

Chapitre 2

Mesure de température

II-1/ NOTIONS

2.1.1 Définition de Température

Qualitativement, la température d'un objet détermine la sensation de chaud ou de froid ressentie en le touchant. Plus spécifiquement, la température est une mesure de l'énergie cinétique moyenne des particules d'un échantillon de matière, exprimée en unités de degrés sur une échelle standard.

Il est possible de mesurer la température de plusieurs façons différentes qui se distinguent par le coût des équipements et la précision ainsi que le temps de réponse.

2.1.2 Les différentes unités de température

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

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

2.1.3 Les échelles de température

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

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(^{\circ}\text{K}) - 273,15 \quad (2.1)$$

Cette dernière échelle, qui est celle du système international, ne dépend d'aucun phénomène particulier et définit donc des températures absolues.

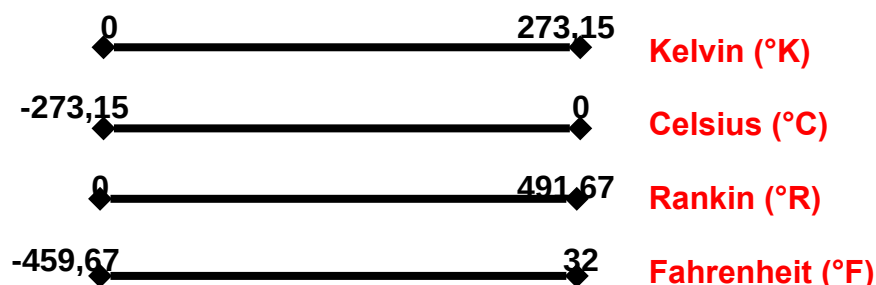
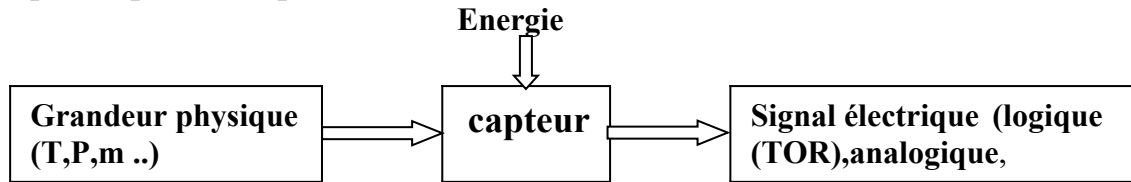


Figure2.1 : Echelles de température

2.1.4. Définition d'un capteur

Un capteur est un dispositif qui transforme une grandeur physique en une autre grandeur normée (ou facilement exploitable), généralement électrique, qui peut être interprétée par un dispositif de contrôle commande.



II-2/ DIFFÉRENTS TYPES DE CAPTEURS DE TEMPÉRATURE

Les types les plus courants de capteurs sont les sondes RTD, les thermistances et les thermocouples.....etc.

2.2.1. Les sondes RTD

Les sondes RTD (en anglais Resistance Temperature Detectors), sont des capteurs de température à résistance.

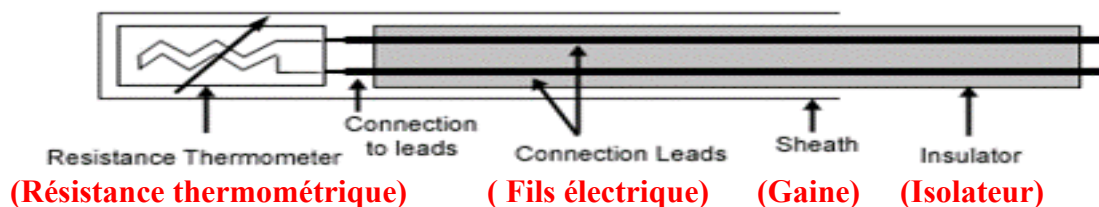


Figure2.2 : Architecture physique d'un RTD

2.2.1.1. Avantages et inconvénients :

Populaires pour leur **stabilité**, les RTD présentent le signal **le plus linéaire** de tous les capteurs électroniques en matière de température. Toutefois, ils coûtent généralement plus cher que leurs équivalents à cause de leur construction plus délicate et le recours au platine.

Les RTD se caractérisent aussi par un **temps de réponse lent** et par une **faible sensibilité**. En outre, parce qu'ils nécessitent une excitation en courant, ils sont sujets à une élévation de température.

Les RTD peuvent mesurer des températures pouvant atteindre **850°C**.

2.2.1.2. Principe de fonctionnement :

Les RTD fonctionnent sur le principe des variations de résistance électrique des métaux purs et se caractérisent par une modification positive linéaire de la résistance en fonction de la température.

Concrètement, une fois chauffée, la résistance du métal augmente et inversement une fois refroidie, elle diminue.

Les éléments types utilisés pour les RTD incluent le nickel (Ni) et le cuivre (Cu) mais le platine (Pt) est de loin le plus courant, en raison de l'étendue de sa gamme de températures, de sa précision et de sa stabilité.

Faire passer le courant à travers une sonde RTD génère une tension à travers la

sonde RTD. En mesurant cette tension, vous pouvez déterminer sa résistance et ainsi, sa température.

2.2.1.3. Caractéristiques

Les RTD sont habituellement classés par leur résistance nominale à 0°C. Les valeurs de résistance nominale types pour les RTD à film fin en platine sont comprises entre 100 et 1000 Ω.

La relation entre la résistance et la température est presque linéaire et respecte l'équation suivante :

$$\text{Pour } T > 0^{\circ}\text{C}, R_T = R_0 [1 + aT + bT^2] \quad (2.2)$$

Avec: R_T = résistance à la température T , R_0 = résistance nominale, a et b = constantes utilisées pour mettre à l'échelle le RTD.

Exemple:

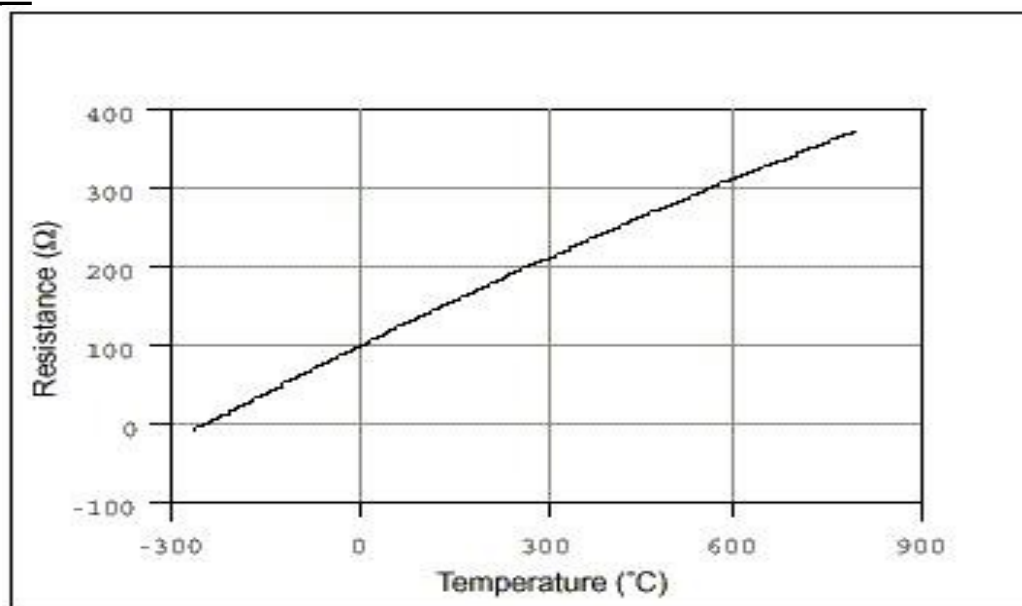


Figure 2.3 : La courbe résistance/température pour un RTD en platine de 100 Ω, communément appelée Pt100

Cette relation semble relativement linéaire, mais un ajustement de courbes est souvent le moyen le plus précis pour relever une mesure RTD avec précision.

Tableau 2.1 : Caractéristiques de quelques sondes

Métal	Résistivité à 0°C	Point de fusion	Domaine d'emploi	R100/R0
	μΩ.cm	°C	°C	
Cuivre	7	1083	-190 à +150	1,427
Nickel	6,38	1453	-60 à +180	1,672
Platine	9,81	1769	-250 à +1100	1,392
Indium	9	153	-269 à +27	

La sonde « Pt100 » est une sonde platine qui a une résistance de 100 Ohms pour une température de 0 °C

2.2.2. Thermistance

Une thermistance est un agglomérat d'oxydes métalliques frittés, c'est-à-dire rendus compacts par haute pression exercée à température élevée, de l'ordre de 150 bars et 1000°C. En général les thermistances sont constituées d'un matériau semi-conducteur d'oxyde métallique encapsulé dans une petite bille d'époxy ou de verre. La loi de variation est de la forme :

$$R = ae^{\frac{b}{\theta}} \quad (2.3)$$

a et b sont deux paramètres de la thermistance.

Symbole :



Figure2.4: les thermistances.

2.2.2.1. Avantages et inconvénients :

En règle générale, les thermistances ont une **sensibilité** de mesure très élevée (~200 Ω/°C), ce qui les rend très sensibles aux variations de températures. Bien qu'elles présentent un **taux de réponse** de l'ordre de la seconde, les thermistances ne peuvent être utilisées que dans une gamme de températures ne dépassant pas **300°C**. Cette caractéristique, associée à leur résistance nominale élevée, contribue à garantir des mesures précises dans les applications à basse température.

2.2.2.2. Principe de fonctionnement :

Les thermistances, comme les capteurs de température à résistance (RTD), sont des conducteurs thermosensibles dont la résistance varie avec la température.

En outre, les thermistances présentent généralement des valeurs de résistance nominale plus élevées que les RTD (de 2 000 à 10 000 Ω) et peuvent être utilisées pour de plus faibles courants

2.2.2.3. Caractéristiques

Chaque capteur a une résistance nominale propre qui varie de manière proportionnelle en fonction de la température selon une approximation linéaire. Les thermistances ont soit un coefficient de température négatif (CTN), soit un coefficient de température positif (CTP).

Dans le premier cas (CTN), le plus courant, la thermistance a une résistance qui diminue lorsque la température augmente, tandis que dans le second (CTP), on constate une résistance accrue lorsque la température augmente.

Remarque :

Le fonctionnement des thermomètres à résistance et des thermistances est basé sur un même phénomène physique, à savoir la variation de la **résistance** électrique d'un conducteur avec la température.

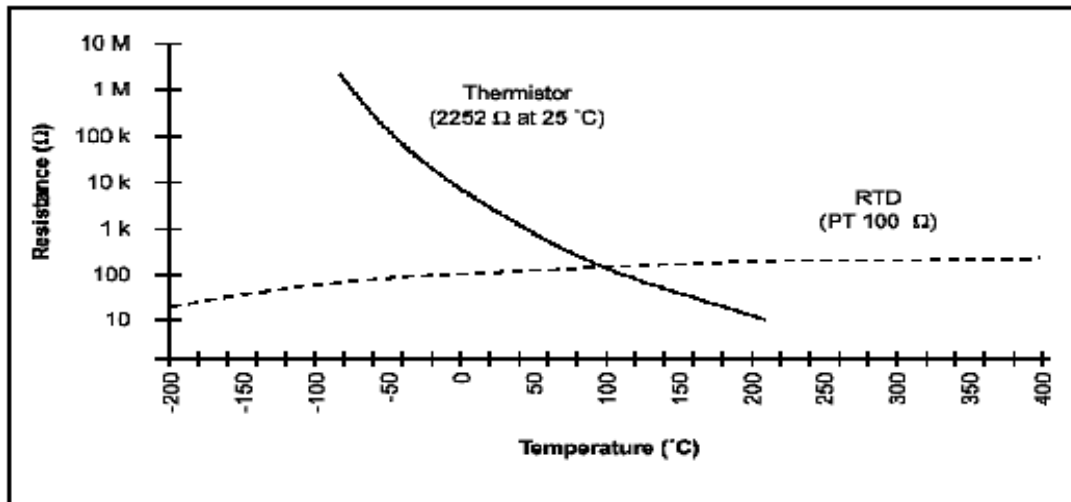


Figure 2.5 : Résistance en fonction de la température pour une thermistance et un RTD

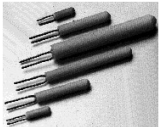
Désignation :	Caractéristiques :
Encombrement : 	Faible : • petits cylindres ($d = 1$ à 12 mm, $L = 5$ à 50 mm), • disques (diamètre 5 mm ; épaisseur 3 mm), • bâtonnets (diamètre $3,2$ mm de et longueur 11 mm), • perles.
Plage de température :	Leur domaine d'utilisation va de -80 à $+700$ $^{\circ}\text{C}$
Précision :	$1/10^{\text{ème}}$ à un demi degré
Alimentation électrique :	Peuvent être traversées indifféremment par un courant continu ou alternatif.
Gamme de résistance :	De 5 k Ω à 100 k Ω environ
Inconvénient :	La loi de variation de la résistance en fonction de la température n'est pas linéaire.

Tableau 2.2 : Caractéristiques de Thermistance

2.2.3. Thermocouple

Un thermocouple est un capteur de température, constitué en deux conducteurs de métaux différents connectés entre eux à une extrémité, de sorte que le point de connexion est le point (ou jonction) de mesure.

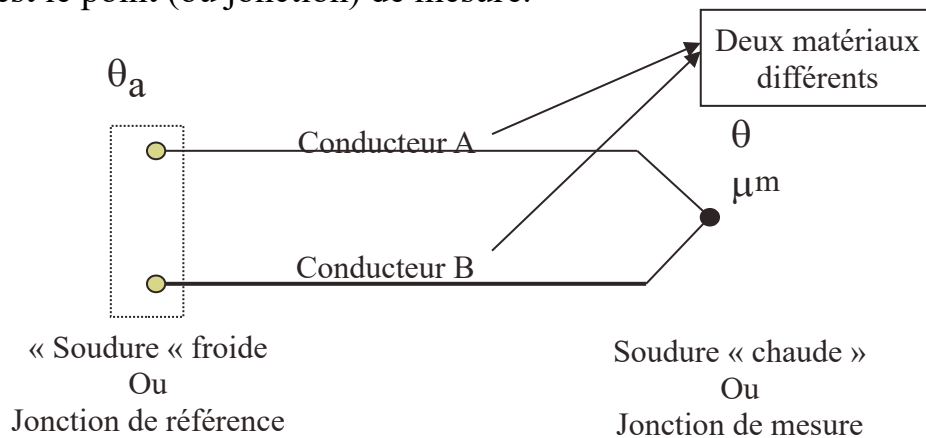


Fig. 2.6 : schéma descriptif du thermocouple

2.2.3.1. Avantages et inconvénients :

Les thermocouples sont les capteurs les plus souvent utilisés pour la mesure de températures, car ils sont relativement peu onéreux, tout en étant **précis**, et peuvent fonctionner sur une **large gamme** de températures.

Les thermocouples présentent **un taux de réponse rapide** (de l'ordre de la milliseconde)

2.2.3.2. Principe de fonctionnement :

Un conducteur génère une tension lorsqu'il est soumis à une variation de température ; cette tension thermoélectrique est appelée tension Seebeck.

La mesure de cette tension nécessite l'utilisation d'un second matériau conducteur générant une tension différente pour une même variation de température (sinon la tension générée par le deuxième conducteur qui effectue la mesure annule tout simplement celle du premier conducteur).

En s'appuyant sur le principe de Seebeck, il est clair que les thermocouples ne peuvent mesurer que des différences de température entre le point de référence (soudure froide) et le point de mesure (soudure chaude).

Ceci nécessite que la température de référence soit connue.

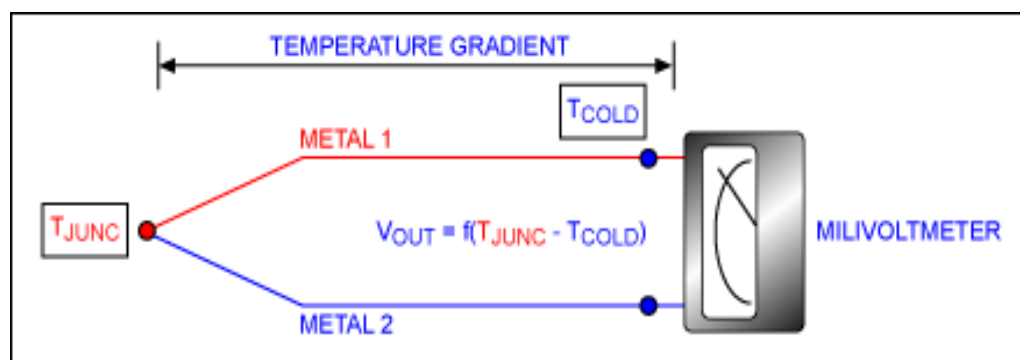


Fig. 2.7 : schéma de principe

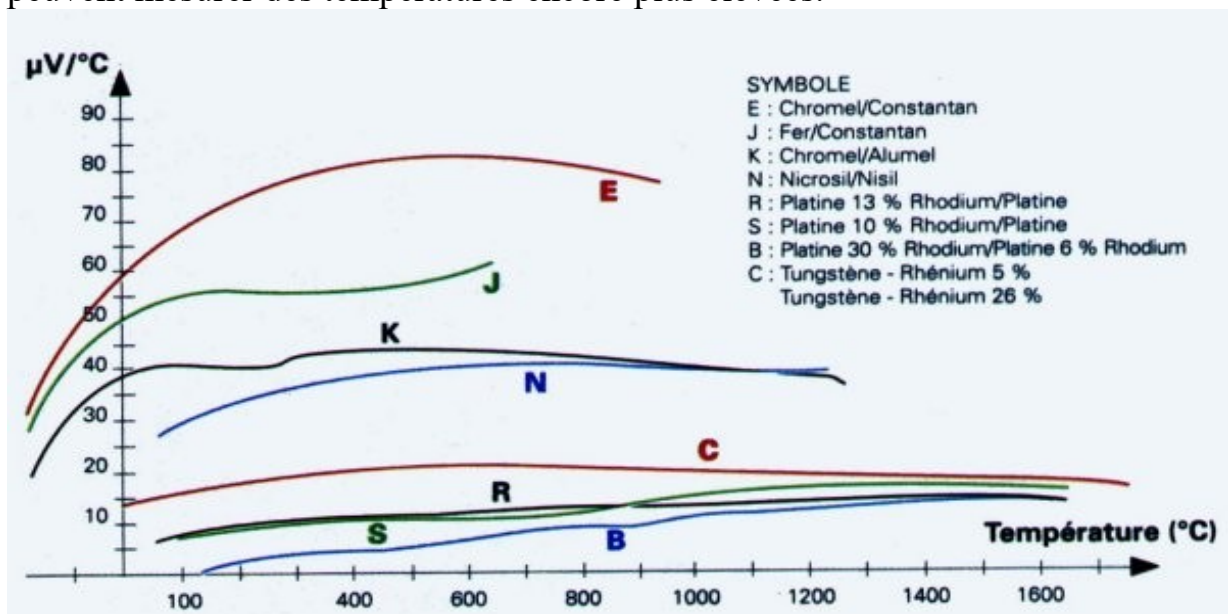
En résumé : Lorsque l'on chauffe le point de mesure, la tension sur les extrémités du câble (jonction froide) est mesurée ; elle représente la température du point de mesure.(Effet thermoélectrique ou effet Seebeck).

2.2.3.3. Caractéristiques

On peut choisir parmi différents types de thermocouples désignés par des lettres majuscules qui indiquent leurs compositions selon les conventions ANSI (American National Standards Institute). Parmi les types de thermocouples courants, citons les B, E, J, K, N, R, S et T.

Les thermocouples, eux, (à part quelques exceptions) sont avantageux à de plus hautes températures (jusqu'à 1600 °C).

Certains thermocouples (tungstène-rhénium, or-platine ou platine-palladium) peuvent mesurer des températures encore plus élevées.



**Fig 2.8 :Allure($V=f(^{\circ}C)$) des différents thermocouples
Ou Courbes de tension thermoélectrique**

Métaux non rares et/ou non précieux (-200°C" 1200°C)	
Type K	Chromel-alumel
Type J	fer-constantan
Type E	Chromel-constantan
Type N	Nicrosil-nisil
Thermocouples platine-rhodium (0°C" 1600°C)	
Type S	: platine rhodié 10% Rh-platine
Type R	: platine rhodié 13% Rh-platine
Type B	: platine rhodié 30% Rh-platine rhodié 6% Rh
Thermocouples tungstène-rhénium (0°C" 2200°C)	
Version C	Tungstène-rhénié 5% Re-tungstène-rhénié 25% Re
Version D	Tungstène-rhénié 3% Re-tungstène-rhénié 25% Re

Tableau 2.3 : Les différents types de thermocouples:

2.2.4 Détecteurs infrarouge

Comme son nom le décrit, un détecteur de rayonnement infrarouge IR est un capteur qui transforme ce rayonnement incident en un signal électrique. On distingue deux types de détecteurs:

- Les détecteurs thermiques qui ne sont sensibles qu'à l'énergie du rayonnement
- Les détecteurs quantiques qui transforment les photons incidents en charges électriques

Pour les détecteurs thermiques, sujet de notre cours, on peut trouver une variété.

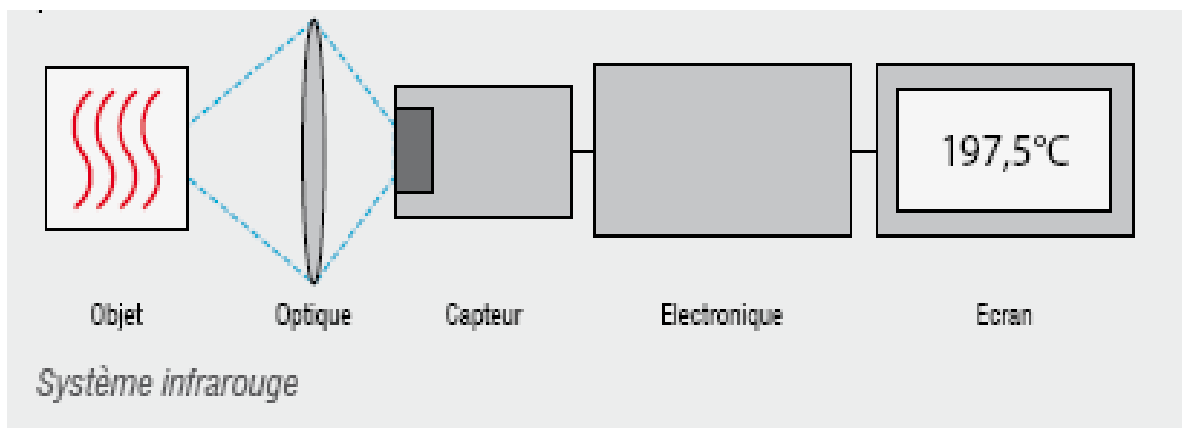


Fig.2.9 : schema et principe du système infrarouge

En effet les radiations IR incidentes élèvent la température du détecteur et modifie ainsi une caractéristique physique de celui ci:

- Bolomètre, variation de conductivité
- Pyro-électrique, modification de la polarisation électrique
- Thermo-voltaïque, apparition d'une tension
- Thermo-pneumatique, effet mécanique dû à la dilatation d'un gaz

On appelle réponse d'un détecteur le rapport entre la grandeur de sortie, courant I ou tension V, et le flux énergétique incident F:

$$R_I = I/F \text{ (en A/ W) } \text{ ou } R_V = V/F \text{ (en V/ W)} \quad (2.4)$$

2.2.5. Les pyromètres

2.2.5.1 Notions

La pyrométrie optique est une méthode de mesure de la température basée sur la relation entre la température d'un corps et le rayonnement optique (infrarouge ou visible) que ce corps émet. Les capteurs utilisés sont donc des capteurs optiques, photo-electriques ou thermiques.

2.2.5.2 Description du pyromètre

Le pyromètre est composé d'une lentille qui focalise l'énergie des radiations infrarouges émises par l'objet sur un détecteur puis convertit cette énergie en un signal électrique lui même converti en température.

2.2.5.3 Principe de fonctionnement du pyromètre

Son principe est basé sur le fait que chaque corps ou objet émet des radiations. Le pyromètre mesure alors l'énergie correspondant aux radiations émises par un objet dans le domaine de l'infrarouge. Cette énergie est convertie en un signal électrique lui-même transformé en une valeur de température. Un pyromètre est donc un appareil de mesure de température sans contact.

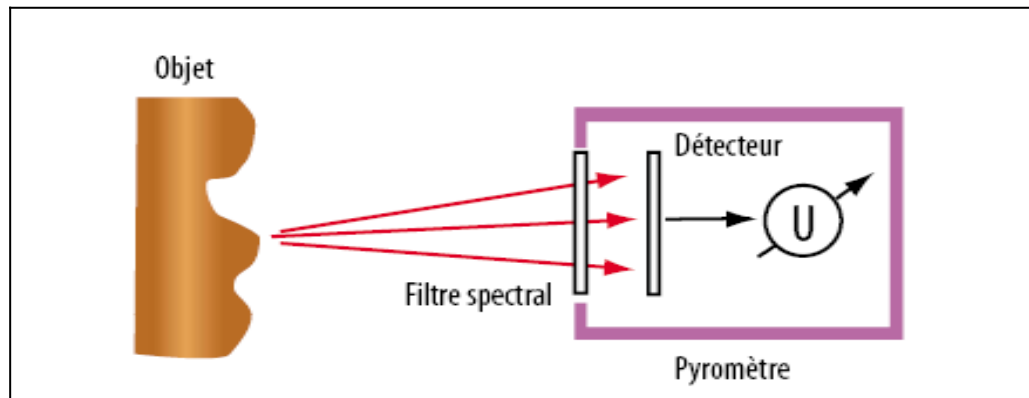


Fig.2.10 : schema et principe du pyromètre

2.2.5.4 Caractéristiques

L'intérêt de la pyrométrie optique est de permettre la détermination d'une température sans contact avec l'objet ; c'est donc une méthode appropriée quand les conditions expérimentales n'autorisent pas l'utilisation de capteurs thermométriques classiques :

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

2.2.5.5 Mode d'utilisation du pyromètre

Pour capter le rayonnement émis, viser l'objet. Le pyromètre dispose d'un système de visée laser à faisceaux étroits pour une lecture précise ; appuyer sur le bouton de lecture ; lire à l'écran la température : temps de réponse inférieur à une seconde ; l'appareil donne une valeur en $^{\circ}\text{C}$ avec un intervalle (mini : bouton de droite et maxi : bouton de gauche).

NB : Précautions d'emploi : Le pyromètre disposant d'une visée laser, éviter de le pointer en direction des yeux d'une personne ; pour optimiser la qualité des mesures, éviter tous les rayonnements parasites.

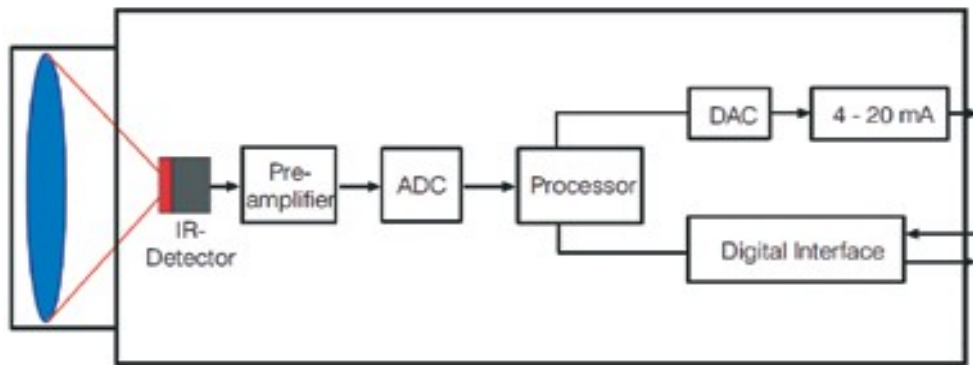


Figure 2.11: Schéma synoptique d'un thermomètre infrarouge

II-3/ ETALONNAGE DES CAPTEURS THERMIQUES

2.3.1. Notion

Au cours du temps d'utilisation, nos instruments de mesure subissent un inévitable état de dérive ou de vieillissement ; ce-ci a pour cause les contraintes chimiques, mécaniques ou thermiques.

Donc dans cette situation l'instrument donne des mesures présentant des valeurs différentes avec le temps. Cette situation est malheureusement inévitable, mais peut être détectée et corrigée par étalonnage.

Actuellement, il est clair qu'une mesure correcte est d'une importance fondamentale dans notre monde industriel et hautement technologique, du fait que des mesures imprécises peuvent engendrer des conséquences économiques coûteuses.

2.3.2. Définition

Le terme « *Étalonnage* » signifie la comparaison entre un étalon soumis à l'essai et un étalon de référence afin de déterminer si la valeur de l'étalon soumis à l'essai respecte les tolérances établies. On rencontre aussi l'anglicisme [calibration](#).

Des étalonnages réguliers nous assurent :

- „ Amélioration de la qualité de fabrication
- „ Sécurité des process
- „ Confiance dans l'instrument de mesure
- „ Prévention des rejets et refabrications
- „ Conformité aux normes, directives et certifications
- „ Protection contre les éventuelles demandes de remplacement
- „ Sécurité d'audit.

2.3.3. Principe

D'une manière générale, l'étalonnage consiste à utiliser notre instrument de mesure sur un étalon, et à vérifier que la mesure produite correspond bien à la valeur de l'étalon (valeur attendue) ; dans le cas échéant, on peut corriger le réglage de l'appareil (ajustage).

Par exemple, on pèse une masse étalon, et on corrige la position de l'aiguille pour que celle-ci indique la valeur correcte. C'est l'ajustage dit « en un point ». Cependant, cela ne suffit pas toujours. L'appareil peut présenter :

1. une dérive systématique : il indique systématiquement une valeur supérieure ou inférieure d'une quantité fixe ;
2. une dérive de sensibilité : il indique systématiquement une valeur supérieure ou inférieure d'une [proportion](#) (d'un [pourcentage](#)) donné.

On peut tracer une courbe représentant la valeur réelle du paramètre en abscisse et la valeur mesurée en ordonnée. Dans les cas simples, la courbe est une [droite](#) appelée *droite d'étalonnage*, et :

- la dérive systématique est l'[ordonnée à l'origine](#) ;
- la dérive de sensibilité est la différence entre la [pente](#) de la droite et la pente théorique (qui est 1, car on doit avoir $x=y$, c'est-à-dire que la valeur mesurée est égale à la valeur réelle).

Dans le cas d'un étalonnage parfait, la droite d'étalonnage est la première [bissectrice](#). Dans ce cas-là, au moins deux étalons sont nécessaires pour pouvoir établir la droite d'étalonnage, et l'appareil doit posséder deux corrections possibles. On peut avoir des courbes d'étalonnage plus complexes, nécessitant plus d'étalons.

Chaque mesure étant entachée d'[erreur](#), y compris la mesure des étalons, on effectue en général plusieurs mesures du même étalon, ou bien on utilise plus d'étalons que nécessaire et l'on détermine la courbe d'étalonnage par [régression linéaire](#).

Pour les [instruments de mesure](#) à [capteurs](#), l'étalonnage est un réglage ou une caractérisation de la réponse de l'appareil. Pour cela, dans certains cas on utilise un [étalon](#).

2.3.4.Étalonnage, vérification et ajustage d'un thermomètre

D'après le *Vocabulaire international de métrologie* (VIM), l'étalonnage est une « opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir un résultat de mesure à partir d'une indication ».

Cette opération d'étalonnage vise en premier lieu à mesurer la même grandeur avec l'instrument à étalonner et l'instrument de référence «étalon», et à comparer les indications des deux instruments, puis à exploiter les résultats de cette comparaison.

Prenons par exemple l'étalonnage d'un thermomètre, que nous allons simplifier. Dans un milieu homogène, à une température stabilisée (four ou bain thermostaté), nous plongeons deux instruments, l'un à étalonner (thermomètre) et un étalon (thermomètre de référence, accompagné d'un certificat d'étalonnage), et nous mesurons la température du milieu (bain ou four). Le thermomètre étalon (ajusté) indique 25,30 °C, le thermomètre à étalonner indique 24,10 °C. Nous avons alors :

$$T^{\circ}\text{thermomètre} = T^{\circ}\text{étalon} - 1,20\text{ °C},$$

qui est une relation entre les indications et les valeurs fournies par un étalon. C'est la première étape de la définition.

La seconde étape dont parle le VIM, consiste à exploiter les résultats de la première. Il peut s'agir de trois actions :

- a) la correction « manuelle » du résultat lu ;
- b) la vérification du matériel ;
- c) l'ajustage du matériel.

La correction « manuelle » consiste à modifier la valeur lue. Dans l'exemple précédent, si le thermomètre mesure 20,6 °C, alors la température à prendre en compte est : $20,6 + 1,20 = 21,8\text{ °C}$.

La vérification métrologique consiste à apporter la preuve à partir de mesures (étalonnage) que des exigences spécifiées, c'est-à-dire les erreurs maximales tolérées (EMT), sont satisfaites. Le résultat d'une vérification se traduit par une décision de conformité (suivie d'une remise en service) ou de non-conformité (suivie d'un ajustage, d'une réparation, d'un déclassement ou d'une réforme de l'appareil).

L'ajustage est un « ensemble d'opérations réalisées sur un système de mesure pour qu'il fournisse des indications prescrites correspondant à des valeurs données des grandeurs à mesurer ».

II-4/ LES ERREURS LIÉES AUX CAPTEURS THERMIQUES

On peut les resumer en :

- Incertitude de mesure.
- Ecart de mesure systématiques.
- Ecart de mesure statistique.
- Erreur de dissipation de chaleur de la sonde de température.

II-5/ CHOIX D'UN CAPTEUR DE TEMPÉRATURE

Si les contraintes de mesures sont les suivantes :

1. Mesure d'une température d'au moins 250°C
2. Temps de réponse rapide : Il faut effectuer au moins 300 points de mesure en 5 minutes donc un temps de réponse inférieur à la seconde.

Alors on peut en déduire que les critères de choix peuvent être résumés en :

- La nature du composant.
- La gamme des températures pouvant être mesurées.
- Le temps de réponse du composant.

En conséquence les Critères de sélection (ou de choix) sont :

- Gamme de température
- Précision souhaitée
- Temps de réponse
- Masse/volume du capteur
- Équilibre thermique
- Accessibilité/Environnement

Mais, on nous recommande, pour un choix judicieux et englobant tous les points, de se poser des questions telles que :

- Quelle est la **plage de mesure couverte** ?
- Quelle est la **précision nécessaire** ?
- Quel est le **temps de réponse** souhaitable ?
- Le capteur doit il posséder un **élément de mesure démontable** ?
- Quels sont les **risques pour le capteur**
- Quel est le **point physique de mesure** le plus approprié ?.
- Quel est le **risque pour le process** du fait de l'installation du capteur ?
- Quel est le risque encouru en cas de **défaillance** ?
- Quelle est la **maintenance prévisible** sur votre capteur ?.

II-6/ L'ACQUISITION AUTOMATIQUE DES MESURES ET LES CARTES D'ACQUISITION.

2.6.1 L'acquisition automatique des mesures

On définit la chaîne d'acquisition de données comme l'ensemble des éléments nécessaires à la capture, à la transmission des données analogiques ou numériques, jusqu'au récepteur ou l'utilisateur (homme ou machine). L'utilisateur peut vouloir utiliser ces données immédiatement ou les stocker pour les utiliser ultérieurement.

Elle est constituée par un capteur qui sert à capturer les données physiques et à les transformer pour qu'elles soient utilisables par le "maillon" suivant de la chaîne. Puis les transmet à un conditionneur qui a comme objectif le conditionnement de signal est essentiellement l'amplification et le pré-filtrage de signaux électriques issus d'un capteur. Ces signaux issus du conditionneur peuvent être convertis (analogique-numérique), transmis ou traités.

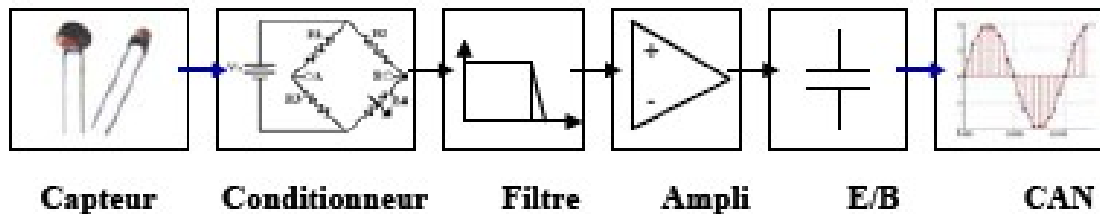


fig 2.12 : la chaîne d'acquisition

2.6.2 Les cartes d'acquisition

C'est un circuit imprimé qui contient des composantes électroniques, et suivant la programmation de ces dernières avoir une application qui a pour objectif de réaliser un système qui gère des entrées analogiques, des entrées numériques et des sorties à travers des relais via un PC selon un schéma bien définis.

Par exemple une carte d'acquisition et d'interface communicante avec un PC à travers une liaison série, dont l'élément principal est un Pic 16F877 capable d'acquérir huit entrées analogiques et huit entrées numériques, ainsi que la génération des signaux de commande de huit relais. Cette carte polyvalente est capable de gérer divers applications.

L'alimentation du montage est assurée par (5V-12V). La communication de cette carte avec le PC se fait à travers une liaison série (DB9), est relié au microcontrôleur par ses broches 2 et 3 (RX, TX) via un circuit MAX232 dont le rôle est l'adaptation des signaux TTL/CMOS.