

## Chapitre II

# Mesures de température

### 1. La température , Grandeur thermométrique, Échelle thermométrique

La température est, au même titre que la pression, le volume, la longueur, etc... , un paramètre définissant **l'état d'un système physique** ; cette température ne variant pas avec l'extension du système est appelée "variable d'état intensive".

- **Grandeur thermométrique, Échelle thermométrique**

Une grandeur thermométrique est une grandeur physique qui dépend de la température :

$$G = f(q).$$

Elle peut alors servir à la détermination de cette température

#### Unités de mesure thermiques

- Échelle Celsius (1742). Échelle relative : Fusion de la glace à **0 °C** ; Ébullition de l'eau distillée à **100 °C**.
- Échelle Kelvin (1848). Échelle absolue : Zéro thermodynamique : **0 K** ; Point triple de l'eau (**0.01 °C**) : **273.16 K**.

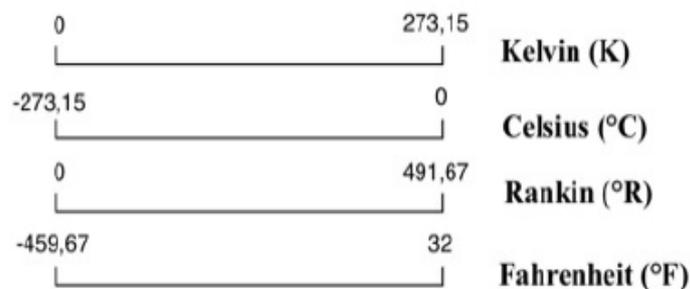
$$T (^{\circ}C) = T (^{\circ}K) - 273.15$$

- Échelle Fahrenheit (1707). Échelle relative : T. minimum solution aqueuse de NaCl : 0 °F; Température d'un cheval sain: 100 °F, *Température du corps humain: 96 °F*;

$$T (^{\circ}F) = 9/5 T (^{\circ}C) + 32$$

- Échelle Rankine. Échelle absolue du Fahrenheit : Zéro thermodynamique : **0 °R** ; Point triple de l'eau (**0.01 °C**) : **459.7 °F**.

$$T (^{\circ}F) = T (^{\circ}R) - 459.7$$



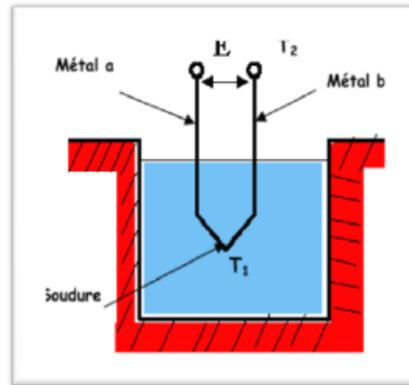
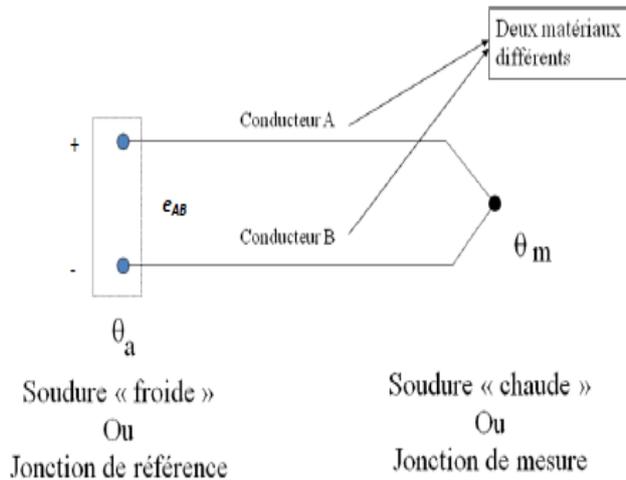
**Fig II.1** – Echelles de température

## 2- Thermocouple, thermistances, Détecteurs infrarouges, Pyromètre

### 2-1- Thermocouple

En physique, les thermocouples sont utilisés pour la mesure de températures. Ils sont bon marché et permettent la mesure dans une grande gamme de températures. Leur principal défaut est leur précision : il est relativement difficile d'obtenir des mesures avec une erreur inférieure à 0,1 - 0,2 °C.

La



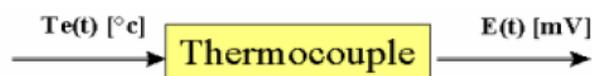
mesure de température par des thermocouples est basée sur l'effet Seebeck

Un thermocouple utilise principalement **l'effet Seebeck** : Si on réunit à une extrémité deux fils métalliques de natures différentes et que l'on élève la température de cette extrémité, il apparaît une tension  $e_{AB}$  aux extrémités restées libres qui dépend de la différence de température entre les jonctions,  $T_e = T_1 - T_2$

Il est possible de déterminer la température de l'extrémité chauffée à partir de la mesure de  $e_{AB}$

On appelle :

- **Soudure chaude** : Jonction de l'ensemble thermocouple soumis à la température à mesurer : c'est la jonction Capteur.
- **Soudure froide** : Jonction de l'ensemble thermocouple maintenu à une température connue ou à 0 °C : c'est la jonction Référence.



Pour mesurer une température inconnue, l'une des deux jonctions doit être maintenue à une température connue, par exemple celle de la glace fondante (0 °C). Ou une température de référence mesurée par un capteur. Et c'est donc une mesure indirecte, puisque les thermocouples mesurent en fait une différence de potentiel électrique.

Type	Métal A(+)	Métal B(+)	Plages utilisation	Coef. Seebeck $\alpha(\mu V/C^\circ)$	Erreur standard
J	Fer	Constantan	-40 à +750 °C	50.38 $\mu V/C^\circ$ à 0°C	2.2% à 0.75%
K	Chromel	Alumel	-40 à +1200 °C	39.45 $\mu V/C^\circ$ à 0°C	2.2% à 0.75%
S	Platine 10% Rhodium	Platine	0 à +1600 °C	10.21 $\mu V/C^\circ$ à 600°C	1.5% à 0.25%
T	Cuivre	Constantan	-40 à +350 °C	38.75 $\mu V/C^\circ$ à 0°C	1% à 0.75%

## 2.2 Thermomètres à thermistance

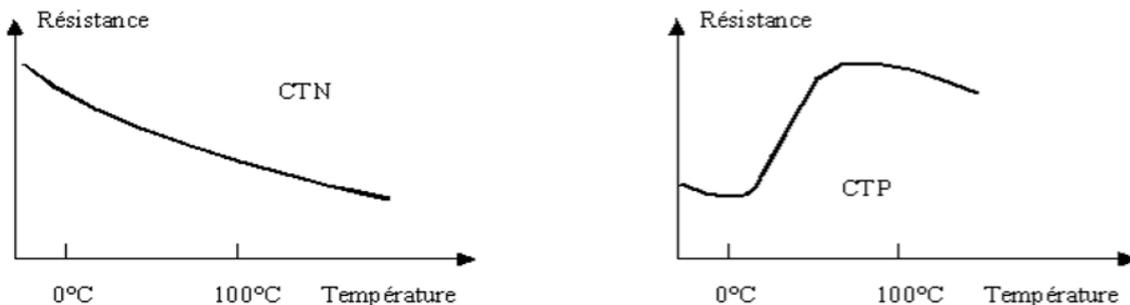
Une thermistance est un agglomérat de petit grain semi-conducteur et d'oxydes métalliques frittés, c'est-à-dire rendus compacts par haute pression exercée à température élevée, de l'ordre de 150 bars et 1000°C. La composition d'une thermistance est :

- ◆  $Fe_2O_3$  (oxyde ferrique) ;
- ◆  $MgAl_2O_4$  (aluminate de magnésium) ;
- ◆  $Zn_2TiO_4$  (titane de zinc).

La résistance électrique d'une thermistance est très sensible à l'action de la température. Il existe deux types de thermistance, les CTN à coefficient de température négatif, et les CTP à coefficient de température positif. La loi de variation est de la forme :

$$R = a \times \exp \frac{b}{T}$$

avec a et b coefficient du métal.



**Figure II 2: Variation de la résistance en fonction de la température**

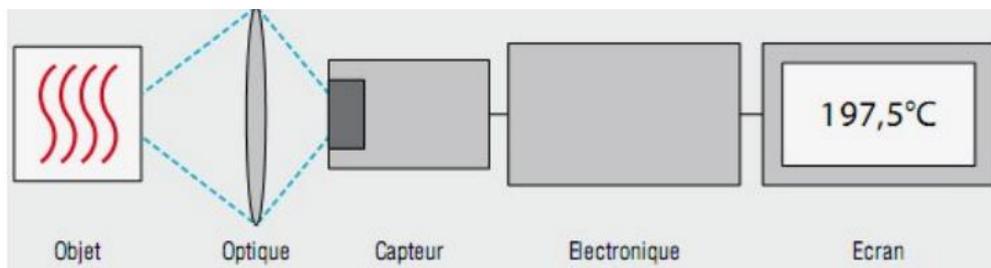
Suivant les deux courbes on distingue deux types de thermistance :

- ✓ Les CTN (Coefficient de Température Négatif, en anglais NTC, Negative Temperature Coefficient) sont des thermistances dont la résistance diminue de façon uniforme avec la température.
- ✓ 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 °C et 100 °C), mais diminue en dehors de cette zone.

### 2.3. Détecteurs infrarouges



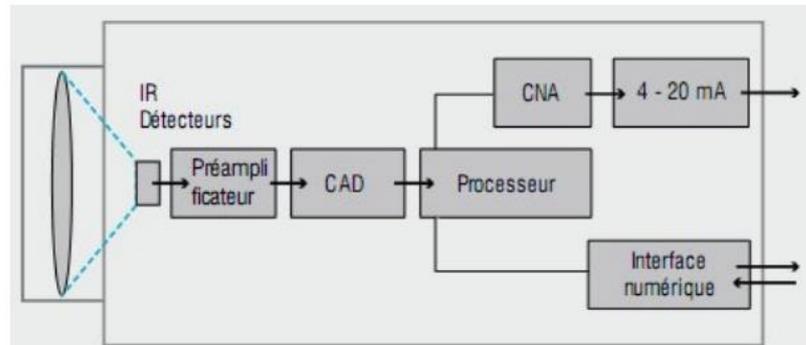
Chaque corps dont la température est supérieure au point zéro absolu de  $-273,15^{\circ}\text{C}$  ( $= 0$  Kelvin) émet en sa surface un rayonnement électromagnétique proportionnel à sa propre température appelé rayonnement propre. Une partie de ce rayonnement est un rayonnement infrarouge pouvant être utilisé pour la mesure thermique. Ce rayonnement traverse l'atmosphère et est focalisé à l'aide d'une lentille (optique d'entrée) sur un élément de détection qui génère un signal électrique proportionnel au rayonnement. Le signal est amplifié et transformé via traitement numérique subséquent en une grandeur de sortie proportionnelle à la température de l'objet. La valeur de mesure peut faire l'objet d'un affichage sur écran ou être émise sous forme de signal analogique permettant un simple raccordement aux systèmes de régulation de la commande de processus



**Figure II 3: Système infrarouge**

Le rayonnement infrarouge émis par l'objet à mesurer est focalisé sur un élément de détection infrarouge à l'aide d'une optique d'entrée. L'élément de détection génère un signal électrique correspondant pouvant ensuite être amplifié et traité. A l'aide d'un traitement numérique des signaux, le signal en question est transformé en une grandeur d'émission proportionnelle à la température de l'objet, puis affiché sur un écran ou émis sous forme de signal analogique. Pour compenser les influences de la température ambiante, il est fait appel à un second détecteur qui mesure la température de l'appareil de mesure ou de son canal optique. Le calcul de la température de l'objet à mesurer s'effectue donc en trois étapes :

1. Transformation du rayonnement infrarouge reçu en signal électrique
2. Compensation du rayonnement de fond de l'appareil et de l'objet
3. Linéarisation et émission de la température



Outre l'affichage de la température sur écran, il existe comme grandeurs de sortie des sorties standardisées sous forme de 0/4-20 mA, 0-10 V linéaires ainsi que des signaux d'éléments thermiques qui permettent un simple raccordement à des systèmes de régulation de la commande de processus. Par ailleurs, la plupart des thermomètres infrarouges utilisés à ce jour disposent, en raison du traitement numérique des valeurs de mesure en interne, également d'interfaces numériques (USB, RS232, RS485, Ethernet, Profibus) pour l'émission des données et pour l'accès aux paramètres des appareils.

## 2.4 Pyromètre



Il existe plusieurs sortes de pyromètres. On peut distinguer :

- Les pyromètres optiques
- Les pyromètres monochromatiques
- Les pyromètres bis chromatiques
- Les pyromètres mesureurs d'énergie

## 2.4.1. Les pyromètres optiques

### 2.4.1.1. Présentation

La pyrométrie optique est une méthode de mesure de la température basée sur la relation entre la température d'un corps et le rayonnement optique (infrarouge ou visible) que ce corps émet. Les capteurs utilisés sont donc des capteurs optiques, photo-électriques ou thermiques. L'intérêt de la pyrométrie optique est de permettre 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 de capteurs thermométriques classiques :

- Température très élevée (supérieure à 2000 °C) ;
- Mesures à grande distance ;
- Environnement très agressif ;
- Pièce en mouvement ;
- Localisation des points chauds.

### 2.4.1.2 Principes physiques

Tout corps émet spontanément et en permanence un rayonnement électromagnétique dont le spectre continu a une répartition énergétique fonction de la température : c'est le rayonnement thermique. Les lois de cette émission sont d'abord établies pour un corps idéal, le corps noir, caractérisé par une absorption totale de tout rayonnement incident ; le rayonnement thermique d'un corps réel, selon son pouvoir absorbant, se rapproche plus ou moins de celui du corps noir.

#### ✓ Lois du rayonnement thermique du corps noir

On définit :

- L'émittance  $E_n$  : C'est la puissance totale rayonnée dans un hémisphère, par unité de surface de l'émetteur ( $W.m^{-2}$ ).

- L'émittance spectrale  $E_{\lambda,n}$ : C'est la densité spectrale de puissance rayonnée dans un hémisphère, par unité de surface de l'émetteur, à une longueur d'onde  $\lambda$  ;

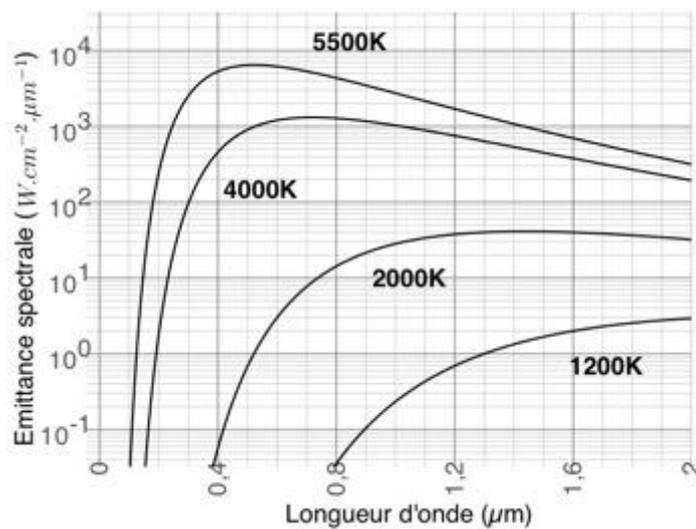
### La loi, de Planck

C'est la loi fondamentale de l'émission thermique ; elle donne l'émittance spectrale d'une source (en  $W.m^{-3}.sr^{-1}$ ) qui est un corps noir en fonction de la longueur d'onde et de la température absolue de:

$$E_{\lambda,T} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)}$$

avec :

- $C_1 = 2\pi^5 h^2 C^2 / 15$
- $C_2 = hc/k$
- $h$  : Constante de Planck =  $6.6256 \cdot 10^{-34} W.s^2$
- $C$  : vitesse de la lumière =  $2.998 \cdot 10^8 m.s^{-1}$
- $k$  : constante de Boltzmann =  $1.38054 \cdot 10^{-23} W.s.K^{-1}$



**Figure II 4:** *Emittance spectrale en fonction de la longueur d'onde pour diverses températures*

Sur la figure , on remarque l'augmentation rapide de l'émittance avec la température et le déplacement du spectre de l'infrarouge vers le visible (de 0,4  $\mu m$  à 0,8  $\mu m$ ) au fur et à mesure que la température augmente.

- En dessous de 500 °C, le rayonnement thermique est quasi totalement dans le domaine infrarouge ;
- Dans le cas du soleil, (T = 5500 K ) lmax correspond au maximum de sensibilité de l'oeil.

✓ **Rayonnement thermique d'un corps réel**

L'émittance spectrale d'une cible réelle E, est liée à l'émittance spectrale du corps noir  $E_{\lambda,n}$  par la relation :

$$E_{\lambda}(T) = e(\lambda, T)E_{\lambda,n}(T)$$

Avec  $e(\lambda, T)$  est l'émissivité à la longueur d'onde  $\lambda$  et à la température T du matériau constituant la cible.

L'émissivité d'un corps est égale à son coefficient d'absorption (loi de Kirchhoff) : sa valeur, égale à 1 pour le corps noir est inférieure à 1 pour un corps réel et dépend, en particulier; de sa nature et de son état de surface. L'incertitude sur les valeurs exactes de  $e(\lambda, T)$  est l'une des principales sources d'erreurs potentielles en pyrométrie optique.

✓ *Limite d'emploi des capteurs photoélectrique en pyrométrie optique*

Photodiodes Si	600 °C
Photodiodes Ge	200 °C
Photorésistance Pb S	100 °C
Photorésistance Pb Se	50 °C
Photorésistance In Sb	0 °C
Photorésistance Hg Cd Te	-50 °C

**2.4.2. Pyromètres mono chromatiques :**

Utiliser pour la mesure de température moyenne d'un « spot » ou zone de mesure

**4.2.3. Pyromètres bichromatiques**

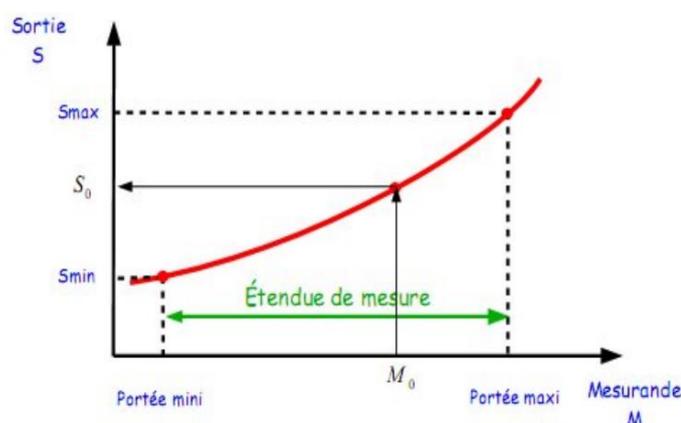
Ce pyromètre peut être considéré comme un double pyromètre monochromatique exploitant deux plages voisines du rayonnement thermique centrées sur des longueurs d'onde  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  et de même largeur.

#### 4.2.4. Pyromètres mesureurs d'énergie

L'ensemble du spectre de rayonnement thermique de la cible (en fait une grande partie) est reçu par un détecteur à large bande, de type thermique. En pratique le pyromètre est étalonné dans ses conditions d'emploi à l'aide d'un thermocouple lorsque cela est possible.

### 2.3. L'étalonnage des capteurs thermiques

La caractéristique statique est la courbe qui représente la réponse statique en fonction du mesurande, on l'appelle aussi courbe d'étalonnage



**Figure II 4 : Courbe d'étalonnage.**

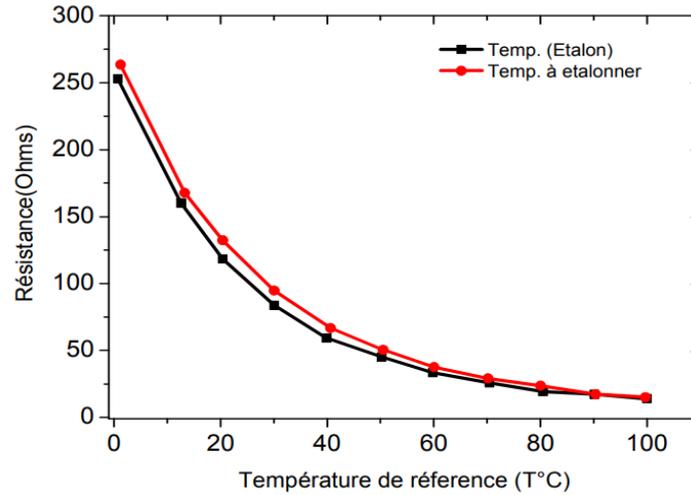
Elle peut être définie par un tableau représentatif de points discrets de mesure

°C	+ 0	+ 1	+ 2	+ 3	+ 4	+ 5	+ 6	+ 7	+ 8	+ 9
0	100	100,39	100,78	101,17	101,56	101,94	102,33	102,72	103,11	103,59
+ 10	103,89	104,28	104,67	105,06	105,45	105,84	106,23	106,62	107,01	107,40
+ 20	107,79	108,18	108,57	108,95	109,34	109,73	110,12	110,51	110,89	111,28
+ 30	111,67	112,06	112,44	112,83	113,22	113,60	113,99	114,38	114,77	115,15
+ 40	115,54	115,93	116,31	116,70	117,08	117,47	117,86	118,24	118,63	119,01
+ 50	119,40	119,78	120,16	120,55	120,93	121,32	121,70	122,09	122,47	122,86
+ 60	123,24	123,62	124,00	124,39	124,77	125,15	125,54	125,92	126,30	126,69
+ 70	127,07	127,45	127,83	128,22	128,60	128,98	129,36	129,74	130,13	130,51

**Tableau d'étalonnage (Pt100)**

le tableau s'emploie dans le sens direct (température → signal) à un °C près, et dans le sens inverse (signal → température) il est possible d'affiner la conversion réciproque par interpolation linéaire.

Pour étalonner un tel instrument de mesure de température, on doit corriger sa courbe qui représente un palier de mesure aux valeurs lues par rapport à une chaîne étalon à l'aide d'une droite d'ajustement



**Figure II.5. Courbe d'étalonnage d'une thermistance.**

Suivant les résultats obtenus, on peut calculer l'erreur du thermocouple qui est égale à :

$$Erreur = \frac{(T_{\text{étalon}} - T_{\text{thermocouple}})}{T_{\text{étalon}}} \times 100$$