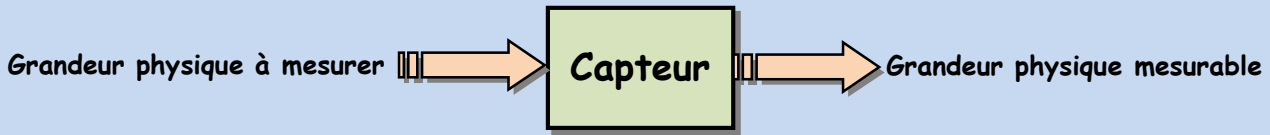


1. Définition

Un capteur est un **transducteur** qui permet de convertir une grandeur physique à mesurer (température, vitesse, humidité, pression, niveau, débit, ...) en une autre grandeur physique mesurable.

Un capteur est dit **analogique** s'il fournit un signal de sortie, courant ou tension, de type analogique. Ce signal évolue continuellement dans le temps et suit les variations de la grandeur physique d'entrée. Il peut prendre une infinité de valeurs entre deux valeurs limites.

Figure 1



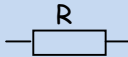


2. Classification

Les capteurs analogiques sont classés en deux familles : les capteurs **passifs** et les capteurs **actifs**.

21. Capteurs passifs

Il s'agit généralement d'impédance dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée. La figure 2 résume les paramètres caractéristiques pour chaque type de capteur passif.

Figure 2

Grandeur de traduction	Transformations possibles
R 	Résistance R : $R=f(\rho, L, S)$. ρ résistivité, L longueur, S section.
C 	Capacité C : $C=f(S, e, \epsilon)$. S surface des armatures, e distance entre armatures, ϵ permittivité.
L 	Inductance L : $L=f(L, S, n, \mu)$. L longueur de la bobine, S surface d'une spire, n nombre de spires, μ perméabilité.

Remarque :

Les capteurs passifs sont souvent associés aux conditionneurs pour réaliser la mesure de la grandeur physique sous forme d'un signal électrique. Les conditionneurs les plus généralement utilisés sont :

- ☒ Pont diviseur de tension (montage potentiométrique).
- ☒ Pont de « Wheatstone ».
- ☒ Circuit oscillant dont la fréquence d'oscillations est fonction de l'impédance du capteur.
- ☒ Amplificateur dont le gain est paramétré par l'impédance du capteur.

22. 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 mesurer : énergie thermique, mécanique ou de rayonnement.

3. Effets physiques les plus classiques

31. Effet piézoélectrique : Figure 3a

L'application d'une force et plus généralement d'une contrainte mécanique sur une lame de quartz entraîne une déformation du cristal qui donne naissance à une tension électrique $\Rightarrow e=k.F$. Cet effet est exploité pour la mesure de force, pression, etc.

32. Effet photoélectrique : Figure 3b

Le principe se base sur la libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux (éclairage) ou plus généralement d'une onde électromagnétique $\Rightarrow e=k.\Phi$. Cet effet est exploité pour la mesure du flux lumineux.

33. Effet thermoélectrique : Figure 3c

Le principe de la mesure est basé sur l'association de deux fils en métaux de nature différente (fer et cuivre par exemple) connectés à leurs deux extrémités. Un courant continu circulera dans la boucle ainsi formée s'il y a une différence de température entre les extrémités appelées « jonctions » ou « soudures ». On distingue la jonction chaude portée à la température T_c et la jonction froide portée à la température T_f . La tension obtenue e est directement liée à la différence de température et un coefficient α dépendant de la nature des deux métaux constituant le thermocouple $\Rightarrow e=\alpha.(T_c-T_f)=\alpha.\Delta T$. L'application directe de l'effet est la mesure de la température T_c dans le cas où $T_f=0^\circ\text{C} \Rightarrow$ thermocouple.

34. Effet Hall : Figure 3d

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 e sur deux de ses faces. C'est la tension de Hall définie par la relation $e=(R_H.I.B)/d$ avec :

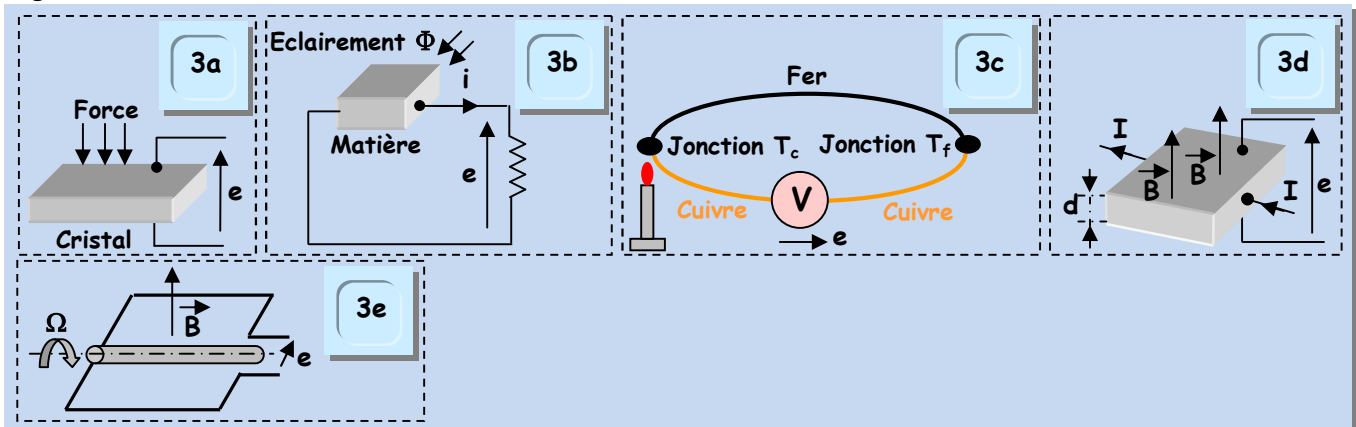
- ☑ R_H : Constante de Hall (dépend du semi-conducteur).
- ☑ I : Intensité du courant(A).
- ☑ B : Intensité du champ magnétique(T).
- ☑ d : Epaisseur du barreau de silicium(m).

Si on maintient le courant I constant, on a donc une tension proportionnelle au champ magnétique $B : e=k.B$ avec $k=R_H.I/d$ d'où la mesure de l'intensité du champ magnétique.

35. Effet d'induction électromagnétique : Figure 3e

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ d'induction fixe B , il est le siège d'une force électromotrice e proportionnelle au flux magnétique Φ coupé par unité de temps, donc à sa vitesse de déplacement : $e=k.\Omega$. La mesure de la tension d'induction e permet de connaître la vitesse du déplacement qui est à son origine.

Figure 3



4. Capteurs de température

41. Résistances thermoélectriques RTD

411. Principe

Les capteurs de température RTD (Resistance Temperature Detector) sont basés sur la variation de la résistivité ρ de certains matériaux en fonction de la température : C'est l'effet thermorésistif.

412. Classification

Selon la nature du matériau utilisé, Les capteurs de température RTD sont classés en deux familles : Les thermistances et les résistances thermoélectriques métalliques.

413. Thermistances

Les thermistances sont des composants semi-conducteurs.

La valeur nominale de la résistance d'une thermistance est donnée pour la température nominale de 25 °C.

On distingue deux types de thermistances :

☑ Thermistances CTN (Coefficient de Température Négatif) ou NTC : leur résistance diminue lorsque la température augmente et vice versa.

☑ Thermistances CTP (Coefficient de Température Positif) ou PTC : leur résistance augmente lorsque la température croît et inversement.

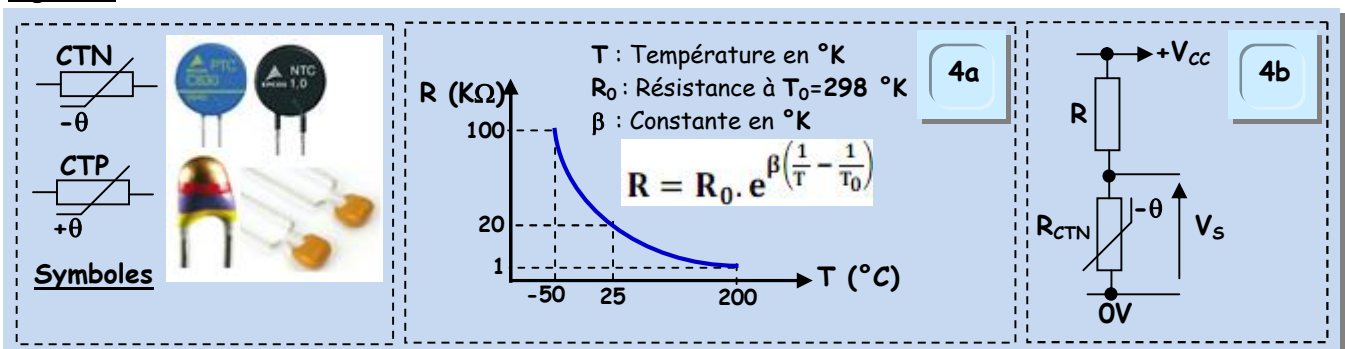
La figure 4a représente un exemple de caractéristique d'une thermistance CTN.

Pour traduire la température mesurée sous forme d'un signal électrique, on utilise, à titre d'exemple,

le montage conditionneur de la figure 4b. On aura ainsi une tension V_s image de la température mesurée

$$V_s = V_{CC} \cdot [R_{CTN} / (R_{CTN} + R)]$$

Figure 4



414. Résistances thermoélectriques métalliques

Ce sont des composants à base des métaux tels que le platine, le cuivre, ou le nickel.

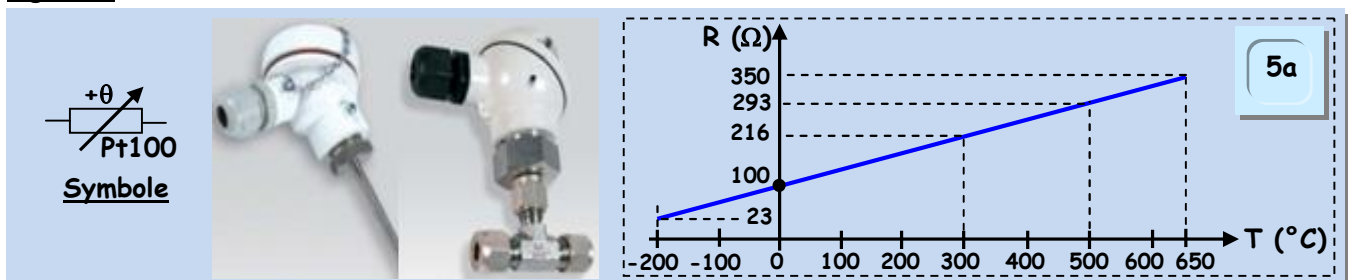
La sonde Pt100 est le modèle le plus répandu. Elle offre une résistance de 100 Ω pour $T=0^{\circ}C$.

L'expression approchée de la résistance d'une sonde métallique en fonction de la température T en $^{\circ}C$ est :

$R(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T)$ avec : R_0 valeur de référence en Ω et α coefficient de température du matériau en $\Omega/^{\circ}C$

La figure 5a montre un exemple de caractéristique d'une sonde Pt100

Figure 5



42. Circuits intégrés spécialisés

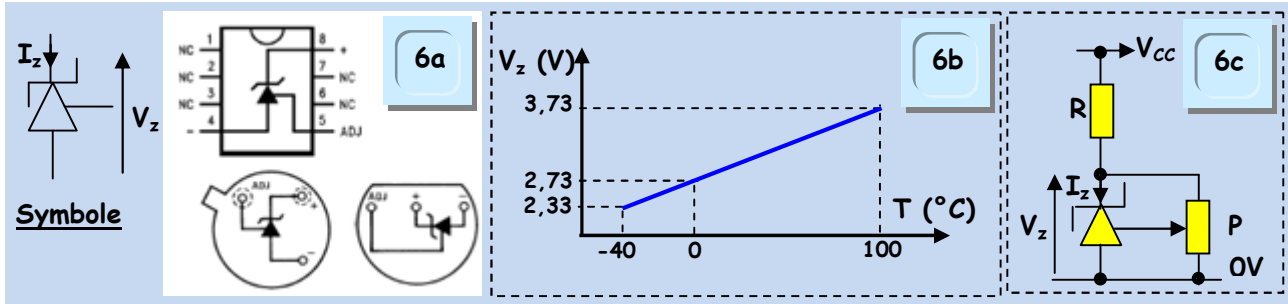
IL existe des composants électroniques spécialisés, conçus pour la mesure de température. Ces circuits permettent d'avoir une tension qui varie linéairement avec la température. On propose le **LM335**, à titre d'exemple, qui se loge dans des différents types de boîtiers comme l'indique la figure 6a.

La figure 6b illustre la caractéristique du LM335 donnant la tension V_z image de la température T .

Pour mettre en œuvre le LM335, on propose le montage de la figure 6c avec :

- ☑ La résistance R doit être déterminée de telle sorte que I_z soit compris entre 0,4 mA et 5 mA.
- ☑ Le potentiomètre P est facultatif. Il permet d'ajuster la tension du 0 °C (décalage).

Figure 6

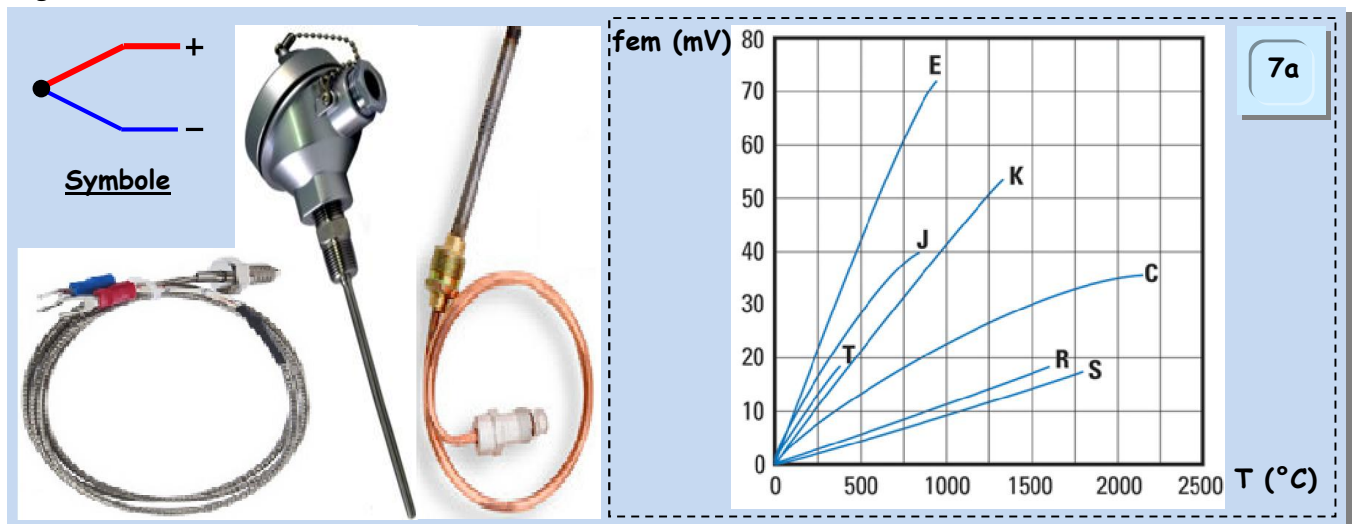


43. Thermocouples

Ce sont des couples de métaux qui exploitent le principe de l'effet thermoélectrique pour la mesure de température dans une large gamme. Ils sont normalisés et codifiés par des lettres : K, J, T, N, E, S, R et B.

La figure 7a montre un exemple de caractéristiques de quelques thermocouples.

Figure 7



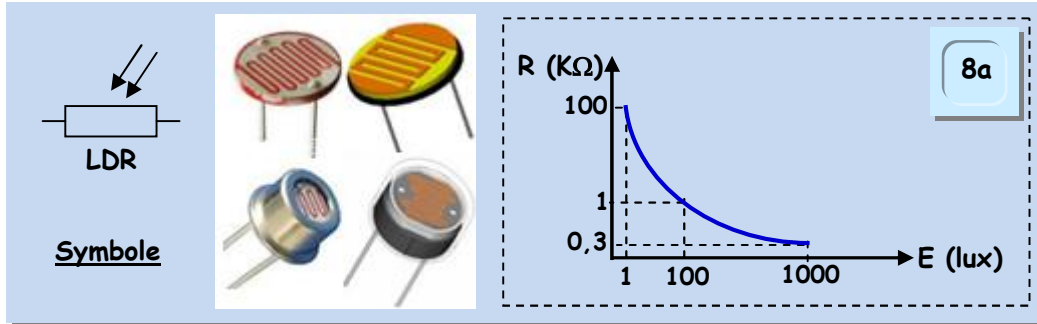
5. Capteurs de lumière

51. Photorésistance LDR

Pour certains matériaux, la résistivité ρ dépend du flux lumineux incident sur le matériau : C'est l'**effet photorésistif**. La LDR (Light Dependent Resistor) est un résistor qui possède une résistance qui varie en fonction de l'intensité lumineuse reçue : Elle est très élevée dans l'obscurité (de 1 à 100 MΩ), puis elle diminue pour atteindre quelques centaines d'Ohms sous un éclairage intense (10^3 lux par ex).

La figure 8a représente un exemple de caractéristique d'une photorésistance donnant sa résistance en fonction de l'éclairement E .

Figure 8

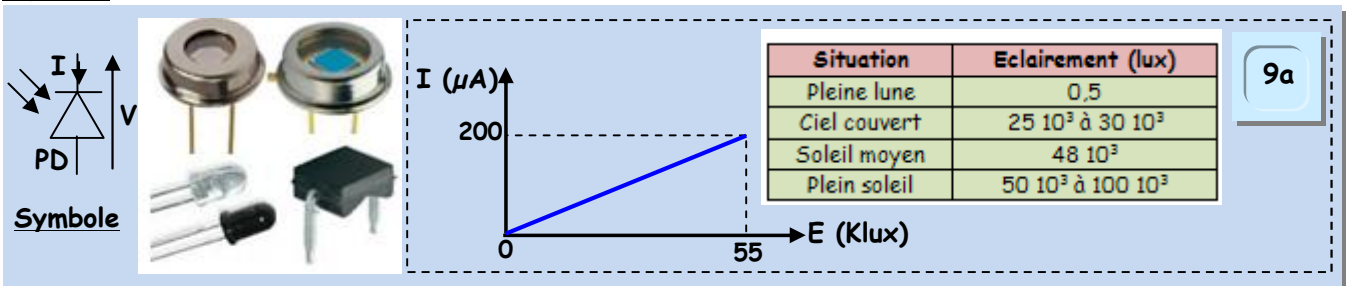


52. Photodiode PD

C'est une diode à jonction qui fonctionne en polarisation inverse. Son boîtier est transparent à une de ses extrémités et comporte une lentille convergente pour la concentration des rayons lumineux. Ces rayons éclairent la jonction, créant un courant inverse, appelé courant photoélectrique, qui est proportionnel à l'intensité lumineuse reçue.

La figure 9a représente un exemple de caractéristique d'une photodiode donnant le courant qui la traverse en fonction du rayonnement.

Figure 9



6. Capteurs potentiométriques de déplacement

Les potentiomètres permettent de réaliser des capteurs simples pour la mesure de déplacements linéaires ou angulaires d'un objet. Pour aboutir à cette fin, il suffit de relier l'objet mécaniquement au curseur C d'un potentiomètre et d'appliquer une tension continue V_{cc} entre ses extrémités A et B (conditionneur).

Pour la mesure de déplacements rectilignes, on utilise les potentiomètres linéaires (voir figure 10a) :

$R_1 = R \cdot (L/L_0)$, $R_2 = R \cdot (L_0 - L/L_0)$ et $V_S = V_{cc} \cdot L/L_0 = k \cdot L$ avec $k = V_{cc}/L_0$: sensibilité du capteur en Volt/mètre.

La mesure d'angles de rotations utilise les potentiomètres rotatifs monotour ou multitours (figure 10b) :

$R_1 = R \cdot (\theta/\theta_0)$, $R_2 = R \cdot (\theta_0 - \theta/\theta_0)$ et $V_S = V_{cc} \cdot \theta/\theta_0 = k \cdot \theta$ avec $k = V_{cc}/\theta_0$: sensibilité du capteur en Volt/degré.

L'inconvénient majeur de ce type de capteurs est l'usure due aux frottements mécaniques, ce qui limite leur durée de vie étroitement liée au nombre de manœuvres.

Figure 10a

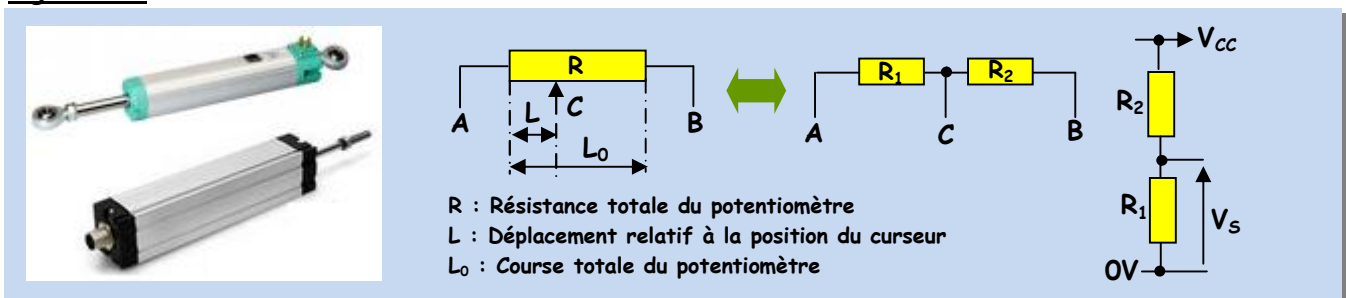
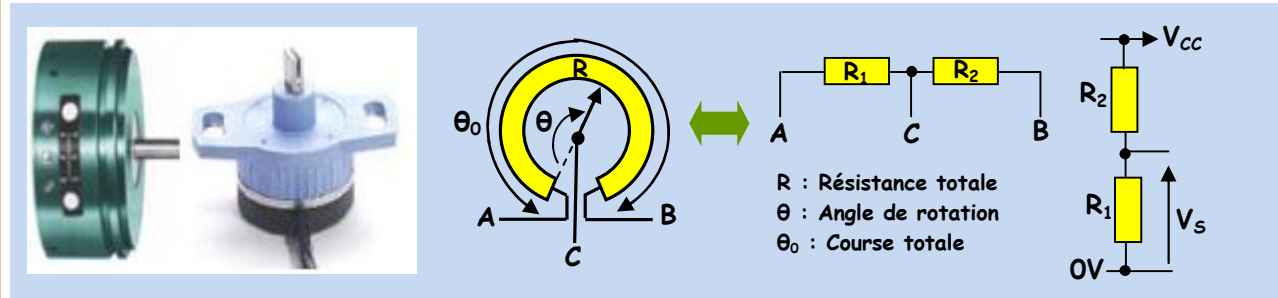


Figure 10b

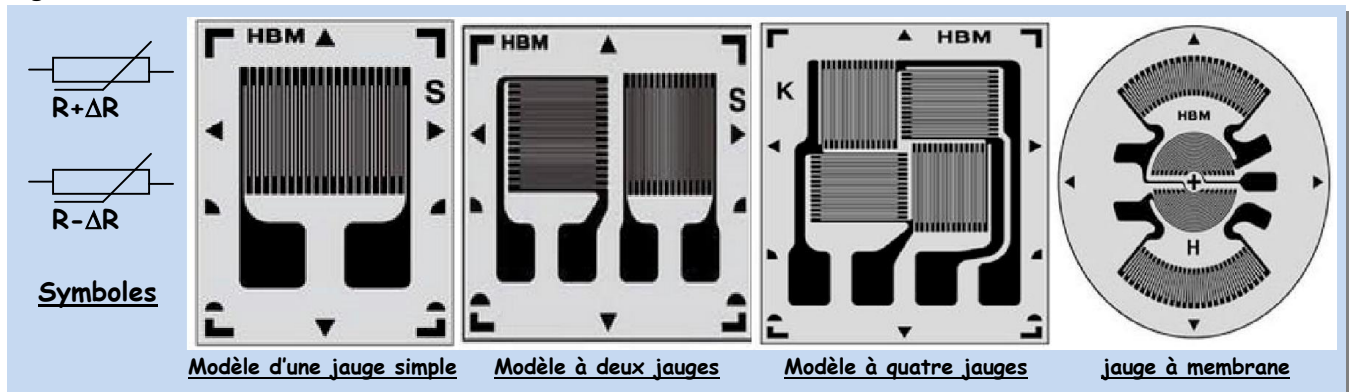


7. Capteurs à base de jauges d'extensiométrie

71. Présentation

Les jauges extensiométriques, dites aussi jauges de contrariantes, permettent de déterminer les efforts dans les matériaux. Elles sont à l'origine de toutes sortes de capteurs de force, de couple, de pression, etc.

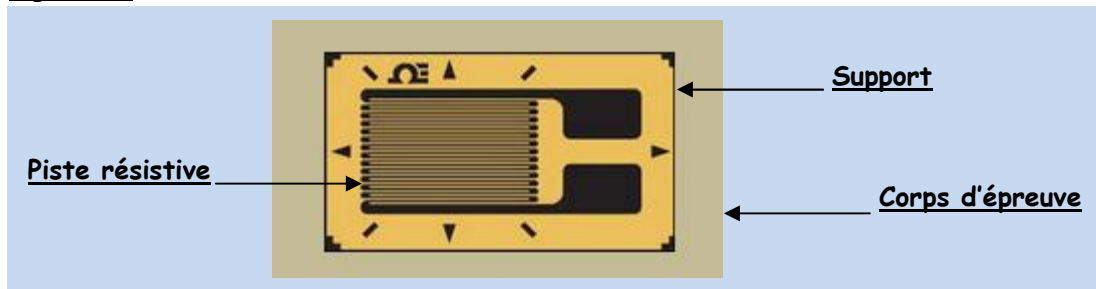
Figure 11



72. Constitution

La jauge est constituée d'une piste résistive miniaturisée collée sur un support isolant (substrat) en résine, le tout est collé sur le corps d'épreuve qui subira la déformation à mesurer. La jauge consiste en des spires jointives généralement fabriquées à partir d'une mince feuille métallique (quelques μm d'épaisseur). Le support et le corps d'épreuve doivent être souples et élastiques.

Figure 12



73. Principe de base

La résistance d'un conducteur est donnée par la relation $R = (\rho \cdot l) / s$. La déformation du conducteur (jauge), modifie la longueur l entraînant une variation de la résistance R .

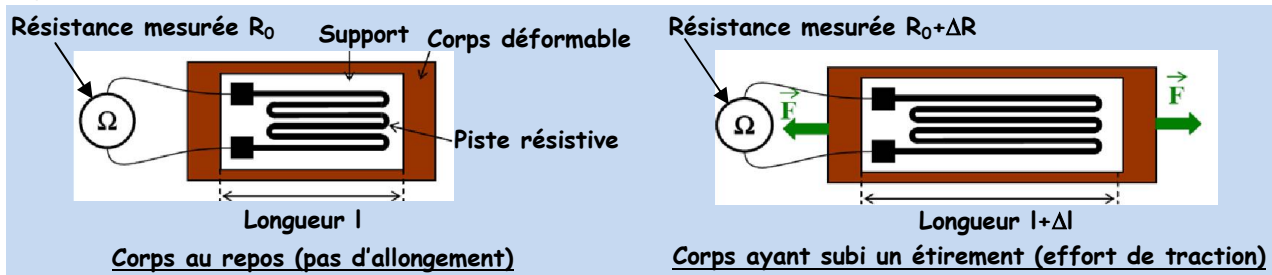
La relation générale pour les jauges est $(\Delta R / R_0) = k \cdot (\Delta l / l)$ où k est le facteur de la jauge qui dépend du matériau de celle-ci et de la température, il caractérise la sensibilité de la jauge.

74. Fonctionnement d'une jauge simple

La figure 13 illustre le fonctionnement d'une jauge de déformation lors d'un effort de traction.

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

Figure 13



75. Conditionneur du signal : Pont de Wheatstone

Qu'elle soit métallique ou en matériau semi-conducteur, une jauge reste 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** dont le schéma du montage est celui de la figure 14a avec :

- ☑ R_0 : Résistance réglée à la valeur R_0 de la jauge au repos.
- ☑ R_J : Résistance de la jauge de valeur égale à $R_0 + \Delta R$.
- ☑ R : Résistances quelconques mais identiques.

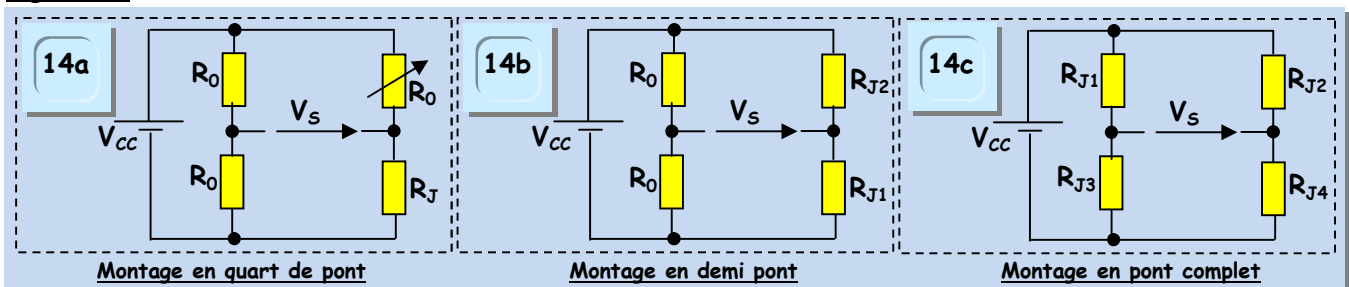
On démontre que $V_S = V_{CC} \cdot \Delta R / (4R_0 + 2\Delta R)$. Généralement, la variation ΔR est très petite devant R_0 , la relation se simplifie alors pour devenir quasi-linéaire $V_S = V_{CC} \cdot \Delta R / 4R_0 = k \cdot \Delta R$. La tension de sortie est par conséquent proportionnelle aux variations de résistance et donc à celles de la contrainte.

Remarque :

On peut améliorer la sensibilité et la linéarité du dispositif en utilisant un pont à deux résistances et deux jauges symétriques (voir figure 14b) : La 1^{ère} jauge $R_{J1} = (R_0 + \Delta R)$ et la 2^{ème} jauge $R_{J2} = (R_0 - \Delta R)$.

Il est même possible d'utiliser un pont à quatre jauges symétriques pour avoir une parfaite linéarité et éviter le problème de dérive avec la température (voir figure 14c).

Figure 14



76. Applications

Parmi les capteurs construits à base des jauges extensiométriques, on cite à titre d'exemple les capteurs de force (figure 15a), de couple (figure 15b) et de pression (figure 15c).

Figure 15

