

Chapitre 5

CAPTEURS DE TEMPERATURES

INTRODUCTION

La température est l'une des grandeurs physiques dont la mesure est la plus fréquente. Elle n'est pas une grandeur directement mesurable (comme la longueur) mais c'est une grandeur repérable à l'aide d'un phénomène associé tel que la variation de résistance d'un conducteur électrique, la dilatation d'un fluide,...

On devrait donc dire : évaluer, comparer, marquer, indiquer les températures et non pas les mesurer au sens propre du terme.

Nous pouvons définir l'égalité de deux températures mais nous ne pouvons pas en faire la somme. Pour apprécier cette égalité ou cette inégalité, nos sens sont insuffisants, et l'on a recours à des instruments spéciaux : les capteurs de températures.

La température peut être mesurée de deux niveaux différents :

1. Au niveau atomique : elle est liée à l'énergie cinétique moyenne des constituants de la matière.

2. Au niveau macroscopique : certaines propriétés des corps dépendent de la température (densité, volume massique, résistivité électrique, etc...). Ces propriétés peuvent être choisies pour construire des échelles de température.

Dans ce cours on s'intéressera à la deuxième façon de mesure de température.

I. les échelles de température

On ne peut réaliser que des mesures indirectes de la température. Pour cela, on utilise la dépendance de certains phénomènes physiques avec la température (dilatation d'un fluide, par exemple), qui sont mesurables directement. On établit une échelle empirique de température à l'aide de ces corps, dits thermométriques. La construction d'une échelle de température nécessite l'attribution arbitraire d'une origine et d'une unité, le degré. On utilise pour cela les températures de *transition de phase des corps purs* à la pression normale.

Les échelles de températures sont des échelles utilisées pour repérer une température par rapport à deux points fixes ou plus prises comme références.

A. Echelle en Kelvin : [William Thomson, connu lord Kelvin -1850]

Inventée par le mathématicien et physicien britannique sir **William Thomson Kelvin** au **XIX^e siècle**, l'échelle Kelvin est l'échelle de température couramment employée dans les domaines scientifiques. Le kelvin (K), unité SI de température, est défini comme la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau. Il mesure la température absolue, grandeur définie par la thermodynamique. La température théorique la plus basse que l'on puisse approcher est le zéro absolu, à savoir 0 K, ou - 273,16 °C.

B. Echelle en degré Celsius (centésimale) : [Anders Celsius (1701-1744)]

L'échelle centésimale a été inventée en 1743. Sur cette échelle, la température de congélation de l'eau est de 0°C et sa température d'ébullition est de 100 °C sous pression atmosphérique. L'échelle Celsius est l'échelle de température utilisée dans la vie courante. Le celsius (°C) est défini par la relation suivante :

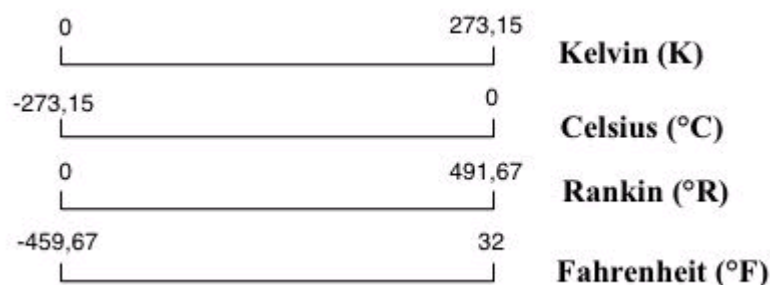
$$T (^{\circ}\text{C}) = T (\text{K}) - 273,16$$

C. Echelle Fahrenheit : [Gabriel Fahrenheit]

L'une des plus anciennes échelles de température a été imaginée en 1720 par le physicien allemand **Gabriel Daniel Fahrenheit**. Sur cette échelle, à la pression de 1 atm, la température de congélation de l'eau est de 32 °F et sa température d'ébullition est de 212 °F. La température en Celsius est liée à la température exprimée en Fahrenheits par la relation :

$$T (\text{F}) = 32 + 1,8 T (^{\circ}\text{C})$$

Remarque :



D. Instrument de mesure de température les thermomètres à dilatation de liquide :

Le thermomètre est un simple instrument de mesure de température. Il n'est pas un capteur de température. Les thermomètres à liquide utilisent la mesure de la dilatation d'un fluide en fonction de la température. Le thermomètre le plus utilisé est le thermomètre à mercure. Il se compose d'un tube capillaire en verre, de diamètre uniforme, s'appuyant sur un réservoir rempli de mercure. L'ensemble est étanche, afin de préserver un vide partiel dans le tube. Si la température augmente, le mercure se dilate et monte dans le tube. La température peut alors être lue sur une échelle graduée.

Le mercure sert généralement à mesurer les températures usuelles ; on emploie également l'alcool, l'éther et d'autres liquides, en fonction de leurs points de congélation et d'ébullition

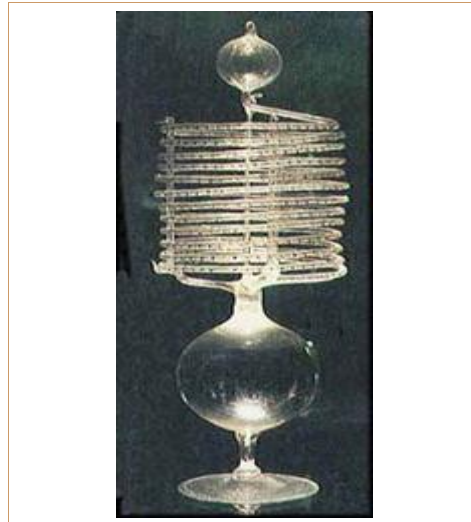


Figure 1 : thermomètre de Galilée

La loi de variation du volume es avec

- V : volume du liquide à
- V_0 : volume du liquide ,
- α : coefficient de dilat

La sensibilité de ce capteur est : $S = ds/de = dV/dT = V_0 \alpha$.

Liquide	Domaine d'emploi (°C)	α 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 +1 000	

Remarque : on peut constituer des thermomètres à dilatation de vapeur ou à dilatation de solide.

II. les capteurs de températures

1. les thermomètres à résistances métallique

Appelées aussi RTD : Résistance ThermoDynamique, la température influx sur la résistance d'un conducteur métallique. Cette relation peut prendre, suivant les approximations, la forme suivante :

$$R(T) = R_0 (1 + aT + bT^2 + cT^3)$$

Avec :

- T : Température °C ;
- R_0 : résistance à 0°C ;
- a, b et c sont des coefficients positives spécifiques pour chaque métal.

Voici quelques métaux utilisés.

Métal	Résistivité à 0 °C	Point de fusion	Domaine d'emploi	R(100°C)/R(0°C)
	$\mu\Omega.cm$	°C	°C	
Cuivre	7	1 083	-190 à +150	1,427
Nickel	6,38	1 453	-60 à + 180	1,672
Platine	9,81	1 769	-250 à +1100	1,392

On peut s'arrêter à l'ordre un dans l'expression de $R(T)$. La résistance varie donc linéairement avec la température :

$$R(T) = R_0(1 + \alpha.T)$$

Les RTD les plus répandues sont les "PT100" à base de platine dont le coefficient α est égale à $0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ et la résistance nominale $R_0 = 100 \text{ } \Omega$ à 0°C .

Quelle est la valeur d'une Pt100 à 100°C ?

$$\rightarrow R = R_0 (1 + \alpha.T) = 100 (1 + 0,00385 \cdot 100) = 138,5 \text{ } \Omega$$

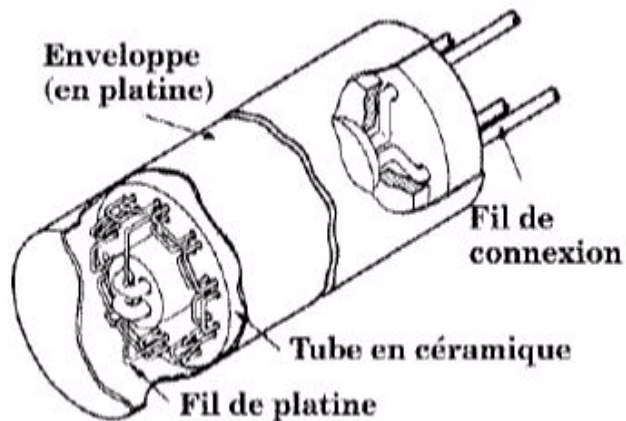


Figure 3 : sonde de platine

Sondes Pt 100 avec câble de raccordement

Prosensor



- Sondes Pt 100 en céramique DIN IEC 751 Classe B, en montage 3 fils.
- Gaine de protection en acier inox 316L.
- Câble PTFE-silicone.
- Sortie protégée par ressort de courbure.

Spécifications techniques

Température d'utilisation: -50°C à +200°C

Tolérance: $\pm(0,3 + 0,005 T)^\circ\text{C}$

Diamètre de la gaine: 6 mm

Longueur de câble: 3 m

Longueur utile : 100 mm

Inconvénients :

Il faut tenir compte de la polarisation de la **RTD** lors de son utilisation.

2. les thermomètres à thermistances

Elles sont constituées de matériaux dont la résistance varie de façon non linéaire avec la Température :

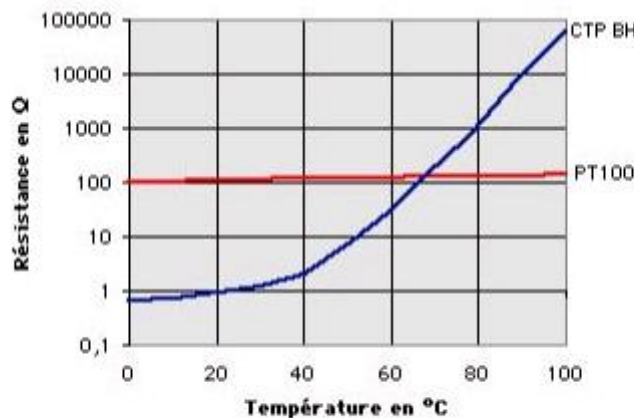
$$R(T) = a \exp(b/T).$$

Elles sont constituées de matériaux de type semiconducteur, à base d'oxydes métalliques. Par exemple : Fe_2O_3 , Zn_2TiO_4 ,....

Elles ont des valeurs de résistance relativement importantes (**jusqu'à 10kΩ**). Elles sont surtout adaptées aux mesures de très petites variations de température.

Il existe deux types de thermistances suivant que le coefficient b est positif ou négatif :

- **thermistance de type CTP** : constante des températures positif : $b > 0$.
- **thermistance de type CTN** : constante des températures négatif : $b < 0$.



Comparaison, de la résistance en fonction de la température pour une thermistance de type CTP BH et une sonde platine Pt100.

avantages :

- importante variation de la résistance comparée à celle d'une PT100
- petites dimensions
- pas de contrainte de polarisation.

Inconvénients :

la loi de variation $R(T)$ n'est pas linéaire.

Thermistances CTP - séries 660

BC Components (Philips Composants)



- Les CTP sont des résistances semiconductrices dont la résistance, à dissipation nulle, augmente avec la température dans une plage déterminée.
- La variation de température est obtenue soit par effet joule soit par variation de température ambiante, ou par la combinaison de ces deux moyens.
- Domaines d'application: stabilisation du courant, protection, senseur.

Spécifications techniques

Tolérance: $\pm 20\%$

réf. BC Components	R (Ω) à 25°C	I (mA) à 25°C basculement	tension max. (V)
660-54792	240	70	145
660-53993	260	59	265
660-52893	500	42	265
660-51593	1900	23	265

3. les thermocouples

Un thermocouple, est un dispositif constitué de deux fils métalliques de nature chimique différente reliés à leurs extrémités par des soudures. Toute différence de température entre ces deux points engendre un courant électrique que l'on peut amplifier et mesurer.

Cette conversion se base sur le principe de la thermoélectricité qui fait appel à trois effets :

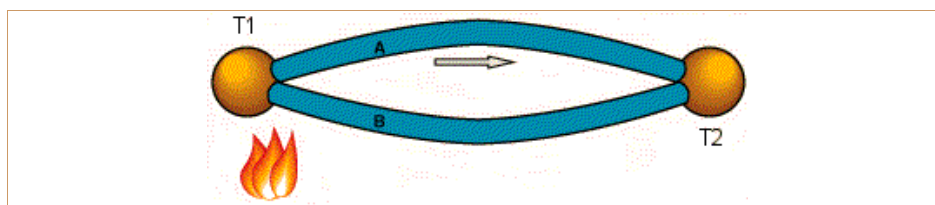
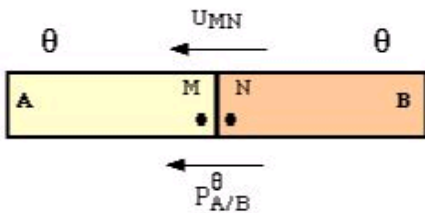


Figure 5 : principe de la thermoélectricité - thermocouple

3.1 Effet Peltier

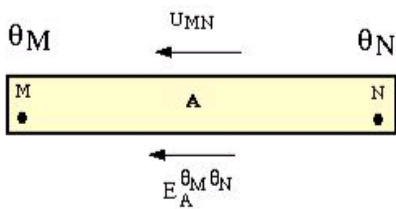
A la jonction de deux conducteurs de nature chimiques différente, mais ayant la même température, elle s'établit une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leurs températures.



θ : Température
 U_{MN} : différence de potentiel
 $P_{A/B}^{\theta}$: Peltier

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

A l'intérieur d'un conducteur homogène A et entre deux points M et N à températures différentes, s'établit une force électromotrice qui ne dépend que de la nature du conducteur et des deux températures aux points M et N.

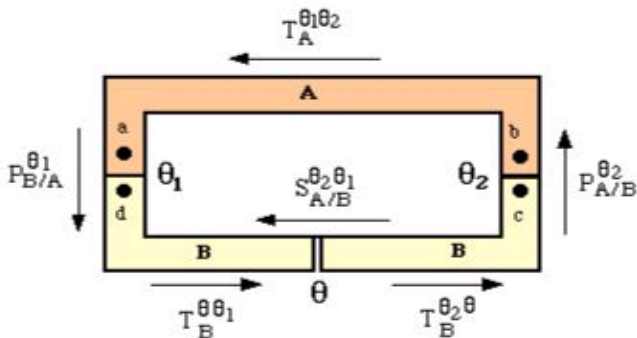


θ : Température, $\theta_M > \theta_N$

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

h_A : coefficient de Thomson du conducteur A

Soit un circuit fermé, constitué de deux conducteurs A et B dont les jonctions sont à des températures θ_1 et θ_2 . ce couple constitue un couple thermoélectrique. C à d on a eu de l'électricité grâce à une variation de température. Ce couple est le siège d'une force électromotrice dite de Seebeck résultant des effets Peltier et Thomson qui s'y produisent.



$$S_{AB}^{\theta_2, \theta_1} = T_B^{\theta_2, \theta_1} + P_{AB}^{\theta_2} + T_A^{\theta_1, \theta_2} + P_{BA}^{\theta_1} + T_B^{\theta_1, \theta_2}$$

$$S_{AB}^{\theta_2, \theta_1} = T_B^{\theta_2, \theta_1} - T_A^{\theta_2, \theta_1} + P_{AB}^{\theta_2} - P_{AB}^{\theta_1}$$

fonction de deux températures et de sa nature. Pour les thermocouples normaux, on dispose de tables de références qui fournissent la F.E.M. en fonction d'une température, l'autre, dite de référence, est fixé à 0°C. Pour déterminer la F.E.M. fournie par un thermocouple, on utilisera donc la table correspondante et la formule de compositions des températures.

Tableau Thermocouple Fer/Cuivre-Nickel - Tension en μV - CEI 584.1 (1995)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	50	101	151	202	253	303	354	405	456
10	507	558	609	660	711	762	814	865	916	968
20	1019	1071	1122	1174	1226	1277	1329	1381	1433	1485

Exemple : On cherche la FEM fournie par le thermocouple pour le couple de température : (4°C;27°C). On peut représenter les données comme sur la figure 6 (Attention : relation de type complexe, représentée ici par un tableau).

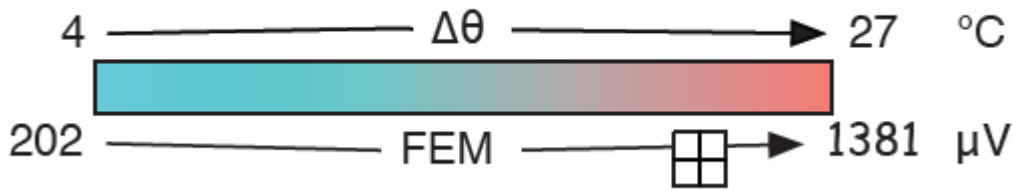
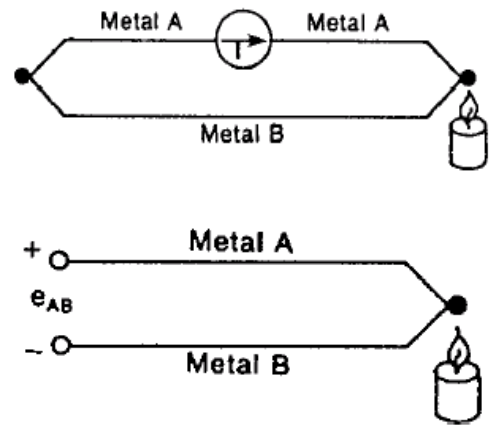


Figure 6 : Relation Température/FEM pour le thermocouple considéré

La FEM est égale à (1381μV - 202μV) soit 1179μV.

3.5 Le Thermocouple

Lorsque deux fils composés de métaux différents sont raccordés à leurs extrémités et que l'une d'elles est chauffée, il se produit une circulation de courant continu dans le circuit. C'est l'effet Thermoélectrique.



Si on coupe le circuit, la tension apparaissant est fonction de la température et de la composition des deux métaux. Tous les métaux dissemblables présentent cet effet.

Après des recherches de linéarité, de valeur de tension et de gamme de température, les combinaisons les plus courantes sont :

Premier métal	Second Métal	Symboles	Type	Limite en °C	Force électromotrice en μV
Cuivre (Cu)	Constantan (C)	Cu/C	T	-192 à +400	4277 à 100 °C
Fer (Fe)	Constantan (C)	Fe/C	J	-194 à +870	27390 à 500 °C
Chromel (Cr)	Constantan (C)	Cr/C	E	+1000 °C	37000 à 500 °C
Chromel (Cr)	Alumel (Al)	Cr/Al	K	+1370	41310 à 1000 °C
Platine (Pt)	Rhodium (Rh)	Pt/Rh	S R B	+1700	10450 à 1000 °C

Pour de petits changements de température, la variation de tension est proportionnelle à la variation de température :

$$\Delta e_{AB} = \alpha \Delta T$$

avec α : coefficient de Seebeck.

Un des thermocouples le plus utilisé est le Chromel-Alumel ou Thermocouple de Type K. Il possède une plage de mesure étendue (-100 à + 1370 °C), une force électromotrice importante (41310 μV à 1000 °C avec soudure froide à 0°C) et une courbe que l'on sait très bien linéariser pour obtenir sur toute l'étendue de mesure des précisions meilleures que 0,2%.

ALUMEL - Alliage composé de 95% de nickel, 2% d'aluminium, 2% de manganèse et 1% de silicium.

CHROMEL - Alliage composé de 80% de nickel et 20% de Chrome.

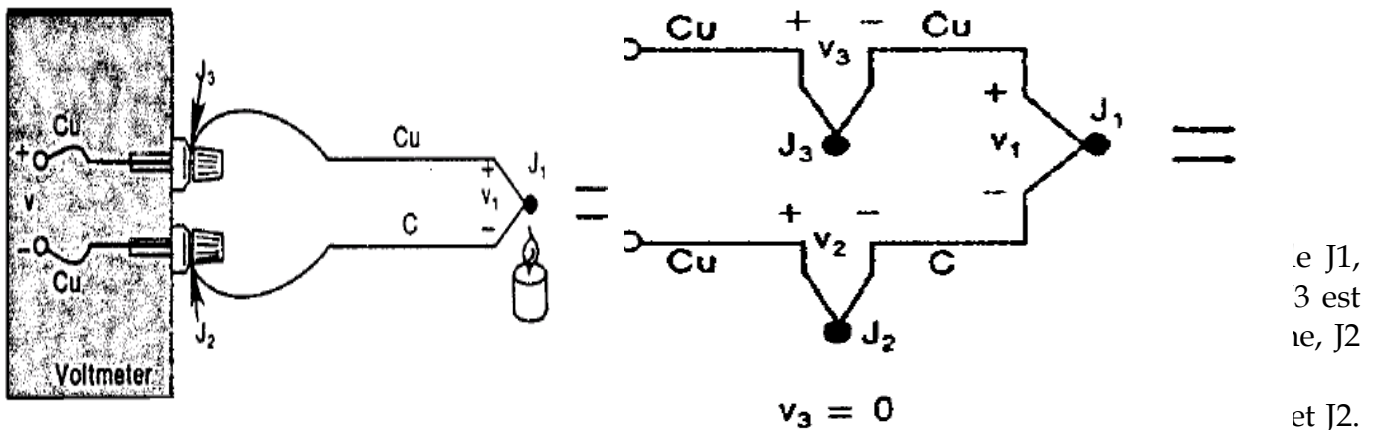
Le tableau suivant donne les caractéristiques des thermocouples les plus utilisés :

Code littéral	Couple	Usage continue Usage intermittent	Précision	Remarques
K	Nickel - Chrome Nickel - Aluminium	0°C à 1100°C -180°C à 1300°C	1,5 %	Bien adapté 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 et à la corrosion

3.6 Mesurer les tensions du thermocouple

On ne peut pas mesurer directement les tensions des thermocouples car le simple fait de le connecter sur un voltmètre crée des nouveaux thermocouples par les liaisons entre les fils du thermocouple et les bornes en cuivre ou en laiton du voltmètre.

Exemple avec un thermocouple cuivre-constantan (Cu/C) : thermocouple de type T



nous ne pourrions connaître la température de J1 que si nous connaissons d'abord celle de J2.

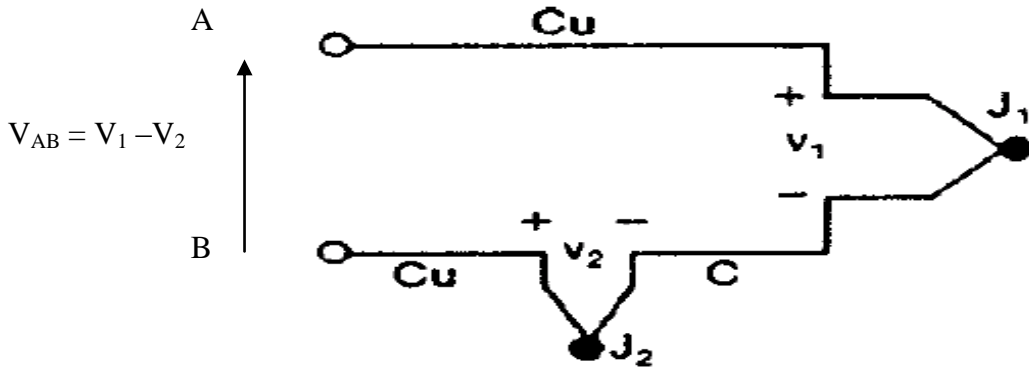


Figure 7: Mesure des tensions d'un thermocouple

3.7 Référence de la jonction externe

Une manière de déterminer exactement et facilement la température de la jonction J2 est de la plonger dans un bain de glace fondante, ce qui force sa température à 0°C, et alors, on pourra considérer J2 comme étant la jonction de référence.

Le schéma a donc maintenant une référence 0°C sur J2. La lecture du voltmètre devient:

$$V = (V1 - V2) \text{ équivalent à } \alpha (tj1 - tj2).$$

Écrivons la formule avec des degrés Celsius :

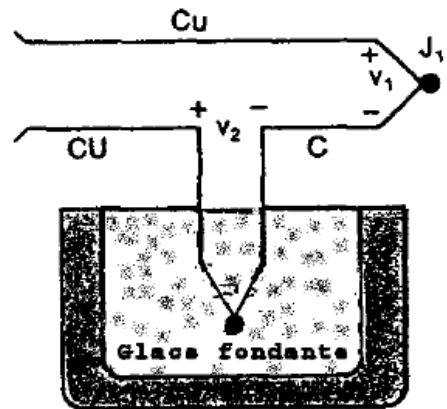
$$tj1 = Tj1 (\text{°C}) + 273,15$$

$$V = V1 - V2 = \alpha [(Tj1 + 273,15) - (Tj2 + 273,15)]$$

$$= \alpha (Tj1 - Tj2)$$

$$= \alpha (Tj1 - 0)$$

$$= \alpha Tj1$$



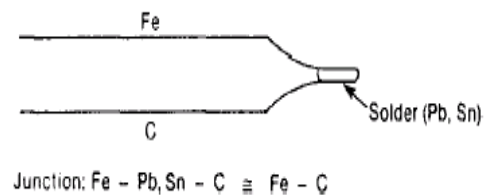
Remarque : la tension V2 de la jonction J2, dans le bain de glace n'est pas zéro volt. Cette méthode est très précise car la température 0°C (Point de fusion de la glace), peut être facilement contrôlée.

Le point de fusion de la glace est utilisé par les organismes de normalisation comme point de référence fondamental pour leurs tables de tension de thermocouple. Ainsi, à la lecture de ces tables, nous pourrions convertir directement la tension V1 en température Tj1.

3.8 Soudure des jonctions

Il y a plusieurs manières de connecter les deux fils d'un thermocouple.

- Soudure à l'étain
- Soudure à l'argent
- Soudure électrique sans apport de métal
- Interpénétration des deux métaux par forte pression



3.9 Loi de conversion : Tension → Température

Malheureusement la loi de conversion Tension → Température n'est pas bien linéaire sur toute l'étendue de mesure comme le montre le graphe suivant.

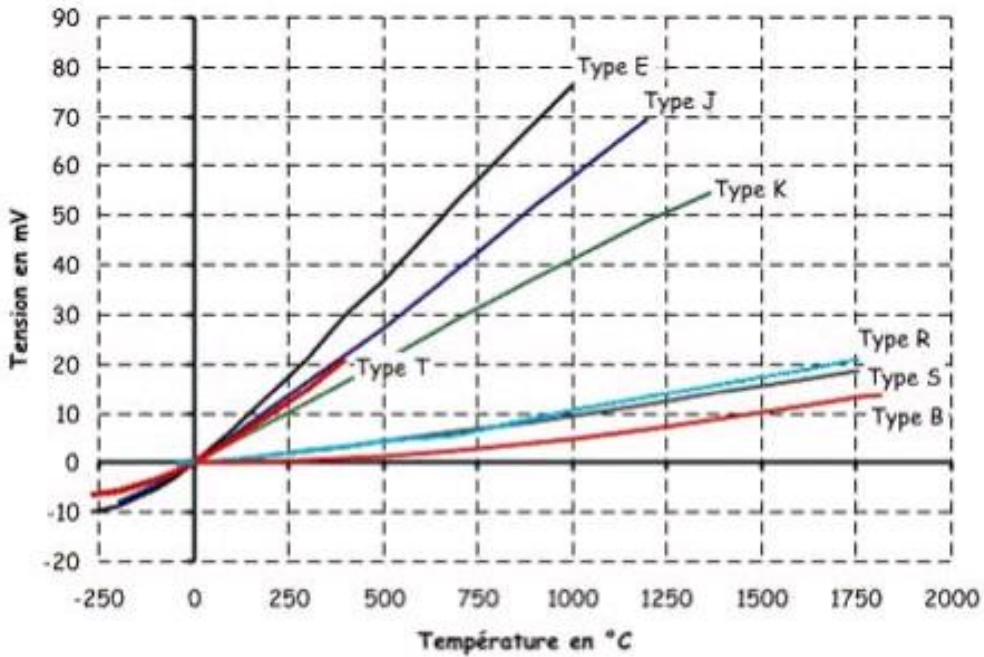


Figure 8 : variation de la force électromotrice en fonction de la température

On peut voir, par exemple, que le thermocouple de type K (Chromel/Alumel) est presque linéaire entre 0°C et 1000°C. Il pourra être utilisé avec une bonne précision.

Une approche polynomiale (polynôme à puissances croissantes) est souvent utilisée pour décrire cette loi de conversion:

$$T = a_0 + (a_1) V + (a_2) V^2 + (a_3) V^3 + (a_4) V^4 + \dots + (a_n) V^n$$

Avec:

- T = Température en °C
- V = Tension du thermocouple
- a_i = Coefficients uniques pour chaque thermocouple
- n = Ordre maximum du polynôme

Si on accroît n, la précision augmente. Par exemple, avec n=9 la précision est d'environ 1 °C. Cette précision dépend du type de thermocouple utilisé.

3.10 Sensibilité du moyen de mesure

Pour les thermocouples de type K (Chromel/Alumel), par exemple, le voltmètre doit être capable de mesurer 4 µV pour détecter une variation de 0,1 °C. Ces faibles amplitudes des signaux sont la porte ouverte aux parasites et bruits électriques.

Pour cette raison, les instruments de mesure doivent utiliser des techniques poussées de réjection de bruit.