
Cours 02 : CAPTEURS DE TEMPERATURE

1. La température

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".

2. Grandeur thermométrique - Échelle thermométrique.

Une grandeur thermométrique est une grandeur physique (longueur, volume, résistance électrique, ...) qui dépend de la température : $G = f(\theta)$. Elle peut alors servir à la détermination de cette température.

Unités de mesure thermiques

Échelle Celsius (1742): Échelle relative:

Références : • Fusion de la glace à 0 °C; • Ébullition de l'eau distillée à 100 °C

Échelle Kelvin (1848): - Échelle absolue:

Références: • Zéro thermodynamique: 0 K; • Point triple de l'eau (0.01 °C): 273.16 K.

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

Échelle Fahrenheit (1707):- Échelle relative:

Références: •T. minimum solution aqueuse de NaCl: 0 °F; •Température d'un cheval sain: 100 °F.

•Température du corps humain: 96 °F;

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

I. Principes de mesure de la température

Pour effectuer des mesures de température, le plus simple est de se fier à un phénomène physique, au cours duquel une grandeur facile à repérer ou à mesurer, suit, dans ses moindres variations, les variations de cette température. Les indications devant présenter toutefois des garanties de : - justesse – sensibilité – fidélité.

La détermination de la température peut être reliée à des grandeurs physiques telles que :

- des grandeurs **géométriques** : longueur, volume, surface
- une grandeur **mécanique** : pression
- une grandeur **optique** : couleur
- une grandeur **électrique** : résistance, intensité d'un courant

Les dispositifs les plus simples font appel aux phénomènes de dilatation, c'est-à-dire aux changements de dimensions des corps chauffés ou refroidis. Dans la pratique, les mesures de température sont essentiellement basées sur :

- les phénomènes **de dilatation**
- les phénomènes **de tension** de vapeur
- les phénomènes **de thermoélectricité**

II. Les appareils de mesure de la température

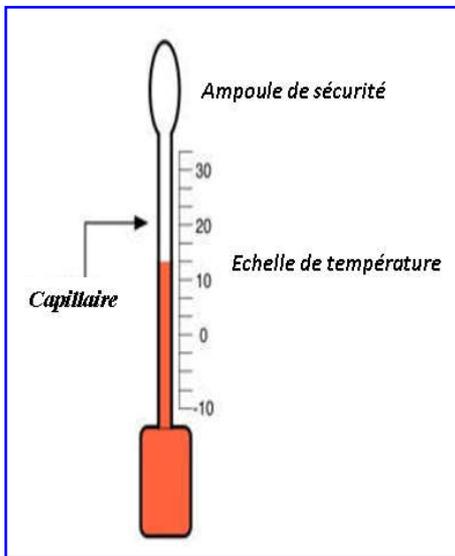
2.1) Thermomètres à dilatation

On constate 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

Il est constitué d'un réservoir surmonté d'un capillaire de section faible et régulière 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.



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

$$V = V_0(1 + \alpha \cdot \theta)$$

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.
- ✓ 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).
- ✓ L'espace libre au dessus du liquide peut-être vide, pour permettre de mesurer des hautes températures.

Fig1 : Thermomètre à dilatation de liquide

2.3) Thermomètres à dilatation de gaz

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

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

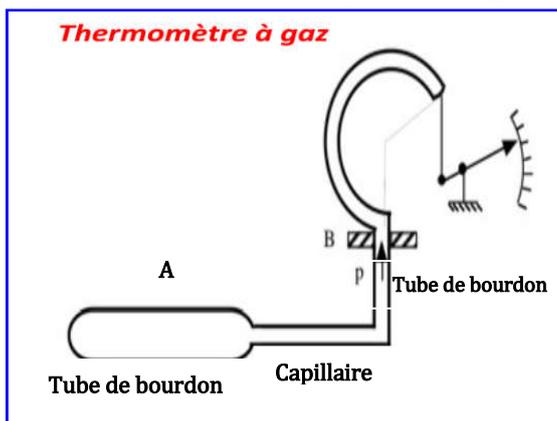
- Si on enferme une certaine quantité de gaz dans une enveloppe de volume constant V , la pression développée par le gaz est proportionnelle à la température absolue :

$P=RT/V$, 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 un tube capillaire de raccordement à l'extrémité (B) d'un tube de Bourdon, appelée spirale de mesure. Cette extrémité 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 thermométrique.



Avantage des thermomètres à gaz

- leur précision, 1 % en mesures industrielles.
- repérage des très basses températures.
- véritables instruments de précision, **exp** ; Le thermomètre à hydrogène.

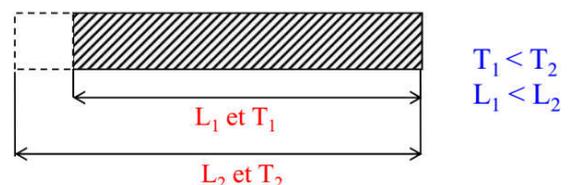
Fig2 : Thermomètre à dilatation de gaz

2.4) Dilatation des solides

Sous l'effet d'une élévation de température, une tige d'un matériau quelconque s'allonge

Cette augmentation de la longueur est d'autant plus importante que

- l'augmentation de la température ΔT est grande
- Le coefficient de dilatation linéaire K est grand (mm/m°C)



Variation de la longueur d'une tige en fonction de la variation de la température.

$$L = K \cdot L_0 \cdot \Delta T \text{ [mm]}$$

Où L_0 est la longueur initiale de la tige (m).

Matériau	K (mm/m°C)
Acier	0.012
Cuivre	0.017
Aluminium	0.022
Plomb ou Zinc	0.029
PVC	0.080

2.5) Thermomètre à dilatation de métal

Il existe deux types:

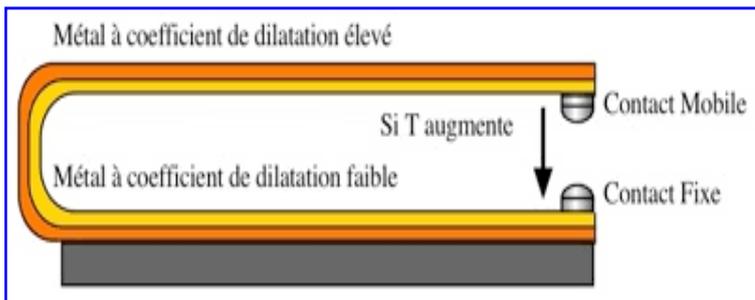
a) Thermomètre à dilatation d'une tige métallique simple

Ce type d'appareil, très peu utilisé, repose sur la variation de la longueur d'une tige métallique par un changement de température.

b) Thermomètre à dilatation d'un bilame

Sur ce type de thermomètre, l'élément de mesure est une lame composée de deux métaux aux coefficients de dilatation différents et laminés de façon inséparable pour former un bilame.

- Sous l'influence d'une élévation de température, les deux métaux se dilatent différemment et le bilame s'incurve du côté du métal ayant le plus faible coefficient de dilatation.
- La courbure obtenue est pratiquement proportionnelle à la température. Le déplacement induit par la déformation du bilame peut alors être reporté sur un indicateur.

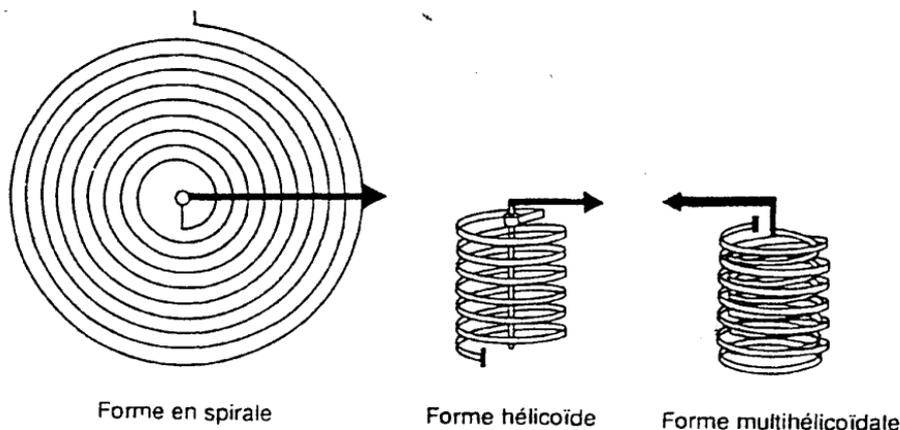


Avantages

- 1) Système de mesure simple et courant;
- 2) Mesure de -50°C à 500°C ;
- 3) Volume réduit;
- 4) Précision de $\pm 1\%$.

Pour une meilleure sensibilité on augmente la longueur du bilame soumis à la dilatation.

Dans les appareils industriels on trouve généralement des **bilames spiralés ou hélicoïdaux**.



Le bilame est fixé à une de ses extrémités, l'autre extrémité fait tourner l'axe de l'aiguille devant l'échelle de mesure. La jonction entre le bilame et le dispositif d'indication se fait par l'intermédiaire d'une tige métallique présentant un coefficient de dilatation pratiquement nul à la température où elle est portée.

2.6) Pyromètres optiques

- ❖ La pyrométrie optique a beaucoup évolué au cours des années passées, passant d'une utilisation plutôt réservée à des spécialistes à une pratique courante. Ceci est essentiellement dû à l'évolution des systèmes électroniques.
- ❖ Les pyromètres de nouvelle génération sont de plus en plus précis. Le domaine des températures s'étend de -100°C à 5000°C, couvrant ainsi l'essentiel des mesures industrielles.
- ❖ L'utilisation préférentielle des pyromètres optiques concerne les mesures :
 - ✓ sans contact (corps en mouvement, à grande distance ou dans le vide).
 - ✓ de températures de surface.
 - ✓ de très hautes températures.
 - ✓ sur des corps de faible capacité thermique.



Le thermomètre sans contact PCE-777

2.6.1) Les pyromètres infrarouges

- ❖ Les pyromètres infrarouges sont surtout indiqués pour les applications nécessitant des capteurs conventionnels. Tel est le cas pour les objets en mouvement ou pour les endroits où une mesure sans contact est requis à cause de possibles pollutions ou d'autres influences négatives.

2.6.2) Exemple : Le thermomètre sans contact PCE-777

Ce thermomètre petit et compact avec pointeur laser rouge, pour la mesure non destructive de la température de surfaces. Il mesure la température de surfaces avec un rayon infrarouge d'une façon non destructive à une distance longue. Il se caractérise par son maniement très simple et l'aide de la mise au point rouge (rayon laser). De cette façon, on peut faire la mise au point de la surface d'une façon précise et enregistrer la température avec le thermomètre.

Il est idéal pour l'utilisation dans l'industrie et l'artisanat pour la maintenance et la réparation, par exemple, dans le domaine du chauffage, ventilation, air conditionné, automobiles, le contrôle d'appareils électriques et cabinets électriques. Il peut être utilisé même dans les circonstances les plus défavorables et effectue des mesures d'une façon précise. Le thermomètre sans contact dispose d'une aide de mise au point pour la mesure de la température sans contact, précise et rapide à partir d'une distance sûre aux **objets chauds ou en mouvement ou dans des zones de mesure d'accès difficile**

III. Les thermomètres électriques

3.1. Introduction :

Les thermomètres électriques présentent l'avantage d'une grande souplesse d'emploi et d'exploitation (le signal électrique délivré est transmissible et enregistrable), tout en étant suffisamment précis, aussi bien pour des utilisations industrielles qu'en laboratoire.

Leur fonctionnement est basé sur la variation de la résistance d'un métal ou d'un semi-conducteur en fonction de la température. Les lois de variation étant très régulières, il est possible de les utiliser pour déterminer les températures par des mesures de résistance. Cependant, ces lois étant très différentes selon qu'il s'agisse d'un métal ou d'un semi-conducteur, deux types de capteurs ont été distingués selon les appellations respectives de thermomètre à résistance (Résistance Température Detector RTD) d'une part, et de thermistance (Thermistor) d'autre part.

3.2 les thermomètres à résistance :

3.2.1. Principe :

La résistance électrique d'un conducteur métallique augmente avec la température. Cette variation étant parfaitement réversible, on peut établir une relation $R=f(T)$ entre la résistance R et la température $T(^{\circ}C)$ sous la forme :

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

avec :

- R_0 la résistance à 0°C
- a, b, c des coefficients de température positifs, spécifiques au métal considéré.

Les coefficients a, b et c de la loi de variation de R ayant été préalablement déterminés par un ensemble de mesures à températures connues, la mesure de R permet de déduire la température.

Pour de petites variations ΔT autour de la température T , la loi de variation de la température peut être linéarisée :

En écrivant $\frac{dR}{dT} = \frac{R(T+\Delta T) - R(T)}{\Delta T}$, on obtient $R(T+\Delta T) = R(T) \cdot (1 + \alpha_R \Delta T)$

avec $\alpha_R = \frac{1}{R(T)} \frac{dR}{dT}$ la sensibilité thermique du capteur à la température T .

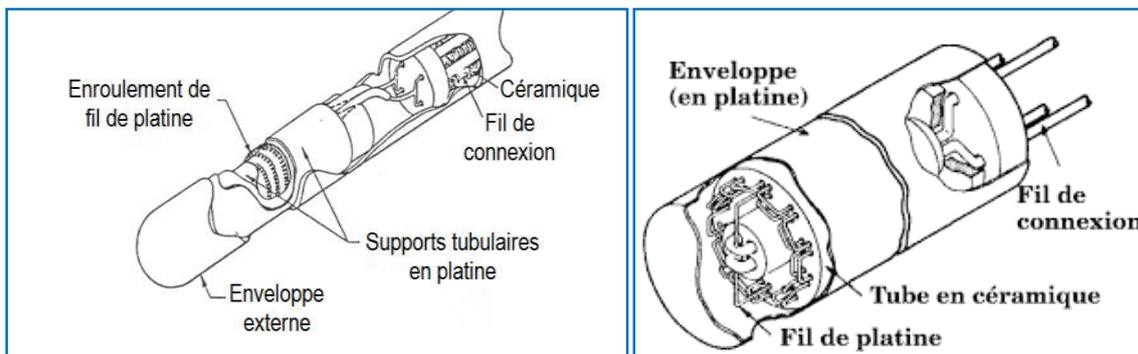
3.2.2. Critères de choix du métal :

Selon le domaine d'application et les qualités particulières recherchées, les résistances sont réalisées en platine, en nickel, et plus rarement en cuivre ou en tungstène :

- Le platine peut être obtenu avec une très grande pureté (99.999%), ce qui lui confère des propriétés mécaniques et électriques très stables.
- Le nickel possède une sensibilité thermique élevée mais ses propriétés électriques et mécaniques beaucoup moins stables limitent son utilisation à des températures inférieures à 250°C.
- L'avantage du cuivre est la linéarité de la loi de variation de la résistance, mais il ne peut pas être employé au-delà de 180°C pour des raisons de stabilité.
- La sensibilité thermique du tungstène est supérieure à celle du platine au dessus de 100K et il est utilisable à des températures plus élevées que le platine avec une linéarité supérieure, mais sa stabilité est inférieure à celle du platine.

Métal	Résistivité à 0°C ($\mu\Omega.cm$)	Point de fusion (°C)	Domaine d'application
Cuivre	7	1083	-190 à +150°C
Nickel	6.38	1453	-60 à +180°C
Platine	9.81	1769	-190 à +150°C
Tungstène	1.72	3380	-269 à +27°C

Le matériau le plus utilisé est le platine, qui est généralement encapsulé avec de la céramique et placé dans une gaine d'acier étanche. La résistance est de 100 Ω à 0°C, ces thermomètres sont donc généralement appelés des sondes Pt 100.



3.3. Les thermistances:

3.3.1. Principe:

Les thermistances sont des capteurs de température dont la sensibilité thermique est très élevée, de l'ordre de 10 fois celle des capteurs à résistance. Leurs coefficients de température sont généralement négatifs et dépendent fortement de la température.

Elles sont constituées à partir de mélanges d'oxydes métalliques semi-conducteurs tels que les oxydes de Nickel, de Cobalt ou de Manganèse. Contrairement aux métaux, la résistance des semi-conducteurs diminue lorsque la température augmente.

Les thermistances sont disponibles sous des formes variées : disques, petits cylindres, anneaux, perles, l'élément sensible pouvant être ou non protégé par enrobage ou en capsulage. Les valeurs élevées de la résistivité des matériaux employés permettent d'obtenir des résistances de valeurs appropriées avec de faibles quantités de matière et donc des dimensions réduites (de l'ordre du mm). Il en résulte un faible encombrement permettant la mesure quasiment ponctuelle de la température.

3.3.2. Relation résistance-température :

La résistance d'une thermistance en fonction de la température s'écrit :

$$R(T) = R_0 \exp\left(\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)$$

avec :

- R_0 la résistance à la température T_0

- β un coefficient qui dépend de la température, compris généralement entre 3000 et 5000K.

La sensibilité thermique a pour expression : $\alpha_R = -\frac{\beta}{T^2}$

Les figures suivantes présentent la variation en fonction de la température de la résistance et de la sensibilité thermique d'une thermistance, sur une échelle semi-logarithmique. Elles montrent que la résistance et la sensibilité thermique varient de manière inversement proportionnelle à la température. La sensibilité des thermistances est très importante pour les basses températures et elles sont particulièrement adaptées à la détection et la mesure des très faibles variations de température (de 10^{-4} à 10^{-3} K). Elles peuvent être utilisées sans problèmes majeurs de stabilité jusqu'à environ 200°C, au-delà il faut utiliser des matériaux spéciaux tel que le carbure de silice. Les variations de la résistance en fonction de la température étant très importantes, on utilise une thermistance donnée pour un intervalle de mesure de 50 à 100°C. Lorsque l'intervalle de mesure est plus étendu, il faut utiliser successivement des thermistances différentes dont les résistances sont convenablement choisies.

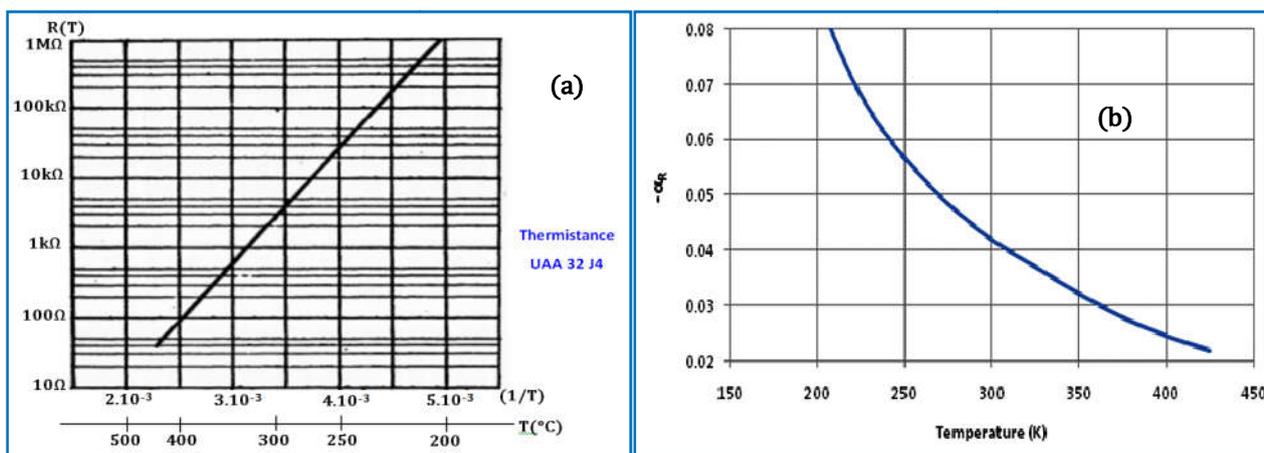


Fig. 03 : la variation en fonction de la température de la résistance (a) et de la sensibilité thermique d'une thermistance (b).

3.3- Les thermocouples

3.3.1 : Sensibilité thermique d'un thermocouple :

La f.e.m délivrée par un thermocouple est, sur de grands intervalles de température, une fonction non linéaire de cette dernière. A titre d'exemple, la figure ci-dessous présente la variation de la f.e.m en fonction de la température, pour différents types de thermocouples d'un usage courant. On considère cependant que cette variation est linéaire sur un intervalle restreint de température, dont la taille dépend de la précision recherchée.

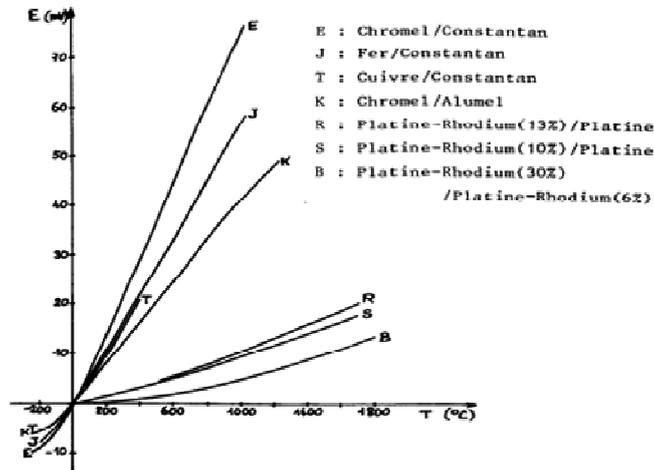


Fig.4 : Évolution de la FEM en fonction de la température.

La relation qui lie la f.e.m E (en μV) d'un thermocouple à la température T (en $^{\circ}\text{C}$) par une équation polynomiale de la forme :

$$E = \sum_{i=1}^n a_i T^i$$

avec :

- n: l'ordre maximal du polynôme (généralement inférieur à 9).
- a_i : des coefficients propres au thermocouple considéré.

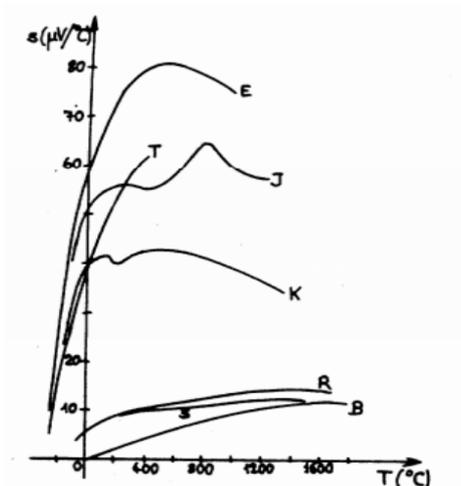
Par exemple, pour le thermocouple type B (Platine -30% Rhodium / Platine -6% Rhodium), $n=8$ et les coefficients a_i sont les suivants :

$$\begin{aligned} a_0 &= 0 & a_1 &= -2.4674601620 \cdot 10^{-1} & a_2 &= 5.9102111169 \cdot 10^{-3} & a_3 &= -1.4307123430 \cdot 10^{-6} & a_4 &= 2.1509149750 \cdot 10^{-9} \\ a_5 &= -3.175800720 \cdot 10^{-12} & a_6 &= 2.4010367459 \cdot 10^{-15} & a_7 &= -9.0928148159 \cdot 10^{-19} & a_8 &= 1.3299505137 \cdot 10^{-22} \end{aligned}$$

La sensibilité thermique S (en $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$) d'un thermocouple, appelée également pouvoir thermoélectrique, est définie à une température T (pour $T_{\text{ref}} = 0^{\circ}\text{C}$) par:

$$S(T) = \frac{dS_{A/B}^{T, 0^{\circ}\text{C}}}{dT}$$

La figure ci-dessous présente la variation de la sensibilité thermique en fonction de la température, pour les différents thermocouples précédents.



Par exemple :

- pour le thermocouple type J (Fer/Constantan) $S(0^{\circ}\text{C}) = 52.9 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ et $S(700^{\circ}\text{C}) = 63.8 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$,
 - tandis que pour le thermocouple type S (Platine-10%Rhodium / Platine) $S(0^{\circ}\text{C}) = 6.4 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ et $S(700^{\circ}\text{C}) = 11.3 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.
- L'ordre de grandeur des sensibilités des thermocouples est très inférieur à celui des capteurs de température utilisant des résistances.

3.3.2 : Matériaux thermoélectrique d'un thermocouple

Les matériaux utilisés pour la fabrication des thermocouples sont choisis en fonction de la plage de température à mesurer, de leurs stabilités, des conditions ambiantes de la mesure, de la sensibilité des appareils de mesure et du cout de la mesure.

Il existe une nomenclature internationale dans laquelle sont désignés par les lettres **J**, **K**, **T** et **E** les thermocouples à base de métaux communs et **R**, **S** et **B** pour ceux à base de métaux précieux.

Chaque type a des caractéristiques et un champ d'application déterminés donnés dans le tableau suivant:

Type	Matériaux A	Matériau B	Gamme de mesure
K	Nickel-Chrome (Chromel)	Nickel-Aluminium (Alumel)	-100/1100°C
T	Cuivre	Cuivre-Nickel (Constantan)	-200/350°C
J	Fer	Cuivre-Nickel (Constantan)	0/700°C
E	Nickel-Chrome (Chromel)	Cuivre-Nickel (Constantan)	-100/700°C
R	Platine-13% Rhodium	Platine	0/1550°C
S	Platine-10% Rhodium	Platine	0/1500°C
B	Platine-30% Rhodium	Platine-6% Rhodium	0/1650°C

3.3.3 : Comparaison thermocouple/thermomètres électriques

Le tableau suivant récapitule les principaux avantages et inconvénients des thermocouples, des capteurs de température à résistance et des thermistances.

	Thermocouple	RTD (PT100)	Thermistance
Avantages	<ul style="list-style-type: none">- Simple- Robuste- Peu couteux- Mesures ponctuelles Rapide <ul style="list-style-type: none">- Gamme de températures large	<ul style="list-style-type: none">- Très stable- Très précis- Meilleure linéarité que le thermocouple	<ul style="list-style-type: none">- Très sensible
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none">- Non linéaire- Sensibilité faible- Nécessite une température de référence	<ul style="list-style-type: none">- Couteux- Lent- Sensibilité faible- Erreurs par auto-échauffement (effet Joule)	<ul style="list-style-type: none">- Non linéaire- Gamme réduite de températures- Fragile- Auto-échauffement