

II Capteurs de température

1. Les différentes unités de température

1.1. Thermodynamique

La température est une grandeur intensive (identique pour des corps en équilibre thermique), qui peut être définie de deux façons différentes : à 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 empiriques de température.

1.2. Les échelles de température

La plus ancienne est l'échelle centésimale (1742), attribuant arbitrairement les valeurs 0 et 100 degrés à la glace fondante et à l'eau bouillante, sous la pression atmosphérique normale. La température ainsi définie dépend du phénomène choisi (la dilatation d'un fluide). Pour constituer le thermomètre étalon, on utilise de préférence l'échelle Celsius, définie à partir de l'échelle Kelvin par :

$$T (\text{Celsius}) = T (\text{kelvin}) - 273,15$$

Cette dernière échelle, qui est celle du système international, ne dépend d'aucun phénomène particulier et définit donc des températures absolues. Le zéro absolu (-273,15 °C) a pu être approché à quelques millièmes de degrés près. Les phénomènes physiques qui se manifestent aux très basses températures connaissent d'importantes applications (Supraconductivité). Dans le domaine des hautes températures, les torches à plasma permettent d'atteindre 50 000 K et les lasers de grande puissance utilisés pour les recherches sur la fusion nucléaire contrôlée donnent, pendant des temps très brefs, des températures dépassant 100 millions de degrés.

	Kelvin (K)	Celsius (°C)	Rankine (°R)	Fahrenheit (°F)
Zéro absolu	0	-273,15	0	-459,67
Équilibre eau glace à 101325 Pa	273,15	0	491,67	32
Point triple de l'eau	273,16	0,01	491,69	32,018
Ébullition de l'eau à 101325 Pa	373,15	100	671,67	212

2. Thermomètres à dilatation

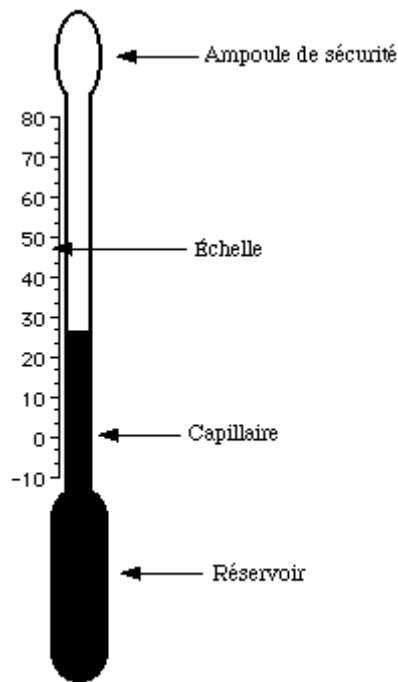
2.1. Présentation

Dans ce paragraphe, 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.

2.2. Thermomètres à dilatation de liquide

2.2.1 Description



Il est réalisé en verre et est constitué d'un réservoir surmonté d'un capillaire de section faible et régulière (ordre de grandeur : Diamètre = 0,2 mm) se terminant par une ampoule de sécurité (utile lors d'un dépassement de la température admissible). 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.

2.2.2 Loi de variation

La loi de variation du volume du liquide en fonction de la température est $V = V_0(1+aT)$ ce qui donne pour la hauteur correspondante :

$$h = V/S = V_0(1+aT)/S$$

Avec : V_0 = volume du liquide à 0 °C ; V = volume de liquide à T °C

a = coefficient de dilatation du liquide en °C⁻¹ ; S = section du capillaire.

Cette équation nous montre que 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.

2.2.3 Liquide thermométrique

Liquide	Domaine d'emploi (°C)	a en °C ⁻¹
Pentane	-200 à +20	*
Alcool éthylique	-110 à +100	1,17
Toluène	-90 à +100	1,03
Créosote - Alcool éthylique	-10 à +200	*
Mercure	-38 à +650	0,182
Mercure - Thallium	-58 à +650	*
Mercure - Gallium	0 à +1000	*

L'espace libre au dessus du liquide peut-être vide. Toutefois, pour empêcher la colonne de liquide de se fractionner facilement et aussi pour permettre de mesurer des hautes températures, l'espace libre est rempli d'un gaz neutre (azote ou argon) gaz mis sous une pression fonction de la température à mesurer.

Exemple : Thermomètre à mercure prévu pour mesurer 600 °C, pression de l'azote 20 bars.

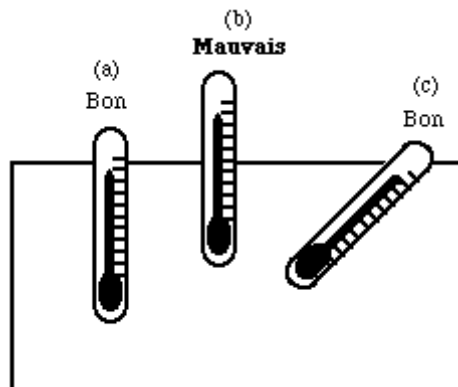
La chambre d'expansion évite les trop fortes variations de pression.

2.2.4 Nature de l'enveloppe

En fonction de la température à mesurer, il y a lieu de choisir le matériau constituant l'enveloppe du thermomètre :

- Verre d'Iena jusqu'à 450 °C
- Verre Supremax jusqu'à 630 °C
- Silice pure fondue jusqu'à 1 000 °C

2.2.5 Colonne émergente



Dans ce cas on doit penser à corriger la mesure de la température s'il est impossible d'immerger complètement la colonne. Dans les cas (a) et (c) la colonne de liquide thermométrique est totalement immergée dans l'enceinte dont on mesure la température X. La dilatation de ce liquide se fait donc pleinement. Dans le cas (b) une partie de la colonne de liquide est en contact avec la température ambiante. Le volume correspondant dépend donc de la résultante de ces deux températures.

2.3. Thermomètres à dilatation de gaz

2.3.1 Rappel

L'équation d'un gaz parfait est : $PV = nRT$

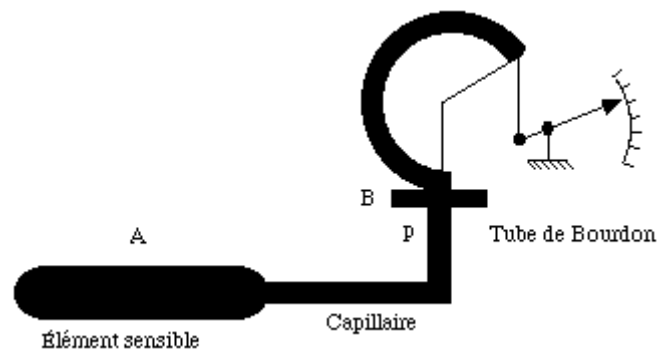
n : Nombre de moles ; $R = 8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$; T : Température en K ; P : Pression en Pa.

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 : $p = \frac{R}{V} \cdot T$

Le rapport R/V étant constant.

2.3.2 Principe

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 un tube de raccordement de faible section à l'extrémité B d'un tube de Bourdon, appelé spirale de mesure. Cette extrémité B est fixe. La longueur du tube de raccordement ne doit pas excéder 100 mètres.



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.

Les gaz les plus employés sont :

Gaz	Température critique
l'hélium	-267,8 °C
l'hydrogène	-239,9 °C
l'azote	-147,1 °C
le gaz carbonique	-31,1 °C

L'avantage des thermomètres à gaz est leur précision, 1 % en mesures industrielles. Mais leur sonde est d'assez grande dimension, ce qui est un inconvénient. Ils permettent le repérage des très basses températures. Certains thermomètres à gaz sont de véritables instruments de précision, auxquels on a recours pour les déterminations de référence de la température. Le thermomètre à hydrogène en est l'exemple classique.

2.4. 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 T est : $L = L_0(1 + \alpha T)$

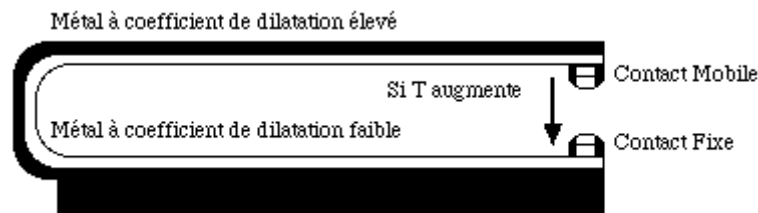
avec : L la longueur de la tige à la température T ; L_0 la longueur de la tige à 0 °C ;
T la température en °C ; α le coefficient de dilatation linéaire du métal.

La dilatation linéaire du métal peut donc servir de grandeur thermométrique.

Quelques valeurs de α : $9 \cdot 10^{-6}$ pour le platine ; $30 \cdot 10^{-6}$ pour le Zinc ; $2 \cdot 10^{-6}$ pour l'Invar (Fer + 36 % de Ni).

2.4.1 Bilame

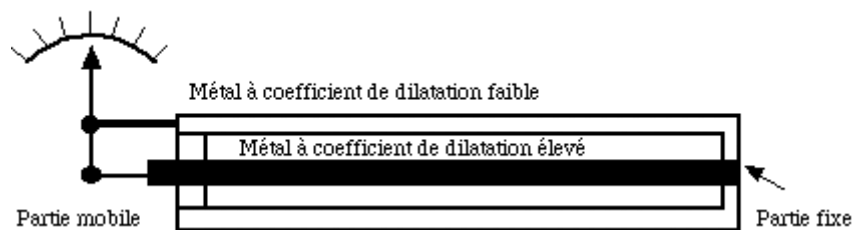
Une bilame thermique est constituée de deux bandes d'alliage dont les coefficients de dilatation sont très différents, soudées à plat sur toute leur surface. Lorsqu'une telle bande est soumise à une variation de température, les dilatations différentes des deux faces provoquent des tensions, il en résulte une incurvation de l'ensemble.



Constitution : Métal très dilatable : Alliage de fer ; Métal peu dilatable : Invar

2.4.2 Pyromètre linéaire

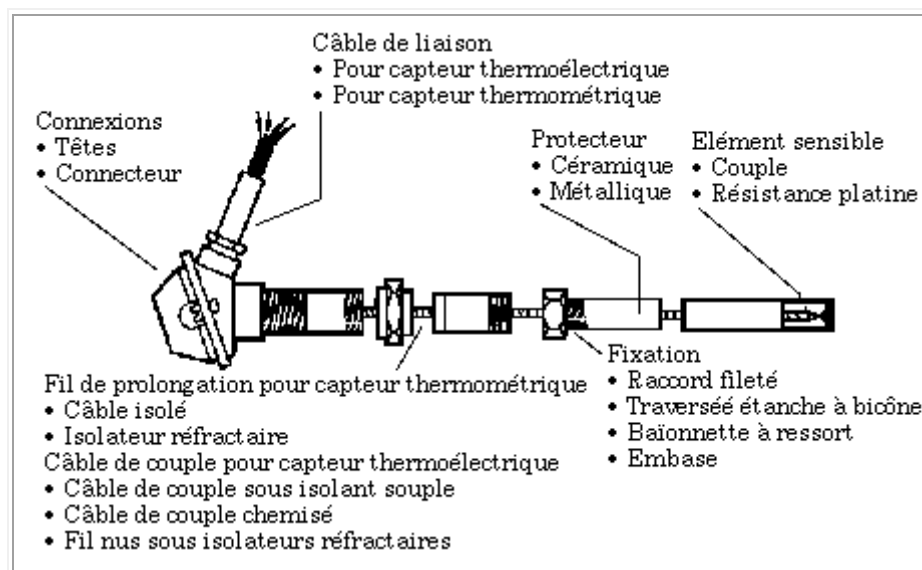
La sonde est formée d'une gaine de silice dans laquelle est placé un barreau métallique dilatable.



3. Thermomètres électriques

3.1. Présentation

Les capteurs qui précèdent sont à lecture directe et se prêtent peu à l'enregistrement si ce n'est les capteurs à dilatation de solide. De plus, à l'exception du thermomètre à gaz la lecture a lieu sur le lieu de mesure. Les capteurs à signal électrique 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.



3.2. Thermomètres à résistance et à thermistance

Le fonctionnement des thermomètres à résistance et des thermistances est basé sur un même phénomène physique, à savoir la variation de la résistance électrique d'un conducteur avec la température. Les lois de variation étant très régulières, il est possible de les utiliser pour repérer les températures par des mesures de résistance. Mais comme ces lois sont différentes suivant qu'il s'agit d'un métal ou d'un agglomérat d'oxydes métalliques, deux cas ont été distingués sous les appellations de thermomètre à résistance d'une part et de thermistance d'autre part.

3.2.1 Thermomètres à résistance

La résistance électrique d'un conducteur métallique croît avec la température. Cette variation est parfaitement réversible. On peut donc établir une relation $R = f(T)$ entre la résistance R et la température T et ainsi relevé T en mesurant R .

Lorsque la température varie on a : $R = R_0(1 + aT + bT^2 + cT^3)$
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.

Quelques métaux utilisés :

Métal	Résistivité à 0°C	Point de fusion	Domaine d'emploi	R_{100}/R_0
	$\mu^*.\text{cm}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	
Cuivre	7	1083	-190 à +150	1,427
Nickel	6,38	1453	-60 à +180	1,672
Platine	9,81	1769	-250 à +1100	1,392
Indium	9	153	-269 à +27	

C'est le platine qui est le matériau le plus utilisé.

Exemple : La sonde Pt100 est une sonde platine qui a une résistance de 100 Ohms pour une température de 0°C . (138,5 pour 100°C)

3.2.2 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).

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 d'une thermistance CTN est de la forme :
$$R(T) = R_0 \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

- R_0 est la résistance à T_0
- B est une constante comprise entre 3000 et 5000 K suivant le semi-conducteur utilisé

En comparant des variations de résistivité d'un fil de platine et d'une thermistance on constate que non seulement les variations sont de sens opposé, mais aussi que la variation de la résistivité est beaucoup plus importante pour une thermistance que pour un fil métallique : pour un même écart de température, la variation du courant à travers une thermistance est très supérieure à celle qui traverse une sonde classique. Donc la mesure est plus sensible ; pour une sonde métallique, on a une variation de 0,3 à 0,4 % par degré, alors que la variation est, en valeur absolue, de 2 à 5 % pour une thermistance.

Un second avantage des thermistances est leur faible encombrement. On les fabrique sous forme de petits cylindres ($d = 1$ à 12 mm, $L = 5$ à 50 mm) de disques, de perles. Des disques de 5 mm de diamètre sur 3 mm d'épaisseur peuvent avoir une résistance qui varie entre 5 k à 0 c et 10 à 300 c. Des bâtonnets de 3,2 mm de diamètre et de 11 mm de longueur ont une résistance qui varie entre 50 k à 20 c et 80 à 500 c. La variation de résistance des thermistances dépend des matériaux utilisés. Leur domaine d'utilisation va de -80 à $+700$ C avec une précision de 1/10ème à un demi degré. Les thermistances ne présentent pas le phénomène de polarisation et peuvent être traversées indifféremment par un courant continu ou alternatif.



L'emploi des thermistances a donc des avantages de sensibilité et de faible encombrement, mais la loi de variation de leur résistance en fonction de la température n'est pas linéaire.

3.2.3 Influence du courant de mesure

La recherche d'une bonne sensibilité de mesure conduit à faire traverser la résistance thermométrique par un courant relativement important.

Cependant, celui-ci risque alors de provoquer par effet Joule un échauffement du capteur qui peut cesser d'être négligeable et qui en tous cas doit pouvoir être estimé et minimisé : c'est pourquoi les courants de mesure sont généralement de l'ordre du mA et rarement supérieurs à 10 mA.

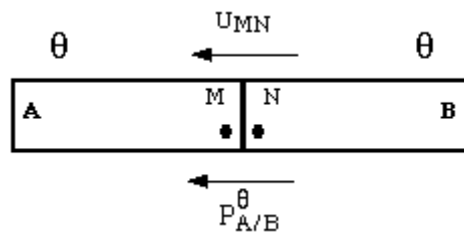
La mesure des très basses températures ne se fera pas à l'aide d'un thermomètre à résistance ou thermistance.

3.3. Thermocouples

3.3.1 Principes

Les phénomènes thermoélectriques dans les chaînes de conducteurs métalliques ou semi-conducteurs mettent en évidence les conversions d'énergie qui s'opèrent en leur sein, l'effet Joule mis à part, entre énergie d'agitation thermique et énergie électrique des charges en mouvement.

Effet Peltier

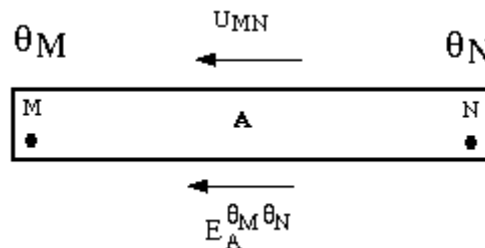


À la jonction de deux conducteurs A et B différents mais à la même température θ , s'établit une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température θ .

$$V_M - V_N = P_{A/B}^{\theta}$$

La loi de Volta nous dit que dans un circuit isotherme, constitué de conducteurs différents, la somme des f.e.m. de Peltier est nulle.

Effet Thomson

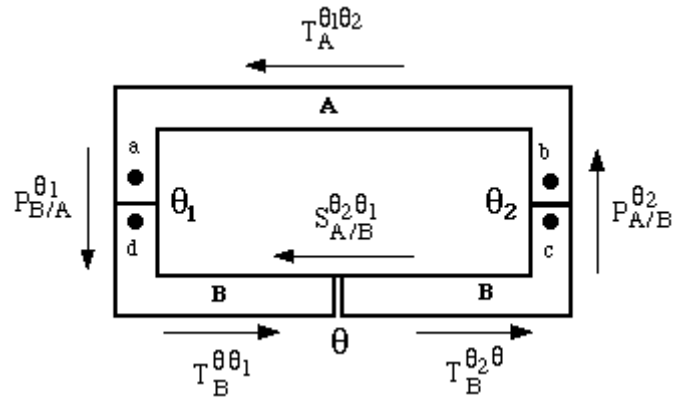


Entre deux points M et N à température différente, à l'intérieur d'un conducteur homogène A s'établit une force électromotrice, ne dépendant que de la nature du conducteur et des températures θ_M et θ_N :

$$T_A^{\theta_M \theta_N} = \int_{\theta_N}^{\theta_M} h_A dT$$

C'est la force électromotrice de Thomson ; h_A coefficient de Thomson du conducteur A est une fonction de la température.

Effet Seebeck



Soit un circuit fermé, constitué de deux conducteurs A et B dont les jonctions sont à des températures θ_1 et θ_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 qui s'y produisent.

$$S_{A/B}^{\theta_2 \theta_1} = T_B^{\theta_2 \theta} + P_{A/B}^{\theta_2} + T_A^{\theta_1 \theta_2} + P_{B/A}^{\theta_1} + T_B^{\theta \theta_1}$$

$$S_{A/B}^{\theta_2 \theta_1} = T_B^{\theta_2 \theta_1} - T_A^{\theta_2 \theta_1} + P_{A/B}^{\theta_2} - P_{A/B}^{\theta_1}$$

3.3.2 Application

Les pouvoirs thermoélectriques des métaux et alliages sont définis par rapport à un métal de référence qui est le plomb ou le platine. On constitue un thermocouple avec le métal dont on désire connaître le pouvoir thermoélectrique et le platine (ou le plomb) et on mesure la force électromotrice de ce couple à diverses températures. Cette valeur est donnée relativement à celle à 0 °C, par exemple :

$$S_{Fe/Pt}^{T0^\circ} = 16,7T - \frac{0,0297}{2}T^2$$

Dans les mêmes conditions on détermine :

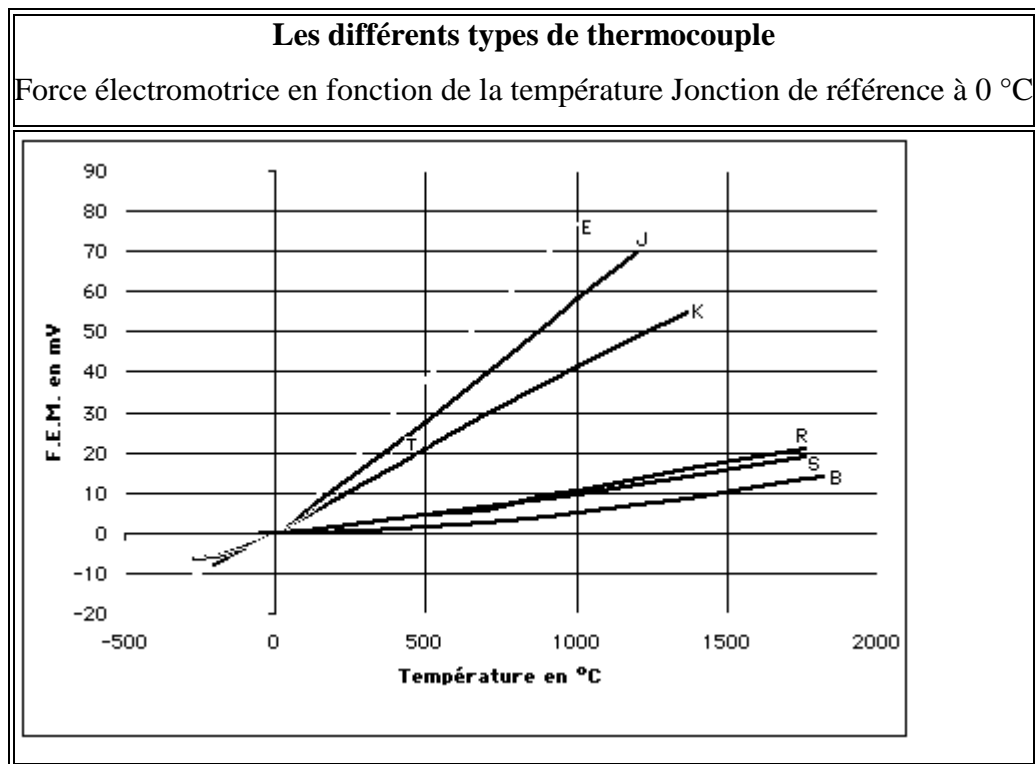
$$S_{Cu/Pt}^{T0^\circ} = 2,7T + \frac{0,079}{2}T^2$$

De là il en résulte la force électromotrice du couple Fer/Cuivre :

$$S_{Fe/Cu}^{T0^\circ} = 14T - \frac{0,0376}{2}T^2$$

La détermination systématique des pouvoirs thermoélectriques permet donc de prévoir la relation force électromotrice/température de n'importe quel couple associant deux métaux ou alliages quelconques.

L'exemple traité fait en outre apparaître l'importance de la température de référence. Dans le thermocouple schématisé, la température de référence est celle des deux bornes de jonction supposée égale à la température ambiante T. En général, cette température est variable. L'utilisation d'un thermocouple monté suivant ce schéma implique donc la mesure par un thermomètre annexe de la température ambiante et une correction d'origine (circuit de compensation de soudure froide).



Pour la réalisation d'un couple thermoélectrique on choisit des fils utilisables dans la zone de température attendue pour la mesure et présentant des caractéristiques de précision et de sensibilité convenables. On tient compte également de l'action corrosive du milieu ambiant (atmosphère oxydante, réductrice, sulfureuse, etc...) sur les constituants du couple pour arrêter son choix. On effectue la soudure par soudage autogène, brasage, soudure à l'étain, soudage électrique au bain de mercure ou tout autre procédé...

Le tableau suivant donne les caractéristiques essentielles des thermocouples les plus courants telles qu'elles paraissent résulter de la pratique des mesures industrielles. Pour les couples les plus courants il existe des tables de conversion directe f.e.m.- température.

Couples	Zone d'utilisation normale °C	Précision %	Sensibilité $\mu\text{V/deg}$
Cuivre-Constantan	-0,375	1,5	de 18 à 62
Fer-Constantan	-0,125	1	de 30 à 60
Nickel-Chrome	0/1100	1	40
Platine-Platine Rhodié 10 %	0/1600	0,5	5 à 14

3.3.4 Méthodes de mesure

C'est la f.e.m. de Seebeck dont le thermocouple est le siège qui fournit l'information de température cherchée. Elle ne peut être connue avec précision que si l'on minimise la chute ohmique de tension due à la circulation d'un courant dans les éléments du thermocouple et les fils de liaison : leur résistance est en effet généralement mal connue car fonction de la température ambiante d'une part et de la température à mesurer d'autre part.

Deux méthodes sont généralement employées :

- La mesure à l'aide d'un millivoltmètre qui permet de minimiser la chute ohmique si sa résistance interne est élevée.
- La méthode d'opposition qui autorise une mesure rigoureuse puisque dans ce cas le courant traversant le thermocouple est annulé.

3.3.5 Comparaison thermocouple / Résistance ou thermistance variable

Le thermocouple a une capacité calorifique plus faible (temps de réponse plus court) et une température de fonctionnement, 2700 °C, plus élevée que les capteurs à variation de résistance. De plus, grâce à la mesure par opposition, le thermocouple est utilisé pour les basses températures.

4. Les pyromètres optiques

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, photoélectriques ou thermiques. Ceci est dû au fait que 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.

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