

# MP05 – MESURES DE TEMPÉRATURE

6 février 2015

« Eh les filles, vous trouvez pas qu'il fait un peu chaud ? »

Anis SENOUSSE & Luc LAURO

LOUIS JOSEPH GAY-LUSSAC

## Commentaires du jury

**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.

ANCIEN TITRE : ÉCHELLES ET MESURES DE TEMPÉRATURE

**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.

ANCIEN TITRE : THERMOMÉTRIE

**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.

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

## Bibliographie

- ♣ *Dictionnaire de la physique expérimentale, tome II* : → Expliciter si besoin l'intérêt du livre dans la leçon et pour quelles parties il est utile.  
*Thermodynamique, Quaranta*
- ♣ *Les capteurs en instrumentation industrielle, Asch* → Pour les questions sur les capteurs
- ♣ *Thermodynamique, Pérez* → Ça fait (presque) jamais de mal ! (p 392)
- ♣ *CAPES de Sciences Physiques, 3ème édition, Duffait* → Sensibilité des capteurs (p 145), mesures de résistance (p 46) et tube de Kundt (p 288, mais c'est presque vide...).
  
- ♣ *Fiche technique P102 de la Pt100* → Pour avoir les coefficients de la thermo-résistance de platine.

## Expériences

- ♣ Mesure de température via le Tube de Kundt
- ♣ Calibration de la résistance de platine à l'aide de points fixes
- ♣ Sensibilité de la CTN et du TC
- ♣ Influence de la température sur le temps de réponse du TC
- ♣ Influence du conditionnement sur le temps de réponse du TC

## Table des matières

|          |                                                                              |          |
|----------|------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>Thermomètre primaire acoustique : le tube de Kundt</b>                    | <b>3</b> |
| <b>2</b> | <b>Thermomètre secondaire de référence : la thermo-résistance de platine</b> | <b>4</b> |
| 2.1      | Présentation de la Pt100 et problèmes de la mesure . . . . .                 | 4        |
| 2.2      | Points fixes et calibration . . . . .                                        | 4        |
| <b>3</b> | <b>Caractéristiques de capteurs de température</b>                           | <b>5</b> |
| 3.1      | Sensibilité . . . . .                                                        | 5        |
| 3.2      | Temps de réponse . . . . .                                                   | 5        |

## Introduction

La température est une grandeur intensive qui caractérise l'agitation microscopique des corps. L'établissement de cette notion de température a longtemps posé problème, puisque les notions de chaleur et de température mirent du temps à être discernées. Une fois cette distinction faite, il a fallu définir une (des) échelle(s) de température, en se basant sur l'utilisation de phénomènes ayant lieu à température fixée (point triple de l'eau par exemple) : les **points fixes**, repérés à l'aide de systèmes dont les propriétés dépendent de la température : les capteurs de température.

### Illustration d'un capteur de température

Matériel : Un thermomètre à alcool et de l'eau très chaude dans un récipient quelconque.  
On montre juste qu'une propriété du capteur (le volume d'alcool) dépend de la température.

Le montage présenté aujourd'hui consistera en l'étude de ces capteurs de température. Nous présenterons dans un premier temps l'étude d'un **thermomètre primaire** (dont on a un modèle analytique parfaitement connu de la variation de ses propriétés en fonction de la température) : le tube de Kundt. Dans un second temps, nous étudierons le comportement d'un thermomètre secondaire de référence que l'on calibrera à l'aide de différents points fixes : la résistance de platine. Enfin, nous étudierons le comportement d'autres thermomètres en fonction de la température en s'attardant sur certaines caractéristiques : temps de réponse, sensibilité, linéarité.

## 1 Thermomètre primaire acoustique : le tube de Kundt

🔗 Fiche « Tube de Kundt » du classeur de manips à lire avant les oraux, mais pas de biblio spécifique disponible le jour J (si ce n'est le Duffait p 288, presque vide...).

Le principe de ce thermomètre repose sur la variation de la vitesse du son dans l'air  $c_{air}$  avec la température. Si l'on considère l'air comme un gaz parfait, et dans l'hypothèse des compressions et détentes isentropiques, on obtient le modèle :

$$c_{air}^2 = \frac{\gamma RT}{M_{air}}$$

avec  $\gamma = 1,4$  pour un gaz parfait diatomique,  $M_{air} = 28,97 \text{ g/mol}$  la masse molaire de l'air,  $R = 8,314 \text{ J/mol/K}$  la constante des gaz parfaits et T la température en Kelvin.

### Mesure de température via le Tube de Kundt

🔗 Fiche « Tube de Kundt » du classeur de manips ☹ 5 min

Le but de la manip est de remonter à T à partir de plusieurs mesures (dont certaines faites en préparation) de la vitesse du son dans l'air à fréquences d'excitation données.

- On travaillera à T donnée, fixée grâce au thermostat d'eau allumé bien en avance ;
- On se place à une fréquence  $f$  de résonance (repérée en faisant défiler les fréquences sur le GBF d'alimentation) ;
- On mesure la longueur d'onde de l'onde stationnaire acoustique obtenue, en déplaçant le micro (fixé sur une tige et relié à un oscilloscope) entre le maximum de ventres de pression possible (la distance entre deux ventres étant de  $\lambda/2$ ) ;
- On reporte les valeurs de  $f$  (donnée par le GBF) et de  $\lambda$  sur Regressi ;
- On aura pris en préparation quelques autres points pour des fréquences d'excitation différentes ;
- On a  $c_{air} = \lambda f$ . On trace donc  $\lambda^2$  en fonction de  $1/f^2$  et on fait une régression linéaire. On obtient le coefficient directeur de la droite qui doit correspondre à  $\frac{\gamma RT}{M_{air}}$ . On en déduit T (en Kelvin).

On pourra comparer à la valeur donnée par le thermocouple également fixé sur la tige. Son fonctionnement sera détaillé dans la troisième partie.

↓ *L'utilisation de thermomètres primaires peut ainsi permettre de mesurer des températures à l'aide d'un modèle. En particulier, ces thermomètres peuvent permettre de repérer des points fixes, qui jouent un rôle important en thermométrie, à la fois dans l'établissement des échelles de température, mais également dans la calibration de thermomètres secondaires, comme le thermomètre secondaire de référence que constitue la résistance de platine.*

## 2 Thermomètre secondaire de référence : la thermo-résistance de platine

Le thermomètre à résistance de platine est un thermomètre de référence entre 13,8033 K (point triple du dihydrogène) et 1 234,93 K (solidification de l'argent). Nous allons étudier ici la calibration de ce thermomètre secondaire à partir de points fixes dont les températures ont été mesurées à l'aide de thermomètres primaires.

### 2.1 Présentation de la Pt100 et problèmes de la mesure

Le thermomètre à résistance de platine est une thermo-résistance : c'est un résisteur métallique dont la résistance augmente avec la température (le nombre de chocs des électrons dans le métal augmente avec la température). Ce résisteur est placé dans une gaine en aluminium. On montre le beau joujou à l'audience.

Nous proposons dans la suite de mesurer la résistance d'un capteur à résistance de platine pour certaines valeurs de température correspondant à des points fixes. Nous sommes alors face à deux problèmes de mesure de résistance :

- 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.
- Le courant utilisé pour mesurer la résistance chauffe la résistance par effet Joule, et fausse donc la mesure. Afin de ne pas perturber quantitativement la mesure, on doit donc travailler à faibles courants (en pratique,  $i < 100$  mA).

On utilisera un appareil adapté à la mesure de faibles résistances en montage 4 fils pour s'affranchir de ces différents problèmes de mesure potentiels.

### 2.2 Points fixes et calibration

On va donc calibrer le capteur à partir de points fixes :

- l'azote liquide en équilibre avec sa vapeur ( $T = -195,79^\circ\text{C}$  à  $P_{atm}$ )
- l'eau liquide en équilibre avec la glace ( $T = 0^\circ\text{C}$  à  $P_{atm}$ )
- l'eau liquide portée à ébullition ( $T = 100^\circ\text{C}$  à  $P_{atm}$ )

#### Calibration de la résistance de platine à l'aide de points fixes

🔗 Pas de biblio spécifique

⌚ 5 min

Le but de la manip est de calibrer la résistance de platine à l'aide des trois points fixes évoqués plus haut.

- On utilise pour cela le FLUKE en mode  $\Omega$ , qui dispose d'une méthode de mesure à 4 fils : deux bornes INPUT constituent la voie d'alimentation du résisteur et deux bornes SENSE constituent la voie de mesure. On branche ces 4 fils sur le montage 4 fils intégré disponible pour la résistance de platine. Ce montage nous donne directement la valeur de la résistance au borne du capteur.
- On trempe successivement le capteur dans l'azote liquide, le mélange eau-glace puis l'eau bouillante (grâce à notre fantastique bouilloire à couvercle non sécurisé), et on note la valeur de la résistance en fonction des températures tabulées (en degrés Celsius).
- On modélise d'abord la résistance  $R(T)$  par un modèle affine  $R = R_0(1 + bT)$ , que l'on utilisera dans la troisième partie du montage.
- On modélise ensuite  $R(T)$  par un modèle quadratique  $R = R_0(1 + b'T + c'T^2)$  afin de retrouver les coefficients donnés par le constructeur, à savoir  $R_0 = 100 \Omega$ ,  $b' = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  et  $c' = -5,8 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$ . On calcule ensuite l'écart à la linéarité  $c'/b' = 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , soit un écart inférieur à 2% sur la gamme de température qui sera envisagée par la suite (eau liquide  $\rightarrow$  de  $0^\circ\text{C}$  à  $100^\circ\text{C}$ ). Cela justifiera donc l'emploi du modèle affine par la suite.

Bien que nous nous contenterons du modèle affine dans la suite, la linéarité de ce capteur n'est pas optimale pour certaines applications métrologiques. Cependant, le fait que le platine soit inerte chimiquement rend le thermomètre à résistance de platine particulièrement intéressant. Il est d'ailleurs considéré comme thermomètre de référence entre 13,8033 K et 1 234,93 K.

↓ Dans la pratique, tout comme la linéarité ou la réactivité chimique, certaines caractéristiques des capteurs de température sont essentielles au choix d'un capteur par rapport à un autre. Nous allons désormais nous attacher à présenter certaines d'entre elles.

### 3 Caractéristiques de capteurs de température

Nous allons étudier ici certaines caractéristiques de thermomètres secondaires fonctionnant via des effets thermo-électriques, à savoir :

- Une **thermistance à coefficient de température négatif** (CTN), constituée d'oxydes métalliques semi-conducteurs, qui voit sa résistance diminuer lorsque la température augmente (la densité de porteurs dans le semi-conducteur augmente avec la température).
- Un **thermocouple** (TC), qui fonctionne selon l'effet Seebeck (la différence des niveaux de Fermi entre deux métaux différents portés à des températures différentes entraîne une ddp).

Pour étudier leur comportement en fonction de la température, on utilisera la calibration faite sur la résistance de platine

#### 3.1 Sensibilité

##### Sensibilité de la CTN et du TC

↗ Duffait p 145 et Quaranta p 441

⌚ 5 min

Le but de la manip est de comparer les sensibilités de deux capteurs de température : la CTN et le TC.

- En préparation, on mesure simultanément la résistance  $R(T)$  de la CTN et la ddp  $U(T)$  aux bornes du TC pour différentes températures d'un bain thermostaté (entre  $0^\circ C$  et  $90^\circ C$ ) dans lequel ils plongent. La température  $T$  du bain thermostaté est mesurée via la résistance de platine calibrée au préalable.
- Pour la CTN, les variations de résistance sur la plage de température envisagée étant de l'ordre du kiloohm, on n'utilisera pas de montage 4 fils mais directement un ohmmètre. On peut modéliser  $R(T)$  par une exponentielle :  $R = A \exp(B/T)$ . Dans la pratique, on tracera  $\ln(R)$  en fonction de  $1/T$ . Une régression linéaire nous permet de remonter à  $A$  et  $B$ . On peut alors estimer la sensibilité relative de la CTN :

$$s_{CTN} = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2} \text{ (que l'on exprimera en } \%/^\circ C \text{)}.$$

- Pour le TC, on utilise celui à trois fils (verts) qui est le plus pratique à utiliser. Un des deux métaux est placé dans un mélange eau-glace tandis que l'autre est placé dans le bain thermostaté. On utilise le nanovoltmètre KEITHLEY pour mesurer la  $U(T)$ . On peut modéliser  $U(T)$  par une régression linéaire donnant  $U(T) = aT + b$ . La sensibilité relative du TC vaut alors :

$$s_{TC} = \frac{1}{U} \frac{dU}{dT} = \frac{a}{aT + b} \text{ (que l'on exprimera en } \%/^\circ C \text{)}.$$

- On évalue  $s_{TC}$  et  $s_{CTN}$  et à  $0^\circ C$  et à  $100^\circ C$  et on compare les deux sensibilités.

#### 3.2 Temps de réponse

On va s'attarder à un capteur en particulier, le TC, et regarder son temps de réponse à 90%.

#### Influence de l'échelon de température

### Influence de la température sur le temps de réponse

⚡ Pas de biblio spécifique

⌚ 5 min

On va soumettre le TC à différents échelons de température et mesurer son temps de réponse à 90%.

- Afin de mesurer l'évolution de la tension aux bornes du TC en fonction du temps, on va utiliser la sortie arrière du KEITHLEY qui ajoute un gain de 100 au signal pour que celui-ci puisse être acquis sans bruit via Synchronie.
- Pour différents échelons de température, on mesure le temps de réponse à 90%. On remarque que plus l'échelon de température est important, plus le temps de réponse est court.

## Influence du conditionnement



### Influence du conditionnement sur le temps de réponse

⚡ Pas de biblio spécifique

⌚ 5 min

On souhaite désormais regarder l'influence du conditionnement sur le temps de réponse.

- On utilise le même dispositif que pour l'expérience précédente.
- On regarde le temps de réponse du TC avec ou sans gaine supplémentaire d'aluminium. Le temps de réponse augmente très nettement avec une gaine supplémentaire.

On peut donner en comparaison les temps de réponse estimés des autres capteurs à disposition.

## Conclusion

- On a pu voir dans ce montage différents type de capteurs de température : primaires et secondaires.
- On a étudié un thermomètre de référence, calibré à partir de points fixes.
- On a pu voir différentes caractéristiques d'un capteur (sensibilité, linéarité, temps de réponse) ainsi que l'influence de certains paramètres sur le temps de réponse d'un capteur.

### Ouverture : pyromètre optique

#### Remarques

J'ai eu de petits problèmes de préparation qui ont fait que je n'ai pas eu les données nécessaires pour mon passage le jour J. Malgré le fait que je n'aie pas tenu le temps lors de mon passage à l'oral pour ces raisons principalement (ainsi que ma fâcheuse tendance à traîner...), je reste persuadé que ce montage peut tenir dans les temps (cf remarques des correcteurs). Le pyromètre optique a été occulté dans mon plan, principalement pour des soucis techniques sus-mentionnés, mais il aurait été judicieux de l'y intégrer au vu des commentaires du jury.