

## T2 MESURE DE LA TEMPERATURE

### I. INTRODUCTION

Dans la majorité des phénomènes physiques, la température joue un rôle prépondérant. Pour la mesurer, les moyens les plus couramment utilisés sont : les thermomètres à gaz, les thermocouples ainsi que les thermomètres à résistance (métallique ou semiconductrice). De nos jours, les thermomètres basés sur un effet électrique sont les plus répandus, car le traitement des signaux est grandement facilité. Pour des mesures très précises de la température, on a encore recours aux thermomètres à gaz. Dans ce travail, nous étudierons 4 types de thermomètre qui tous délivrent une tension électrique qui dépend de la température suivant un mécanisme physique fondamental que nous décrivons brièvement ci-dessous.

### II. THEORIE

Lorsque la température d'un corps varie, certaines grandeurs physiques caractéristiques du corps sont modifiées : les phénomènes les plus souvent observés sont par exemple, la dilatation, la variation de la résistance électrique ou la modification du rayonnement émis. La détermination d'une température se fait toujours par la mesure de la variation d'une de ces grandeurs physiques.

La graduation d'une échelle de température nécessite la définition de repères thermométriques. Dans l'échelle CELSIUS, les deux repères choisis sont la température de fusion normale de la glace (0°C) et la température d'ébullition de l'eau (100°C). Le deuxième principe de la thermodynamique nous permet de définir une température absolue que l'on exprime en kelvin. Le passage de l'échelle CELSIUS à celle de KELVIN se fait par la relation:

$$(1) \quad T[\text{K}] = \vartheta[^\circ\text{C}] + 273.15$$

#### 1) Thermomètre à résistance métallique

Pour des métaux purs, la résistance électrique augmente linéairement avec la température, ceci sur une grande plage de température suivant la loi :

$$(2) \quad R(T) = R_0 [1 + \alpha (T - 273.15)]$$

où  $T$  est la température exprimée en kelvin,  $\alpha$  est le coefficient de température du métal ( $[\alpha] = \text{K}^{-1}$ ) et  $R_0$  est la résistance à 273.15 K.

#### 2) Thermomètre à résistance semiconductrice

A l'inverse des résistances métalliques, la résistance d'un semiconducteur diminue lorsque la température augmente. Ce comportement provient du fait que le nombre de porteurs de charge croît avec la température

$$(3) \quad R(T) = A_0 \text{Exp} \left[ \frac{E_a}{k_B T} \right]$$

où  $E_a$  est l'énergie d'activation des porteurs de charge [ $E_a$ ] = joule,

$k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$  est la constante de Boltzmann et  $A_0$  est un paramètre caractéristique du semiconducteur [ $A_0$ ] =  $\Omega$

### Remarques

- 1)  $A_0$  et  $E_a$  dépendent également de la température. Mais pour un intervalle de température pas trop grand, on peut admettre que ces paramètres sont constants devant la très grande variation de l'exponentielle.
- 2) A partir de l'équation (3) on obtient :

$$(4) \quad \text{Ln}[R(T)] = \text{Ln}(A_0) + \frac{E_a}{k_B} \frac{1}{T}$$

Ainsi en portant sur un graphique  $\text{Ln}[R(T)]$  en fonction de  $1/T$ , on obtient une droite de pente  $E_a/k_B$

### 3) Thermomètre à diode

Une diode est un élément semiconducteur qui a la propriété de ne conduire le courant que dans une direction. La relation tension courant est donc fortement non linéaire et est donnée par l'équation (5)

$$(5) \quad I = I_0 \left\{ \text{Exp} \left[ \frac{eV}{k_B T} \right] - 1 \right\}$$

où  $I_0$  est le courant inverse de la diode et est généralement très faible de quelques pA (pico= $10^{-12}$ ) jusqu'à quelques nA (nano= $10^{-9}$ ). Ce courant dépend également de la température suivant

$$(6) \quad I_0 = A \text{Exp} \left[ -\frac{E_g}{k_B T} \right]$$

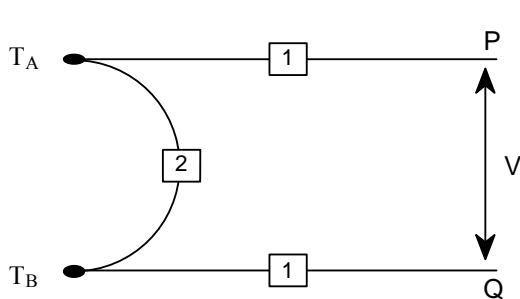
$E_g$  est la largeur en énergie de la bande interdite (1.18 eV pour le silicium à 0 kelvin),  $T$  la température exprimée en kelvin,  $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$  la constante de Boltzmann et  $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$  la charge élémentaire.

Aux alentours de la température ambiante (150 K à 300 K), on peut considérer  $A$  comme indépendant de la température, et l'équation (5) devient en tenant compte de (6) et du fait que  $eV \gg k_B T$  :

$$(7) \quad V = - \left( \frac{k_B \text{Ln} \left( \frac{A}{I} \right)}{e} \right) T + \frac{E_g}{e} \Rightarrow V = aT + b : \text{relation linéaire}$$

Sur un graphique  $V$  en fonction de  $T$ , on a une droite de pente négative (-2 à -3 mV/K) et dont la tension à  $T=0$  donne le gap ( $E_g/e$ ).

#### 4) Les thermocouples



La figure 1 montre un circuit constitué par deux conducteurs 1 et 2 dont les soudures sont à des températures différentes  $T_A$  et  $T_B$ . On mesure aux extrémités P et Q une force électromotrice  $V$  appelée tension thermo-électrique. C'est l'effet SEEBECK.

**Figure 1**

Cette tension thermo-électrique est fonction de la différence de température entre les points A et B. Si l'intervalle de température  $T_A - T_B$  n'est pas trop grand la tension thermo-électrique  $V$  peut s'exprimer simplement par la relation:

$$(8) \quad V = a(T_A - T_B)$$

$a$  est une constante caractéristique des matériaux utilisés. Contrairement aux méthodes précédentes, la mesure de température est ici relative : on mesure un écart de température par rapport à la température de référence qu'on a donc intérêt à connaître avec une grande précision. Pour réaliser ces sondes de température, on emploie comme matériau le chromel (80 % Ni, 20 % Cr) et l'alumel (94 % Ni, 2,5 % Mg, 2 % Al ...). On peut ainsi mesurer des températures comprises entre  $-200^\circ\text{C}$  et  $1000^\circ\text{C}$ . Des tables donnent la relation entre tension thermo-électrique et température.

### III. EXPERIENCES

#### Régulateur de température

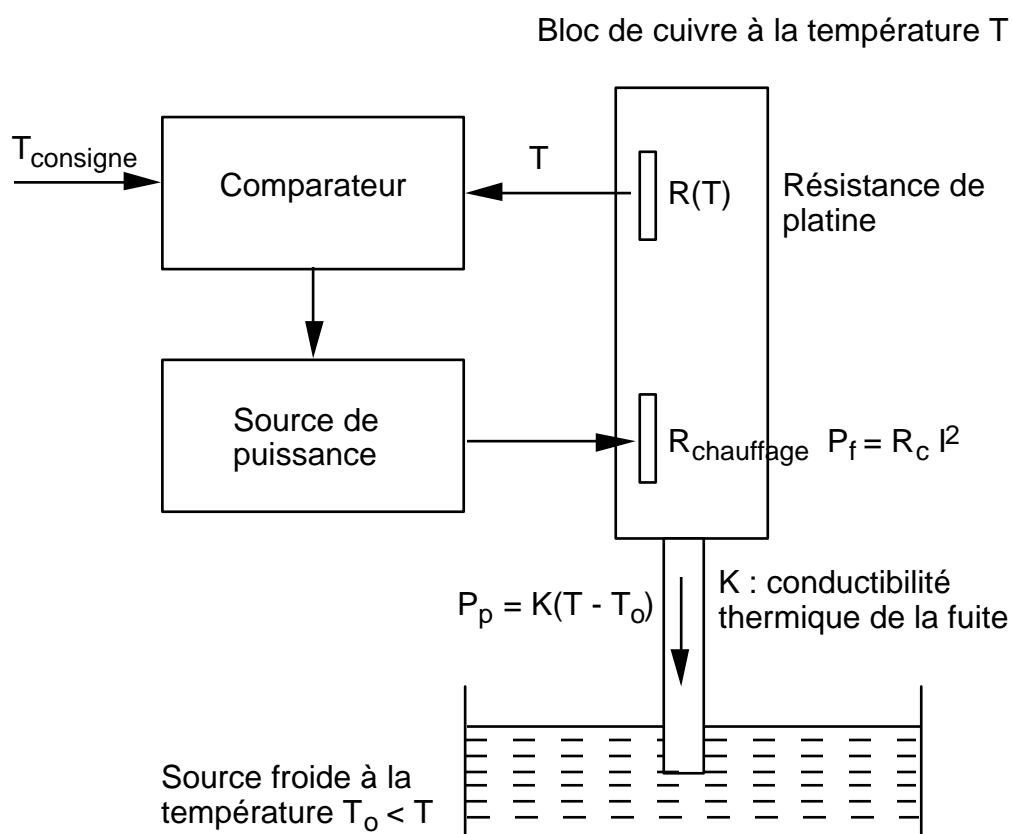
Pour mesurer la dépendance en température d'un phénomène physique, il est important de stabiliser la température à une valeur définie. Ceci est réalisé par le régulateur de température dont le schéma de principe est donné sur la Fig. 2.

### Le comparateur

Cet étage a pour fonction de comparer la valeur de la température donnée par la résistance thermométrique montée sur le bloc de cuivre avec une valeur de consigne  $T_{\text{consigne}}$ . Cet étage délivre une tension de commande proportionnelle à la différence entre  $T$  et  $T_{\text{consigne}}$ .

### Source de puissance

Cet étage délivre un courant dans une résistance de chauffage  $R_c$  montée sur le bloc de cuivre. La puissance ainsi dissipée va permettre de chauffer puis contrôler la température du bloc en cuivre. Lorsque l'on atteint l'équilibre, la source de puissance doit fournir une puissance  $P_f$  qui contrebalance exactement la puissance perdue  $P_p$  via la fuite thermique. Une meilleure stabilisation est généralement obtenue si  $P_f$ , et donc  $P_p$ , ne sont pas trop élevées. Pour ceci, on diminue la conductibilité thermique de la fuite en sortant la tige de cuivre du bain de référence.



**Figure 2**

#### IV. MANIPULATIONS

Pour cette expérience le contrôleur de température utilise une résistance de platine calibrée pour mesurer et stabiliser la température. La température est affichée sur le contrôleur de température en même temps que la température de consigne qui représente la température à laquelle on désire stabiliser le bloc de mesure.

##### Prises des données

Branchez la sortie de la résistance semiconductrice (NTC) sur l'ohmmètre, les trois autres sondes étant reliées aux voltmètres indiqués sur la boîte de mesure. Mettre la référence du thermocouple dans l'azote liquide ( $T_{ref} = 77K$ ). Pour le thermocouple et la diode les voltmètres donnent directement les valeurs à mesurer. Pour la résistance de platine, il faut calculer la résistance, sachant que le courant qui la traverse est constant et vaut 0.5 mA.

Introduire une température de consigne de 70K sur le contrôleur de température et refroidir le bloc de mesure à la température de l'azote liquide le plus proche possible de 77K. Prendre les 4 points de mesure

Donner une consigne de 90K. Attendre que la température se stabilise puis mesurer les 4 sondes. Prendre des points de mesure tous les 10K jusqu'à la température ambiante.

##### Analyse des résultats.

##### 1) Caractéristique d'une résistance de platine

- Tracer le graphique R en fonction de T
- Déterminer le coefficient en température  $\alpha$  de la résistance de platine, sachant que  $R_0=R(273K)=100\Omega$

##### 2) Caractéristique d'une NTC (semiconducteur).

- Tracer le graphique  $\ln R$  en fonction de  $1/T$ .
- A partir de la pente de la droite, déterminer l'énergie d'activation  $E_a$ .

##### 3) Caractéristique d'une diode

- Tracer le graphique V en fonction de T.
- Du graphique V(T), estimer le coefficient en température  $\frac{k_B}{e} \ln\left(\frac{A}{I}\right)$  de cette diode.
- Sur votre graphique, extrapoler la droite pour  $T=0K$  afin de déterminer  $E_g$ .

##### 4) Caractéristique d'un thermocouple.

- Tracer le graphique U en fonction de T

Temp T[K]	Platine		Diode	Thermo	Résistance NTC	
	U [V]	R [ $\Omega$ ]	U [V]	U [V]	R [ $\Omega$ ]	Ln(R)
90						
100						
110						
120						
130						
140						
150						
160						
170						
180						
190						
200						
210						
220						
230						
240						
250						
260						
270						