

CAPTEURS

I. Introduction :

La Métrologie au sens étymologique du terme se traduit par « science de la mesure ». La métrologie s'intéresse traditionnellement à la détermination de caractéristiques (appelées grandeurs) qui peuvent être fondamentales comme par exemple une longueur, une masse, un temps, ou dérivées des grandeurs fondamentales comme par exemple une surface, une vitesse .

Cependant, dans les domaines courants des essais, il existe de nombreuses caractéristiques n'ayant qu'une relation indirecte avec ces grandeurs. C'est le cas, par exemple, de la dureté, de la viscosité, qui peuvent poser des problèmes dans l'interprétation.

Mesurer une grandeur physique consiste à lui attribuer une valeur quantitative en prenant pour référence une grandeur de même nature appelée unité.

Dans le langage courant des «métrologues», on entend souvent dire mesurer c'est comparer.

Les résultats des mesures servent à prendre des décisions dans de nombreux domaines, tels que:

- Acceptation d'un produit (mesure de caractéristiques, de performances, conformité à une exigence) ;
- Réglage d'un instrument de mesure, validation d'un procédé ;
- Réglage d'un paramètre dans le cadre d'un contrôle d'un procédé de fabrication ;
- Validation d'une hypothèse scientifique, protection de l'environnement ;
- Définition des conditions de sécurité d'un produit ou d'un système.

L'ensemble de ces décisions concourt à la qualité des produits ou des services: on peut qualifier quantitativement la qualité d'un résultat de mesure grâce à son incertitude.

En effet sans incertitude les résultats de mesure ne peuvent plus être comparés: Soit entre eux (essais croisés) ; soit par rapport à des valeurs de référence spécifiés dans une norme ou une spécification (conformité d'un produit).

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs ...), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, ...).

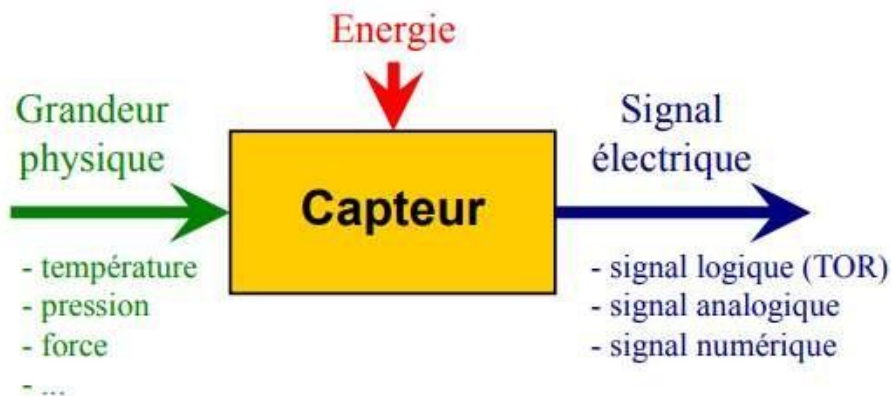
Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

II. Définitions :

1) Capteur :

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique).

Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.



2) Etendue de mesure :

Valeurs extrêmes pouvant être mesurée par le capteur.

3) Résolution :

Plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur.

4) Sensibilité :

Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.
Exemple : Le capteur de température LM35 a une sensibilité de $10\text{mV} / ^\circ\text{C}$.

5) Précision :

Aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie.

6) Rapidité :

Temps de réaction du capteur. La rapidité est liée à la bande passante.

III. Éléments de métrologie (définitions) :

Le mesurage :

C'est l'ensemble des opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.

1) **La mesure (x) :**

C'est l'évaluation d'une grandeur par comparaison avec une autre grandeur de même nature prise pour unité. Exemple : 2 mètres, 400 grammes, 6 secondes.

2) **La grandeur (X) :**

Paramètre qui doit être contrôlé lors de l'élaboration d'un produit ou de son transfert. Exemple : pression, température, niveau.

On effectue des mesures pour connaître la valeur instantanée et l'évolution de certaines grandeurs. Renseignements sur l'état et l'évolution d'un phénomène physique, chimique, industriel.

3) **L'incertitude (dx) :**

Le résultat de la mesure x d'une grandeur X n'est pas complètement défini par un seul nombre. Il faut au moins la caractériser par un couple (x, dx) et une unité de mesure. dx est l'incertitude sur x . Les incertitudes proviennent des différentes erreurs liées à la mesure. Ainsi, on a : $x-dx < X < x+dx$

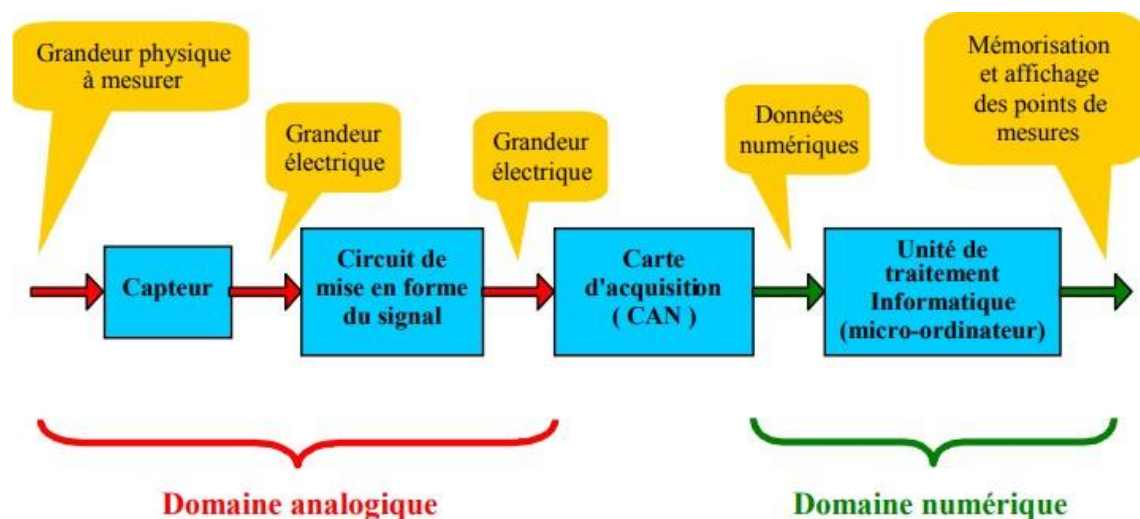
4) **Erreur absolue :**

Résultat d'un mesurage moins la valeur vraie du mesurande. Une erreur absolue s'exprime dans l'unité de la mesure.

5) **Erreur relative :**

Rapport de l'erreur de mesure à une valeur vraie de mesurande. Une erreur relative s'exprime généralement en pourcentage de la grandeur mesurée.

IV. **Caractéristiques d'une chaîne de mesure informatisée :**



La structure de base d'une chaîne de mesure comprend au minimum quatre étages :

- 1) Un capteur sensible aux variations d'une grandeur physique et qui, à partir de ces variations, délivre un signal électrique.
- 2) Un conditionneur de signal dont le rôle principal est l'amplification du signal délivré par le capteur pour lui donner un niveau compatible avec l'unité de numérisation; cet étage peut parfois intégrer un filtre qui réduit les perturbations présentes sur le signal.
- 3) Une unité de numérisation qui va échantillonner le signal à intervalles réguliers et affecter un nombre (image de la tension) à chaque point d'échantillonnage.
- 4) L'unité de traitement informatique peut exploiter les mesures qui sont maintenant une suite de nombres (enregistrement, affichage de courbes, traitements Mathématiques, transmissions des données ...).

De nos jours, compte tenu des possibilités offertes par l'électronique et l'informatique, les capteurs délivrent un signal électrique et la quasi-totalité des chaînes de mesure sont des chaînes électroniques et informatiques.

Certains capteurs, par exemple le thermomètre DS1621, délivrent directement un mot binaire, image de la température, en leur sortie. Ils intègrent, dans un seul boîtier le capteur + le circuit de mise en forme.

V. **Les différentes familles de capteurs :**

Si l'on s'intéresse aux phénomènes physiques mis en jeu dans les capteurs, on peut classer ces derniers en deux catégories.

1) **Capteurs actifs :**

Fonctionnant en générateur, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre à la grandeur physique à prélever, énergie thermique, mécanique ou de rayonnement.

Les effets physique les plus classiques sont :

a) **Effet thermoélectrique :**

Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente, dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 , est le siège d'une force électromotrice d'origine thermique $e(T_1, T_2)$.

b) **Effet piézo-électrique :**

L'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézo-électriques (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une déformation et d'une même charge électrique de signe différent sur les faces opposées.

c) **Effet d'induction électromagnétique :**

La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique (détection de passage d'un objet métallique).

d) **Effet photo-électrique :**

La libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique.

e) **Effet Hall :**

Un champ magnétique B et un courant électrique I créent dans le matériau une différence de potentiel UH .

f) **Effet photovoltaïque :**

Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction PN illuminée, leur déplacement modifie la tension à ses bornes.

Grandeur physique mesurée	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Photo-émission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photo-électrique	Tension
Force	Piézo-électricité	Charge électrique
Pression		
Accélération	Induction électromagnétique	Tension
Vitesse		
Position (Aimant)	Effet Hall	Tension
Courant		

2) **Capteurs passifs**

Il s'agit généralement d'impédance dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée. La variation d'impédance résulte :

- Soit d'une variation de dimension du capteur, c'est le principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteur de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile.
- Soit d'une déformation résultant de force ou de grandeur s'y ramenant, pression accélération (armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensomètre liée à une structure déformable).

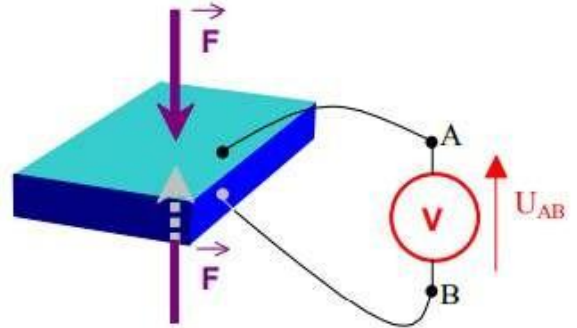
Grandeur mesurée	Caractéristique électrique sensible	Type de matériau utilisé
Température	Résistivité	Métaux : platine, nickel, cuivre ...
Très basse température	Constante diélectrique	Verre
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité	Alliage de Nickel, silicium dopé
	Perméabilité magnétique	Alliage ferromagnétique
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnéto résistants : bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

CAPTEURS

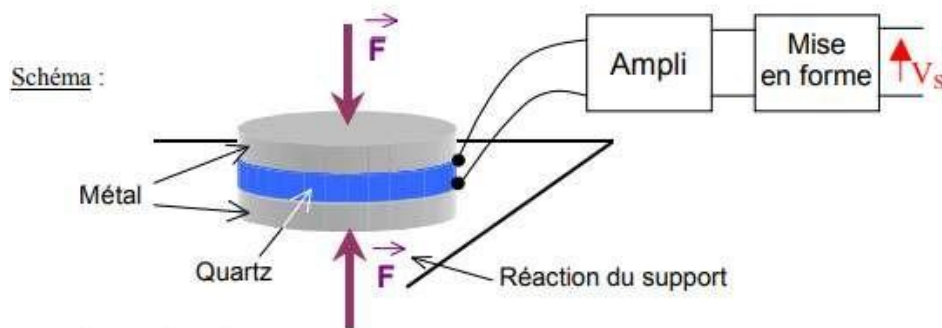
I. Capteurs à effet piézoélectrique :

1) Effet piézoélectrique :

Une force appliquée à une lame de quartz induit une déformation qui donne naissance à une tension électrique.



2) Capteur de force :



La tension V_S de sortie sera proportionnelle à la force F :

$$V_S = k.(F+F) = 2k.F \quad \text{avec } k \text{ constante.}$$

3) Capteur de pression :

Définition :

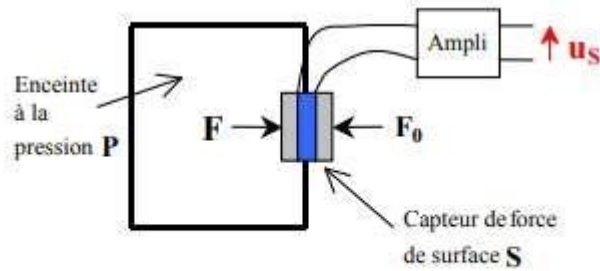
Lorsqu'un corps (gaz, liquide ou solide) exerce une force F sur une paroi S (surface); on peut définir la pression P exercée par ce corps avec la relation ci-dessous :

$$\boxed{P = \frac{F}{S}} \quad \text{avec les unités : } 1\text{Pascal} = \frac{1\text{Newton}}{1\text{m}^2} \quad \text{ou} \quad 1\text{Pa} = \frac{1\text{N}}{1\text{m}^2}.$$

On rappelle que $1 \text{ kg} = 9,81 \text{ N}$.

Unités : $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 100\,000 \text{ N} / \text{m}^2 \approx 10\,000 \text{ kg} / \text{m}^2 \approx 1 \text{ kg} / \text{cm}^2$

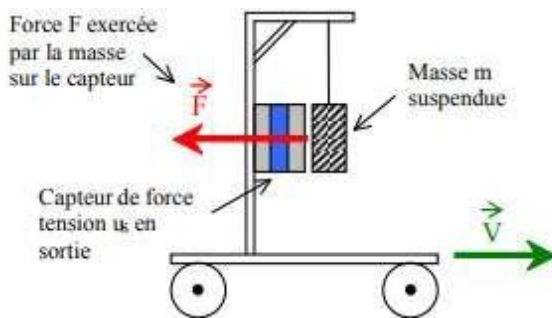
Le capteur de force est inséré dans la paroi d'une enceinte où règne une pression P . Une face du capteur est soumise à la force F (pression P) et l'autre face est soumise à la force F_0 (pression extérieure P_0)



On a $F = P.S$; $F_0 = P_0.S$ et $u_s = k.(F+F_0)$ (capteur de force, $k = \text{constante}$).
 Donc $u_s = k.S (P + P_0) = k' (P + P_0) \Rightarrow \boxed{u_s = k' (P + P_0)}$:

Il s'agit ici d'un capteur de pression qui mesure la somme de la pression extérieure P_0 et de la pression de l'enceinte P .

4) **Capteur d'accélération :**



L'augmentation de vitesse V du véhicule donne une accélération a qui induit une force F exercée par la masse sur le capteur.
 On a donc :
 $F = m.a$ mais $u_s = 2k.F$
 donc $\boxed{u_s = 2k.m.a}$

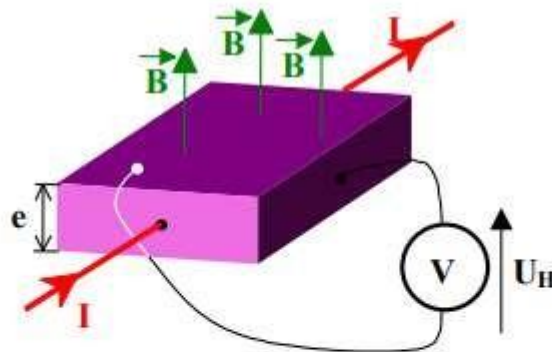
5) **Récepteur à ultrason :**

La réception d'un son engendre une variation de pression à la surface du récepteur. Un capteur de pression sur cette surface donnera donc une tension image du signal ultrasonore.

II. **Capteurs à effet hall**

1) **L'effet Hall :**

Un barreau de semi-conducteur soumis à un champ magnétique uniforme B et traversé par un courant I , est le siège d'une force électromotrice U_H sur deux de ses faces.



La tension de Hall U_H est définie par la relation ci-dessous :

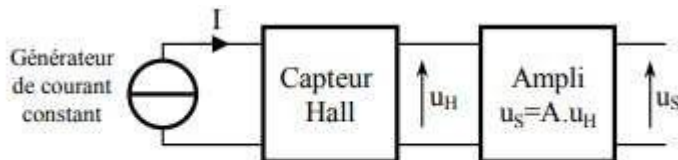
$\boxed{U_H = R_H \frac{IB}{e}}$ avec : R_H : constante de Hall (dépend du semi-conducteur)

I : intensité de la source de courant (A)
 B : intensité du champ magnétique (T)
 e : épaisseur du barreau de silicium.

Si on maintient le courant I constant, on a donc une tension U_H proportionnelle au champ magnétique B : $U_H = k.B$ avec k constante égale à $R_H \frac{I}{e}$.

2) Capteur de champ magnétique

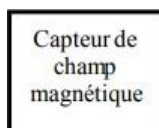
La structure typique d'un capteur de champ magnétique est la suivante :



La sensibilité de ce capteur pourra être ajustée en agissant sur I et sur A .

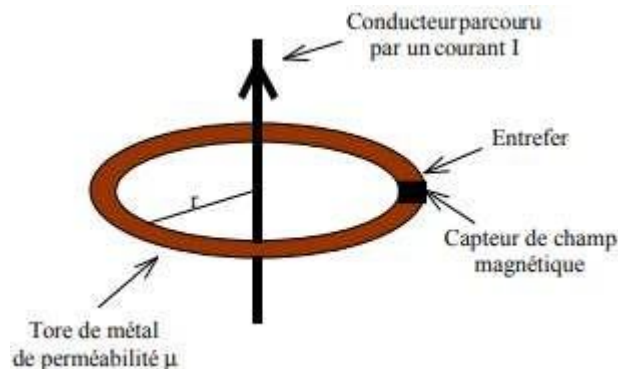
3) Autres applications

a) Capteur de proximité



Le capteur détecte l'approche de l'aimant placé au préalable sur un objet.

b) Mesure de l'intensité d'un courant électrique sans "ouvrir " le circuit



Le courant I crée un champ magnétique proportionnel à ce courant : $B = \frac{\mu}{2\pi r} I$.

Le capteur donne une tension $U_S = k.B = k'.I$ avec k et k' constantes.

C'est le principe des pinces ampèremétriques (mesure de forts courants de 1000A et plus).

Avantages :

- plus de détérioration des ampèremètres "classiques".
- pas de danger car le fil reste isolé (pas besoin d'ouvrir le circuit).
- rapidité d'intervention.

III. Capteurs à effet photoélectrique

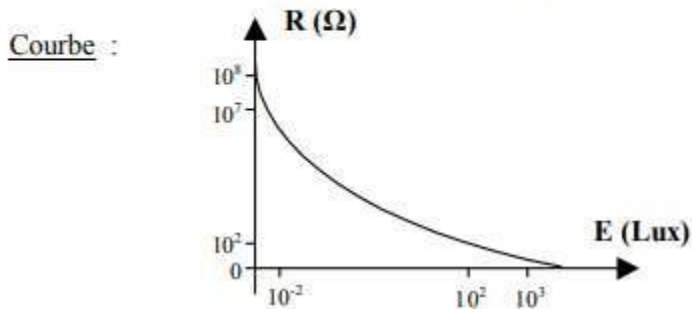
1) L'effet photoélectrique :

Un semi-conducteur est un matériau pauvre en porteurs de charges électriques (isolant). Lorsqu'un photon d'énergie suffisante excite un atome du matériau, celui-ci libère plus facilement un électron qui participera à la conduction.

2) Les photorésistances :

Une photorésistance est une résistance dont la valeur varie en fonction du flux lumineux qu'elle reçoit.

Exemple : Obscurité → $R_0 = 20 \text{ M}\Omega$ (0 lux)
 Lumière naturelle → $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ (500 lux)
 Lumière intense → $R_2 = 100 \Omega$ (10000 lux).



Avantages :

- bonne sensibilité
- faible coût et robustesse.

Inconvénients :

- temps de réponse élevé
- bande passante étroite
- sensible à la chaleur.

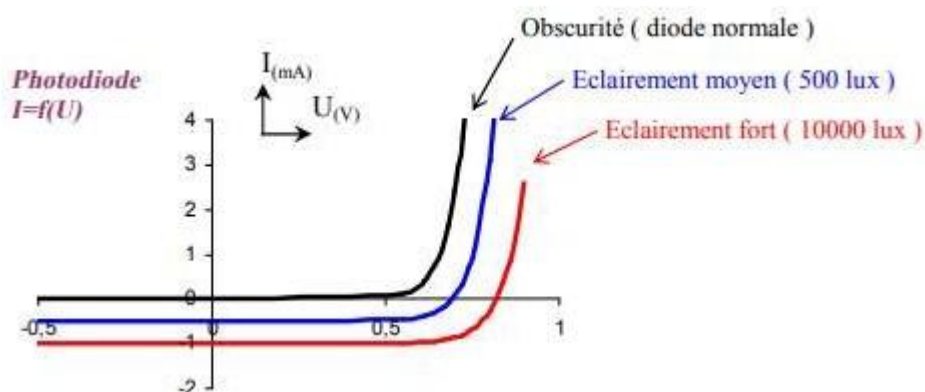
Utilisation :

- détection des changements obscurité-lumière (éclairage public).

3) Les photodiodes

Une photodiode est une diode dont la jonction PN peut être soumise à un éclairage lumineux.

Courbe : Le graphe $I = f(U)$ pour une photodiode dépend de l'éclairage (Lux) de la jonction PN.



Avantages :

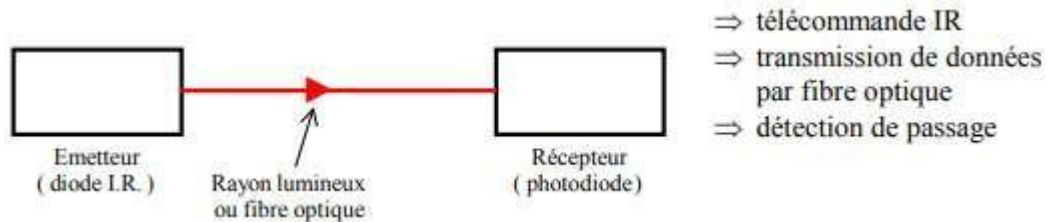
- bonne sensibilité
- faible temps de réponse (bande passante élevée).

Inconvénients :

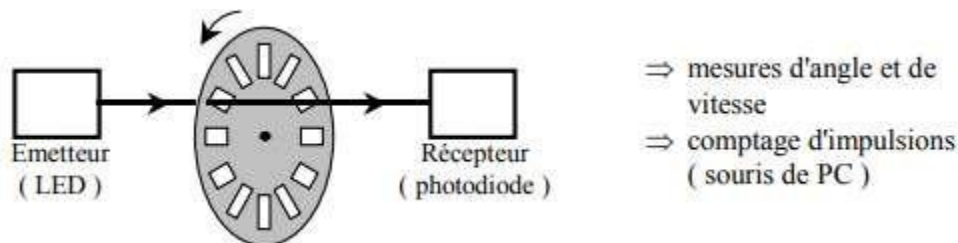
- coût plus élevé qu'une photorésistance
- nécessite un circuit de polarisation précis.

Utilisations :

a) Transmission de données



b) Roue codeuse

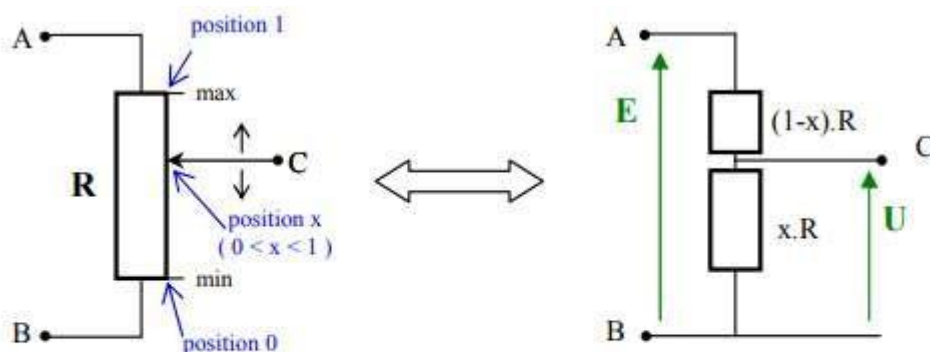


IV. Capteurs à résistance variable par déformation

1) Capteurs potentiométriques de déplacement

Principe :

Pour mesurer la position d'un objet, il suffit de le relier mécaniquement au curseur C d'un potentiomètre (schéma ci-dessous).



On applique une tension continue E entre les extrémités A et B du potentiomètre.

La tension U en sortie aura l'expression suivante : $U = E \frac{x.R}{R} = x.E$.

La tension U en sortie est donc proportionnelle à la position x du curseur.

Avantages

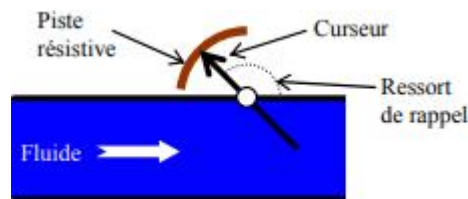
- simplicité d'utilisation
- faible coût.

Inconvénient

- usure mécanique (utilisation déconseillée dans les asservissements très dynamiques)

Utilisations

- Mesures de déplacements rectilignes (potentiomètre rectiligne).
- Mesures d'angles de rotations (potentiomètre rotatif monotour ou multitour).
- Mesure de débit de fluide : Le débit du fluide exerce une force sur un clapet relié au curseur d'un potentiomètre. La tension en sortie du potentiomètre augmente avec la vitesse d'écoulement.



2) Capteurs à jauges d'extensiométrie

a. Principe

La résistance d'un conducteur est donnée par la relation :

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Labels: ρ (résistivité $\Omega \cdot m$), l (longueur m), S (surface m^2)

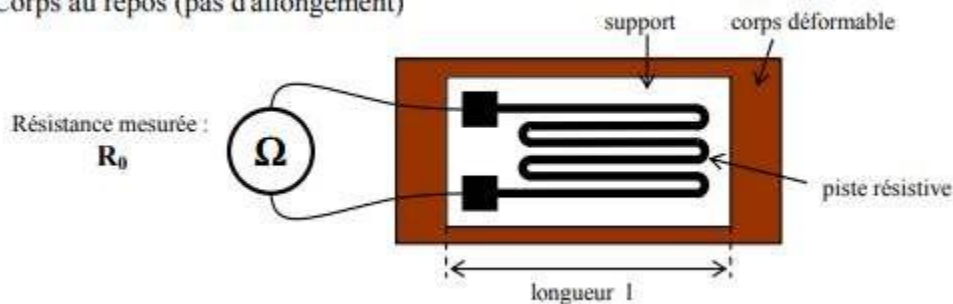
La déformation du conducteur (jauge) modifie la longueur l entraînant une variation de la résistance R .

La relation générale pour les jauges est $\frac{\Delta R}{R_0} = K \frac{\Delta l}{l}$ où K est le facteur de jauge.

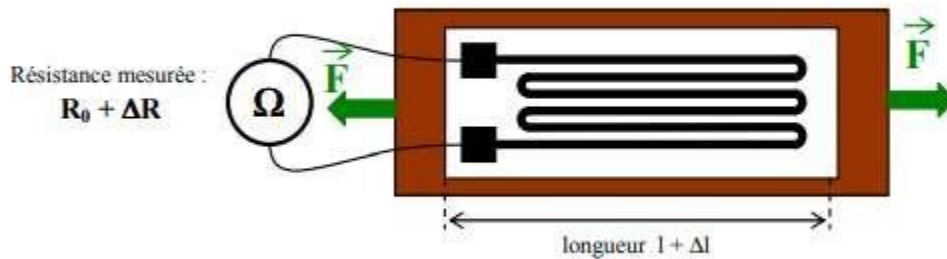
b. Fonctionnement d'une jauge simple

La jauge est constituée d'une piste résistive collée sur un support en résine. Le tout est collé sur le corps dont on veut mesurer la déformation.

① Corps au repos (pas d'allongement)



② Corps ayant subi un étirement (effort de traction)

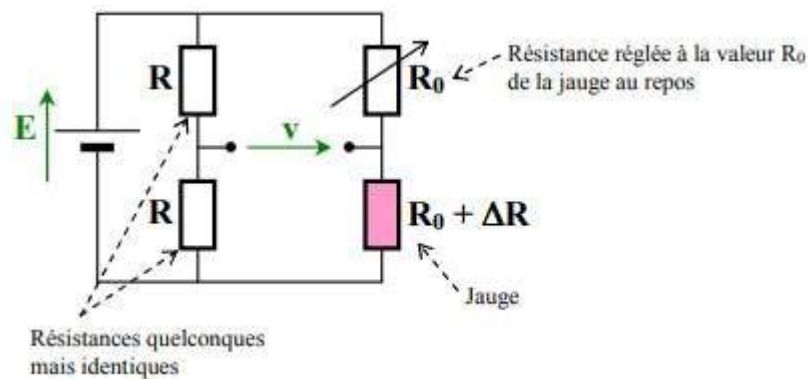


Remarque : Dans le cas d'une contraction, la résistance de la jauge serait $R_0 - \Delta R$.

c. Conditionneur de signal (pont de Wheatstone)

La jauge étant un composant purement résistif, il faut l'associer à un circuit électrique pour obtenir une tension image de la déformation.

Le circuit souvent utilisé est appelé "pont de Wheatstone". Il est ici constitué d'un générateur de tension associé à 4 résistances dont une est la jauge (schéma ci-dessous) :



La tension de sortie v du pont a l'expression suivante :

$$v = E \left[\frac{R_0 + \Delta R}{R_0 + R_0 + \Delta R} - \frac{R}{R + R} \right] = E \left[\frac{R_0 + \Delta R}{2R_0 + \Delta R} - \frac{1}{2} \right] = E \left[\frac{2R_0 + 2\Delta R - 2R_0 - \Delta R}{4R_0 + 2\Delta R} \right]$$

$$\Rightarrow v = E \frac{\Delta R}{4R_0 + \Delta R}$$

En général, la variation ΔR est petite devant R_0 ; la relation se simplifie alors pour devenir quasi-linéaire :

$$v \approx E \frac{\Delta R}{4R_0}$$

Remarque :

On peut améliorer la sensibilité et la linéarité du dispositif en utilisant un pont à 2 résistances et 2 jauges symétriques $R_0 + \Delta R$ et $R_0 - \Delta R$.

Il est même possible d'utiliser un pont à 4 jauges symétriques pour avoir une parfaite linéarité.

CAPTEURS DE TEMPÉRATURE

LES THERMOMETRES A DILATATION

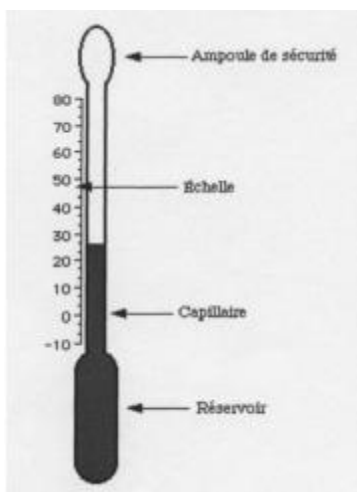
I. INTRODUCTION :

- La température est une grandeur différente des autres grandeurs physiques (longueur, masse, ...) qui sont des grandeurs extensives qu'on peut définir numériquement par rapport à une grandeur de même nature prise comme référence. La température est une grandeur intensive, multiplier ou diviser une température n'a pas, à priori, de signification physique évidente.
- La température est une grandeur abstraite, elle définit est définie en termes de changement de comportement des matériaux lorsqu'ils sont soumis à un changement de température. Du nombre important de propriétés de la matière et de phénomènes physiques sensibles à la température, résulte une grande diversité de méthodes de mesure de la température.
- La dilatation des corps sous l'effet de l'augmentation de la température qui sera l'image de la grandeur thermométrique. La dilatation étant un phénomène réversible, elle fournit un mode pratique de mesure des températures. Ce phénomène se retrouve de manière analogue, mais avec une ampleur différente pour les liquides, les gaz et les solides. D'où les trois types de thermomètres à dilatation qui font l'objet de notre étude.

II. THERMOMETRE A DILATATION DE LIQUIDE :

1. Description :

Il est constitué d'un réservoir surmonté d'un capillaire de section faible et régulière (l'ordre de grandeur est de 0.2 mm) se terminant par une ampoule de sécurité. Il est réalisé en verre. Sous l'effet des variations de température, le liquide se dilate de manière plus ou moins importante. Son niveau est repéré à l'aide d'une échelle thermométrique gravée sur l'enveloppe.



2. Loi de variation :

La loi de variation du volume du liquide en fonction de la température s'écrit :

$$V = V_0 (1 + aT)$$

avec :

- V_0 le volume du liquide à 0°C
- V le volume du liquide à $T(^\circ\text{C})$
- a le coefficient de dilatation du liquide ($^\circ\text{C}^{-1}$)

3. Liquides thermométriques :

Le liquide le plus utilisé est le mercure mais d'autres liquides sont quelquefois employés :

Liquide	Domaine d'emploi ($^\circ\text{C}$)	a ($^\circ\text{C}^{-1}$)
Pentane	-200 à +20	-
Alcool éthylique	-110 à +100	1.17
Toluène	-90 à +100	1.03
Mercure	-38 à +650	0.182

L'espace libre au-dessus du liquide peut être vide mais pour empêcher la colonne de liquide de se fractionner facilement et pour permettre la mesure des hautes températures, l'espace libre est rempli d'un gaz neutre (azote ou argon) et mis sous une pression fonction de la température à mesurer. Par exemple, pour un thermomètre à mercure prévu pour mesurer une température de 600°C , la pression de l'azote est de 20 bars. La chambre d'expansion évite les trop fortes variations de pression.

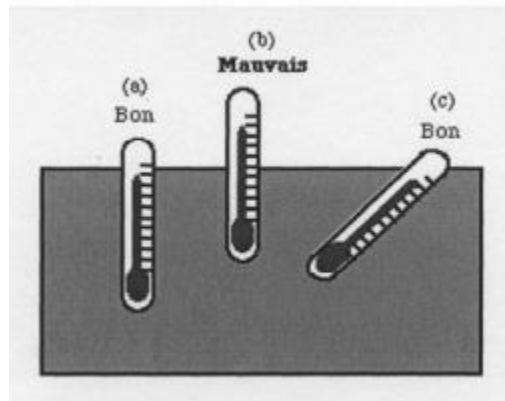
4. Nature de l'enveloppe :

Le matériau constituant l'enveloppe du thermomètre dépend de la température à mesurer :

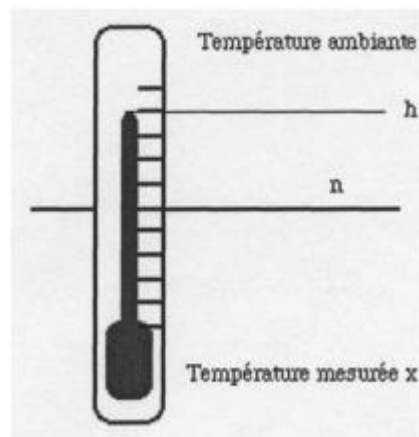
- jusqu'à 450°C : verre d'Iena
- jusqu'à 630°C : verre Supremax
- jusqu'à 1000°C : silice pure fondue

5. Colonne émergente :

Il faut corriger la mesure de la température s'il n'est pas possible d'immerger complètement le thermomètre. Comme le montre la figure suivante, dans les cas (a) et (c) la colonne de liquide thermométrique est totalement immergée dans l'enceinte dont on mesure la température. La dilatation du liquide se fait donc pleinement.



Par contre, dans le cas (b), la colonne de liquide est immergée jusqu'à la graduation n, dans l'enceinte de température inconnue x et la partie de la colonne située entre les graduations n et h est en contact avec la température ambiante.



Si on note v le volume correspondant à une graduation, le volume V à la température ambiante T a pour expression :

$$V = (h - n) v$$

La correction à apporter est donc :

$$dh = \frac{dV}{v} = a(h - n)(x - T)$$

En réalité, la partie émergée n'est pas tout à fait à la température ambiante, dans la pratique on prend les 7/10 de la correction calculée. Cette correction n'étant pas très précise, il faut, dans la mesure du possible, positionner au mieux le thermomètre (selon les configurations a et c).

Ces thermomètres sont très simples à utiliser, ils peuvent être également précis mais ils présentent deux inconvénients, leur temps de réponse est élevé et ils sont à lecture directe, ce qui nécessite la présence d'un opérateur pour réaliser les mesures. Ils ne sont pas adaptés à l'enregistrement et à l'acquisition de données et ne peuvent pas être utilisés pour des mesures sur une longue période de temps ou pour de la régulation. Ce dernier inconvénient est commun à tous les thermomètres à dilatation.

III. **LE THERMOMETRE A DILATATION DE GAZ :**

1. **Principe :**

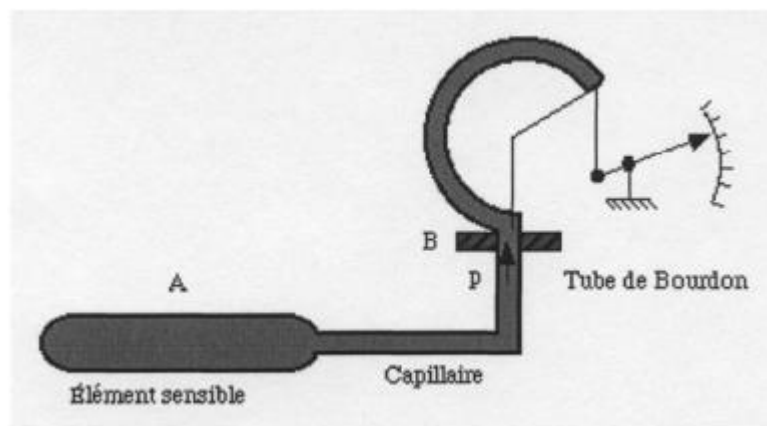
L'équation d'un gaz parfait s'écrit : $PV = nRT$, avec :

- P la pression (Pa)
- T la température (K)
- R la constante des gaz parfaits ($8.31 \text{ J.mol}^{-1} . \text{K}^{-1}$)
- n le nombre de moles

Si on enferme une certaine quantité de gaz dans une enveloppe de volume constant V, la pression développée par le gaz est proportionnel à la température, c'est le principe sur lequel repose le thermomètre à dilatation de gaz.

2. **Description :**

De manière schématisée, un thermomètre à gaz est composé d'une sonde A qui représente l'enveloppe dans laquelle est enfermé le gaz thermométrique. Cette sonde est reliée par un tube de raccordement de faible section à l'extrémité B fixe d'un tube de Bourdon, appelé également spirale de mesure. La longueur du tube de raccordement ne doit pas dépasser 100 m.



Sous l'effet de la variation de la température du milieu dans lequel est placée la sonde, la pression du gaz varie, ce qui modifie l'extrémité libre du tube de Bourdon. Cette variation de pression se traduit par un mouvement de rotation de l'index indicateur qui se déplace devant un cadran portant des graduations thermométriques. Les gaz les plus employés sont l'hélium, l'hydrogène, l'azote et le gaz carbonique.

L'avantage des thermomètres à gaz est leur précision, qui est de l'ordre de 1% en mesures industrielles. Ils sont très adaptés pour mesurer les très basses températures (jusqu'à -268°C pour l'hélium et -240°C pour l'hydrogène). Certains de ces thermomètres sont de véritables instruments de précision auxquels on a recours pour les déterminations des températures de référence, tels que le thermomètre à hydrogène. Leur principal inconvénient est que la dimension de la sonde est d'assez grande dimension.

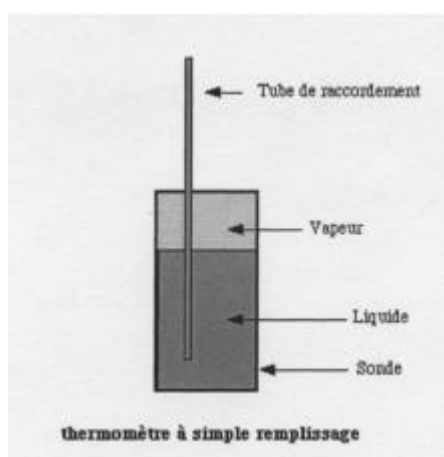
IV. **LE THERMOMETRE A TENSION DE VAPEUR**

1. **Principe**

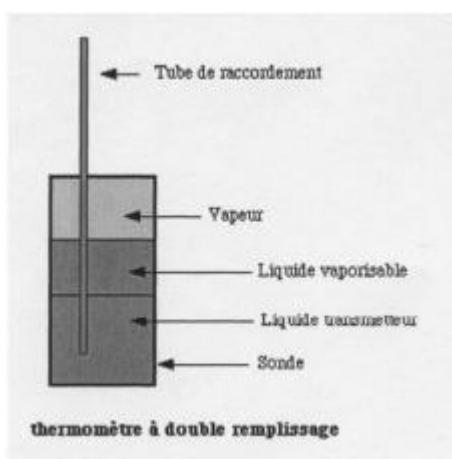
On appelle tension de vapeur d'un liquide pur, la pression sous laquelle ce liquide est en équilibre avec sa vapeur saturante. Pour un liquide donné, la tension de vapeur n'est fonction que de la température. La mesure de la tension de vapeur d'un liquide permet donc de connaître sa température, la mesure thermométrique se fait donc par l'intermédiaire d'une mesure de pression.

La réalisation la plus simple est celle du thermomètre à simple remplissage présenté sur la figure ci-dessous. L'élément sensible est une sonde analogue à celle du thermomètre à gaz mais le tube de raccordement est plongé dans la sonde. La sonde, le tube de raccordement et l'élément de mesure sont remplis de liquide vaporisable.

Lorsque la sonde est placée dans une enceinte chaude, une partie du liquide se vaporise. Un équilibre liquide/vapeur, fonction de la température, s'établit. En même temps, la pression augmente pour se fixer à la valeur de la tension de vapeur du liquide. Cette pression est transmise par le liquide à un manomètre de mesure.



La vaporisation se faisant toujours au point le plus chaud du système fermé, les capteurs à simple remplissage ne sont utilisables que si la sonde est à une température supérieure à la température ambiante, sinon la vaporisation se ferait dans le capteur de pression. Pour pallier cet inconvénient et effectuer des mesures de températures inférieures et supérieures à la température ambiante, on utilise une sonde à double remplissage (figure suivante). Le liquide vaporisable est placé dans la zone médiane de la sonde et c'est un liquide non évaporable, appelé liquide transmetteur, qui est placé dans le fond de la sonde et dans l'ensemble capillaire-capteur de pression. Ce liquide, qui transmet au manomètre la pression de la vapeur est soit de l'huile, soit de la glycérine.



L'avantage de ces thermomètres est qu'ils sont très sensibles, l'inconvénient est que la position de la sonde par rapport au capteur peut influencer la mesure.

2. Liquides de remplissage et domaines d'utilisation

Ils sont rassemblés dans le tableau suivant :

Liquide	Domaine d'utilisation	
	Température (°C)	Pression (bars)
Ammoniac	-20 à +60	2 à 25
Propane	0 à 100	5 à 45
Butane	+20 à +140	2 à 30
Chlorure d'éthyle	+30 à +180	2 à 50
Alcool méthylique	+60 à +220	1 à 53
Benzène	+80 à +280	1 à 43

1. **Principe :**

Lorsqu'une tige métallique est soumise à une variation de température, sa longueur varie. Cette loi de variation s'écrit sous la forme : $L = L_0(1 + \alpha T)$, avec :

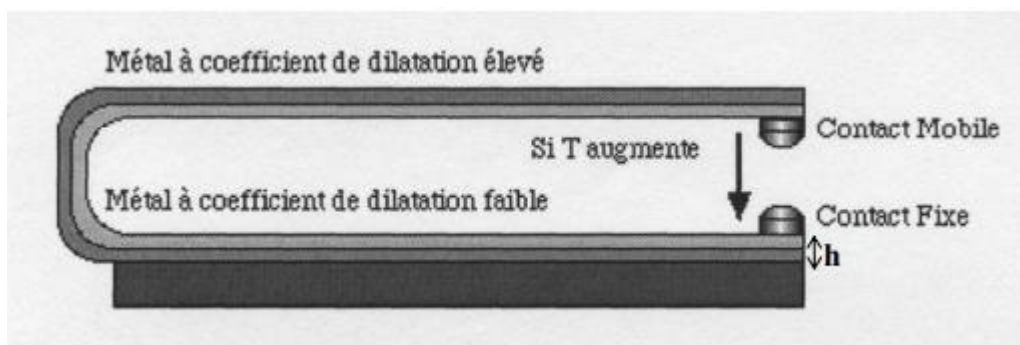
- L la longueur de la tige à la température T ($^{\circ}\text{C}$)
- L_0 la longueur de la tige à 0°C
- α le coefficient de dilatation linéaire du métal ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

La dilatation linéaire du métal peut donc servir de grandeur thermométrique, c'est le principe sur lequel reposent les thermomètres à dilatation de solide. Les métaux les plus utilisés sont le platine ($\alpha = 9.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), le Zinc ($\alpha = 30.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) et l'Invar qui est un alliage de Fer et de Nickel ($\alpha = 2.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

2. **Le bilame (bi-metallic-strip thermometer) :**

Le thermomètre bilame est constitué de deux bandes de métaux dont les coefficients de dilatation sont très différents, soudés à plat sur toute leur surface. La soudure des deux constituants doit être réalisée de manière à ce que le contact soit parfait et que la zone de jonction soit mécaniquement aussi résistante que chacune des deux lames.

Lorsque le bilame est soumis à une variation de température, les dilatations des deux lames provoquent des tensions, il en résulte une incurvation de l'ensemble.



Si on note h_1 l'épaisseur de la lame de coefficient de dilatation élevé α_1 , et h_2 l'épaisseur de la lame de coefficient de dilatation faible α_2 , le rayon de courbure du bilame d'épaisseur $h = (h_1 + h_2)$ a pour expression :

$$\rho = \frac{h \cdot \left(3(1+r_h)^2 + (1+r_h r_e) \left(r_e^2 - \frac{1}{r_h r_e} \right) \right)}{6(\alpha_1 - \alpha_2)(1+r_h)\Delta T}$$

avec :

$r_h = \frac{h_2}{h_1}$ le rapport des épaisseurs

$r_e = \frac{E_2}{E_1}$ le rapport des modules d'élasticité

La sensibilité des bilames est améliorée en minimisant l'épaisseur h et en augmentant l'écart entre α_1 et α_2 , ce qui revient à prendre des métaux dont les coefficients de dilatation sont les plus différents possibles.

Les bilames sont très utilisés comme thermostats :

Lorsque la température souhaitée est atteinte, le contact fixe touche le contact mobile qui joue alors le rôle d'un interrupteur de courant. C'est le cas, par exemple, du thermostat du fer à repasser.

CAPTEURS DE TEMPÉRATURE

LES THERMOMETRES ELECTRIQUES

I. 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 Temperature Detector RTD) d'une part, et de thermistance (Thermistor) d'autre part.

II. LES THERMOMETRES A RESISTANCE :

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 $0^{\circ}C$
- a, b et 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 $R(T + \Delta T) = R(T).(1 + \alpha_R \Delta T)$

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

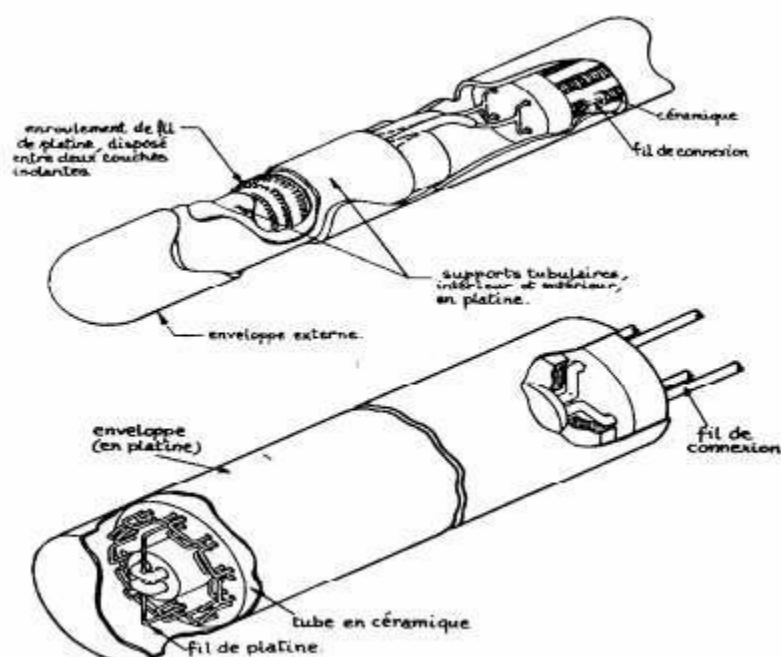
2. Critères de choix du métal :

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 : f

- Le platine peut être obtenu avec une très grande pureté (99.999%), ce qui lui confère des propriétés mécaniques et électriques très stables. f
- 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. f
- 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. f
- 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 ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	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	-250 à +1100°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.



III. LES THERMISTANCES :

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 quasi-ponctuelle de la température.

2. Relation résistance-température :

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

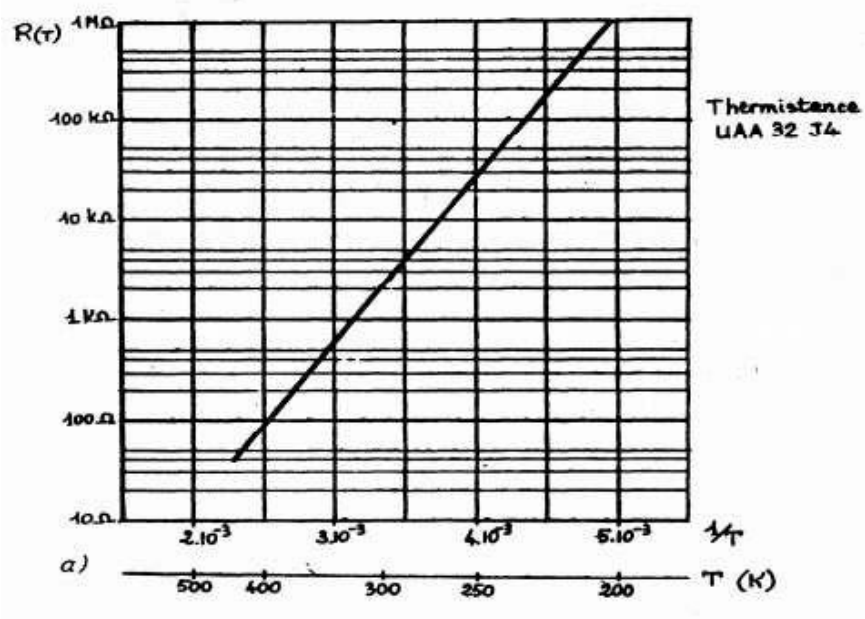
$$R(T) = R_0 \exp\left(\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)$$

avec :

- R_0 la résistance à la température T_0
- β un coefficient qui dépend de la température, compris généralement entre 3000 et 5000 K.

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.

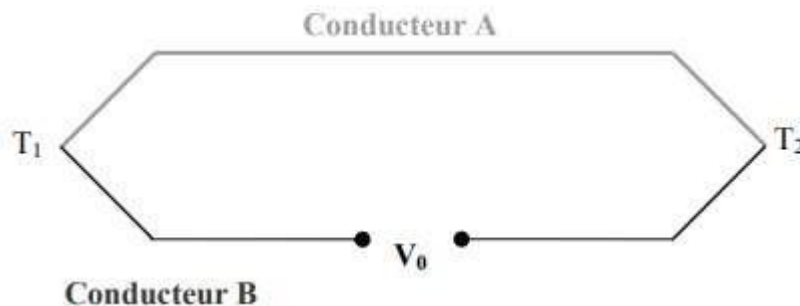


CAPTEURS DE TEMPÉRATURE

LES THERMOCOUPLES

I. PRINCIPE :

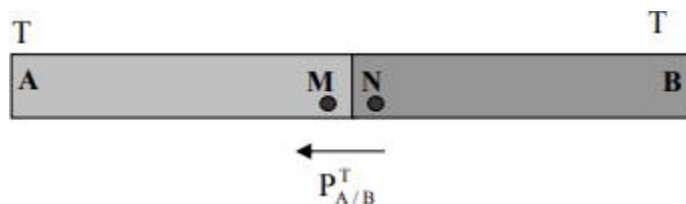
Un thermocouple constitué de deux conducteurs A et B de nature différente, dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 délivre une f.é.m. V_0 qui dépend d'une part de la nature de A et B, et d'autre part des températures des deux jonctions. En général, la température de l'une des jonctions est fixe, connue et sert de référence ($T_1=T_{ref}$), tandis que l'autre jonction est placée dans le milieu dont on cherche à mesurer la température. La jonction à la température T_1 est également appelée soudure froide et celle à la température T_2 soudure chaude.



II. LES EFFETS THERMOELECTRIQUES :

Le fonctionnement des thermocouples est basé sur plusieurs phénomènes thermoélectriques.

1. L'effet Peltier :



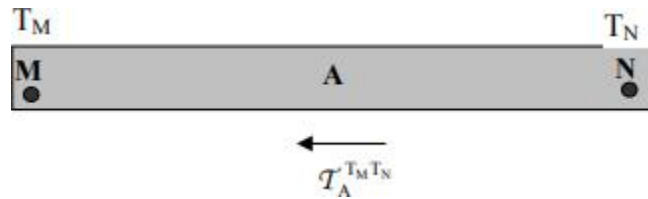
A la jonction de deux conducteurs A et B différents mais à la même température T , s'établit une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température, c'est la f.é.m. de Peltier :

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

Loi de Volta : dans un circuit isotherme constitué de conducteurs différents, la somme des f.é.m. de Peltier est nulle. On a donc :

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

2. L'effet Thomson :

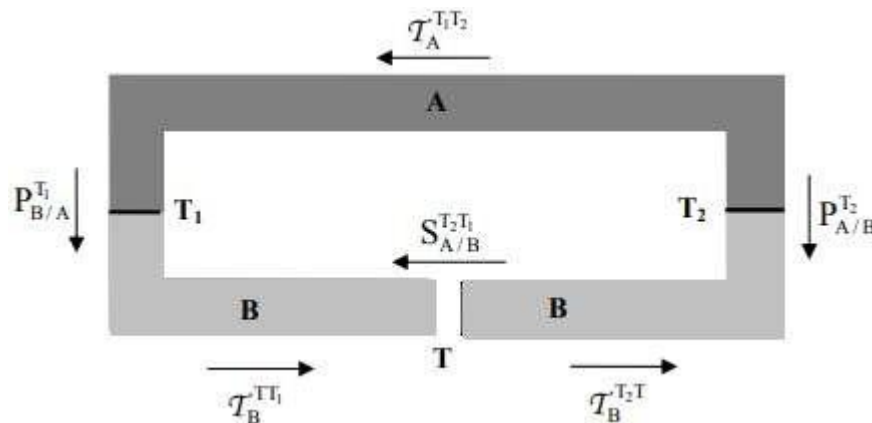


Entre deux points M et N de températures différentes T_M et T_N qui se trouvent à l'intérieur d'un conducteur A homogène, s'établit une force électromotrice, qui ne dépend que de la nature du conducteur et des températures T_M et T_N , c'est la f.é.m. de Thomson :

$$\mathcal{T}_A^{T_M T_N} = \int_{T_N}^{T_M} h_A dT$$

avec h_A le coefficient de Thomson du conducteur qui dépend de la température.

3. L'effet Seebeck :



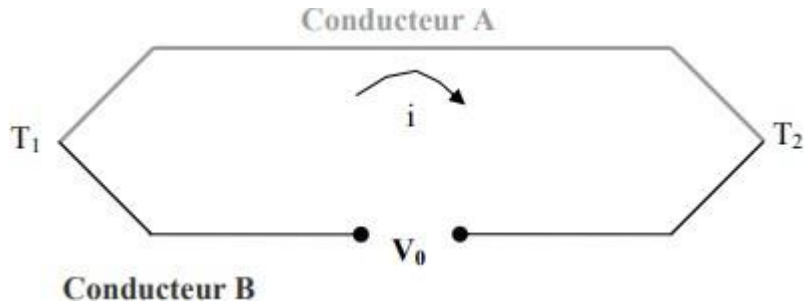
On considère le circuit électrique fermé ci-dessus, constitué des deux conducteurs A et B dont les jonctions sont aux températures T_1 et T_2 , ce circuit constitue un couple thermoélectrique et est le siège d'une f.é.m. dite de Seebeck qui résulte des effets de Peltier et de Thomson qui s'y produisent.

Si par convention on choisit pour l'une des températures, T_1 par exemple, une valeur de référence déterminée (généralement 0°C), la f.é.m. ne dépend que de la température T_2 , pour un couple de conducteurs A et B donnés.

III. PRINCIPES PRATIQUES D'UTILISATION DES THERMOCOUPLES :

L'utilisation pratique des thermocouples repose sur les six principes suivants :

1) Un thermocouple doit contenir au moins 2 matériaux et 2 jonctions



La différence de potentiel V_0 est une fonction non linéaire de la différence de températures ($T_1 - T_2$) des deux jonctions :

$$V_0 = e_{B/A} T_1 + e_{A/B} T_2$$

avec :

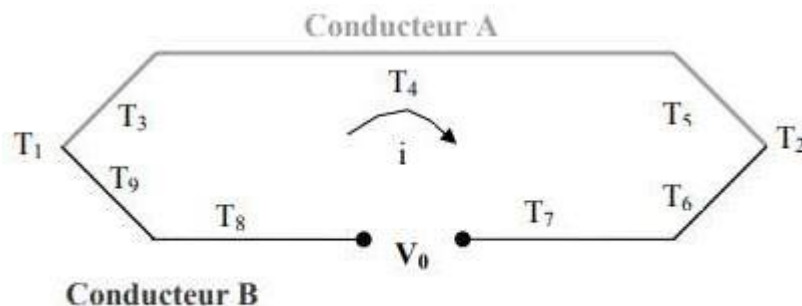
- $e_{B/A}$ le potentiel à la jonction par unité de température à la jonction quand le courant circule de B vers A
- $e_{A/B}$ le potentiel à la jonction par unité de température à la jonction quand le courant circule de A vers B

Etant donné que $e_{A/B} = -e_{B/A}$, on obtient :

$$V_0 = e_{B/A} (T_1 - T_2)$$

Attention : Cette relation n'est pas linéaire, $e_{B/A}$ dépend de la température.

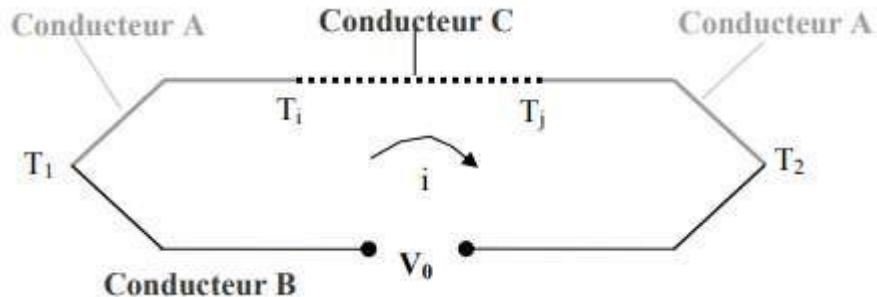
2) V_0 dépend uniquement de la nature des conducteurs A et B et de la différence de température ($T_1 - T_2$) des jonctions.



$$V_0 = f(T_1 - T_2)$$

3) Loi des métaux intermédiaires :

Quand on introduit un 3^{ème} conducteur dans le circuit comprenant le couple A/B, la f.e.m dont le circuit est le siège ne change pas à condition que les extrémités du conducteur ajouté soient à la même température.



En effet :

$$V_0 = e_{B/A} T_1 + e_{A/C} T_i + e_{C/A} T_j + e_{A/B} T_2$$

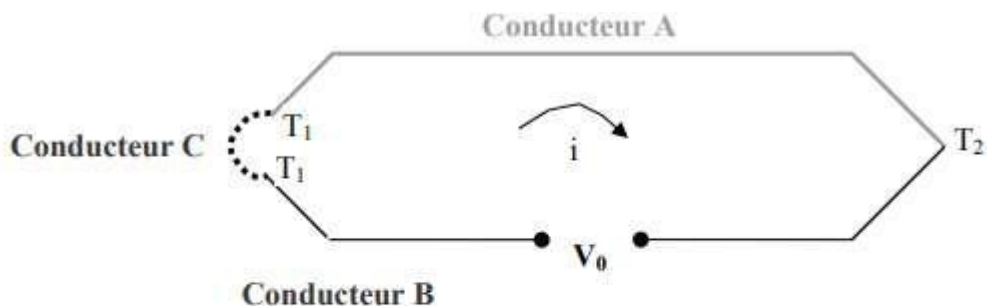
Etant donné que $e_{A/B} = -e_{B/A}$ et $e_{A/C} = -e_{C/A}$, on obtient :

$$V_0 = e_{B/A} (T_1 - T_2) + e_{A/C} (T_i - T_j)$$

Les effets du conducteur introduit dans le circuit sont donc éliminés si $T_i = T_j$

Cette conclusion est valable quel que soit le nombre de conducteurs introduits, à condition que leurs extrémités soient deux à deux à la même température.

4) L'insertion d'un conducteur dans une jonction n'affecte pas V_0 si ses deux extrémités sont maintenues à la température de la jonction.



En effet :

$$V_0 = e_{B/C} T_1 + e_{C/A} T_1 + e_{A/B} T_2, \text{ et compte tenu du fait que } \begin{cases} e_{C/A} = e_{C/B} + e_{B/A} \\ e_{B/A} = e_{B/C} + e_{C/A} \end{cases}$$

on obtient : $V_0 = e_{B/A} (T_1 - T_2)$

Cette conclusion est valable quel que soit le nombre de conducteurs introduits, à condition que leurs extrémités soient deux à deux à la température de la jonction.

5) Loi des températures successives :

Lorsque la température de référence T_1 d'un thermocouple prend une nouvelle valeur T_1' , la f.e.m de Seebeck du couple A/B passe de la valeur $S_{A/B}^{T_2 T_1}$ à $S_{A/B}^{T_2 T_1'}$:

$$S_{A/B}^{T_2 T_1'} = (\mathcal{T}_B^{T_2 T_1'} - \mathcal{T}_A^{T_2 T_1'}) + (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1'})$$

que l'on peut écrire :

$$S_{A/B}^{T_2 T_1'} = (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1}) + (\mathcal{T}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_A^{T_2 T_1}) - (P_{A/B}^{T_1'} - P_{A/B}^{T_1}) - (\mathcal{T}_B^{T_1' T_1} - \mathcal{T}_A^{T_1' T_1})$$

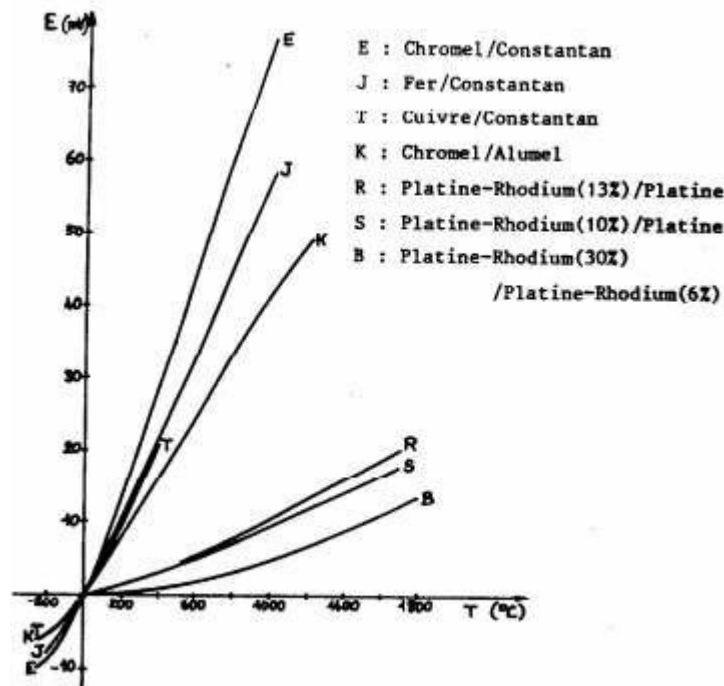
soit : $S_{A/B}^{T_2 T_1'} = S_{A/B}^{T_2 T_1} - S_{A/B}^{T_1' T_1}$, ou encore :

$$S_{A/B}^{T_2 T_1} = S_{A/B}^{T_2 T_1'} + S_{A/B}^{T_1' T_1}$$

Cette relation est utilisée en particulier lorsque la mesure a été faite avec une température de référence T_1' ayant fourni la f.e.m $S_{A/B}^{T_2 T_1'}$ et que l'on souhaite connaître la valeur de $S_{A/B}^{T_2 T_1}$ pour $T_1=0^\circ\text{C}$, afin d'en déduire la température à mesurer T_2 à partir de la table du thermocouple utilisé.

IV. SENSIBILITE 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.



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.

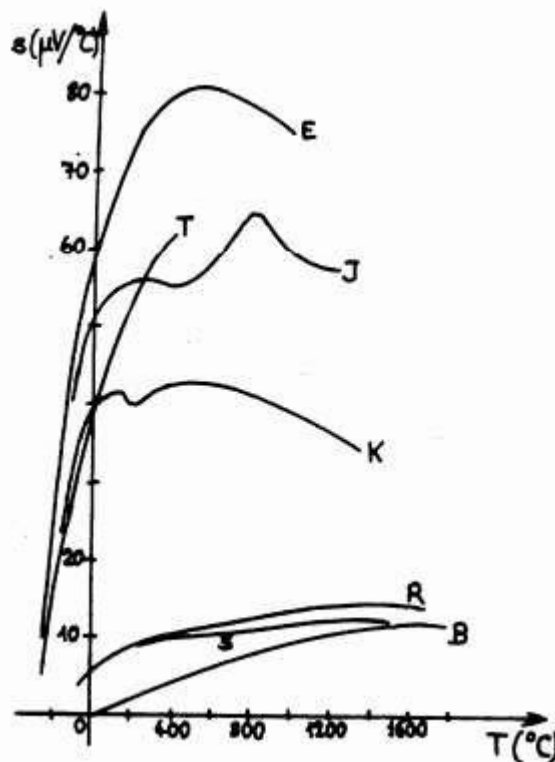
Par exemple, pour le thermocouple type B (Platine-30% Rhodium / Platine-6% Rhodium), $n=8$ et les coefficients a_i sont les suivants :

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

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 $S(700^{\circ}\text{C}) = 11.3 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.

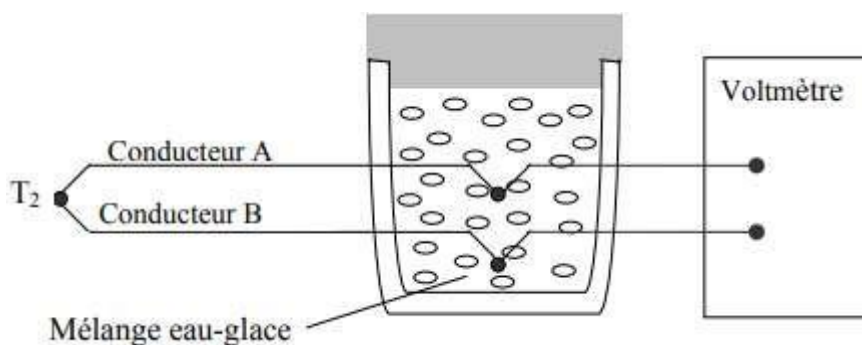
L'ordre de grandeur des sensibilités des thermocouples est très inférieur à celui des capteurs de température utilisant des résistances.

V. TEMPERATURE DE REFERENCE D' UN THERMOCOUPLE :

La mesure de la température à l'aide d'un thermocouple nécessite que la température de la jonction de référence soit parfaitement connue, en effet toute incertitude sur la valeur de T_{ref} entraîne une incertitude sur la température mesurée. Plusieurs méthodes sont utilisées pour maintenir cette température constante à 0°C

1. Le bain d'eau et de glace :

La jonction de référence est plongée dans un bain constitué d'un mélange eau - glace à pression atmosphérique normale, à l'intérieur d'une enceinte adiabatique. L'eau et la glace doivent être très pures et la glace finement pilée. Cette dernière doit être renouvelée fréquemment pour maintenir une température de référence constante. La température de 0°C est obtenue avec une précision de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.



2. La méthode du pont électrique :

Il est possible de maintenir la température de référence à 0°C par l'intermédiaire de circuits électriques, appelés circuits de correction de la soudure froide.

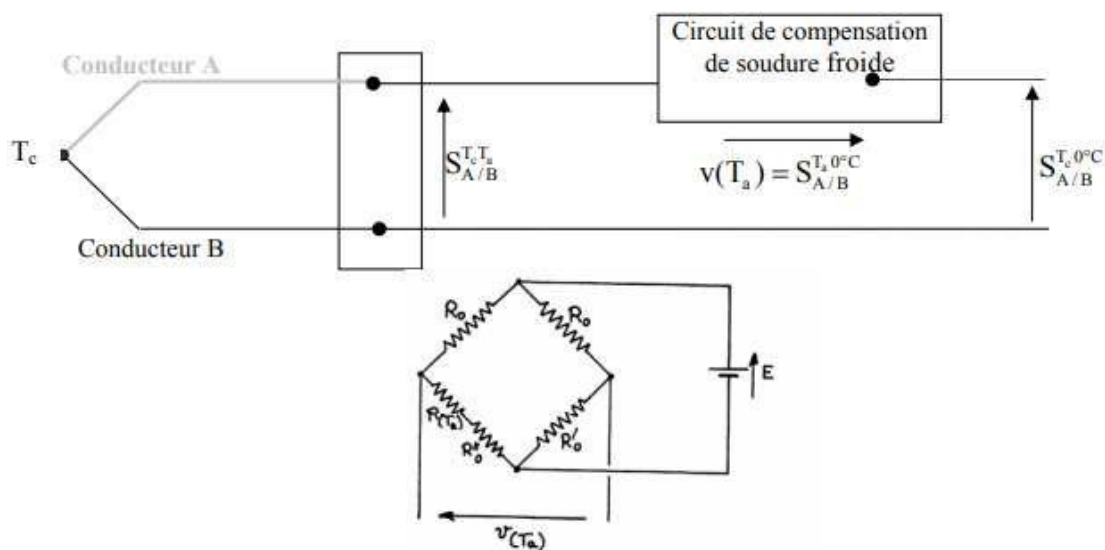
Si on connaît la température ambiante T_a à l'instant de la mesure, et T_c étant la température à mesurer, on peut écrire :

$$S_{A/B}^{T_c, 0^{\circ}\text{C}} = S_{A/B}^{T_c, T_a} + S_{A/B}^{T_a, 0^{\circ}\text{C}}$$

Le circuit de correction de la soudure froide est tel qu'il délivre automatiquement une tension $v(T_a)$ qui est égale à $S_{A/B}^{T_a, 0^\circ\text{C}}$.

Cette f.e.m, ajoutée à la f.e.m $S_{A/B}^{T_c, T_a}$ du thermocouple A/B, permet de mesurer la f.e.m $S_{A/B}^{T_a, 0^\circ\text{C}}$ aux bornes du circuit de mesure.

La tension $v(T_a)$ est déterminée à partir de la résistance $R(T_a)$ d'un capteur de température à résistance maintenu à température ambiante, le dispositif utilisé est le pont de Wheatstone. Le montage de principe est présenté sur la figure suivante :



Le pont de Wheatstone permet la correction de la soudure froide pour des variations de la température ambiante autour de 0°C . Les résistances R_0 , R_0' et R_0'' ne dépendent pas de la température alors que la résistance $R(T_a)$ du capteur en est une fonction linéaire, dont le coefficient est sa sensibilité thermique α_R .

Le pont est équilibré à 0°C , à la température T_a sa tension de déséquilibre a pour expression :

$$v(T_a) = E \frac{R_0 (R_0' - R_0'')}{(R_0 + R_0')^2} \alpha_R T_a$$

Les valeurs numériques des composants du pont sont choisies de manière à assurer :

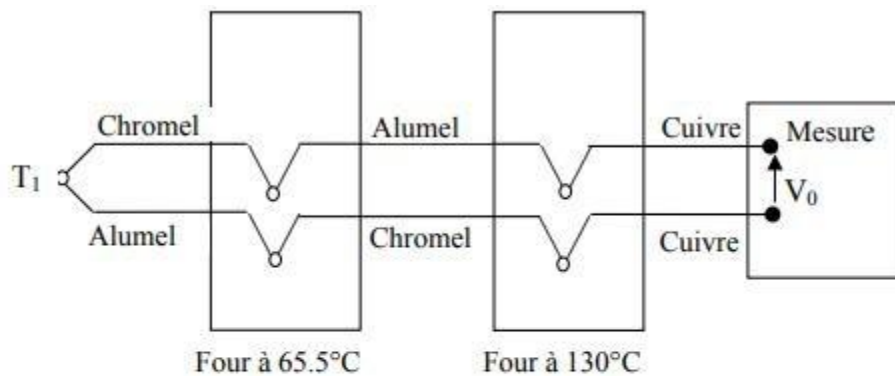
$$E \frac{R_0 (R_0' - R_0'')}{(R_0 + R_0')^2} \alpha_R T_a = S_{A/B}^{T_a, 0^\circ\text{C}}$$

En supposant que la sensibilité du thermocouple est constante dans la plage de variation de T_a on obtient :

$$S = E \frac{R_0 (R_0' - R_0'')}{(R_0 + R_0')^2} \alpha_R$$

3. La méthode du double four :

Cette méthode utilise deux fours à des températures différentes pour simuler la température de référence de 0°C .



On a :

$$\begin{aligned} V_0 &= e_{\text{Cuivre/Alumel}} \cdot 130 + e_{\text{Alumel/Chromel}} \cdot 65,5 + e_{\text{Chromel/Alumel}} \cdot T_1 + e_{\text{Alumel/Chromel}} \cdot 65,5 + e_{\text{Chromel/Cuivre}} \cdot 130 \\ &= 2e_{\text{Alumel/Chromel}} \cdot 65,5 + e_{\text{Chromel/Alumel}} \cdot 130 + e_{\text{Chromel/Alumel}} \cdot T_1 = e_{\text{Chromel/Alumel}} (T_1 - 0^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

On se ramène ainsi à un couple Chromel/Alumel dont la jonction froide est à 0°C .

VI. PRINCIPAUX TYPES DE THERMOCOUPLES ET LIMITES D'EMPLOI :

Le tableau suivant présente, pour différents types de thermocouples, les températures d'utilisation ainsi que la précision, pour les diamètres indiqués. Des tables donnant la f.e.m de ces thermocouples en fonction de la température tableau suivante.

Thermocouples	Gamme de Températures	f.e.m (mV)	Précision
Cuivre / Constantan Type T (diamètre 1.63 mm)	-270 à 370°C	-6.258 à 19.027	± 2% de -100°C à -40°C ± 0.8% de -40°C à 100°C ± 0.75% de 100°C à 350°C
Fer / Constantan Type J (diamètre 3.25 mm)	-210 à 800°C	-8.096 à 45.498	± 3°C de 0°C à 400°C ± 0.75% de 400°C à 800°C
Chromel / Alumel Type K (diamètre 3.25 mm)	-270 à 1250°C	-5.354 à 50.633	± 3°C de 0°C à 400°C ± 0.75% de 400°C à 1250°C
Chromel / Constantan Type E (diamètre 3.25 mm)	-270 à 870°C	-9.835 à 66.473	± 3°C de 0°C à 400°C ± 0.75% de 400°C à 1250°C
Platine-Rhodium (10%) / Platine Type S (diamètre 0.51 mm)	-50 à 1500°C	-0.236 à 15.576	± 2.5°C de 0°C à 600°C ± 0.4% de 600°C à 1600°C
Platine-Rhodium (13%) / Platine Type R (diamètre 0.51 mm)	-50 à 1500°C	-0.226 à 17.445	± 1.4°C de 0°C à 538°C ± 0.25% de 538°C à 1500°C
Platine-Rhodium (30%) / Platine-Rhodium (6%) Type B (diamètre 0.51 mm)	0 à 2760°C	0 à 12.426	± 0.5% de 870°C à 1700°C

VII. COMPARAISON THERMOCOUPLE/THERMOMETRES ELECTRIQUES :

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

	THERMOCOUPLE	RTD	THERMISTANCE
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> ✓ simple ✓ robuste ✓ peu coûteux ✓ mesures ponctuelles ✓ rapide ✓ 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 ✓ faible encombrement
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> ✓ non linéaire ✓ stabilité faible ✓ sensibilité faible ✓ nécessite une température de référence 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ coûteux ✓ lent ✓ sensibilité faible ✓ erreurs par auto-échauffement (effet Joule) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ non linéaire ✓ gamme réduite de températures ✓ stabilité faible ✓ fragile ✓ auto-échauffement