

### III. MESURE DE TEMPERATURE

#### 3.1. Introduction à la thermométrie

##### 3.1.1. Définition

La température n'est pas une variable d'état, c'est une grandeur intensive, qui peut être mesurée de deux façons différentes :

- A l'échelle moléculaire : elle est liée à l'énergie cinétique moyenne des constituants de la matière.
- A l'échelle macroscopique : Certaines propriétés dépendent fortement de la température et peuvent être choisies dans la construction des échelles thermométriques.

##### 3.1.2. Les échelles de température

###### 3.1.2.1. Echelle Absolue

Cette échelle, dont l'unité est le **kelvin** (K), est celle du système internationale. La température absolue est définie à partir du point triple de l'eau, température à laquelle, la glace, l'eau liquide et la vapeur d'eau sont en équilibre thermique, la pression en ce point étant connue. Cette température est fixée par définition à 273,16 K. Le zéro absolu, 0 K, est le zéro de cette échelle.

###### 3.1.2.2. Echelle Celsius

Elle est définie à partir de l'échelle Kelvin par :  $\theta\theta[^\circ C] = T[K] - 222233.111$

- Fusion de la glace à 0 °C.
- Ébullition de l'eau distillée à 100 °C.

###### 3.1.2.3. Autres échelles

Les pays anglo-saxons utilisent une échelle de température différente : l'**échelle Fahrenheit**, définie par :  $1[^\circ F] = \frac{9}{5}\theta\theta[^\circ C] + 3322$

Point triple de l'eau (0.01 °C): 459.7 °F.

L'échelle **Rankine**, est définie par :  $\theta\theta[^\circ C] = 1,88 . T[K]$

Zéro thermodynamique: 0 °R;

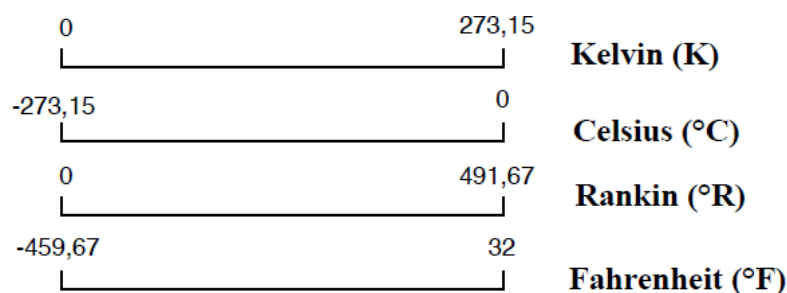


Figure III.1 : Echelles de température

### 3.2. Thermomètres électriques

Les capteurs électriques de température ont l'avantage d'une plus grande souplesse d'emploi tout en gardant une précision suffisante pour l'utilisation industrielle. On distingue deux catégories :

- Les capteurs passifs, à résistance ou à thermistance.
- Les capteurs actifs, à couple thermoélectrique

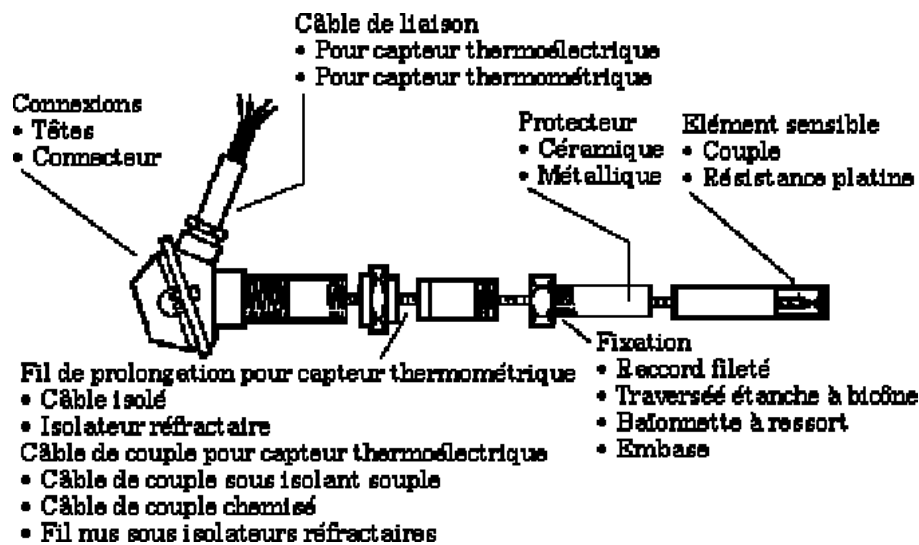


Figure III.2 : Structure d'un capteur électrique de température industriel

#### 3.2.1. Thermomètres à résistance

Le fonctionnement de ces capteurs passifs, se base sur l'influence de la température sur la résistance électrique d'un conducteur. La relation entre la résistance électrique et la température est de la forme:

$$R = R_0(1 + a. \theta\theta + b. \theta\theta^{22} + c. \theta\theta^{33})$$

Avec  $\theta$  : la température en °C,  $R_0$  la résistance à 0°C, a, b et c sont des coefficients positifs spécifiques au métal. Différents métaux peuvent être utilisés comme le nickel et le cuivre mais c'est le platine est le plus utilisé, car il offre l'étendue de mesure la plus grande (-250 à 1100 °C).

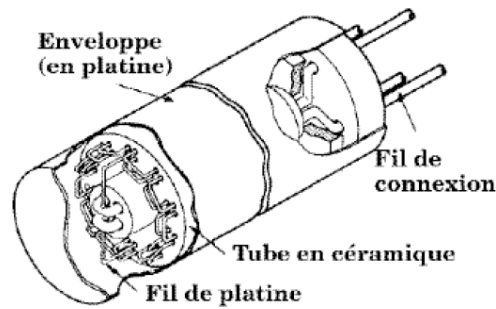


Figure III.3 : Sonde PT100

- Avantages et inconvénients

Populaires pour leur stabilité, les capteurs de température à résistance (Resistance Temperature Detectors) RTD 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 RTD se caractérisent aussi par un temps de réponse lent et par une faible sensibilité. En outre, parce qu'ils nécessitent une excitation en courant, ils sont sujets à une élévation de température. Les RTD peuvent mesurer des températures pouvant atteindre 850°C.

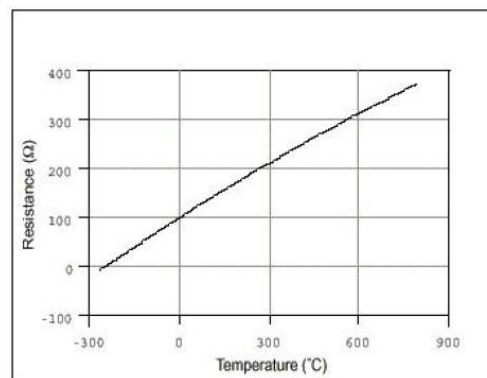


Figure III.4 : Courbe résistance/température pour PT100

### 3.2.2. Thermomètres à thermistance

Ceux sont des oxydes métalliques, semi-conducteurs, présentant une bonne sensibilité, qui est dix fois supérieure à celle de résistances de platine, grâce à une rapide et importante variation de la résistance en fonction de la température sous la forme :

$$R = a. \exp\left(\frac{b}{\theta\theta}\right)$$

Il existe deux types de thermistances :

- Les CTN à coefficient de température négatif ( $b < 0$ ).
- Les CTP à coefficient de température positif ( $b > 0$ )

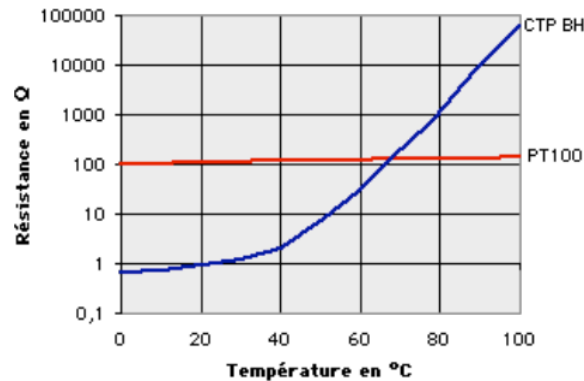


Figure III.5 : Comparaison entre la résistance d'une thermistance CTP et une sonde PT100

- Avantages et inconvénients

En règle générale, les thermistances ont une sensibilité de mesure très élevée ( $\sim 200 \Omega/^\circ\text{C}$ ), ce qui les rend très sensibles aux variations de températures. Bien qu'elles présentent un taux de réponse de l'ordre de la seconde, les thermistances ne peuvent être utilisées que dans une gamme de températures ne dépassant pas  $300^\circ\text{C}$ .

Cette caractéristique, associée à leur résistance nominale élevée, contribue à garantir des mesures précises dans les applications à basse température.

Un autre avantage des thermistances est leur faible encombrement : elles sont fabriquées sous forme de petits cylindres, dont la variation de la résistance dépend du matériau utilisé.

Les thermistances ne présentent pas de polarisation et peuvent être utilisées en continu ou en alternatif. Cependant, la loi de variation de la résistance avec la température est non linéaire.

### 3.2.3. Thermocouples

#### 3.2.3.1. Principe

Le principe du thermocouple repose sur la conversion de l'énergie thermique en tension électrique qui découle des phénomènes suivants de la thermoélectricité : Effet Peltier, Effet Thomson et Effet seebeck.

#### 3.2.3.2. Effet Peltier

A la jonction de deux conducteurs A et B différents mais à la même température, s'établit une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température :  $V_M - V_N = P_{AB}^{\theta\theta}$

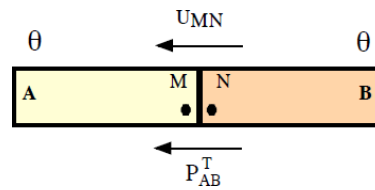


Figure III.6 : Effet Peltier

### 3.2.3.3. Loi de Volta

Dans un circuit isotherme, constitué de conducteurs différents, la somme des f.e.m. de Peltier est nulle. On a donc :  $P_{AB}^{\theta\theta} + P_{BC}^{\theta\theta} = P_{AC}^{\theta\theta}$

### 3.2.3.4. Effet Thomson

Entre deux points M et N à températures différentes, à l'intérieur d'un conducteur homogène A s'établit une force électromotrice qui ne dépend que de la nature du conducteur et des températures aux points M et N. C'est la force électromotrice de Thomson,  $h_A$  est le coefficient de Thomson du conducteur A :  $T_A^{\theta\theta_M\theta\theta_N} = \int_{\theta_N}^{\theta_M} h_A \cdot d\theta$

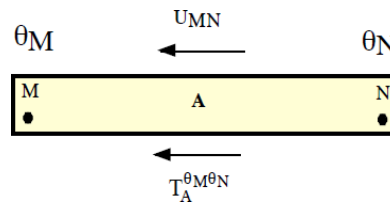


Figure III.7 : Effet Thomson

### 3.2.3.5. Effet Seebeck

Soit un circuit fermé, constitué de deux conducteurs A et B dont les jonctions sont à des températures  $\theta_1$  et  $\theta_2$ . Ce circuit constitue un couple thermoélectrique. Ce couple est le siège d'une force électromotrice dite de Seebeck qui résulte des effets de Peltier et de Thomson :  $S_{AB}^{\theta\theta_2\theta\theta_1} = T_B^{\theta\theta_2\theta\theta_1} - T_A^{\theta\theta_2\theta\theta_1} + P_{AB}^{\theta\theta_2} + P_{AB}^{\theta\theta_1}$

Comme la F.E.M. dépend de la différence de température entre les 2 jonctions, il faut s'assurer de connaître la température de l'une d'entre elle pour déduire la température de l'autre. La jonction dont la température est connue est dite "jonction de référence".

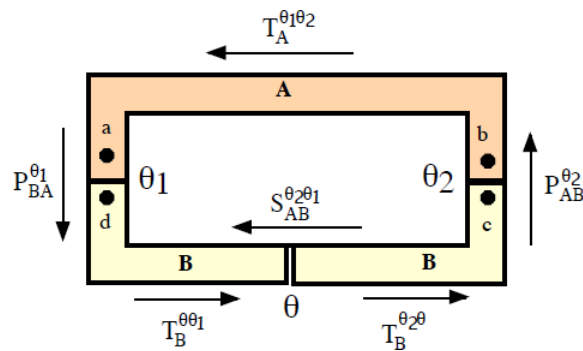


Figure III.8 : Effet Seebeck

### 3.2.3.6. Différents types de thermocouples

Tableau 1 : Caractéristiques des thermocouples les plus connus

Code	Couple	Usage continu Usage intermittent	Précision en %	Remarques
K	Nickel - Chrome Nickel - Aluminium	0°C – 1100°C -180°C – 1300°C	1,5	Bien adapté aux milieux oxydants
T	Cuivre Cuivre - Nickel	-185°C – 300°C -250°C – 400°C	0,5	
J	Fer Cuivre - Nickel	20°C – 700°C -180°C – 750°C	1,5	Pour milieu réducteur
E	Nickel - Chrome Cuivre - Nickel	0°C – 800°C -40°C – 900°C	1,5	Utilisation sous vide ou milieu légèrement oxydant
R	Platine – 13% Rhodium Platine	0°C – 1600°C 0°C – 1700°C	1	
S	Platine – 10% Rhodium Platine	0°C – 1550°C 0°C – 1700°C	1	Résistance à l'oxydation à la corrosion

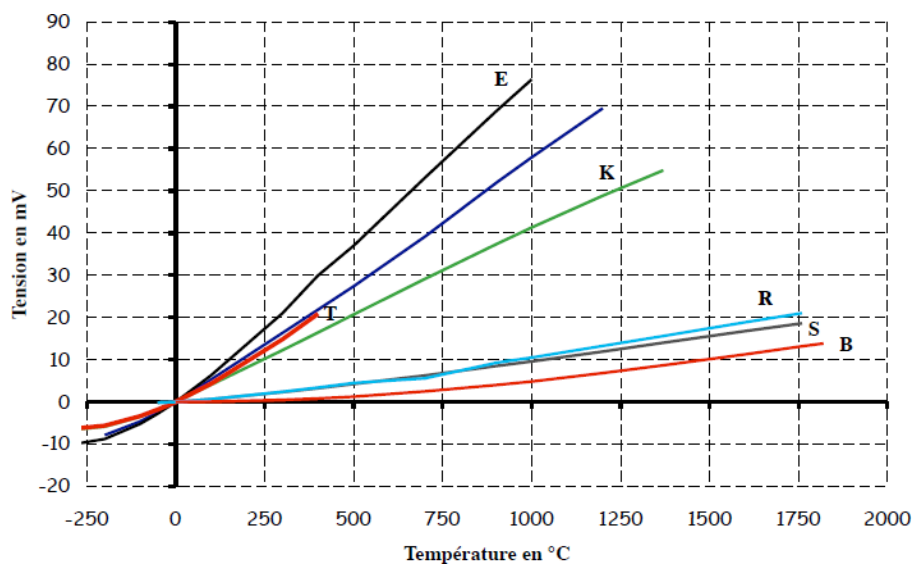


Figure III.9 : FEM en fonction de la température des différents thermocouples

### 3.2.3.7. Caractéristiques

- Les thermocouples permettent de mesurer de hautes températures.
- Les températures mesurées ponctuelles.
- Très grande rapidité.
- Pas d'auto échauffement.
- Peuvent mesurer des températures de surfaces à l'aide des peintures métalliques.

### 3.2.3.8. Câbles de compensation

On utilise les câbles de compensation dans deux cas :

- Lorsque les métaux formant le couple sont d'un prix très élevé.
- Lorsque la distance entre la prise de température et la jonction de référence est grande.

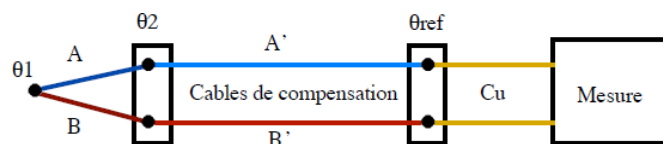


Figure III.10 : Câbles de compensation

### 3.2.3.9. Méthodes de mesure

Le thermocouple est donc le siège de la FEM de Seebeck, qui permet de mesurer la température.

Deux méthodes sont généralement utilisées :

- Méthode du millivoltmètre.
- Méthode d'opposition : pour laquelle le courant dans le thermocouple est annulé.

### 3.2.4. Thermomètres à semi-conducteurs

La tension aux bornes d'un semi-conducteur ainsi que le courant qui le traverse dépendent de la température :

$$I = I_{00} \cdot \exp\left(\frac{q \cdot V}{k \cdot T}\right)$$

Ce sont des capteurs dit intégrés et qui ont l'avantage, à courant constant I, la mesure de V est linéaire en fonction de la température et se présente sous la forme :  $V = a \cdot T + b$

Où a dépend de l'élément sensible.

Ce type de capteurs utilisant, des diodes et des transistors ont l'avantage d'être simple à fabriquer et à mettre en œuvre, peu coûteux et très linéaire. Mais du fait de leur conception, ils ont une étendue de mesure limité ( $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) et sont affectés par un champs magnétique.



Figure III.11 : Thermomètres à diodes ou transistor

### 3.3. Pyromètres optiques

#### 3.3.1. Principe

Les pyromètres optiques se basent sur la relation entre la température d'un corps et le rayonnement optique que ce corps émet. Ils permettent la détermination d'une température sans contact avec l'objet. C'est donc une méthode appropriée quand les conditions expérimentales n'autorisent pas l'utilisation des capteurs thermométriques classiques.



Figure III.12 : Pyromètre optique

#### 3.3.2. Applications

- mesure de températures élevées
- Plage de  $300$  à  $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Précision de  $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- mesures à de grandes distances
- environnement très agressif
- Localisation des points chauds
- Pièce en mouvement

#### 3.3.3. Types de pyromètres optiques

Suivant qu'on utilise les grandeurs spectrales à une longueur d'onde déterminée ou les grandeurs intégrales sur l'ensemble du spectre visible et infrarouge, les résultats obtenus n'ont pas la même signification physique. On distingue:

- Les pyromètres monochromatiques.

- Les pyromètres bi-chromatiques.
- Les pyromètres mesureurs d'énergie à radiation totale : On retrouve un thermocouple ou un RTD au niveau du point focal

### 3.3.4. Caractéristiques

- Plage de 300 à 3000 °C;
- Précision de  $\pm 5$  °C (dépend de l'utilisateur);
- Fonctionnement automatique possible.
- Capteur infrarouge avec thermocouple.

### 3.4. Conclusion

Le type de mesure définit le type de capteur à utiliser. Le choix du capteur adéquat dépend de différents critères :

- l'application
- l'étendue de mesure
- la précision
- la fidélité
- le temps de réponse
- prix
- durée de vie (la robustesse).
- sa forme

Un tableau récapitulatif des différences de gammes est donné comme suit :

Tableau 2 : Comparaison entre les différents capteurs thermométriques selon la gamme de température

