

# MP05 - Mesure de température

6 février 2017 - Présenté par Corentin GOURICHON

Correction : S. LEROY<sup>1</sup>, C.-E. LECOMTE<sup>2</sup>

Le présent compte-rendu a pour but de résumer et compléter la discussion qui a suivi la présentation du montage en classe. Bien entendu, il est partiel et partial, et n'est qu'un point de vue qui n'engage que son auteur. Rappelons que c'est vous qui présenterez les montages en fin d'année, et que c'est donc à vous de décider de ce que vous voulez en faire.

## Rapport du jury

Je résume ici les attentes du jury pour ce montage spécifiquement, extraite des rapports du jury des années précédentes. Ceux-ci sont compilés dans le Book 2017.

*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 infrarouge.*

*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.*

*Lors de l'utilisation de thermocouples, il faut en connaître le principe, la température de référence, et le domaine de validité.*

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

*Ce montage ne peut pas se résumer à une simple comparaison de capteurs. La notion d'échelle de température doit être dégagée. Le jury rappelle le statut particulier des thermomètres de référence (thermomètre à gaz et résistance de platine) et des points fixes.*

*Deux types de thermistances existent, dénommées CTP lorsque la résistance augmente avec la température, et CTN dans le cas contraire. Certains candidats ont fait des confusions à ce sujet. Dans le cas des CTN à semi-conducteur, il convient d'explorer une gamme de températures suffisamment large si l'on veut vérifier la relation  $R_g = R_0 \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right)$ . Sur l'étendue 20–50 °C, la courbe donnant  $R_g(T)$  peut tout à fait s'avérer aussi proche d'une droite que la courbe donnant  $\log(R_g) = f(1/T)$ .*

## Remarques générales

### 1 Commentaires sur le montage

Le montage qui a été présenté était correct et a été préparé avec sérieux. Le tableau est globalement bien tenu. Cependant, il manquait de rigueur dans la réalisation des expériences. Le discours était globalement efficace mais les expériences l'accompagnant étaient souvent peu convaincantes. La gestion du temps est globalement correcte mais veillez à ne pas dépasser : le jury vous coupera si vous n'avez pas commencé votre conclusion aux 40 minutes.

Il faut également commenter plus en détails les manipulations, détailler les précautions que vous prenez lors du montage (par exemple laisser la tige du micro dans le tube pour ne pas la refroidir).

Les manipulations choisies sont globalement pertinentes et ont leur place dans ce montage. Elles permettent l'illustration des idées fortes attendues pour ce montage. Par contre, la progression et l'objectif choisi pour le montage n'est pas pertinent (voir ci-dessous).

Pour un montage dont l'enjeu est métrologique, ce qui est ici manifestement le cas, le jury attend une présentation de techniques de mesures variées et exécutées avec soin et avec la meilleure précision possible. Il n'est pas acceptable de présenter des mesures de températures ambiantes avec une incertitude de 40 °C sur celles-ci. Veillez également à écrire les température mesurées et les valeurs attendues dans la même unité (choisir entre K ou °C).

Les incertitudes visent à établir un intervalle de confiance autour de la mesure, dont on peut estimer la probabilité qu'il contienne la valeur vraie. Il ne faut pas réaliser grossièrement une expérience, puis gonfler les incertitudes pour que la valeur attendue soit contenue dans les barres d'erreurs. Ici, le montage est à visée métrologique, chaque incertitude doit être correctement et rigoureusement justifiée, et on veillera à utiliser préférentiellement un **appareil de mesure** : multimètre, fréquence-mètre, etc. et consulter l'incertitude dans la notice des appareils : elle est souvent la somme d'une fraction de la mesure et d'une valeur constante. Il faut également être en mesure de justifier le traitement qu'en fait le logiciel.

De façon générale pour un montage, toujours préparer un thermomètre, un mètre ruban, quelques fils et câbles coaxiaux au cas où vous auriez oublié du matériel.

Je conseille toujours à tous la lecture du rapport du jury<sup>3</sup> sur le montage de physique de 2016, qui est complet sur les attentes du jury sur cette épreuve. Prenez le temps de le lire plusieurs fois au cours de l'année, surtout les **conseils généraux pour le montage**.

1. samuel.leroy@ens-lyon.fr

2. charlesedouard.lecomte@ens-lyon.fr <http://perso.ens-lyon.fr/charlesedouard.lecomte>

3. À l'adresse [http://media.devenirenseignant.gouv.fr/file/externe/63/7/rj-2016-agregation-externe-physique-chimie-physique\\_609637.pdf](http://media.devenirenseignant.gouv.fr/file/externe/63/7/rj-2016-agregation-externe-physique-chimie-physique_609637.pdf)

## 2 Quelques conseils

Le montage vise à présenter plusieurs techniques de mesures de températures et donc différents capteurs de température. On peut utiliser la partie sur la thermométrie secondaire pour définir et illustrer les différentes caractéristiques de capteurs :

- capteurs actifs (thermocouple) et passifs (thermistance, sonde de Pt) ;
- conditionnement d'un capteur passif (mesure 4-fils pour une sonde de Platine par exemple) ;
- linéarité ;
- sensibilité (quotient de la variation de la grandeur de sortie par la variation correspondante de celle d'entrée) ;
- rapidité (définition et mesure d'un temps de réponse ou d'une bande passante) ;
- fidélité (peu d'erreurs aléatoires) ;
- justesse (peu d'erreurs systématiques) ;
- résolution (plus petite variation de grandeur que le capteur est capable de mettre en évidence) ;
- finesse (qualité du capteur de ne pas modifier la valeur du mesurande par sa présence) : c'est une grandeur particulièrement importante en thermométrie.

Il est possible de faire un choix parmi ces caractéristiques, mais il faut à tout prix illustrer plusieurs de ces caractéristiques et connaître les définitions de toutes. Elles sont compilées de façon concise dans l'article des Techniques de l'ingénieur sur les Capteurs [3] ou dans le Asch [2].

Il est également important de souligner les spécificités à la mesure de température par rapport à d'autres grandeurs physiques. Elle se fait en pratique au moyen de l'échelle internationale de température 90. La lecture de l'article des Techniques de l'ingénieur sur l'EIT90 [4] est recommandée. L'échelle repose sur des points fixes de température (transitions de phase de corps purs). Le Kelvin est basé sur la définition du point triple de l'eau. Pour obtenir la position des autres points fixes, on utilise des grandeurs dont la dépendance à la température thermodynamique est connue. C'est l'objectif des thermomètres primaires : par exemple le thermomètre à gaz repose sur des mesures de pression et de volume, le thermomètre acoustique sur la mesure de la célérité d'une onde acoustique, etc.

L'usage des thermomètres primaires est peu pratique et on étalonne alors grâce aux points fixes le thermomètre à résistance de platine. Enfin, le thermomètre à résistance de platine permet l'étalonnage d'autres thermomètres d'usage courant : thermistances, thermocouples, etc.

## Retour sur la présentation

### Introduction (1 min)

L'introduction situait bien le sujet et la problématique du montage, l'annonce du plan n'est pas forcément nécessaire. Elle n'était pas trop longue, ce qui est positif.

L'introduction peut être l'occasion de définir le Kelvin, d'expliquer l'EIT90, et également quelques spécifications des capteurs qui seront illustrées dans la suite. Il faut cependant

éviter une introduction trop longue et commencer à manipuler assez vite.

## 1 Thermométrie primaire (23 min)

Les thermomètres primaires ne sont pas les premiers thermomètres utilisés, et n'ont pas été remplacés à cause d'une moins bonne précision : leur intérêt est de pouvoir réaliser une mesure de la température thermodynamique sans étalonnage. Ceci est au prix d'une mise en oeuvre plus délicate, mais la précision peut être très bonne lorsque les principales causes d'incertitude sont maîtrisées.

### 1.1 Le tube de Kundt (13 min)

Le choix du tube de Kundt [1] est pertinent pour ce montage : 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  $\gamma$  tirées d'un Handbook.

Il faut faire attention à bien laisser l'ensemble de la tige dans le tube pendant le temps de thermalisation afin qu'elle soit à la même température que le gaz.

Il faut être en mesure de justifier les valeurs choisies de fréquences pour la mesure :

- 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.

Ces mesures nécessitent beaucoup de précautions, une incertitude de 1% sur la longueur d'onde ou la fréquence induit une incertitude de 2% sur la température, c'est-à-dire  $\pm 6^\circ\text{C}$ .

L'incertitude était autour de 1 % pour la mesure de fréquence, il faut diminuer celle-ci. On peut représenter la tension du haut-parleur en fonction de celle du micro (mode XY sur l'oscilloscope), et repérer la résonance par la méthode de Lissajous. Enfin, réalisez la mesure de la fréquence avec l'oscilloscope ou un fréquencemètre : le GBF n'est pas un appareil de mesure.

Il faut également mesurer avec précaution la longueur d'onde, faire des marques sur le verre induit une incertitude énorme sur la longueur d'onde : il faut mieux faire une marque sur la tige du micro : on peut ramener l'incertitude à environ 0.5% sur la mesure de  $\lambda$ .

La notion de temps de réponse du capteur doit être différenciée de celle de temps de thermalisation : ici, il n'y a pas de temps de réponse à proprement parler (les capteurs utilisés sont rapides devant le temps typique de mesure).

Attention également aux notations des résultats : il ne faut pas noter  $321 \pm 34 \text{ K}$ , mais  $(3.2 \pm 0.3) \cdot 10^2 \text{ K}$  : donner deux chiffres significatifs à une incertitude a peu de sens (on ne

connait pas a priori la densité de probabilité, on ne sait pas si l'incertitude est donnée à  $1\sigma$  ou  $2\sigma$ , etc.).

## 1.2 Le thermomètre à gaz SF<sub>6</sub> (10 min)

Présenter un thermomètre à gaz [5] peut être pertinent pour ce montage. Cependant, l'utilisation de la manipulation à SF<sub>6</sub> posait plusieurs problèmes :

- L'accès à la température est difficile : seul un thermomètre à alcool est placé dans le bain. Dans tous les cas, il faut mieux utiliser cette mesure que celle du thermomètre du bain thermostaté car une différence de température non négligeable existe entre le bain et la colonne thermalisant le SF<sub>6</sub>.
- Le dispositif sert à utiliser les transitions de phase. Par conséquent, le fluide est très loin d'un comportement d'un gaz parfait. On peut s'en affranchir en déterminant les coefficients du Viriel<sup>4</sup>, mais l'erreur induite sera plus importante que si le gaz utilisé est proche d'un gaz parfait.

L'avantage du thermomètre à gaz est que l'on peut illustrer l'échelle internationale de température. À partir de la position d'un premier point fixe, on peut déterminer la position d'un second.

Une possibilité est d'étudier les variations du produit ( $PV$ ) en fonction de  $P$  avec une seringue remplie d'air, de cette façon on assure que le gaz a un comportement proche du gaz parfait (en calculant le premier coefficient du Viriel). À partir de la température de fusion (première mesure du produit ( $PV$ ) d'un récipient hermétique trempant dans un mélange eau-glace) qui sert ici d'étalon absolu pour l'illustration, obtenir la température d'ébullition de l'eau (seconde mesure du produit ( $PV$ )).

Là encore, il ne faut pas surestimer les incertitudes : une incertitude de 10% sur une température en Kelvin n'est pas acceptable.

## 2 Thermométrie secondaire (17 min)

Il est très regrettable de n'avoir jamais parlé de thermomètre à résistance de Platine, vu son importance dans l'EIT90. On peut utiliser pour son étalonnage la fusion de l'eau, l'ébullition de l'azote liquide ou de l'eau, la fusion de l'étain entre autres. Attention, les températures d'ébullition dépendent fortement de la pression, il faut mesurer la pression et utiliser les données tabulées de température d'ébullition correspondantes.

De façon générale, l'étude de différents capteurs peut permettre à chaque fois l'illustration d'une des spécifications du capteur (linéarité, précision, temps de réponse, finesse, etc.).

### 2.1 Thermocouple (10 min 30)

Il faut faire preuve de beaucoup plus de précautions lors des manipulations. Si vous faites une mesure dans l'air ambiant, essayez délicatement le thermocouple (la température du bain et l'évaporation peuvent modifier la température) et laisser le temps de thermaliser.

4. Contrairement à ce que j'ai dit en classe, la détermination des coefficients du Viriel ne nécessite pas de définition de la température et permet d'obtenir avec une meilleure précision  $\lim_{P \rightarrow 0} (PV)$ .

5. Ce point est également problématique pour la sonde de platine dont la résistance est assez faible.

De façon générale, il faut mieux utiliser un bain d'eau pour réaliser un étalonnage : la thermalisation avec le milieu est beaucoup plus facilement accessible.

- la capacité thermique d'un capteur de température n'est pas négligeable devant celle de l'air environnant, ce qui rend la thermalisation particulièrement longue (notion de **finesse**). Ce point est beaucoup moins gênant avec l'eau ;
- le coefficient de diffusion thermique est plus élevé dans l'eau que dans l'air, on atteint donc assez vite l'équilibre thermique avec l'environnement.

Vous pouvez préparer un bain eau-glace et un bain avec une température connue pour réaliser deux points devant le jury. Le point réalisé avec la glace est effectivement intéressant pour illustrer le principe physique du thermocouple.

Enfin, il faut éviter de mesurer la température du bain au thermocouple, car cela revient à mesurer la tension aux bornes d'un thermocouple en fonction de la tension aux bornes d'un autre thermocouple. L'usage d'une sonde de platine est ici plus approprié.

### 2.2 Thermistance (6 min 30)

Cette manipulation n'a pas été très convaincante, mais le protocole proposé peut donner lieu à une intéressante discussion sur l'autoéchauffement du capteur. En effet, la mesure de la résistance implique d'y faire passer un courant et cela peut chauffer le capteur<sup>5</sup>. La mesure proposée est intéressante de ce point de vue : on mesure  $R$  pour différentes tensions d'alimentation et on vérifie que la valeur obtenue est constante en dessous d'une certaine valeur.

## Conclusion (30 s)

Pas de remarques particulière. Cela peut être l'occasion de faire une ouverture sur les mesures de hautes températures, par exemple au pyromètre optique, si celles-ci n'ont pas été abordées au cours de la montage.

## Questions

Les questions servent d'abord à éclaircir les points peu clairs du montage, tester votre connaissance des appareils et dispositifs utilisés, puis ensuite à tester vos connaissances plus largement. Voilà quelques points qui pourraient être discutés lors des questions. La séance de questions durera au maximum 20 minutes le jour J.

- Tube de Kundt.
  - Comment repérer avec la meilleure précision la résonance.
  - Pourquoi ce choix de fréquence.
  - Comment mesurer avec plus de précision la longueur d'onde ?
  - Quel est l'intérêt du tube de Kundt ?
  - Qu'est ce qu'un point fixe et à quoi ça sert ?
  - Définition du Kelvin.

- Thermomètre à gaz.
- Comment la température est-elle mesurée ?
- La température du thermostat est-elle une bonne indication ?

La température indiquée par le thermostat est la température du capteur baignant dans le réservoir d'eau. Mais les tuyaux allant du réservoirs jusqu'au dispositif à SF<sub>6</sub> engendrent une baisse de la température et l'erreur systématique est importante.

- Que dire des incertitudes au vu de la modélisation ?
- Quel traitement fait Regressi des incertitudes ?
- Thermométrie secondaire.
- Comment calibre-t-on un thermomètre secondaire ?
- Quel est l'origine du temps de réponse d'un thermomètre ?

C'est le temps de thermalisation du capteur avec son environnement. Dans un bain d'eau, cela dépend surtout du temps de diffusion du bords du dispositif jusqu'au capteur proprement dit (donc de sa taille et du matériau dans lequel il est fait.

- Pourquoi ce choix des incertitudes ?

Il faut consulter l'incertitude dans la notice des multimètres utilisés, et prendre en compte d'éventuelles fluctuations.

Je reste à votre disposition par mail si vous avez d'autres questions.

## Références

- [1] FRUCHART M., LIDON P., THIBIERGE É., CHAMPION M. et LE DIFON A., Physique expérimentale : optique, mécanique des fluides, ondes et thermodynamique, De Boeck, 2016
- [2] ASCH G., Les capteurs en instrumentation industrielle, Dunod, 2010
- [3] Y. PARMANTIER et F. KRATZ. Capteurs – définition, principe de détection. Techniques de l'ingénieur, 2009.
- [4] M. SADLI, L'échelle internationale de température EIT-90, Techniques de l'ingénieur, 2006.
- [5] M. BERTIN, J.-P. FAROUX et J. RENAULT, Thermodynamique, Dunod, 1989.