

1. GENERALITES:

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

- Capteurs actifs
- Capteurs passifs

1.1- Capteurs actifs :

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

Les effets physiques les plus rencontrés en instrumentation sont :

- **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 $e(T_1, T_2)$.
- **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.
- **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).
- **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.
- **Effet Hall** : Un champ magnétique B et un courant électrique I créent dans le matériau une différence de potentiel U_H .
- **Effet photovoltaïque** : Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction PN illuminée, leur déplacement modifie la tension à ses bornes.

Tableau 1 : Grandeurs d'entrée et de sortie et effet utilisé pour les capteurs actifs

Grandeur physique mesurée	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Photoémission	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		

1-2- 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).

Tableau 2 : Type de matériau utilisé et caractéristique électrique des capteurs passifs

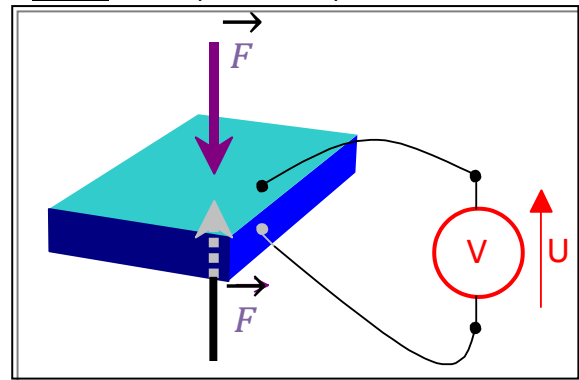
Grandeur mesurée	Caractéristique électrique	Type de matériau utilisé
Température	Résistivité	Métaux : platine, nickel, cuivre ...
Très basse température	Constante diélectrique	Verre
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité	Alliage de Nickel, silicium dopé
	Perméabilité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

2. CAPTEURS A EFFET PIEZOELECTRIQUE:

2-1- L'effet piézoélectrique:

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

Fig. 1 : L'effet piézoélectrique

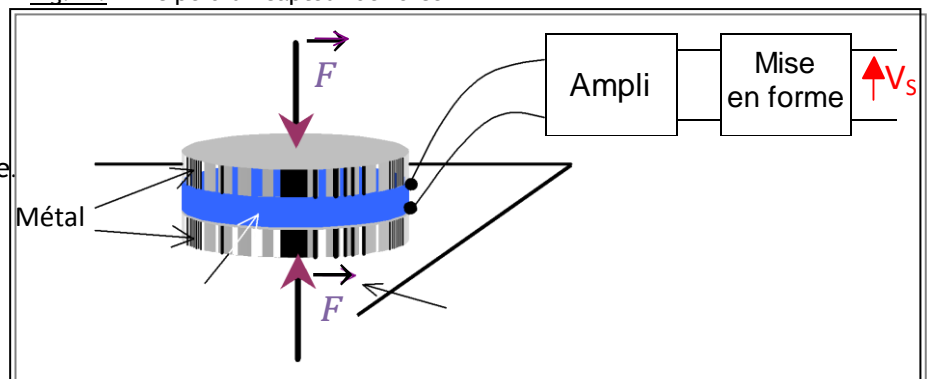


2-2- Capteur de force:

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

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

Fig. 2 : Principe d'un capteur de force



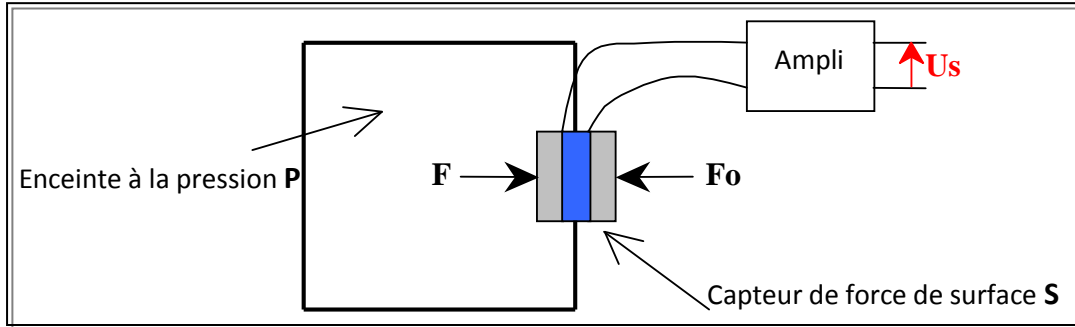
2-3- Capteur de pression:

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 :

$$P = \frac{F}{S} \text{ Sachant que : } 1\text{Pascal}(Pa) = \frac{1\text{Newton}}{1\text{ m}^2}$$

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).

Fig. 3 : Principe d'un capteur de pression



On a $F = P.S$; $F_0 = P_0.S$ et $u_s = k.(F+F_0)$ (capteur de force, $k =$ constante).

Donc $u_s = k.S (P + P_0) = k' (P + P_0) \Rightarrow u_s = k' (P + P_0)$.

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 .

2-4- Capteur d'accélération:

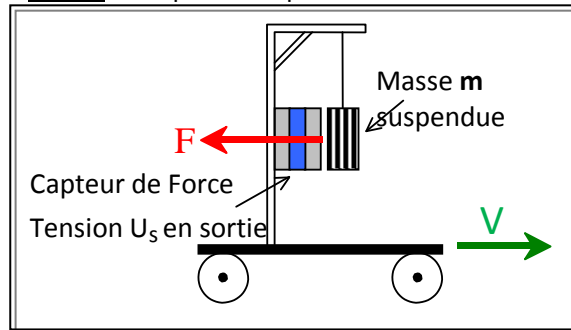
L'augmentation de vitesse V du véhicule donne une accélération a qui induit une force F exercée par la masse sur le capteur.

On a donc :

$$F = m.a \text{ mais } u_s = 2k.F$$

$$\text{et donc } u_s = 2k.m.a$$

Fig. 4 : Principe d'un capteur d'accélération



2-5- Capteur 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.

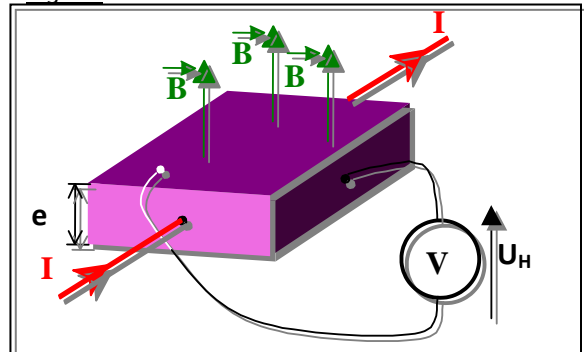
3. CAPTEURS A EFFET HALL:

3-1- 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- contre :

Fig. 5 : L'effet Hall



$$U_H = R_H \frac{I \cdot B}{e}$$

R_H : constante de Hall (dépend du semi-conducteur)

I : intensité de la source de courant (A)

B : intensité du champ magnétique (T)

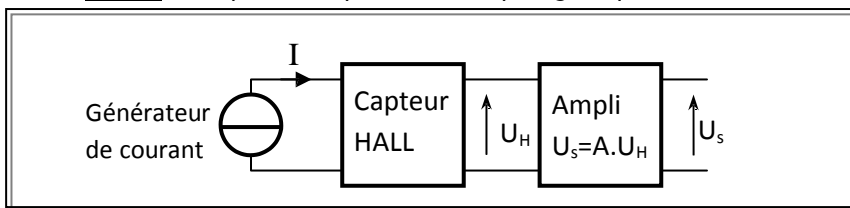
e : épaisseur du barreau de silicium.

Si on maintient le courant I constant, on a donc une tension U_H proportionnelle au champ magnétique B :

$$U_H = k \cdot B \text{ avec } k \text{ constante égale à } R_H \frac{I}{e}$$

3-2- Capteur de champ magnétique:

Fig. 6 : Principe d'un capteur de champ magnétique



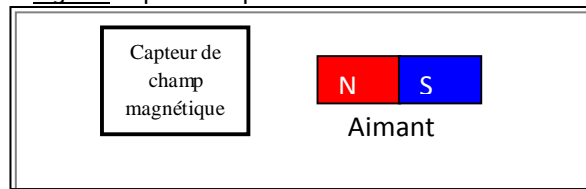
La sensibilité de ce capteur pourra être ajustée en agissant sur I et sur A .

3-3- Autres applications:

3.3.1 Capteur de proximité:

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

Fig. 7 : Capteur de proximité



3.3.2 Mesure de l'intensité d'un courant électrique sans "ouvrir" le circuit:

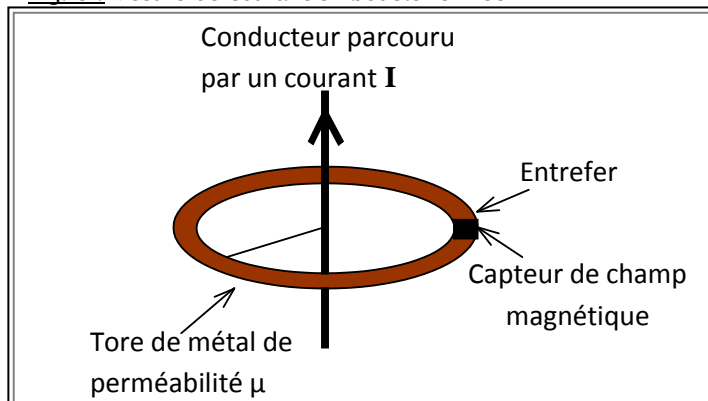
Le courant I crée un champ magnétique

$$\text{proportionnel à ce courant : } B = \frac{\mu}{2\pi} \frac{I}{r}$$

Le capteur donne une tension $U_s = k \cdot B = k' \cdot I$ avec k et k' constantes.

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

Fig. 8 : Mesure de courant en boucle fermée



4. CAPTEURS A EFFET PHOTOELECTRIQUE:

4-1- 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.

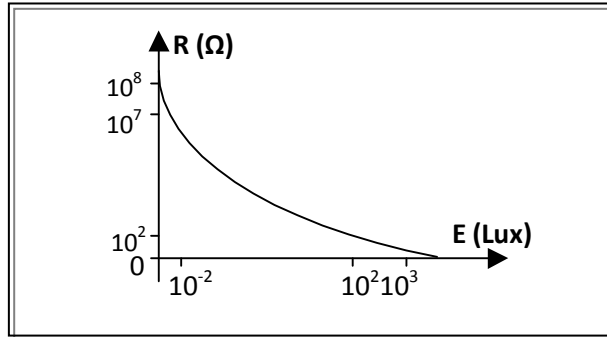
4-2- Les photorésistances:

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).

Caractéristique lumière/tension:



Avantages :

- Bonne sensibilité
- Faible coût et robustesse.

Inconvénients :

- Temps de réponse élevé
- Bande passante étroite
- Sensible à la chaleur.

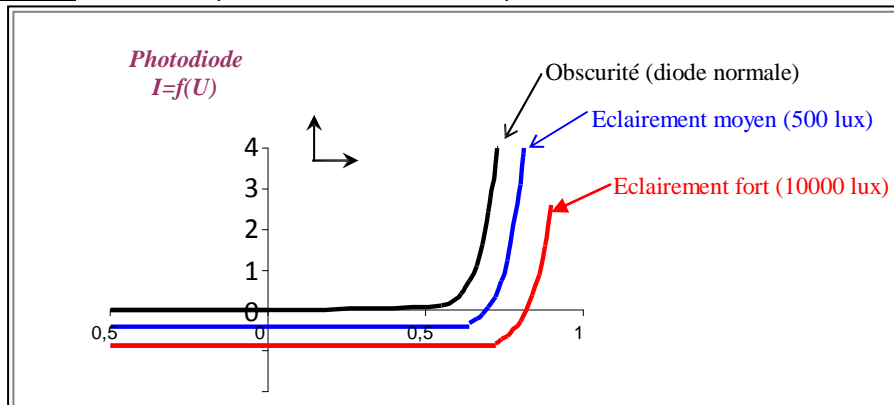
Utilisation : Détection des changements obscurité-lumière (éclairage public).

4-3- 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'éclairement en (Lux) de la jonction PN.

Fig. 9 : Caractéristique courant/tension d'une photodiode en fonction de l'éclairement



On constate que lorsque la diode est éclairée, elle peut se comporter en générateur ($I = 0$, $U = 0,7V$ pour 1000lux). On a donc affaire à une photopile (effet photovoltaïque).

Avantages :

- Bonne sensibilité
- Faible temps de réponse (bande passante élevée).

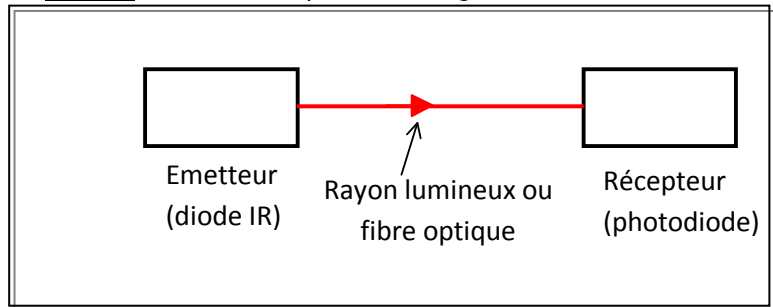
Inconvénients :

- Coût plus élevé qu'une photorésistance
- Nécessite un circuit de polarisation précis

Utilisations :

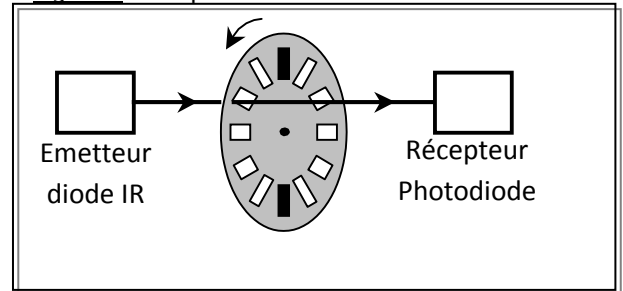
- Transmission de données
 - ⇒ Télécommande IR
 - ⇒ Transmission de données par fibre optique
 - ⇒ Détection de passage

Fig. 10 : Emetteur/Récepteur infrarouge



- Roue codeuse
 - ⇒ Mesures d'angle et de vitesse
 - ⇒ Comptage d'impulsions (souris de PC)

Fig. 11 : Principe de la roue codeuse



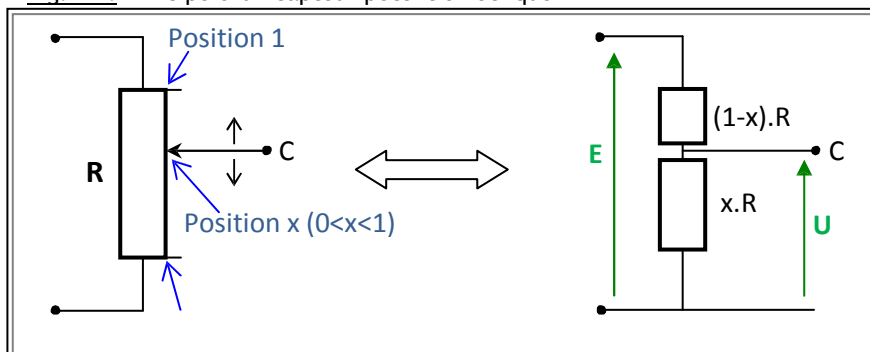
5. CAPTEURS A RESISTANCE VARIABLE PAR DEFORMATION :

5-1- Capteurs potentiométriques de déplacement:

5.1.1 Principe:

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

Fig. 12 : Principe d'un capteur potentiométrique



On applique une tension continue E entre les extrémités A et B du potentiomètre. La tension U en sortie aura l'expression suivante : $U = E \cdot \frac{x.R}{R}$

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

Avantages :

- Simplicité d'utilisation
- Faible coût.

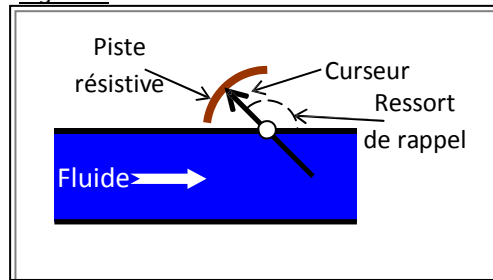
Inconvénients :

- Usure mécanique

5.1.2 Utilisations:

- Mesure de déplacement rectiligne
- Mesure d'angles de rotation
- 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.

Fig. 13 : Mesure de débit



5-2- Capteurs à jauges d'extensiométrie:

5-2-1. Principe:

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

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

- ρ : Résistivité en $\Omega \cdot m$
- L : longueur en m
- S : section en m^2

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

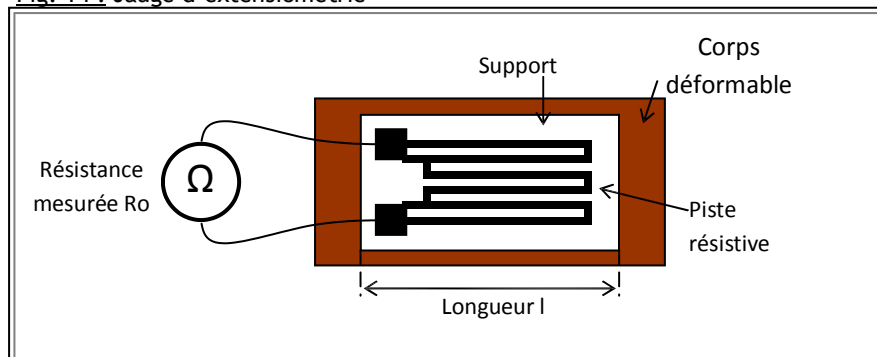
La relation générale pour les jauges est $\frac{\Delta R}{R_0} = K \frac{\Delta l}{l}$ où K est le facteur de jauge.

5-2-2 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.

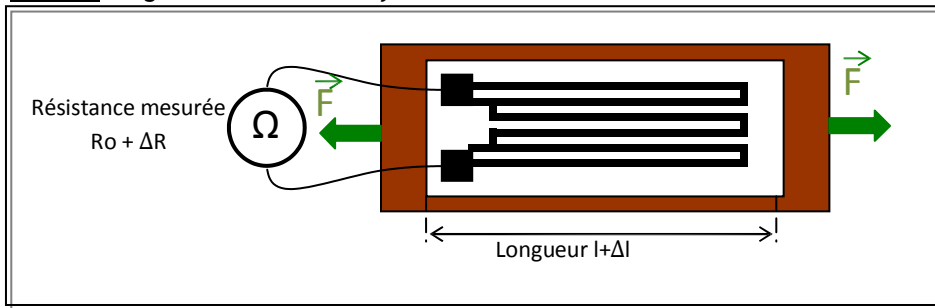
- Corps au repos (pas d'allongement)

Fig. 14 : Jauge d'extensiométrie



- Corps ayant subi un étirement (effort de traction)

Fig. 15 : Jauge d'extensiométrie ayant subi un étirement



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

- Conditionneur de signal (pont de Wheatstone)

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

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

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

$$V \approx E \left[\frac{\Delta R}{4R_0} \right]$$

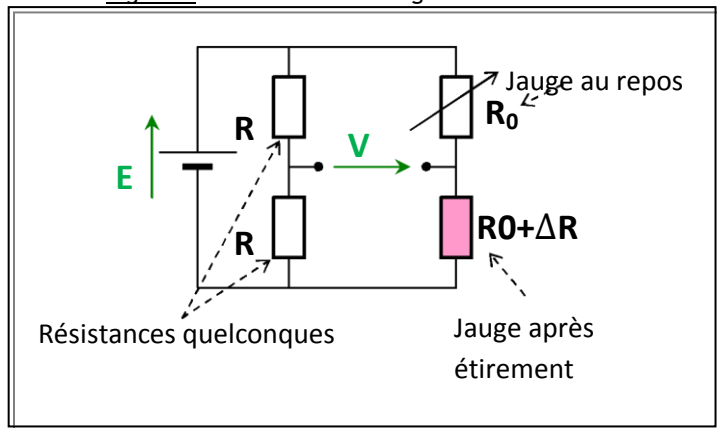
La tension de sortie v du pont a l'expression suivante :

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

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

$$V \approx E \left[\frac{\Delta R}{4R_0} \right]$$

Fig. 16 : Conditionneur de signal



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

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

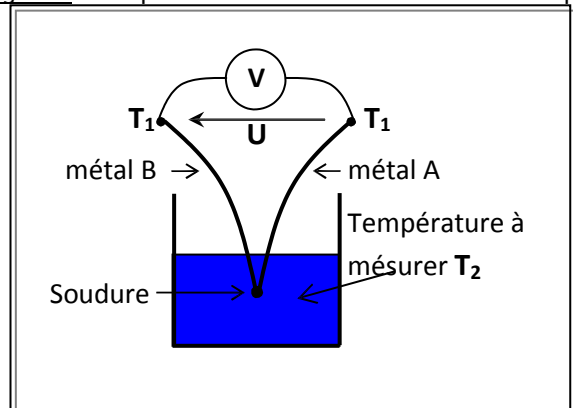
6. CAPTEURS DE TEMPERATURE :

6-1- Thermomètre à thermocouple:

On constate que si la température T_2 est différente de T_1 alors il apparaît une tension U aux bornes des deux fils soumis à la température T_1 .

Le phénomène inverse est aussi vrai : si on applique une tension, alors il y aura un échauffement ou un refroidissement au point de liaison des deux conducteurs (modules à effet Peltier).

Fig. 17 : Principe de fonctionnement d'un thermocouple



Application: Mesure des hautes températures : 900 à 1300 °C.

6-2- Thermistance:

Une thermistance est un composant dont la résistance varie en fonction de la température. En première approximation, la relation entre résistance et température est la suivante :

$$R_{\theta} = R_0(1 + \alpha\theta)$$

R_{θ} : La résistance à la température

R_0 : La résistance à la température 0°C

α : Le coefficient de température.

Remarque:

- si $\alpha > 0$ alors on a une thermistance CTP ($R \nearrow$ quand $\theta \nearrow$)
- si $\alpha < 0$ alors on a une thermistance CTN ($R \searrow$ quand $\theta \nearrow$).

Application: On insère la thermistance dans un pont de jauge. On obtient ainsi une tension V en sortie du pont $V = K.(\theta - \theta_0)$. Si on prend $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$, on obtient $V = K. \theta$.

On peut aussi alimenter la thermistance avec un générateur de courant. La tension à ses bornes sera donc proportionnelle à la résistance.

6-3- Capteurs à sortie numérique directe:

On trouve actuellement sur le marché, des capteurs de température à sortie numérique directe de type série. Il s'agit notamment des capteurs DALLAS qui sont classés en deux catégories :

6-3-1 Les capteurs à sortie I2C (2 fils) DS1621:

Ce capteur DS1621 peut mesurer une température variant de -55°C à 125°C avec une précision de 0,5°C. Pour transmettre la mesure (9 bits), il utilise la norme I2C qui consiste à transmettre en série les bits de mesure sur la ligne SDA en synchronisation avec la ligne SCL (horloge).

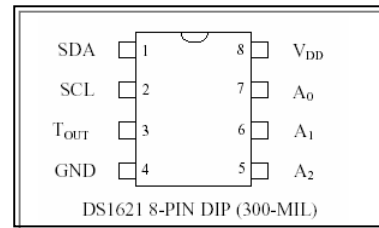


Tableau 3

TEMPERATURE/DATA RELATIONSHIPS		
TEMPERATURE	DIGITAL OUTPUT (Binary)	DIGITAL OUTPUT (Hex)
+125°C	01111101 00000000	7D00h
+25°C	00011001 00000000	1900h
+½°C	00000000 10000000	0080h
+0°C	00000000 00000000	0000h
-½°C	11111111 10000000	FF80h
-25°C	11100111 00000000	E700h
-55°C	11001001 00000000	C900h

Le DS1621 possède aussi d'autres fonctions :

- Il est adressable physiquement sur 3 bits (A0, A1 et A2), ce qui permet d'en utiliser 8 sur la même ligne SDA-SCL.
- Il possède une fonction thermostat qui permet de commander un chauffage (températures TH et TL) par l'intermédiaire de la ligne TOUT même lorsque le capteur est déconnecté du matériel informatique.

6-3-1 Les capteurs à sortie I2C (2fils) DS1621:

Ce capteur DS1820 peut mesurer une température variant de -55°C à 125°C avec une précision maximale de $0,125^{\circ}\text{C}$. Pour transmettre la mesure (résolution réglable de 9 à 12 bits), il utilise la norme 1-wire qui consiste à transmettre en série sur un seul fil, le résultat de la mesure. La ligne VD peut être connectée à la masse GND et la ligne DQ supportera à la fois l'alimentation et la transmission des données, d'où l'appellation 1 Wire. Il suffit donc de deux fils (DQ et GND) pour alimenter et communiquer avec ce capteur.

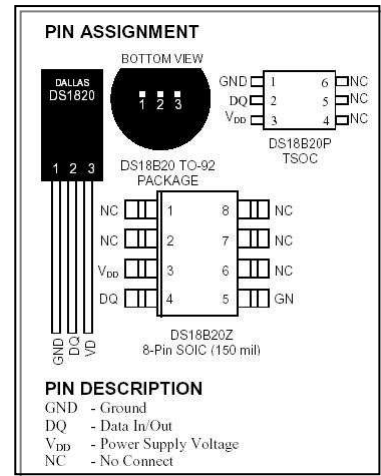


Tableau 4

TEMPERATURE	DIGITAL OUTPUT (Binary)	DIGITAL OUTPUT (Hex)
+125°C	0000 0111 1101 0000	07D0h
+85°C	0000 0101 0101 0000	0550h*
+25.0625°C	0000 0001 1001 0001	0191h
+10.125°C	0000 0000 1010 0010	00A2h
+0.5°C	0000 0000 0000 1000	0008h
0°C	0000 0000 0000 0000	0000h
-0.5°C	1111 1111 1111 1000	FFF8h
-10.125°C	1111 1111 0101 1110	FF5Eh
-25.0625°C	1111 1110 0110 1111	FF6Fh
-55°C	1111 1100 1001 0000	FC90h

*The power on reset register value is +85°C.

Le DS1621 possède aussi d'autres fonctions :

- Il est doté d'une adresse (numéro de série) affectée en usine et définitive. Elle est codée sur 8 octets ce qui permet d'utiliser, en théorie, un très grand nombre de DS1820 sur la même ligne.
- Une alarme de température peut être paramétrée et la consultation de celle-ci se fait par lecture d'une zone mémoire (adresse - donnée).