

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, ...).

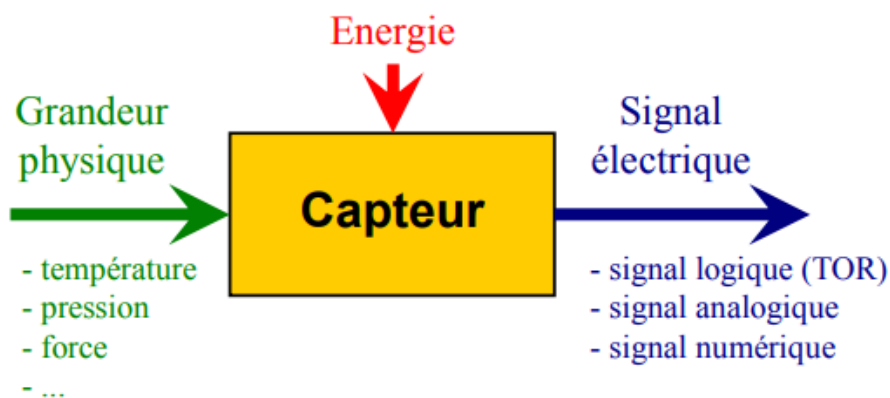
Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

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) :

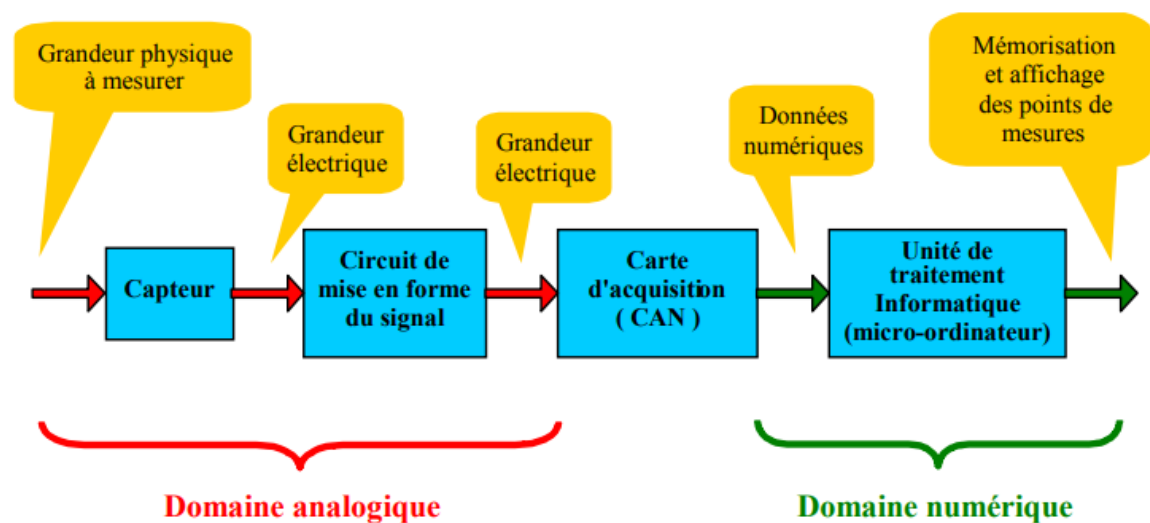
Le résultat de la mesure x d'une grandeur X n'est pas complètement défini par un seul nombre. Il faut au moins la caractériser par un couple (x, dx) et une unité de mesure. dx est l'incertitude sur x . Les incertitudes proviennent des différentes erreurs liées à la mesure. Ainsi, on a : $x-dx < X < x+dx$

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 U_H .

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 :

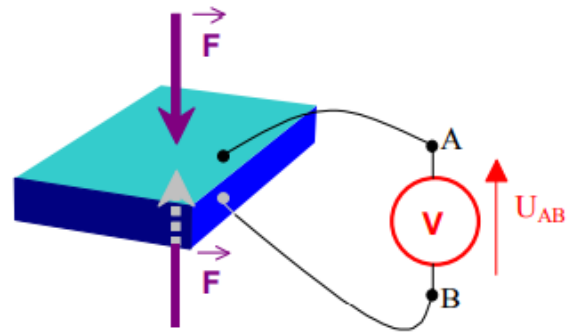
- Soit d'une variation de dimension du capteur, c'est le principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteur de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile.
- Soit d'une déformation résultant de force ou de grandeur s'y ramenant, pression accélération (armature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

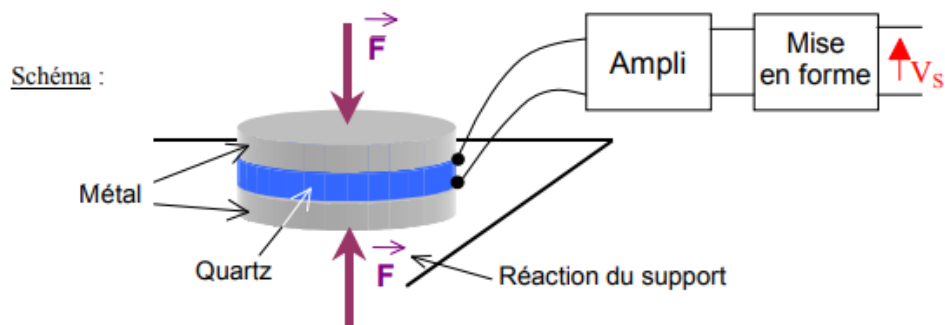
VI. Capteurs à effet piézoélectrique :

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 :

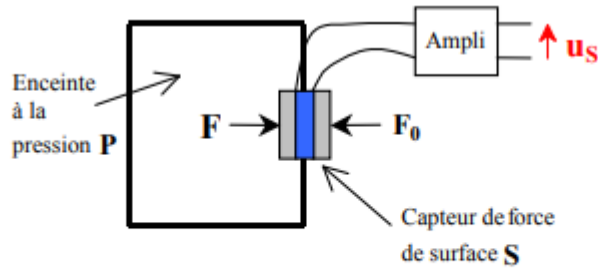
Lorsqu'un corps (gaz, liquide ou solide) exerce une force F sur une paroi S (surface); on peut définir la pression P exercée par ce corps avec la relation ci-dessous :

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

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

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

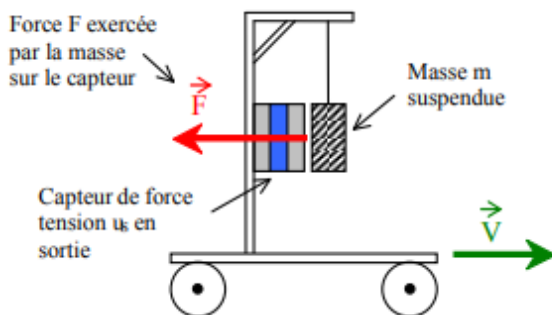
Le capteur de force est inséré dans la paroi d'une enceinte où règne une pression P . Une face du capteur est soumise à la force F (pression P) et l'autre face est soumise à la force F_0 (pression extérieure P_0)



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 $\boxed{u_s = 2k.m.a}$

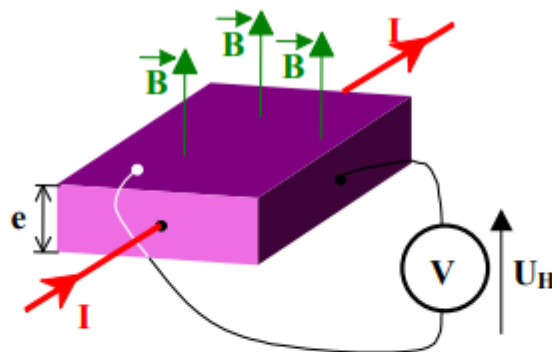
5) Récepteur à ultrason :

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.

VII. 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 :

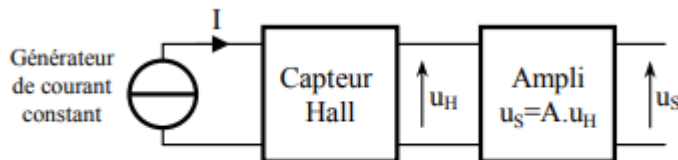
$\boxed{U_H = R_H \frac{IB}{e}}$ avec : R_H : constante de Hall (dépend du semi-conducteur)

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

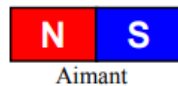
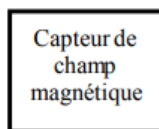
La structure typique d'un capteur de champ magnétique est la suivante :



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

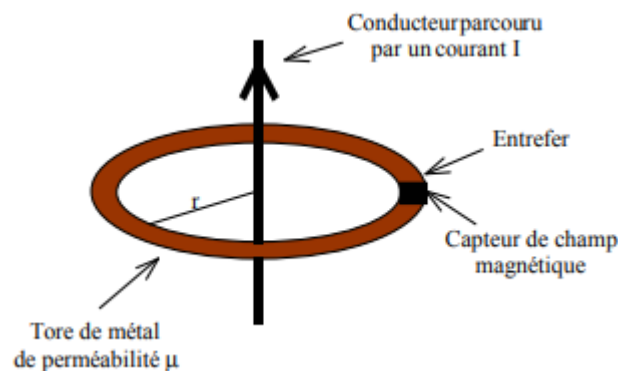
3) Autres applications

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.

VIII. Capteurs à effet photoélectrique

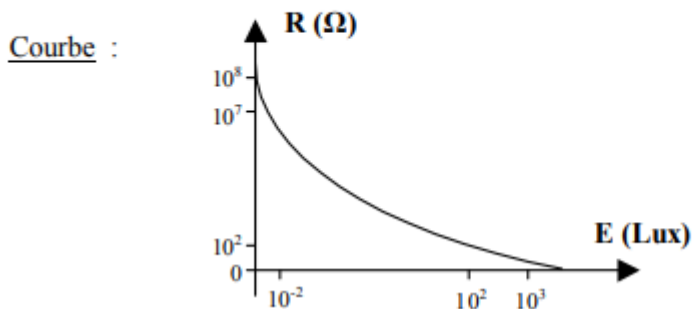
1) L'effet photoélectrique :

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.

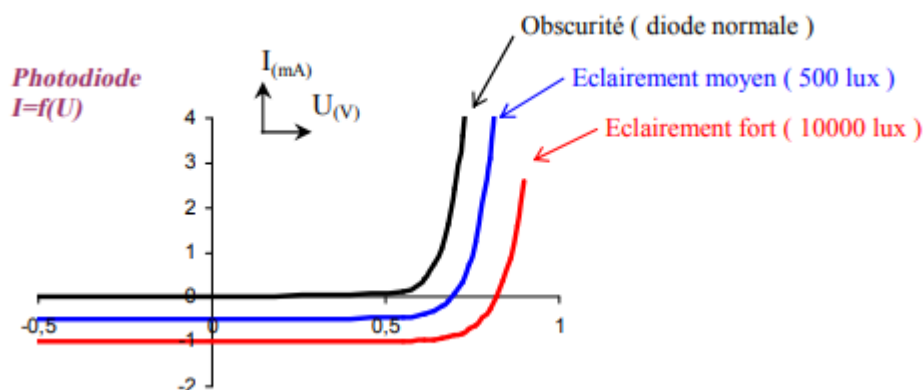
Utilisation :

- 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 :

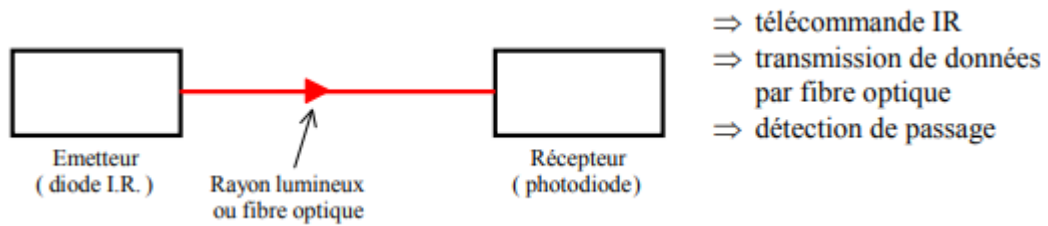
- bonne sensibilité
- faible temps de réponse (bande passante élevée).

Inconvénients :

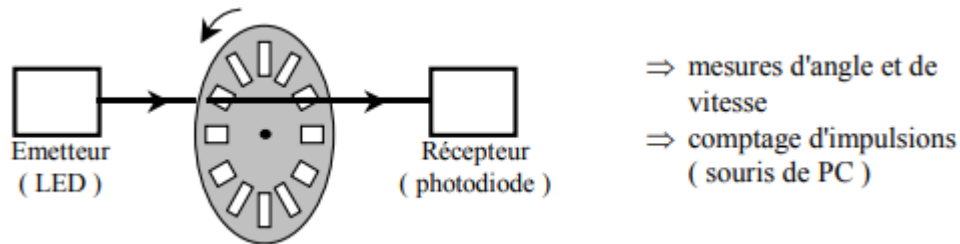
- coût plus élevé qu'une photorésistance
- nécessite un circuit de polarisation précis.

Utilisations :

a) **Transmission de données**



b) **Roue codeuse**

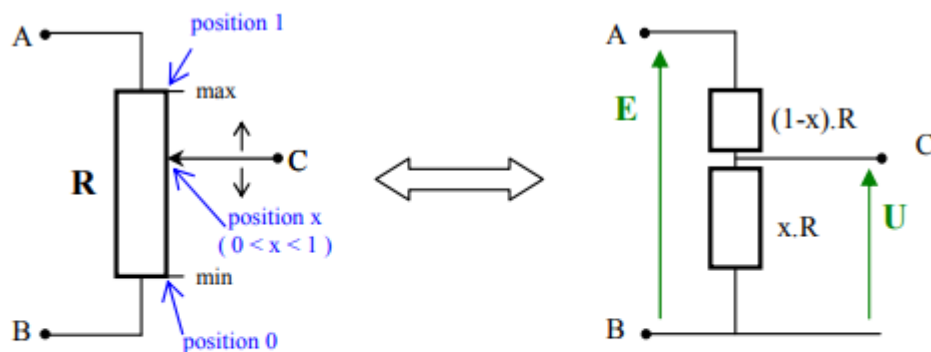


IX. Capteurs à résistance variable par déformation

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

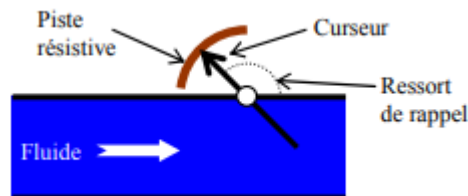
- simplicité d'utilisation
- faible coût.

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 :

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

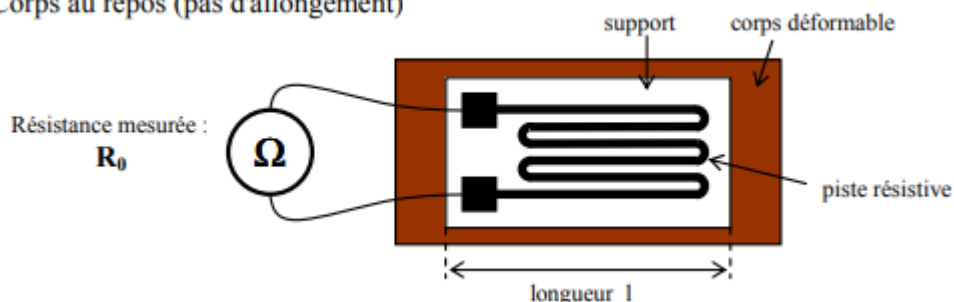
où ρ est la résistivité ($\Omega \cdot m$), l est la longueur (m), et S est la surface (m^2).

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

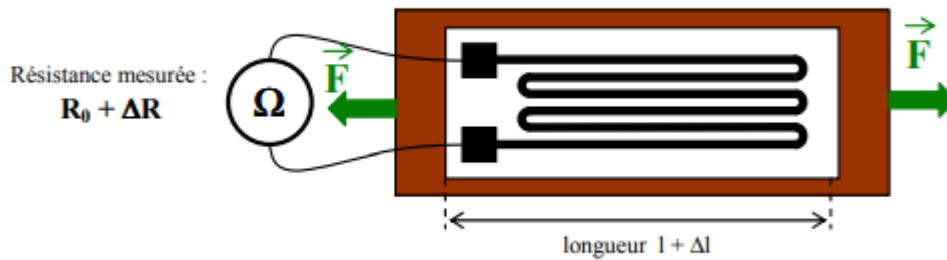
La relation générale pour les jauges est $\frac{\Delta R}{R_0} = K \frac{\Delta l}{l}$ où K est le facteur de jauge.

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)

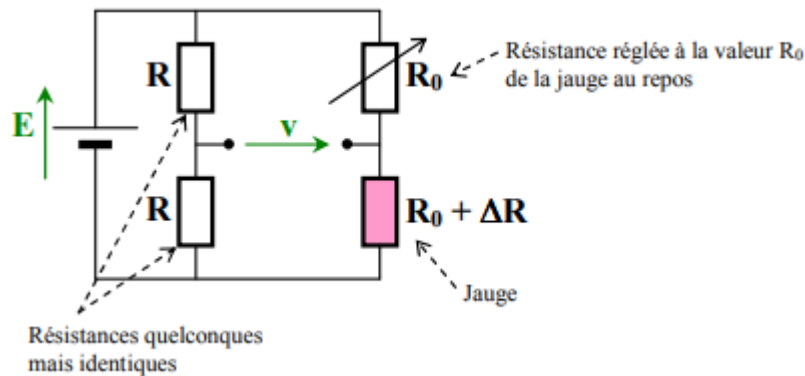


Remarque : Dans le cas d'une contraction, la résistance de la jauge serait $R_0 - \Delta R$.

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.