurs en instrumentation industrielle**, Ash

- ✦ à lire pour un montage de métrologie

Prérequis

-
-
-

Expériences

- ☞
- ☞

Table des matières

Table des matières	1
1 Thermomètres primaires	2
1.1 Tube de Kundt	2
2 Thermomètres secondaires	4
2.1 Thermomètre à résistance de platine	4
2.2 Thermocouple	5
2.3 Thermistance (si étude du temps de réponse pas possible)	7

Intro

C'est vachement utile de mesurer des températures, que ce soit dans un quotidien scientifique ou dans un quotidien classique (l'eau des pâtes... MDR tu mesures la température de tes pâtes ? :D)! Mais cette mesure est souvent compliquée (ex ?) et c'est pour cela qu'a été créée en 1990 l'EIT90. Il s'agit de l'Échelle Internationale de Température qui est une norme construite pour permettre des mesures de températures aussi proches que possible de la température absolue.

Dans cet objectif, les échelles Kelvin et Celsius sont respectivement définies à partir du zéro absolu et du point triple de l'eau. De manière générale les **points fixes** (événements dont la température est considérée comme constante et peuvent donc servir de référence : points triples, points de fusion..) sont les points de départ de cette norme.

Mais il faut bien des thermomètres pour les déterminer ces températures de point fixe ! C'est le rôle des thermomètres primaires

1 Thermomètres primaires

Définition : Thermomètre primaire

Un thermomètre primaire est un système qui peut déterminer une température de manière absolue, indépendante d'une référence. Ceci est possible grâce à l'utilisation d'un modèle physique qui fait explicitement intervenir la température.

On peut citer par exemple la dépendance de la vitesse du son en T . Tiens quelle coïncidence c'est notre première expérience !

1.1 Tube de Kundt

🔗 Jolidon

L'exemple de thermomètre primaire auquel nous allons nous intéresser est en effet un thermomètre acoustique. Il repose sur la mesure de la célérité du son c_s dans un système résonateur, célérité que nous savons reliée à la température, **pour un gaz parfait** et des **transformations isentropiques**, par

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

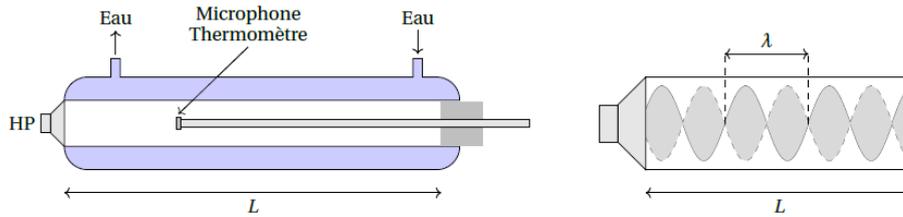
avec R la constante des gaz parfaits, M la masse molaire du gaz utilisé et γ le facteur isentropique du gaz.

Ainsi, si on parvient à déterminer la célérité du son dans un gaz supposé parfait nous aurons alors la mesure de la température, et ce **indépendamment de toute référence**.

But

Vérifier la loi donnant $c_s(T)$ pour le gaz dans le tube pour prouver la pertinence du thermomètre.

Pour déterminer la célérité du son dans l'air on va utiliser un système résonateur : un tube de Kundt. Un tube de Kundt est un tuyau de section circulaire et rempli d'air. Il est thermalisé par un bain thermostaté sur ses bords pour assurer une température constante.



À une de ses extrémités, un haut-parleur commandé par un GBF envoie une onde acoustique qui se propage dans l'air du tube et se réfléchit partiellement sur l'autre extrémité. Cette condition aux limites est donc responsable d'ondes stationnaires à l'intérieur du tube, superpositions d'ondes progressives. Les longueurs d'ondes possibles λ_n ne sont donc déterminées que par la longueur L du tube : $\lambda_n = \frac{2L}{n}$. Un microphone mobile permet de mesurer la surpression acoustique à un endroit du tube et permet alors, relié à un oscillo, de visualiser les ventres et noeuds de l'onde stationnaire.

Nous savons que la célérité du son dans l'air est reliée à sa fréquence f et sa longueur d'onde λ par

$$c_s = \lambda f$$

équation qui est la traduction de la relation de dispersion de l'équation de d'Alembert.

Pour mesurer la célérité, il suffit donc de mesurer la fréquence de l'onde et sa longueur d'onde :

- f : la fréquence de l'onde créée par le GBF est évidemment mesurée au fréquencemètre ou à l'oscillo mais on ne fait pas confiance au GBF sur la fréquence qu'il affiche
- λ : la longueur d'onde l'onde est obtenue en mesurant, avec le micro mobile, la distance entre deux noeuds ou deux ventres de l'onde stationnaire que l'on sait séparés de $\lambda/2$.

Expérience : Vérification de la loi $c_s(T)$

⚡ TP, Jolidon p.528

🔍 ?

- On commence par thermaliser le tube de Kundt et son bain thermostaté, ce qui peut prendre du temps.
- Imposer au GBF une fréquence $f \simeq 3$ kHz mesurée au fréquencemètre. ⚡ *Jolidon, p534* Il ne faut pas choisir une fréquence trop grande car le tube est un guide d'onde et il faut s'assurer que la fréquence d'excitation est inférieure à la fréquence de coupure des modes guidés excités, ici ~ 4 kHz.
- Ajuster f finement pour être à une résonance avec la méthode de Lissajous effectuée avec le signal du microphone et celui du GBF
- Mesurer λ : en déplaçant le microphone, repérer un nombre m de minima successifs x_i d'amplitude de l'onde stationnaire, minima séparés de $\lambda/2$. En déduire $\lambda = 2 \frac{x_{i+m} - x_i}{m}$. Cette mesure est la principale source d'incertitude et doit être réalisée avec le plus grand soin, en faisant des marques sur la tige du micro.
- Répéter l'expérience en faisant varier, au choix, T ou f et tracer $c_s^2(T, f)$ pour vérifier la relation linéaire attendue.

On espère avoir montré avec cet exemple le principe d'un thermomètre primaire. Ces thermomètres sont principalement utilisés pour déterminer des points fixes (évoqués en intro), pour mesurer des températures au labo entre ces points fixes on préférera une autre famille de thermomètres, les thermomètres secondaires.

Autres thermomètres primaires

On peut aussi citer comme thermomètres primaires :

- Le thermomètre à gaz : on se sert de la mesure de la pression d'un gaz pour

accéder à sa température

$$pV = nRT + (V_v - V_0)p$$

- Le thermomètre à rayonnement : utilise la mesure du rayonnement dans tout le domaine spectral et la loi de STEFAN

$$P = \sigma T^4$$

Celui-ci a le bon goût de pouvoir donner une valeur de température à distance !

2 Thermomètres secondaires

Définition : Thermomètres secondaires

Les **thermomètres secondaires** ne sont pas capables de réaliser une mesure directe de la température : ils dépendent d'une échelle de température et nécessitent un étalonnage.

Le thermomètre secondaire utilisé par l'EIT90 pour déterminer des températures entre des points fixes sur une plage de températures de 13.8 à 1035 K est le thermomètre à résistance de platine.

2.1 Thermomètre à résistance de platine

✦ *Quaranta II, "Thermométrie"*

Le thermomètre à résistance de platine est un thermomètre pour lequel la température peut être déduite de la mesure de la résistance électrique d'un fil de platine (cf modèle de Drude-Sommerfeld avec $R = R(T)$). Le platine a été choisi pour sa grande pureté et ses caractéristiques électriques stables.

Des équations, des équations ! Bon d'accord. Dans le domaine de température entre 0 °C et 850 °C, la variation de R avec T s'écrit :

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

avec T en degrés, c'est la loi de Callendar-Van Dusen. Les valeurs des coefficients a et b ont été déterminés grâce aux points fixes de définition et sont désormais définis par l'EIT90.

Pour les résistances pré-étalonnées comme celle que l'on va utiliser, $R_0 = 100 \Omega$. Cette résistante est donc nommée PT100 pour laquelle :

$$a = 3,90802 \times 10^{-2} \text{ C}^{-1} \quad b = -5,775 \times 10^{-7} \text{ C}^{-2}$$

But

Étalonner un thermomètre PT100

On l'a compris, la mesure précise de T passe par une mesure précise de R ce qui impose des précautions expérimentales :

- utilisation d'un Ohmmètre 4-fils pour avoir la plus grande précision possible en supprimant la résistance des câbles

- l'utilisation de courants faibles ($i \simeq 10 \text{ mA}$) permet d'éviter l'échauffement du fil par effet Joule qui perturberait la mesure de T . On fait confiance au Fluke qui est généralement un allié fiable!

Expérience : Étalonnage de la résistance PT100

➤ Quaranta II, Perez, notice Fluke

☹ ?

- Préparer les 3 points fixes : fusion de l'étain (et du gallium si on est des oufs, agiter ne sert à rien), fusion de l'eau (juste pas coller la sonde à un glaçon) et ébullition de l'eau (agiter au maximum pour homogénéiser la température au maximum)
- Mesurer la résistance avec une Fluke en mode Ohmmètre 4 fils
- Ne pas chercher à avoir une précision de 14 chiffres après la virgule vu qu'on est incapable de déterminer clairement quand y a le plateau (utiliser la fonction mémoire du Fluke pour faciliter l'identification du plateau, cf notice)
- Tracer $R(T)$ et modéliser la magnifique courbe à trois points obtenue par un polynôme (on peut montrer que le terme quadratique est négligeable)
- Faire une mesure de température mais la comparer à quoi ?

2.2 Thermocouple

But

Étalonner un thermocouple et étudier son temps de réponse

➤ Duffait p.109

Le principe est simple et se base sur l'effet SEEBECK (théorie dans ➤ *Leblois* ou version de DRUDE (fautive d'un facteur 100 encore lui!) dans ➤ *Ashcroft p.29*). Lorsque l'on soumet un conducteur à un gradient de température, il apparaît un champ **thermoélectrique** :

$$\mathbf{E} = Q \text{ grad } T$$

Où Q est le pouvoir thermoélectrique propre au matériau.

D'où une différence de potentiel :

$$U = -Q\Delta T$$

On peut alors imaginer simplement le montage suivant :

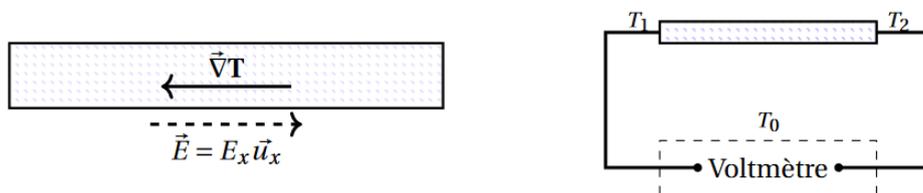


FIGURE 2.1 – On envisage le montage représenté

Alors la tension se calcule avec les pouvoirs thermoélastiques du matériau utilisé Q_0 mais aussi du cuivre constituant les câbles!

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

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

Ainsi, on peut étalonner le thermocouple et ensuite mesurer des températures. Par contre, on ne pourra pas remonter simplement avec ce montage aux pouvoirs thermoélectriques !

L'idée est donc de se servir d'une valeur de température de référence pour l'étalonnage :

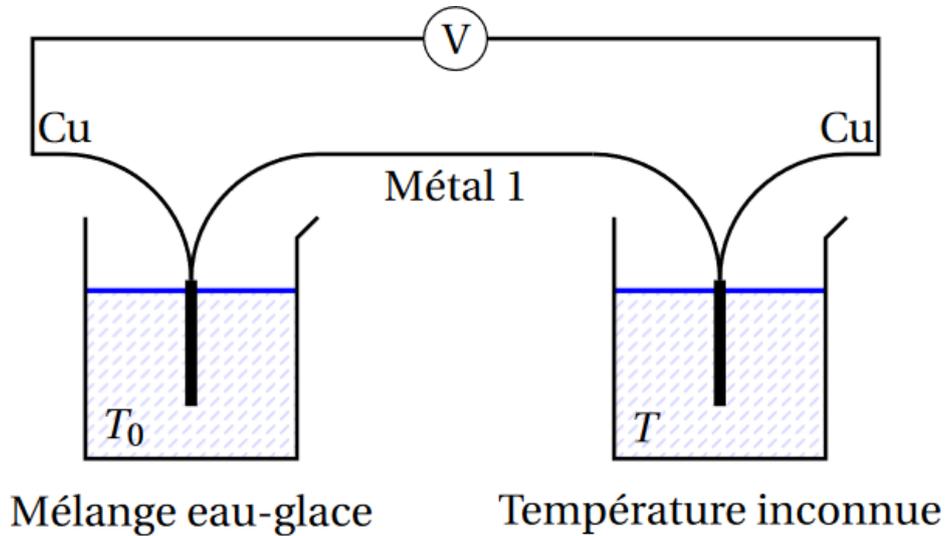


FIGURE 2.2 – Montage du thermocouple

On appelle **soudure chaude**, la jonction soumise à la température inconnue et **soudure froide** celle dans le bain eau-glace.

Expérience : Linéarité du thermocouple

➤ Duffait p.109 paraît-il

⊖ 5 min

Le thermocouple utilisé est en constantan (alliage cuivre - nickel). Le bécier à température inconnue est chauffé et agité par un agitateur magnétique. Étalonner le thermocouple et donner sa sensibilité relative :

$$s = \frac{1}{U(T_0)} \left. \frac{\partial U}{\partial T} \right|_{T_0}$$

Évidemment, on utilise un voltmètre pour mesurer la tension. La température peut-être mesurée avec la résistance de platine précédemment constituée !

Ensuite on peut étudier sa réponse temporelle :

Expérience : Temps de réponse du thermocouple

➤ Duffait ?

⊖ 5 min

Placer les deux soldures dans un bain eau-glace. Plonger rapidement l'une des deux dans un bain chauffé et agité. On suppose une évolution exponentielle :

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

On se démerde pour mesurer τ (fit LatisPro, où temps à 63% de la valeur finale sur oscillo)

Difficile

Comme il paraît que c'est chaud à mettre en oeuvre (temps vraiment très court), on peut étudier les thermistances à la fin...

Avantages

Le temps de réponse est très faible, le thermocouple délivre directement une tension et en plus les soudures sont peu étendues donc on mesure ponctuellement la température.

2.3 Thermistance (si étude du temps de réponse pas possible)

But

Vérifier la loi d'évolution de la résistance et étalonnage... Bon ça ressemble beaucoup au platine ^^ . Ce qui peut-être plus intéressant à la limite, c'est l'étude de l'auto-échauffement.

☞ Duffait p.110

Il s'agit de matériau semi-conducteurs dont la résistance évolue comme :

$$R(T) = R_0 e^{B/T}$$

Ce capteur est hautement non-linéaire et son **coefficient de température** (sensibilité relative) est alors :

$$\alpha(T) = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2}$$

Expérience : Étalonnage

☞ Duffait p.110

⊖ 5 min

Blablabla on fout la thermistance dans un bécher chauffé et agité et patati et patatata. Petite régression des familles. Pareil, on récupère la température au platine et la résistance au Ohmmètre (pas besoin du 4 fils).

Un des défauts de ce capteur est l'auto-échauffement : l'intensité du courant doit être pas trop élevée sinon le matériau chauffe (effet JOULE) et la température mesurée est faussée. ☞ Duffait

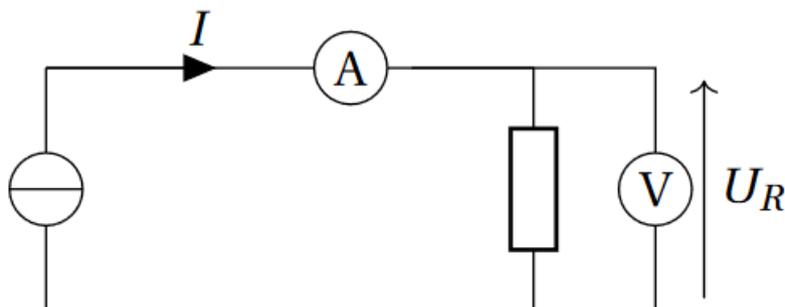


FIGURE 2.3 – Montage pour l'étude de l'auto-échauffement

Expérience : Étude de la l'auto-échauffement

✍ Duffait

⊖ 5 min

Utiliser une thermistance de faible résistance pour cette étude (gros courants!) genre 1.9Ω P102.13 ou 4.7Ω 102.12F. Utiliser une alimentation continue en générateur de courant. Mesurer la tension pour des courants imposés de 0 à 500 mA et tracer $R = U/I$ en fonction de $P = UI...$

Cet effet induit une erreur systématique dans les mesures précédemment menées. On peut vérifier qu'elle est négligeable.

Pyromètre