
CHAPITRE III

CAPTEURS DE TEMPERATURE

INTRODUCTION

La mesure de la température est très importante puisque la température détermine de façon décisive les propriétés de la matière (solide, liquide ou gazeuse). Elle agit sur les propriétés physiques de la matière: Pression, Résistivité électrique, Changement de phase ... Pour cette raison la température est l'une des grandeurs physiques les plus mesurées.

IV.1. UNITES ET METHODES DE MESURE DE TEMPERATURE

La température est une grandeur intensive, qui peut être mesurée de deux façons différentes:

- ✓ A l'échelle atomique, elle est liée à l'énergie cinétique moyenne des constituants de la matière;
- ✓ Au niveau macroscopique, certaines propriétés des corps dépendant de la température (volume massique, résistivité électrique, etc...) peuvent être choisies pour construire des échelles de température.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour mesurer la température :

- Méthodes mécaniques (dilatation d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz)
- Méthodes électriques (résistivité, fém à la jonction de matériaux de natures différentes, fréquence de résonance d'un quartz)
- Méthodes optiques (rayonnement spectral)

IV.2. ECHELLES DE TEMPERATURE (GRANDEUR INTENSIVE)

IV.2.1. Echelle absolue

Son unité est le kelvin (°k), le **Kelvin** est défini à partir du point triple de l'eau, qui vaut 273,16 K «Le kelvin est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau» ; 0 °K est le zéro absolu (aucune agitation thermique).

IV.2.2. Echelle Celsius

Echelle relative : références à la fusion de la glace à 0°C et à l'ébullition de l'eau distillée à 100°C. Elle est défini à partir de l'échelle absolue à travers la relation suivante :

$$T^{\circ}C = T(^{\circ}K) - 273,15 \quad (\text{IV.1})$$

Le zéro absolu vaut donc -273,15°C

IV.2.3. Echelle Fahrenheit

L'échelle fahrenheit attribue une plage de 180°F entre la température de solidification de l'eau et sa température d'ébullition (solidification de l'eau à 32°F et point d'ébullition à 212°F). Ainsi elle s'obtient de l'échelle précédente par la relation :

$$T(^{\circ}F) = 9/5 T(^{\circ}C) + 32 \text{ ou } T(^{\circ}C) = 5/9(T(^{\circ}F) - 32) \quad (\text{IV.2})$$

D'une façon générale la relation liant les trois échelles est :

$$\frac{T(^{\circ}k)-273}{100} = \frac{T(^{\circ}c)}{100} = \frac{T(^{\circ}F)-32}{180} \quad (\text{IV.3})$$

IV.2.4. Echelle Rankine

Echelle absolue de Fahrenheit : références aux zéro thermodynamiques 0°R et au point triple de l'eau (0.01°C) 459.7°R

$$T(^{\circ}F) = T(^{\circ}R) - 459.7 \quad (\text{IV.4})$$

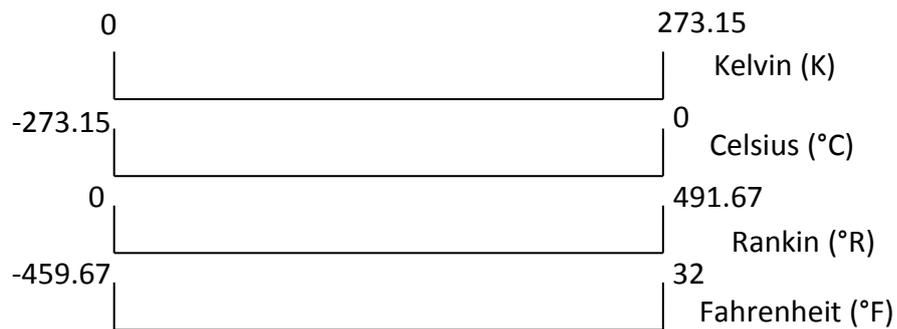


Figure IV.1: Echelles de températures

IV.3. THERMOMETRES A DILATATION

C'est la dilatation des corps qui sera le phénomène image de la grandeur thermométrique. On constate en effet que le volume d'un corps augmente en général, lorsque sa température s'élève (sans qu'il y ait de changement d'état physique). La dilatation étant réversible, elle fournit un mode pratique de repérage des températures. Ce phénomène se retrouve de façon analogue, mais avec une ampleur différente pour les liquides, les gaz et les solides. D'où les trois types de thermomètres à dilatation.

- * Thermométrie à dilatation de liquide
- * Thermométrie à dilatation de gaz
- * Thermométrie à dilatation de solide

IV.3.1. Thermomètres à dilatation de liquide

Il est constitué d'un réservoir surmonté d'un capillaire de section faible et régulière (ordre de grandeur : $D = 0,2 \text{ mm}$) se terminant par une ampoule de sécurité (utile lors d'un dépassement de la température admissible). Il est réalisé en verre. Sous l'effet des variations de température, le liquide se dilate plus ou moins. Son niveau est repéré à l'aide d'une échelle thermométrique gravée sur l'enveloppe.

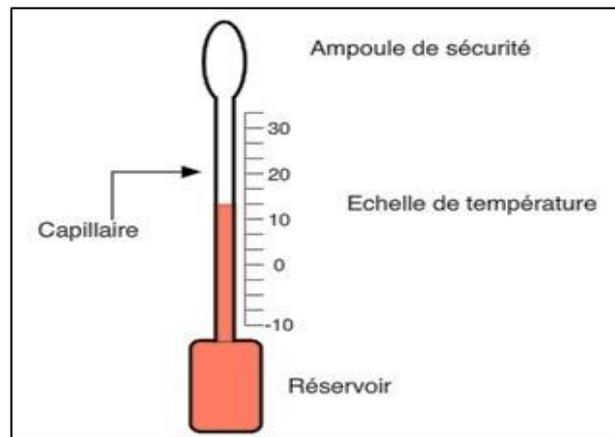


Figure IV.2 : Thermomètre à dilatation de liquide

- La loi de variation du volume du liquide en fonction de la température est :

$$V = V_0(1 + \alpha\theta) \quad (\text{IV.5})$$

Avec :

- V_0 : volume du liquide à 0 °C ;
- V : volume de liquide à θ °C ;
- α : coefficient de dilatation du liquide en °C⁻¹.

La sensibilité du thermomètre à dilatation de liquide est proportionnelle au volume V_0 (fonction du volume du réservoir), au coefficient de dilatation du liquide (donc au type de liquide choisi) et inversement proportionnel à la section S du capillaire. Liquides thermométriques les plus utilisés sont illustrés dans le tableau 1 :

Liquide	Domaine d'emploi (°C)	α en °C ⁻¹
Pentane	-200 à 20	
Alcool-éthylique	-110 à 100	1.17
Toluène	-90 à 200	1.03
Créosote Alcool-éthylique	-10 à 200	
Mercure	-38 à +650	0.182
Mercure-Thallium	-58 à +650	
Mercure-Gallium	0 à 1000	

Tableau 1: Liquides employés en thermométrie

IV.3.2. Thermomètres à dilatation de gaz

L'équation d'un gaz parfait est donnée par l'expression:

$$PV = nRT \quad (\text{IV.6})$$

Avec :

- n : Nombre de moles ;
- $R = 8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$;
- T : Température en K ;
- P : Pression en Pa.

On voit donc que, si l'on enferme une certaine quantité de gaz dans une enveloppe de volume constant V , la pression développée par le gaz est proportionnelle à la température absolue :

$P=RT/V$, avec le rapport R/V constant.

Sous une forme schématisée, un thermomètre à gaz est composé d'une sonde (A), formant une enveloppe dans laquelle est enfermé le gaz thermométrique. Cette sonde est reliée par une tube capillaire de raccordement à l'extrémité (B) d'un tube de bourdon appelé spirale de mesure. La longueur du tube de raccordement ne doit pas excéder 100m. sous l'effet de la température du milieu dans lequel la sonde est placée, la pression du gaz va varier, ce qui modifiera l'équilibre de l'extrémité libre du tube de bourdon.

Cette variation de pression se traduira par un mouvement de rotation de l'index indicateur qui se déplacera devant un cadran portant des graduations thermométriques.

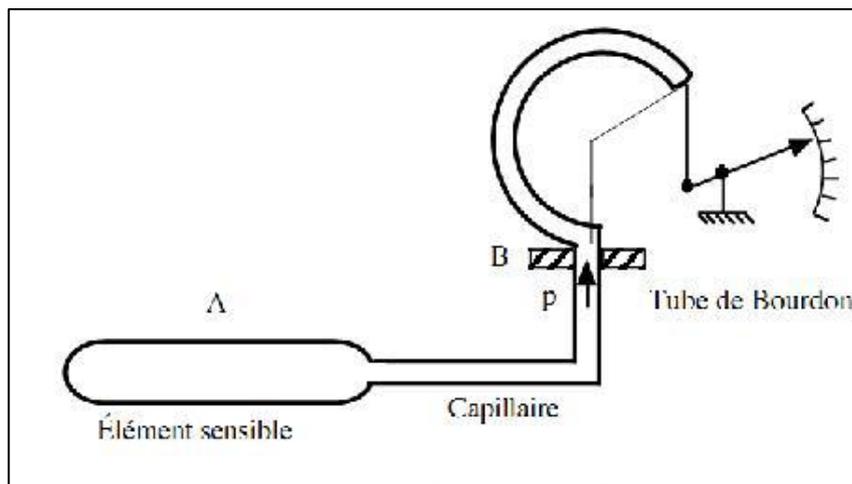


Figure IV.3: Thermomètre à gaz

Gaz	Température critique
Hélium	-267.8°C
Hydrogène	-239.9°C
Azote	-147.1°C
Gaz carbonique	-31.1°C

Tableau 2: Gaz employés en thermométrie

- Le gaz doit être soigneusement séché avant l'emploi et être utilisé dans des conditions qui le rapprochent de l'état parfait.
- L'avantage des thermomètres à gaz est leur précision, 1% en mesures industrielles. Mais leur sonde est d'assez grande dimension. Ils permettent le repérage des très basses températures.

IV.3.3. Thermomètres à dilatation de solide

Lorsqu'une tige métallique est portée à la température T sa longueur varie. La relation entre sa longueur L et la température T est donnée par la relation:

$$L = L_0(1 + \alpha T) \quad (\text{IV.7})$$

Avec :

L_0 est la longueur de la tige à 0°C ; L : la longueur de la tige à $^\circ\text{T}$ et α : est le coefficient de dilatation linéaire du matériau ($9.10^{-6}/^\circ\text{C}$ pour le Platine, $9.10^{-6}/^\circ\text{C}^{-1}$ pour le Zinc,.....).

- Le Pyromètre linéaire est un exemple des thermomètres à dilatation de solide. La sonde d'un pyromètre est formée d'une gaine de silice dans laquelle est placé un barreau métallique dilatable.
- Une tige en élinvar (Ferronickel dérivé de l'invar auquel on a ajouté du chrome pour assurer un module d'élasticité constant) transmet la dilatation du barreau à un système amplificateur permettant la lecture.

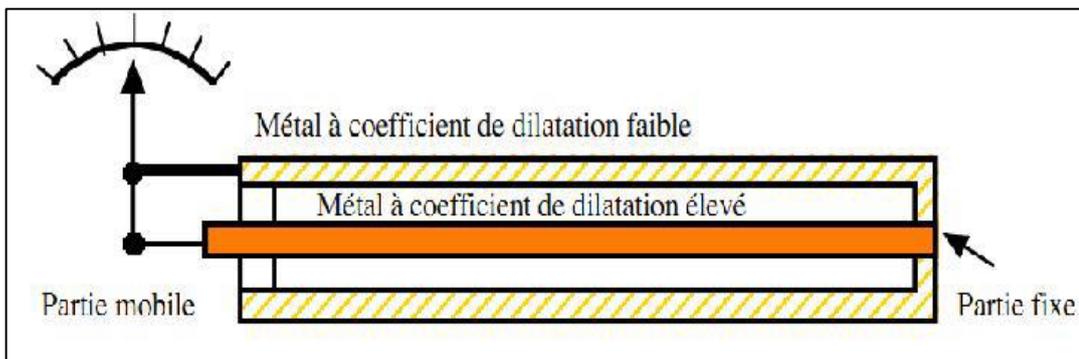


Figure IV.4: Pyromètre linéaire

IV.4. THERMOMETRES ELECTRIQUES

Les capteurs qui précèdent sont à lecture directe et sont peut utiliser dans les régulations industrielles. Les capteurs électriques qui suivent auront l'avantage d'une plus grande souplesse d'emploi (information transmissible, enregistrement) tout en gardant une précision suffisante pour les emplois industriels et beaucoup d'emplois de laboratoire.

On décompose les capteurs de température en deux sous catégories:

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

IV.4.1. Thermomètres à résistance et à thermistance

Le fonctionnement des thermomètres à résistance et thermistances est basé sur le même phénomène physique : l'influence de la température sur la résistance électrique d'un conducteur. La mesure d'une température est donc ramenée à la mesure d'une résistance. Comme la caractéristique résistance/température est de nature différente pour un métal et un agglomérat d'oxydes métalliques, deux cas sont distingués. On parlera du thermomètre à résistance d'une part et de thermistance d'autre part.

IV.4.1.1. Thermomètres à résistance

Le conducteur est un élément métallique. On peut établir une relation entre la résistance R et la température θ et ainsi mesurer θ en mesurant R . Cette relation est de la forme :

$$R = R_0(1 + aT + bT^2 + cT^3) \quad (\text{IV.8})$$

Avec T la température en $^{\circ}\text{C}$, R_0 la résistance à 0°C , a , b et c des coefficients positifs, spécifiques au métal. C'est le thermomètre à résistance de platine qui répond le mieux à l'ensemble des critères: sensibilité, fidélité, linéarité et encombrement, car il peut s'obtenir très pur (99,999%) et il est très ductile.

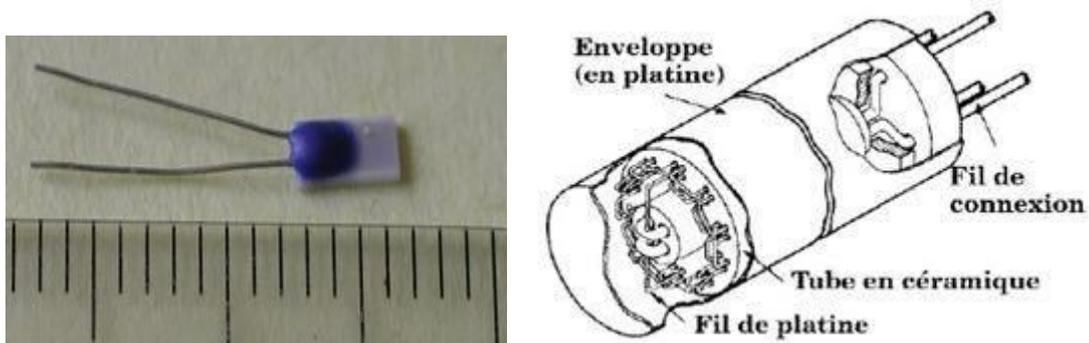


Figure IV.5: Thermomètre à résistances.

Par exemple, la sonde PT100 est un thermomètre à résistance de platine ; elle est caractérisée par :

- Une puissance de 100W à 0°C ; diamètre de fil $\sim 10 \mu\text{m}$ et longueur $\sim 10 \text{ cm}$ et 1 cm après bobinage. Le fil bobiné est enrobé dans des matières isolantes choisies en fonction des températures d'utilisation auxquelles la sonde sera soumise (verre, céramique, ciment, plastique).

- La sensibilité pour la PT100 est environ $0,4 \text{ mV}/^\circ\text{C}$; si le courant de mesure est de 5mA , on aura alors $2\text{mV}/^\circ\text{C}$ aux bornes de la sonde.
- Le temps de réponse (la rapidité) dépend de la résistance thermique de l'enrobage et de la gaine. En général, $\sim 1 \text{ s}$ dans l'eau, $\sim 10 \text{ s}$ dans l'air.
- Influence du courant de mesure. Pour éviter l'auto-échauffement de la sonde on limite le courant de mesure de la sonde $< 10\text{mA}$.

IV.4.1.2. Thermomètres à thermistance

Une thermistance est un agglomérat 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 peut-être, par exemple :

- Fe_2O_3 (oxyde ferrique) ;
- MgAl_2O_4 (aluminat de magnésium) ;
- Zn_2TiO_4 (titane de zinc).

Les thermistances se présentent sous forme de disque, anneau, perle, etc. Un enrobage ou une encapsulation les protège éventuellement.

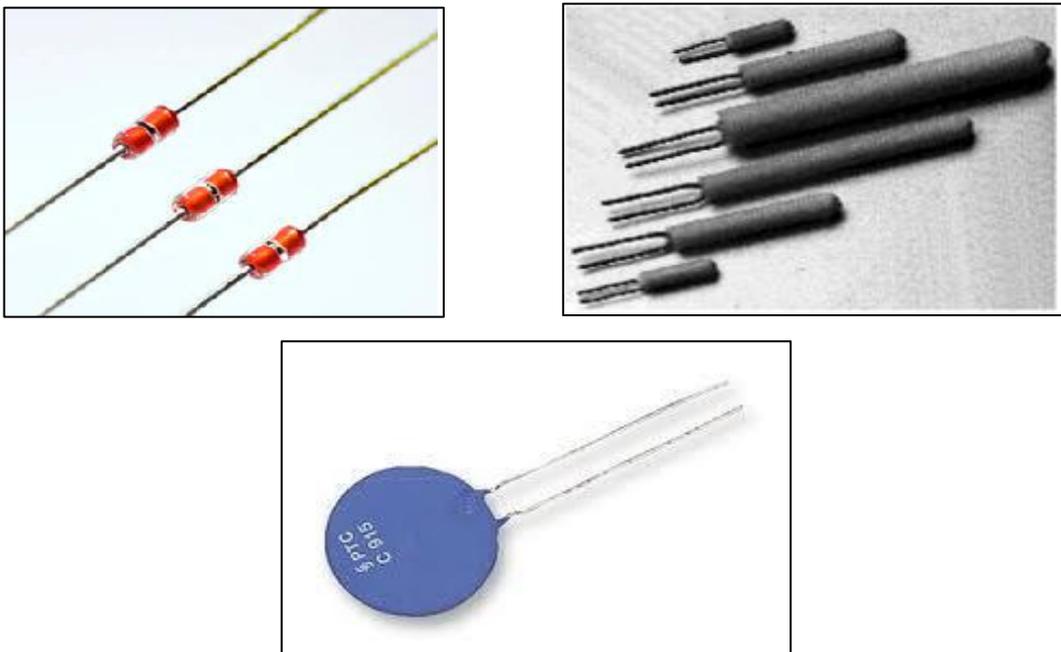


Figure IV.6: Thermomètre à base de thermistances

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 :

$$R_T = A. e^{(B/T)} \quad (\text{IV.9})$$

On définit alors le coefficient de température :

$$\alpha_T = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT} = -\frac{B}{T^2} \quad (\text{IV.10})$$

Avec :

- B est compris entre 3 000 et 5000 K.
- α_T varie entre $1,2 \cdot 10^{-2}$ et $8 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$.

IV.4.2. Comparaison des thermistances par rapport aux résistances

- **Avantages:**
 - ✓ Les thermistances présentent une sensibilité thermique élevée, de l'ordre de 10 fois supérieure à celle des résistances métalliques.
 - ✓ Leur grande résistivité permet d'obtenir des dimensions réduites (quelques mm) et de réaliser des mesures quasi ponctuelles de la température.
 - ✓ Leur capacité calorifique réduite (due à leurs faibles dimensions donc faible encombrement) leur permet des temps de réponse très courts.
 - ✓ Leur domaine d'utilisation va de -80°C à 700°C .
- **Inconvénients:**
 - ✓ Elles sont sensibles à la corrosion chimique et aux chocs thermiques.
 - ✓ La loi de variation de température n'est pas linéaire.

IV.5. MONTAGES DE MESURE

La mesure de la température se ramène donc à une mesure de résistance. La méthode la plus simple consiste à alimenter la résistance avec un courant I et de mesurer la tension aux bornes de la résistance (on rappelle : $U = R * I$).

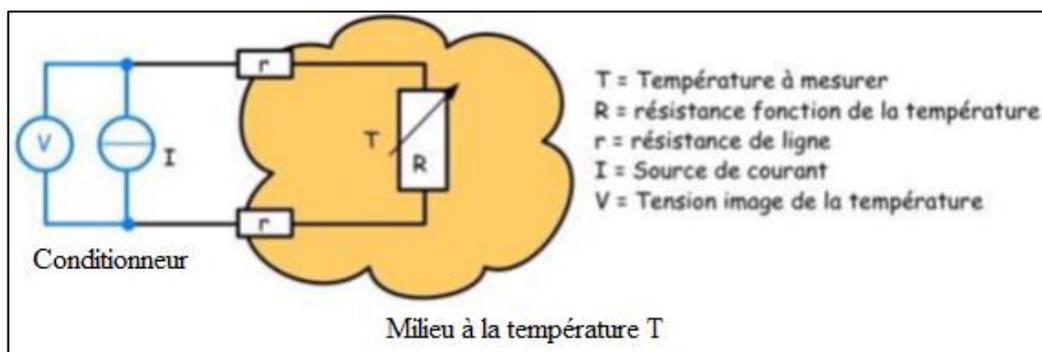


Figure IV.7: Montage deux fils avec source de courant.

Mais, dans ce montage, la tension V dépend aussi des résistances de ligne r . Pour éviter cela, on ajoute deux fils aux bornes de la résistance, on utilise alors une résistance avec quatre fils.

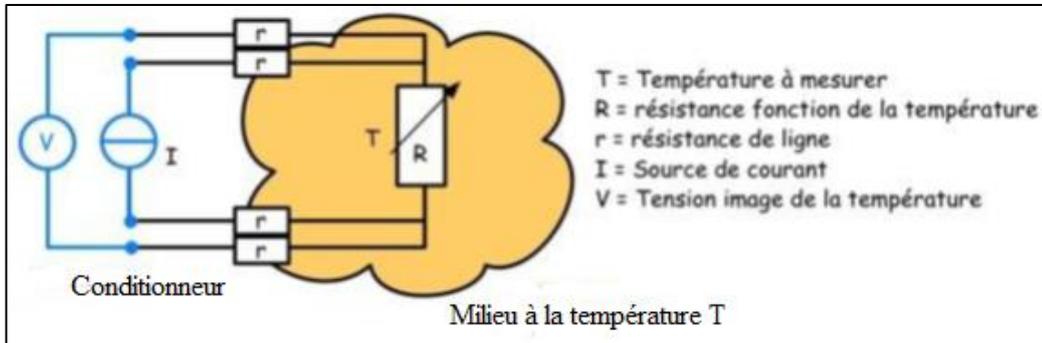


Figure IV.8: Montage quatre fils avec source de courant.

Ces deux montages ne permettent pas de supprimer simplement la composante continue $R(0^\circ\text{C})$ de la résistance de mesure R . On préfère généralement utiliser un montage utilisant un pont de Wheatstone.

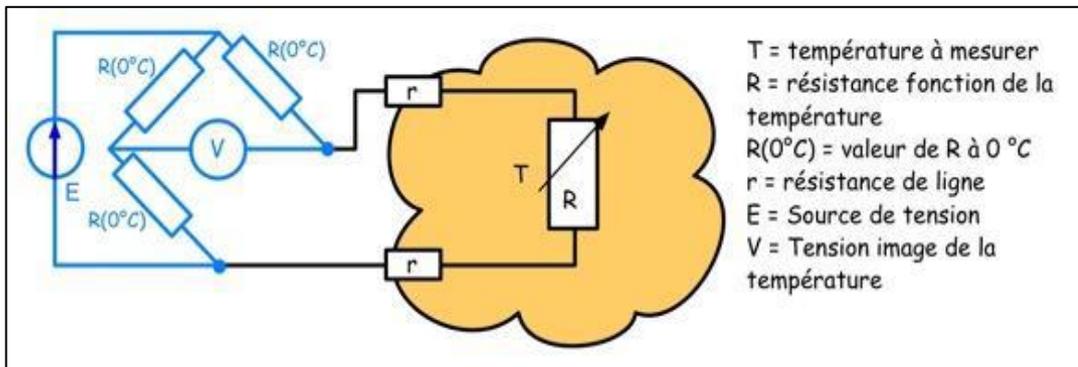


Figure IV.9: Montage avec pont de Wheatstone

Si on néglige les résistances r et si on note:

$$R(T) = R_0 + \alpha T \tag{IV.11}$$

$$V = \frac{\alpha T}{2R_0 + \alpha T} \tag{IV.12}$$

Pour diminuer l'influence des résistances de ligne, on utilise un montage trois fils comme il est illustré sur la figure IV.10 .

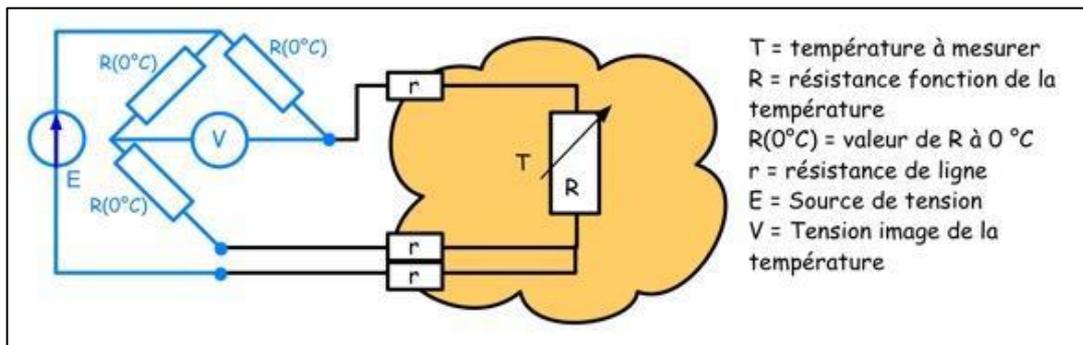


Figure IV.10: Montage à trois fils

IV.6. LES THERMOCOUPLES

IV.6.1. Principe de fonctionnement

Un thermocouple utilise principalement l'effet Seebeck afin d'obtenir une mesure de la température. Si on réunit à une extrémité deux fils métalliques A et B de natures différentes et que l'on élève la température de cette extrémité, il apparaît une tension ($E_{A/B}^{T_1T_2}$) aux extrémités restées libres. Il est possible de déterminer la température de l'extrémité chauffée à partir de la mesure de ($E_{A/B}^{T_1T_2}$). 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.

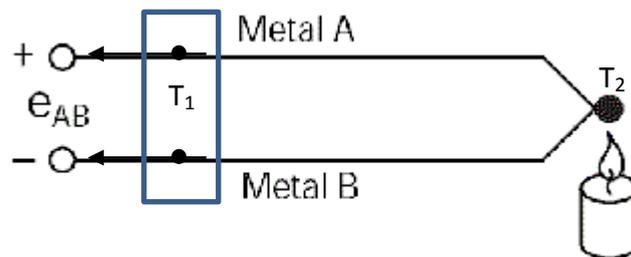


Figure IV.11: Principe d'un thermocouple

En générale l'une des températures est fixe, connue et sert comme référence ($T_1=T_{\text{réf}}$); l'autre température T_2 est celle cherchée T_c . Cette tension thermoélectrique ($E_{A/B}^{T_1T_2}$) est connue sous le nom de tension de Seebeck, d'après Thomas Seebeck qui l'a découverte en 1821.

Un thermocouple fonctionne par l'effet Seebeck : C'est l'effet par lequel les électrons excités par la chaleur vont se déplacer de la région chaude vers la région froide. Un thermocouple permet de mesurer des températures ponctuelles avec des vitesses de réponses élevées. Il délivre une f.é.m dont la mesure ne nécessite pas la circulation d'un courant qui

provoque l'auto-échauffement. Ceci représente des avantages par rapport aux résistances thermométriques. Cependant et cela est un inconvénient du thermocouple, la mesure exige que la température de la jonction de référence soit connue : toute incertitude sur T_{ref} risque d'introduire une incertitude de même ordre sur T_c .

La tension thermo-électrique induite n'est pas linéaire en fonction de la température. Cependant, pour de petites variations de température, la tension est approximativement linéaire, soit:

$$\Delta V = S. \Delta T \quad (IV.13)$$

Où ΔV est la variation de la tension, S est le coefficient de Seebeck et ΔT la variation de la température.

Il existe plusieurs types de thermocouples; ils sont désignés par une lettre majuscule qui indique leur composition selon les conventions de l'American National Standards Institute (ANSI). Par exemple, un thermocouple de type J est constitué d'un fil conducteur en fer et d'un autre en constantan (un alliage de cuivre et de nickel).

Le tableau 3 donne les caractéristiques simplifiées des thermocouples les plus courants définies par la norme CEI 584.1.

Code littéral	Couple	Usage continue Usage intermittent	Précision en %	Remarques
K	Nickel-Chrome Nickel-Aluminium	0°C à 1100 °C -180°C à 1300°C	1.5	Bien adaptés aux milieux oxydants
T	Cuivre Cuivre-Nickel	-185°C à 300°C -250°C à 400°C	0.5	
J	Fer Cuivre-Nickel	20°C à 700°C -180°C à 750°C	1.5	Pour milieu réducteur
E	Nickel-Chrome Cuivre-Nickel	-0°C à 800°C -40°C à 900°C	1.5	Utilisation sous vide ou milieu légèrement oxydant
R	Platine-13%Rhodium Platine	0°C à 1600°C 0°C à 1700°C	1	
S	Platine-10%Rhodium Platine	0°C à 1550°C 0°C à 1700°C	1	Résistance à l'oxydation A la corrosion

Tableau 3: Caractéristiques simplifiées des thermocouples

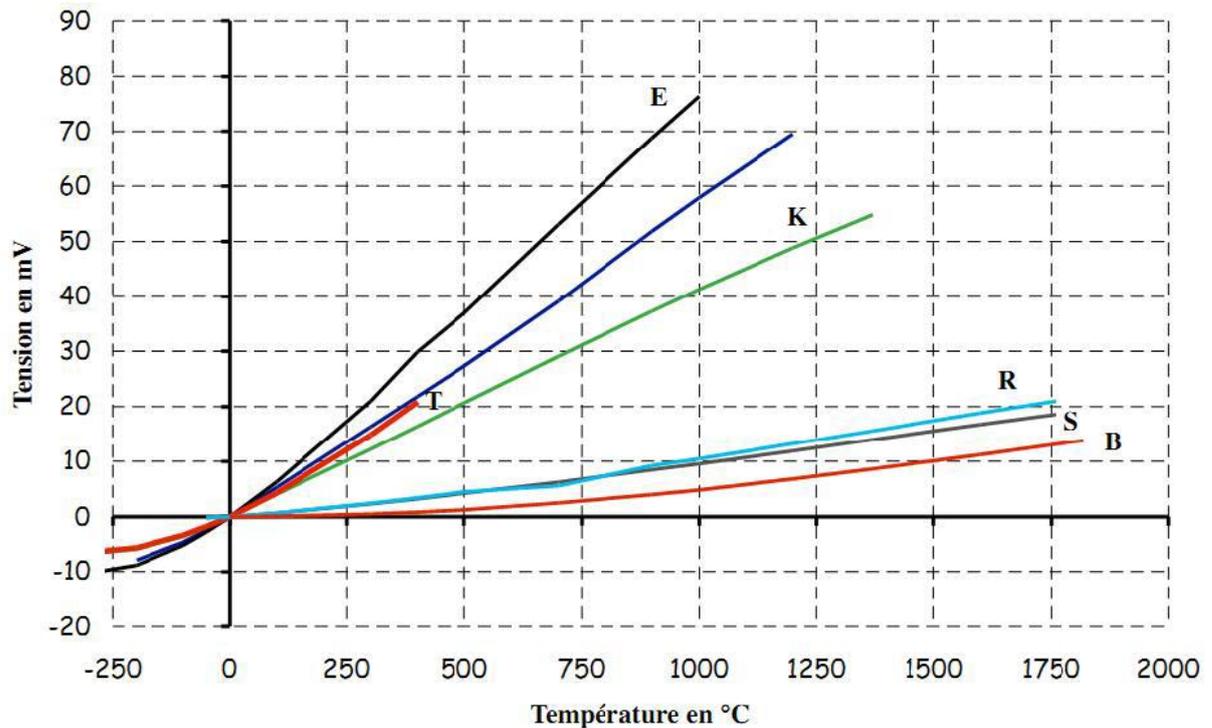


Figure IV.12: FEM en fonction de la température de thermocouples

IV.6.2. Câbles de compensation

Généralement, on utilise les câbles de compensation dans les cas suivants:

- Lorsque les métaux formant le thermocouple sont coûteux ;
- Lorsque la distance entre la prise de température et la jonction de référence est importante.

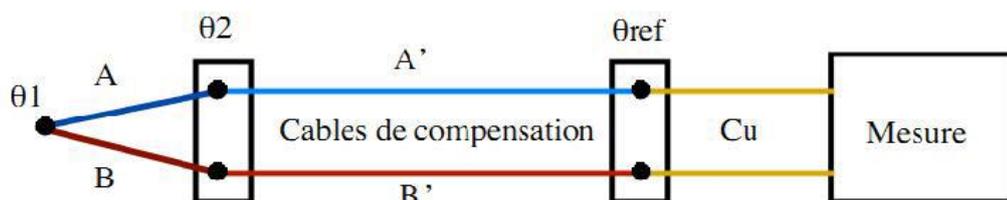


Figure IV.13: Câbles de compensation

En utilisant les câbles de compensation, la tension délivrée par le couple AB ne sera pas modifiée pas les fils A' et B' à condition que:

- Les jonctions AA' et BB' soient à la même température θ_2 ;
- Les couples A'B' et AB aient la même force électromotrice de Seebeck entre θ_2 et 0°C .

Au-delà de la jonction de référence et jusqu'à l'appareil de mesure, la liaison peut être assurée par des fils de cuivre moins résistants et beaucoup moins chers que les fils du thermocouple et les câbles de compensation eux-mêmes.

Il est important évidemment d'associer convenablement les câbles de compensation et les thermocouples correspondants.

Les fils de compensation les plus courants ainsi que leur nature sont indiquées au tableau 4 en regard des thermocouples correspondants.

Fils de compensation		Fils thermocouples	
Positif	Négatif	Positif	Négatif
Cuivre	Constantan T	Cuivre	Constantan
Fer	Constantan J	Fer	Constantan
Cuivre	Constantan V	Chrome	Alumel
Cuivre	Cupronickel S	Platine Rhodié 10%	Platine

Tableau 4: Fils de compensation

IV.7. LES PYROMETRES OPTIQUES

IV.7.1. 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.

IV.7.2. Principe physiques

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.

Rayonnement thermique : Tout corps émet spontanément et en permanence un rayonnement électromagnétique dont le spectre a une répartition énergétique fonction de la température

- Origine : transition radiatives provoquées dans les atomes par l'agitation thermique
- Les lois sont d'abord établies pour un corps idéal : le corps noir

Corps noir : Absorption totale de tout rayonnement incident.

- Un corps réel absorbe et réémet une partie du rayonnement environnant.

IV.7.2.1 Rayonnement du corps noir

L'émittance E_n : Puissance totale rayonnée dans un hémisphère, par unité de surface de l'émetteur.

L'émittance spectrale $E_{\lambda,n}$: Densité spectrale de puissance rayonnée dans un hémisphère, par unité de surface de l'émetteur, à une longueur d'onde λ .

- La loi de Planck est la loi fondamentale de l'émission thermique.
- Elle donne l'émittance spectrale d'un corps noir en fonction de la longueur d'onde et de la température absolue T de cette source :

$$E_{\lambda,n} = \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1)} \quad (\text{IV.14})$$

Avec:

- $C_1 = 2\pi hc^2 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$ et $C_2 = hc/k = 1,43 \cdot 10^{-2} \text{ mK}$,
- h: constante de Planck, $h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$,
- c: vitesse de la lumière (dans le vide), $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$,
- k: constante de Boltzmann, $k = 1,38054 \cdot 10^{-23} \text{ JsK}^{-1}$.

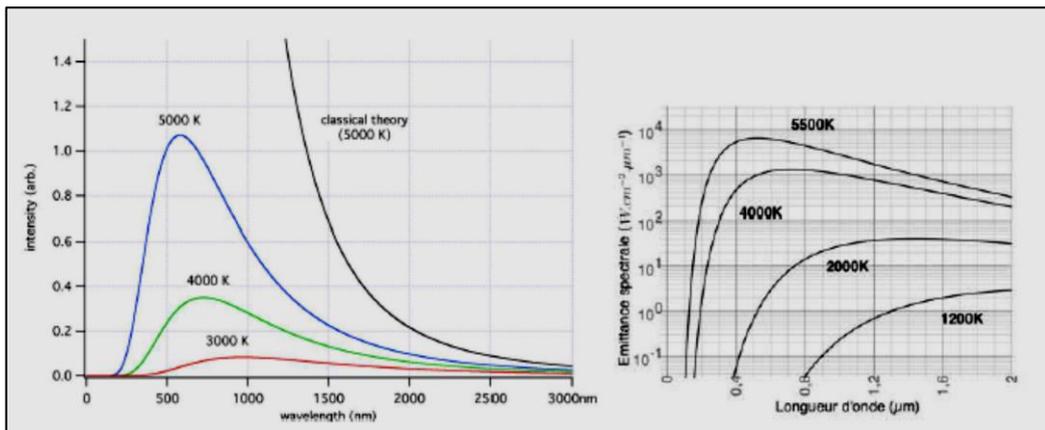


Figure IV.14: Loi de Planck

Sur la figure IV.14, on remarque:

- L'augmentation rapide de l'émittance avec la température,
- Le déplacement du spectre de l'infrarouge vers le visible (de $0,4 \mu\text{m}$ à $0,8 \mu\text{m}$) 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, ($T=5500^\circ\text{K}$) le maximum correspond au maximum de sensibilité de l'œil.

IV.7.2.2. Rayonnement thermique d'un corps réel

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

$$E_\lambda(T) = e(\lambda, T) \cdot E_{\lambda,n}(T) \quad (\text{IV.15})$$

où $e(\lambda, T)$ est l'émissivité à la longueur d'onde λ 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 vaut à 1 pour le corps noir, et est inférieure à 1 pour un corps réel,
- . 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.

IV.7.3. Principe généraux des pyromètres optiques

On doit distinguer:

- Les pyromètres monochromatiques;
- Les pyromètres bi-chromatiques;
- Les pyromètres mesureurs d'énergie.

Un dispositif optique forme l'image de la source S sur la surface S' du récepteur avec juxtaposition d'une source de référence dans les appareils de zéro.

IV.7.3.1. Pyromètres monochromatique (à bande étroite)

- Une fraction limitée du spectre de rayonnement thermique de la cible est sélectionnée.
- Un filtre optique assure la sélection.
- Un capteur photoélectrique transforme le rayonnement $E_\lambda(T^\circ)$ en signal électrique S_{el} .

L'expression de S_{el} est:

$$S_{el} = \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} S_d(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot E_\lambda(T) \quad (\text{IV.16})$$

Avec:

$S_d(\lambda)$: Sensibilité du photo-détecteur;

$K(\lambda)$: Fonction du système optique;

$E_\lambda(T)$: émissance spectrale de la cible.

Si le spectre reçu est étroit : $\lambda \cong \lambda_0$ dans la bande $\Delta\lambda$, alors:

$$S_{el} = S_d(\lambda_0) \cdot K(\lambda_0) \cdot e(\lambda_0, T) \cdot \frac{C_1 \cdot \Delta\lambda_0}{\lambda_0^5 \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda_0 \cdot T}\right) - 1 \right)} \quad (\text{IV.17})$$

- Lorsque le pyromètre est étalonné au moyen d'un corps noir, S_{e1} correspond à une température T_n .
- Dans le cas d'une cible réelle d'émissivité $e(\lambda_0, T)$, la température T correspondant à S_{e1} est:

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_n} + \frac{\lambda_0}{c_2} \ln e(\lambda_0, T)} \quad (\text{IV.18})$$

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

Tableau 5: Limite d'emploi des capteurs photoélectriques en pyrométrie optique

IV.7.3.2. Pyromètres bi-chromatiques

- Ce pyromètre peut être considéré comme un double pyromètre monochromatique exploitant deux plages voisines du rayonnement thermique.
- Le rapport des signaux électriques est alors indépendant de l'émissivité $e(\lambda, T)$ de la cible.
- C'est le grand intérêt de ce type de pyromètre.

IV.7.3.3. 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.
- En pratique le pyromètre est étalonné dans ses conditions d'emploi à l'aide d'un thermocouple lorsque cela est possible.