

## MP 6 Temperature

### Remarques : Rapport Jury

#### 2017 Montage 5 :

Mesure de température.

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.

#### 2016-2015-2014 Montage 5: Mesure de température.

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 infrarouges.

Jusqu'en 2013, le titre était : 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.

Jusqu'en 2013, le titre était : 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.

2010 : Comme recommandé dans les précédents rapports, 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. Il est important de faire la différence entre mesure et repérage de température.

2009 : On attend dans ce montage des manipulations plus pertinentes que l'étalonnage d'une résistance de platine par un thermomètre à mercure. La notion de point fixe doit être connue.

Biblio : essentiellement Quaranta

Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, Donnini et Quaranta

\* Thermodynamique, Faroux et Renault

p 55 et suivantes pour la théorie

# I Les instruments de mesure de la température

## 1. Thermomètre officiel

Officiellement, le seul thermomètre autorisé est le thermomètre à gaz. Mais en dehors des laboratoires de métrologie, il n'est guère utilisé.

On utilise le thermomètre à hydrogène qui donne directement accès à l'échelle absolue de température. À l'aide de cet instrument, on détermine un certain nombre de points fixes.

Ce n'est qu'à partir de ces points fixes (appareils d'interpolation) que l'on étalonne les autres thermomètres.

## 2. Les instruments légaux d'interpolation

L'utilisation de ces différents appareils dépend des domaines de température considérés.

\*Thermomètre à résistance de Platine : de 13,81 K (point triple de l'hydrogène) à 903,89 K (point de solidification de l'antimoine).

\*Thermocouples : de 903,89 K et jusqu'à 1337,58 K (point de congélation de l'or),

\*Pyromètres : Au-delà du point de fusion de l'or

## 3 Les instruments usuels

**\*thermomètres à dilatation de liquide** (mercure, éthanol...)

inconvénient : plage de température (limitée par solidification du liquide) sa vaporisation ou ramollissement de l'enveloppe de verre. dilatation de l'enveloppe, difficile à apprécier totalement ; l'erreur de parallaxe dans la lecture ;

**\*thermomètres à thermistance** CTP et CTN (mélanges d'oxydes métalliques semi-conducteurs)

**\*Thermocouples**

**\*Thermomètres à cristaux liquides** utilisent des cristaux liquides qui changent de couleur selon la température.

**\*Les thermomètres magnétiques** appliquent la loi de Curie (susceptibilité magnétique d'un paramagnétique est inversement proportionnelle à la température) pour mesurer les très basses températures

# II Thermomètre à Gaz

## 1. Principe Physique :

variation de la pression d'un gaz en fonction de  $T$  à Volume fixe.

## 2. Dispositif et Fonctionnement

1 ballon avec de l'air dans un bain de flotte. On mesure différence de pression avec extérieur en fonction de  $T$ .

On utilise une résistance Pt100 pour mesurer la température de l'eau.

Partir de températures élevées (100 degrés) vers la plus basse, Tracer  $DP$  en fonction de  $T$ . En déduire la sensibilité du thermomètre.

Si gaz Parfait,  $P/T$  est constant : échelle de température fixée à partir du point triple de l'eau.

Avantages : mesure directe de  $T$  absolue seul thermomètre autorisé,

Inconvénient : peu pratique, réponse en temps longue

voir aussi

<http://eduscol.education.fr/rnchimie/phys/kohl/Thermo/thermometres.htm>

Description du thermomètre à hydrogène

On utilise l'hydrogène car c'est pour ce gaz que le produit  $pV$  dépend le moins de la pression

Les mesures de volume étant moins précises que des mesures de pression, on étudie la variation de pression du gaz à volume constant quand on impose des variations de température.

Pour obtenir la température on trace  $PV$  en fonction de  $P$  et on prend la limite quand  $P$  tend vers 0.

Permet de définir l'échelle absolue de température avec 1 point fixe (point triple de l'eau)

C'est ainsi que l'on a déterminé les points fixes de l'Échelle Internationale Pratique de Température.

## III Thermomètre à résistance de Platine

### 1. Principe physique

**Dependence resistivite des métaux avec la température** voir Kittel – Introduction à la physique de l'état solide Chap 7.

**\*A savoir :** La resistivite des metaux est due à la mobilité des électrons de conduction. Les électrons interagissent (collision) avec les phonons (vibration), avec des atomes d'impuretés ou les défauts du réseau cristallins. A 300K, c'est les collisions avec les phonons qui dominent. Le nombre de phonons augmente avec la température, si bien que la resistivite augmente avec  $T$ .

**\*Culture + :** A Température de l'hélium liquide (faible devant l'énergie des phonons), c'est les interactions avec les impuretés et défauts du réseau qui dominent (dont le nombre dépend peu de la température si peu d'impureté): on obtient alors de resistivite indépendante de la température lorsque  $T \rightarrow 0$  (cf Kittel)

## 2 . Dispositif et fonctionnement

Les résistances de platine fonctionnent sur le principe des variations de résistance électrique des métaux purs et se caractérisent par une modification positive linéaire de la résistance en fonction de la température. Concrètement, une fois chauffée, la résistance du métal augmente et inversement une fois refroidie, elle diminue. On peut utiliser d'autres éléments que le platine : les éléments types utilisés pour les résistances incluent le nickel (Ni) et le cuivre (Cu) mais le platine (Pt) est de loin le plus courant, en raison de l'étendue de sa gamme de températures, de sa précision et de sa stabilité. Faire passer le courant à travers une sonde résistance de platine génère une tension à travers la sonde. En mesurant cette tension, vous pouvez déterminer sa résistance et ainsi, sa température. Les résistances de platine sont habituellement classées par leur résistance nominale à 0°C. Les valeurs de résistance nominale types pour les résistances de platine à film fin en platine sont comprises entre 100 et 1 000  $\Omega$ .

Populaires pour leur stabilité, les résistances de platine présentent le signal le plus linéaire de tous les capteurs électroniques en matière de température. Toutefois, ils coûtent généralement plus cher que leurs équivalents à cause de leur construction plus délicate et le recours au platine. Les résistances de platine se caractérisent aussi par un temps de réponse lent et par une faible sensibilité. En outre, parce qu'elles nécessitent une excitation en courant, ils sont sujets à une élévation de température.

**Manip possible :** étalonnage à partir de 3 points fixes qui nous sont accessibles : l'ébullition du diazote, la glace fondante et l'ébullition de l'eau (attention, la température de ce point dépend de la pression atmosphérique, la mesurer et vérifier dans les tables si l'écart de température est significatif). Même si cela fait peu de points, on peut expliquer qu'on ne peut pas avoir accès à autre chose dans ces conditions expérimentales.

On montre donc qu'on obtient une variation quasi-linéaire de la résistance en fonction de la température. On modélise par une loi du type  $R=R_0(1+aT)$  (développement polynomial au degré 1).

On calcule  $a$  et  $R_0$  par la modélisation du logiciel. On connaît ainsi la loi qui relie la résistance à la température : le thermomètre est étalonné.

## III Thermocouples

### 1. Principe physique

Cf Effet Seebeck.

### 2 . Dispositif et fonctionnement

Type	Métal A (+)	Métal B (-)	Plage utilisation	Limites théoriques	Coef. Seebeck $\alpha$ ( $\mu V/^{\circ}C$ ) à $T^{\circ}C$	Erreur standard	Erreur Mini
B	Platine	Platine	+600°C à	0 à	5,96 $\mu V$ à	0,5%	0,25%

	30% Rhodium	6% Rhodium	1700°C	1820°C	600°C		
E	Nickel 10% Chrome	Constantan	-40 à 900°C	-270 à 1000°C	58,67 $\mu$ V à 0°C	1,7% à 0,5%	1% à 0,4%
J	Fer	Constantan	-40°C à 750°C	-210 à 1200°C	50,38 $\mu$ V à 0°C	2,2% à 0,75%	1,1% à 0,4%
K	Chromel	Alumel	-40°C à 1200°C	-270 à 1372°C	39,45 $\mu$ V à 0°C	2,2% à 0,75%	1,1% à 0,2%
N	Nicrosil	Nisil	-40°C à 1200°C	-270 à 1300°C	25,93 $\mu$ V à 0°C	2,2% à 0,75%	1,1% à 0,4%
R	Platine 13% Rhodium	Platine	0 à 1600°C	-50 à 1768°C	11,36 $\mu$ V à 600°C	1,5% à 0,25%	0,6% à 0,1%
S	Platine 10% Rhodium	Platine	0 à 1600°C	-50 à 1768°C	10,21 $\mu$ V à 600°C	1,5% à 0,25%	0,6% à 0,1%
T	Cuivre	Constantan	-40 à 350°C	-270 à 400°C	38,75 $\mu$ V à 0°C	1% à 0,75%	0,5% à 0,4%

Constantan = alliage nickel cuivre,  
Chromel = Nickel-chrome  
Alumel = Nickel- aluminium

## Fonctionnement

Attention de toujours utiliser 2 thermocouples, l'un dans un milieu de référence (glace fondante), l'autre dans le milieu dont on veut mesurer la température. Mesurer la tension aux bornes des deux thermocouples en fonction de  $\Delta T$

Si on utilise qu'un seul thermocouple : on n'a alors pas de compensation de soudure froide (la température de référence devient la température de la pièce). Les appareils électroniques qui nous donnent directement la température compensent la soudure froide si on a mis un seul thermocouple.

Avantages : on a une variation linéaire de la ddp en fonction de la température. Simple, robuste, bon marché, grande variété de types différents, large gamme de température

Inconvénients : il faut maintenir la soudure de référence à une température rigoureusement constante et la sensibilité est faible, il faut amplifier la ddp pour pouvoir la mesurer. Pas stable, peu sensible.

## IV Pyromètres

### 1 principe

- mesure de la température de *surface* d'un objet à partir de l'émission de lumière de type *corps noir*.

Tous les corps à une température  $T$  émettent des ondes électromagnétiques dont le spectre est continu, la longueur d'onde  $\lambda_{\max}$  correspondant au maximum d'émission varie inversement avec  $T$ , et la puissance  $M$  totale rayonnée par unité de surface dans le demi-espace libre d'un corps noir varie comme la puissance 4 de la température :  $M = \sigma \epsilon T^4$

$\sigma$  est la constante de Stefan ,  $\epsilon$  l'émissivité (tient compte de la différence entre le matériaux et un corps noir idéal)

Avantage :

Le domaine des températures s'étend de  $-100^{\circ}\text{C}$  à  $5000^{\circ}\text{C}$  couvrant ainsi l'essentiel des mesures industrielles. L'utilisation préférentielle des pyromètres optiques concerne les mesures :

- sans contact (corps en mouvement, à grande distance ou dans le vide).
- de températures de surface.
- de très hautes températures.
- sur des corps de faible capacité thermique.
- La mesure des températures passe par la détermination (mesure ou comparaison) de l'une des deux grandeurs énergétiques exprimées séparément ci dessous pour le corps noir (CN) et le corps non noir (CNN) :

	Emittance totale (Loi de Stefan) <input type="checkbox"/>	Emittance monochromatique (Loi de Planck) <input type="checkbox"/>
Corps noir (CN)	$M^{\circ}_T = \sigma T^4$	$M^{\circ}_{\lambda,T} = C_1 \lambda^{-5} / (\exp(C_2 / \lambda T) - 1)$
Corps non noir (CNN)	$M_T = \epsilon M^{\circ}_T = \epsilon \sigma T^4$ ( $\epsilon$ émissivité totale)	$M_{\lambda,T} = \epsilon_{\lambda} M^{\circ}_{\lambda,T}$ ( $\epsilon_{\lambda}$ émissivité monochromatique)
Unités	$M^{\circ}_T$ et $M_T$ en $\text{W/m}^2$ ; $T$ en K ; $\epsilon$ sans dimension  $\sigma$ constante de STEFAN ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ )	$M^{\circ}_{\lambda,T}$ et $M_{\lambda,T}$ en $\text{W/m}^3$ ; $T$ en K ; $\epsilon$ sans dimension  $\sigma$ constante de STEFAN ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ )

**Performances.** Gamme assez basse de  $-100$  à  $600^{\circ}\text{C}$ . Incertitude de l'ordre de  $10^{\circ}\text{C}$ .

- **En résumé :** Avantage (peu cher, robuste) ; inconvénient (peu sensible, peu fidèle, corrections à apporter dont celle due à l'émissivité. Les émissivités dépendent de la longueur d'onde à laquelle on effectue la mesure).

Pyromètres monochromatiques.

mesure l'émittance monochromatique de la source (pyromètre monochromatique) ou on compare l'émittance monochromatique de l'image de la source, fournie par l'objectif, à celle d'un filament de référence (PDF).

## **V Les instruments usuels**

### **1) thermomètres à dilatation de liquide**

### **2) thermomètres à thermistance (CTN ou CTP)**

(mélanges d'oxydes métalliques semi-conducteurs)

**CTN :** Il s'agit d'un semi-conducteur dont les porteurs de charge sont libérés avec la température (donc semi-cond plutôt intrinsèques) : la résistance baisse donc avec la température (contrairement à la résistance de platine)

La conductivité est proportionnelle à la densité des porteurs. Sauf qu'elle dépend aussi de leur mobilité qui elle dépend aussi un peu de la température

Commodes d'emploi, ils sont peu fidèles mais d'une très grande sensibilité (sensibilité thermistance > 10 sensibilité platine).

On obtient une variation en exponentielle décroissante qui est régie par une loi du type  $R = A \cdot \exp(B/T)$  On trace donc  $\ln R = \ln A + B/T$ , qui doit correspondre à une droite.

Avantages : très sensible.

Inconvénients : on ne peut pas fabriquer de thermistances identiques puisque ce sont des semi-conducteurs, donc chacune doit être étalonnée indépendamment. Il y a également un effet joule dû

à la circulation d'un courant (gêne aux basses températures).

CTP : Les CTP (Coefficient de Température Positif, en anglais PTC, *Positive Temperature Coefficient*) sont des thermistances dont la résistance augmente fortement avec la température dans une plage de température limitée (typiquement entre 0 et 100 °C), mais diminue en dehors de cette zone

<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/electronique-photonique-th13/materiaux-pour-l-electronique-et-dispositifs-associes-42271210/ceramiques-semi-conducteurs-e2080/thermistances-ctp-e2080v2niv10003.html>

Les thermistances CTP sont des céramiques ferroélectriques et semi-conductrices. Elles présentent une « anomalie » de variation de leur résistance à la température de Curie  $T_C$  du matériau correspondant à la température de transition ferro-paraélectrique. Au-dessus de cette température (figure 2), la résistance croît brutalement (de l'ordre de 10 à 100 % / °C) puis atteint un maximum avant de diminuer. En d'autres termes, la thermistance passe d'un état *conducteur* à un état *isolant* dans un intervalle de quelques dizaines de degrés : elle se comporte comme un fusible à réarmement automatique car le phénomène est réversible.

Ce comportement est dû à la nature ferroélectrique et polycristalline du matériau. En effet, un monocristal de même composition chimique qu'un polycristal ne montre aucune « anomalie de résistance ».

Le saut de résistance ou de résistivité est lié à la présence d'une barrière de potentiel  $\Phi$  localisée à chaque joint des grains de la céramique. C'est donc une propriété spécifique des matériaux polycristallins. Cette barrière de potentiel est due au piégeage d'électrons libres du matériau semi-conducteur à la surface de chaque cristal (ou grain) de la céramique par des accepteurs générés par chimisorption d'oxygène.

La hauteur de barrière de potentiel s'accroît brutalement au-dessus de la température  $T_C$  c'est-à-dire lorsque le matériau passe dans son état paraélectrique. En dessous de  $T_C$  les grains sont organisés en domaines ferroélectriques. La charge de polarisation qui en résulte aux interfaces a pour effet de diminuer la hauteur de la barrière de potentiel.

Les matériaux sont constitués principalement de titanate de baryum dopé à l'aide de donneurs ( $Y_2O_3$ ,  $La_2O_3$ ,  $Sb_2O_3$ ...) de façon à le rendre semi-conducteur de type N. Le titanate de baryum ( $BaTiO_3$ ) possède une température de Curie de 120 °C correspondant à sa transition ferroélectrique-paraélectrique. Différentes substitutions de l'ion  $Ba^{2+}$  par l'ion  $Sr^{2+}$  ou  $Pb^{2+}$  permettent de déplacer la température de Curie respectivement au-dessous ou au-dessus de 120 °C (figure 11).