

Les Capteurs

I. INTRODUCTION :

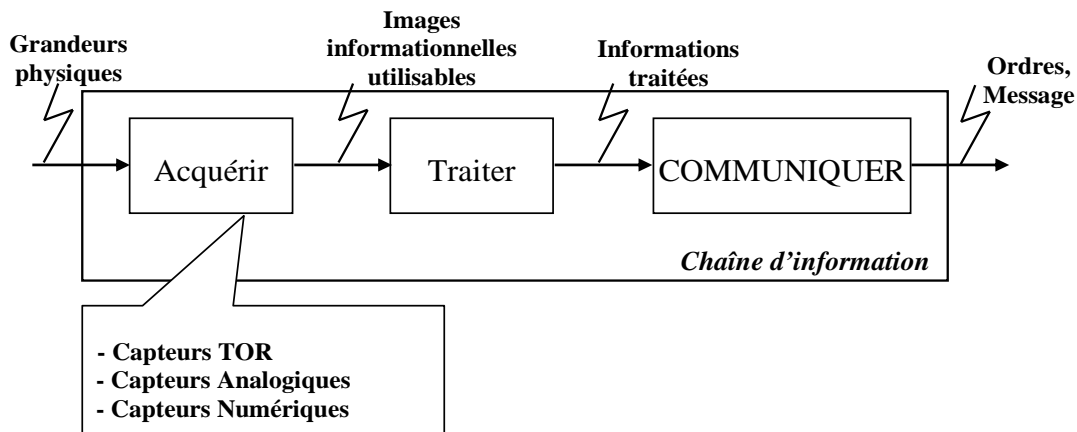
Le traitement des informations par un système s'effectue aujourd'hui de manière électronique. Il est donc indispensable que ces informations soient supportées par des signaux électriques (tensions ou courants).

Les capteurs permettent la conversion des grandeurs **physiques** en signaux **électriques**.

II. CHAÎNE D'INFORMATION :

La **chaîne** d'information permet :

- d'**Acquérir** des informations ;
 - sur un élément de la **chaîne d'énergie**: position d'un vérin, vitesse d'un moteur, courant dans un moteur, température d'un four, ...
 - sur un élément **extérieur au système**: présence ou dimension de la matière d'œuvre, vitesse du vent, température de l'arrivée d'air, ...
- de *Traiter* ces informations ;
- de **Communiquer** les informations traitées à la **chaîne d'énergie** (ordres de commande des pré actionneurs) et à l'opérateur (interface homme/machine).



III. CLASSIFICATION DES CAPTEURS

Souvent la grandeur *physique* à capter (position par exemple) est transformée à l'intérieur du capteur en d'autres grandeurs physiques intermédiaires (résistance par exemple) avant d'être transformée en une grandeur électrique utilisable (tension analogique par exemple).

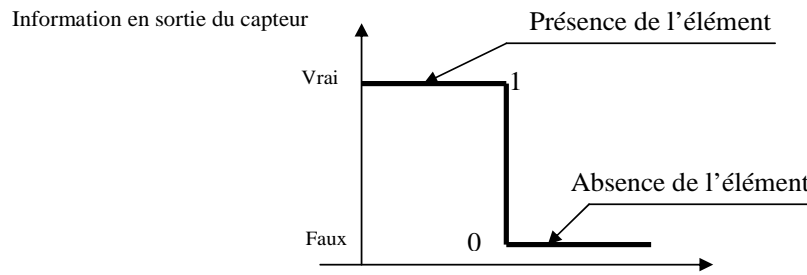
On peut classer les capteurs en fonction :

- de la **grandeur** physique **d'entrée** : capteurs de position, de vitesse, de température, de force, de pression, de débit, ...
- de **l'élément sensible** en interne : capteurs résistifs, inductifs, capacitifs, optiques (ou photosensibles), à semi-conducteur, piézo-électrique, ...
- du signal **de sortie** : capteurs tout ou rien ou TOR (signal logique), numériques, analogiques.

La grandeur électrique de sortie d'un capteur peut varier de 3 manières différentes :

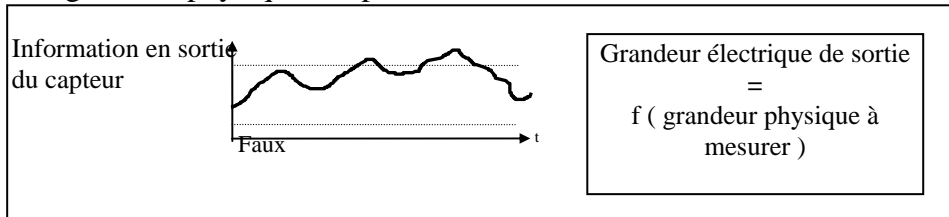
↳ Capteur tout ou rien (TOR)

Ces capteurs génèrent une information électrique de type binaire (*Vrai ou faux*) qui caractérise le phénomène à détecter ou capter.



↳ **Capteur analogique**

La grandeur électrique délivrée en sortie par ce type de capteur est en relation directe avec la grandeur physique à capter.

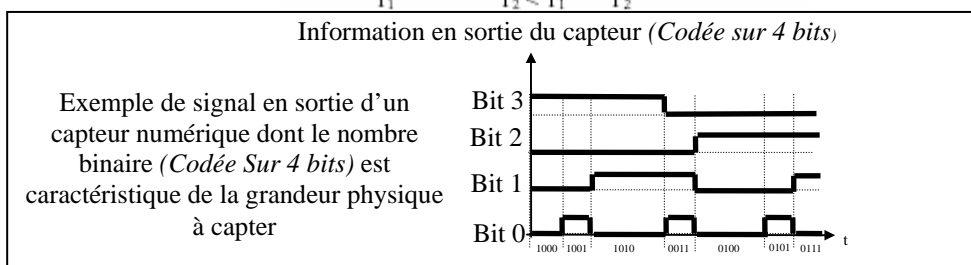
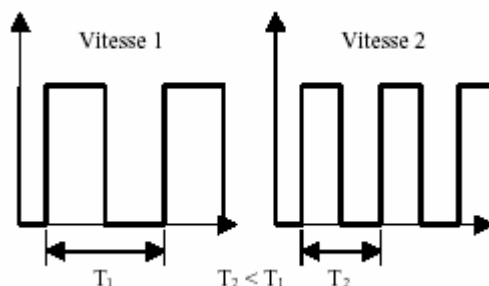
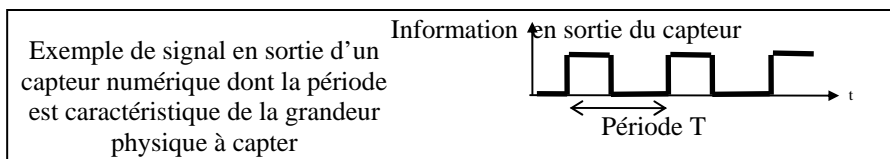


↳ **Capteur numérique**

Ce type de capteur délivre en sortie une information électrique à caractère numérique, image de la grandeur physique à mesurer, c'est à dire ne pouvant prendre qu'un nombre limité de valeurs distinctes.

L'information délivrée par ces capteurs peut être représentée par :

- Soit un signal électrique périodique (*Signal carré*) à période variable.
- Soit un signal numérique codé sur n variables binaires (*n Bits*).



Aussi la grandeur de sortie peut être soit : une charge, une tension ou un courant, dans ces 3 cas, le capteur est actif ; si la grandeur est une impédance : R, L ou C le capteur est passif.

1. 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'extensométrie liée à une structure déformable).

Mesurande	Effet utilisé	matériau
Température	Résistivité	Platine, nickel, cuivre
Très basse température	Constante diélectrique	semi-conducteurs
Flux optique	Résistivité	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité Perméabilité	Alliages nickel Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Magnétorésistances : Bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

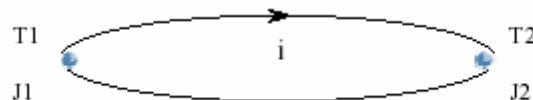
2. Capteurs actifs :

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 plus classiques sont :

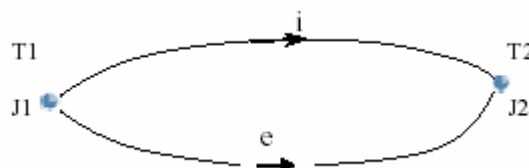
Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	thermoélectricité	Tension
Flux électromagnétique (optique)	Photo émission Pyroélectricité	Courant Charge
Déformation, force, pression, accélération	Piézoélectricité	Charge
Position	Effet Hall	Tension
Vitesse	Induction	Tension

a. Effet thermoélectrique :

Deux métaux différents sont réunis entre eux à chaque extrémité (J_1, J_2) et sont portées à des températures (T_1, T_2) différentes, un courant i circule.



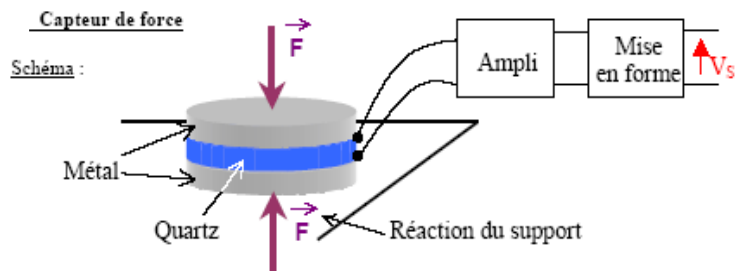
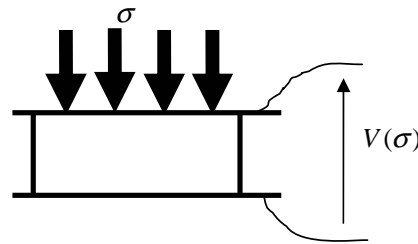
Aux bornes d'un circuit composé de deux conducteurs A et B, la jonction J_1 est à la température T_1 , différente de celle de l'extrémité J_2 qui se trouve à T_2 . Il apparaît une force électromotrice $e(T_1, T_2)$ ne dépendant que de la nature des conducteurs et des températures T_1 et T_2 .



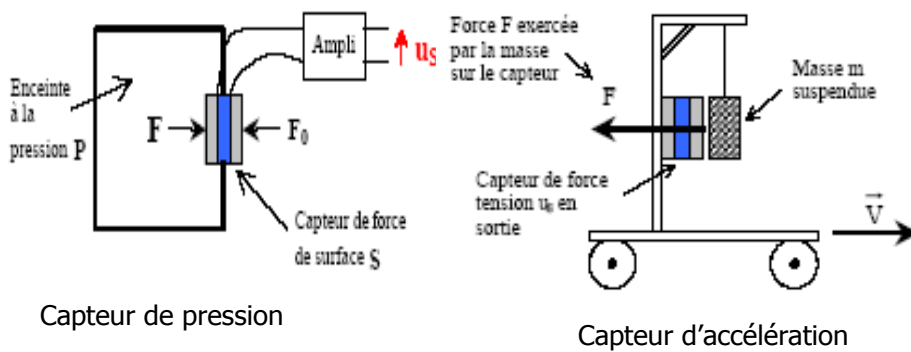
La sensibilité des thermocouples diminue avec la température, il est donc difficile de réaliser des mesures à basses températures.

b. Effet piézo-électrique :

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



La tension V_s de sortie sera proportionnelle à la force F : $V_s = k.(F+F) = 2k.F$ avec k constante.



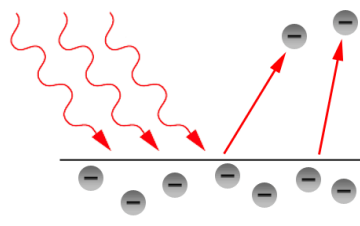
c. Effet d'induction électromagnétique :

La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique.

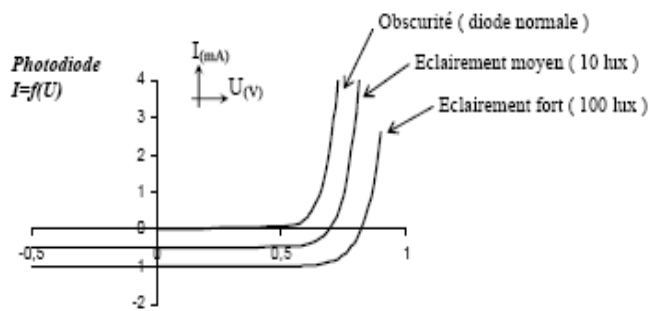
d. Effet photo-électrique :

La libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique dont la longueur d'onde est inférieure à un seuil caractéristique du matériau.

Les photons contenus dans les ondes lumineuses de fréquence f possèdent une énergie $E = h.f$ (où h est la constante de Planck $h = 6.62.10^{-34}$ J.s)



Exemples : ► photodiodes : c'est une jonction PN soumise à un éclairement lumineux.



On constate que lorsque la diode est éclairée, elle peut se comporter en générateur ($I = 0 \Rightarrow U \approx 0,7V$ pour 10lux). On a donc affaire à une photopile (effet photovoltaïque).

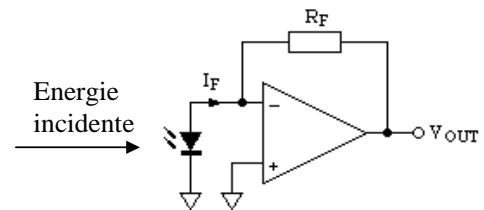


Schéma de détection de flux optique

e. Effet photovoltaïque :

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

f. Effet Hall :

Un champ B crée dans le matériau un champ électrique E dans une direction perpendiculaire.

IV. CARACTERISTIQUES GENERALES DES CAPTEURS

1. Sensibilité

La sensibilité d'un capteur correspond à son aptitude à fournir un signal de forte *amplitude* par rapport à l'amplitude du signal physique en entrée :

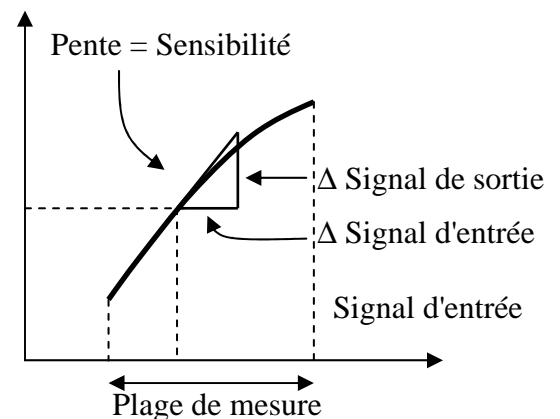
$$\text{Sensibilité} = \frac{\Delta \text{Signal de sortie}}{\Delta \text{Signal d'entrée}}$$

Elle correspond graphiquement à **la pente de la caractéristique de transfert** du capteur.

Si le capteur est **linéaire**, alors elle ne dépend pas du *point de fonctionnement*.

Elle est définie sur un certain domaine de mesure appelé **plage de mesure**.

Signal de sortie



2. Précision et résolution

La *résolution* du capteur correspond à la plus petite variation d'entrée qui soit détectable en sortie. La *précision* du capteur correspond à l'erreur maximale possible sur une mesure.

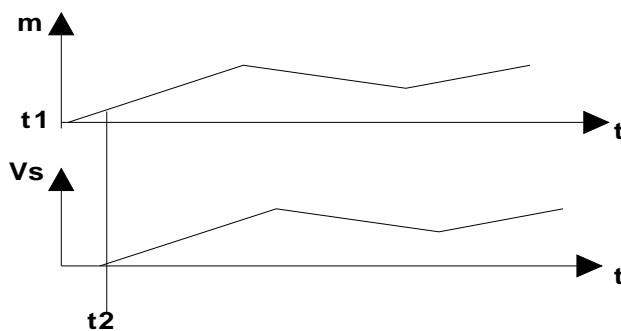
3. Interchangeabilité :

Le remplacement par un capteur identique ne modifie pas les performances de la chaîne de mesures. Cette propriété est d'une grande importance pour le domaine de la maintenance des matériels.

4. Fidélité :

Un capteur est dit fidèle si le signal qu'il délivre en sortie ne varie pas dans le temps pour une série de mesures concernant la même valeur de la grandeur physique Ψ d'entrée (*Influence du vieillissement, ...*).

5. Rapidité et temps de réponse.



La valeur $t_2 - t_1$ représente le temps de réponse du capteur. Dans certains systèmes, les temps de réponse lents ne sont pas importants, mais dans d'autres, comme l'A.B.S, la vitesse de transmission du signal est majeure pour intervenir avant le blocage des roues.

V. CAPTEURS RESISTIFS :

D'une manière générale, une résistance pure R peut s'écrire : $R = \frac{F(x)}{s}$

où $F(x)$ est fonction de la géométrie et s la conductivité du matériau, avec : $s = q(m_p \rho + m_n n)$
 q est la charge élémentaire, et les coefficients m_p , m_n sont les mobilités respectives des porteurs : trous, de densité ρ ou électrons, de densité n .

Un mesurande peut ainsi agir sur :

- la densité des porteurs (température ou flux lumineux)
- la mobilité des porteurs (t° , contrainte, champ magnétique)
- la géométrie.

1. Résistances métalliques

Ces résistances ont une valeur qui croît avec la t° selon une loi de la forme :

$$R(T) = R_0 (1 + AT + BT^2 + C(T-100)T^3) \quad T \text{ est en } ^\circ\text{C}.$$

Le Pt est le métal le plus utilisé. Sa plage d'utilisation s'étend de -200°C à 1000°C . Ses valeurs forment des étalons normalisés.

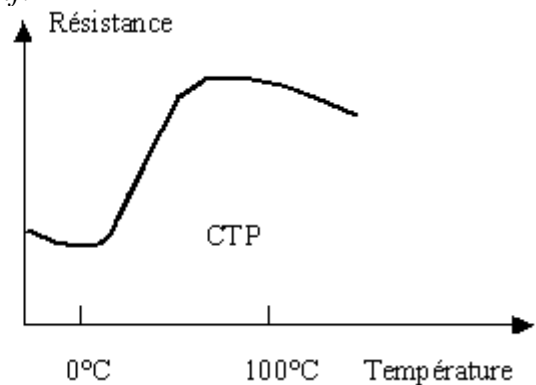
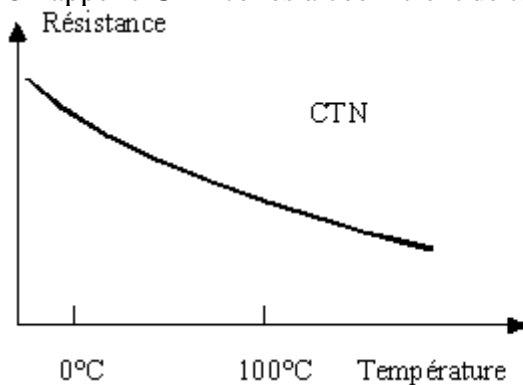
Le Ni et le Cu sont d'autres métaux utilisés. Le Cu est caractérisé par une courbe très linéaire.

2. Thermistances

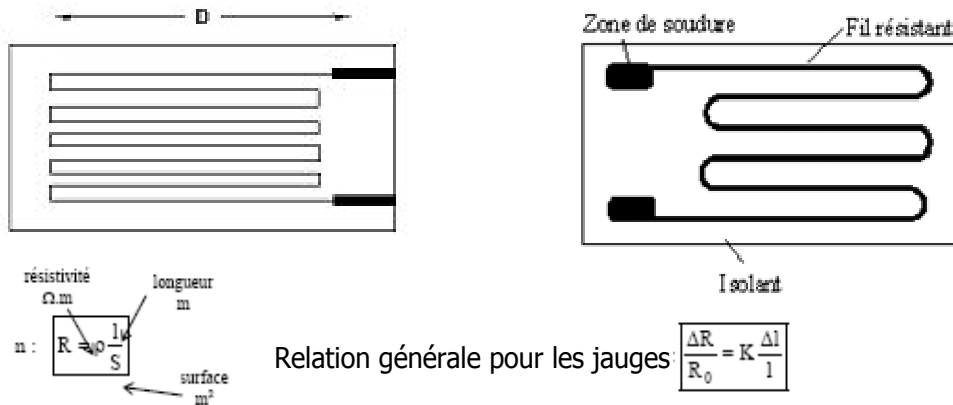
Les thermistances n'ayant pas une caractéristique linéaire mais étant très sensibles, ils sont particulièrement adaptés aux problèmes de régulation.

On appelle **CTN** les thermistances à Coefficient de Température Négatif : **leur résistance diminue lorsque la température augmente.**

On appelle **CTP** celles à coefficient de température positif.



3. Mesures de déplacement et jauges d'extensométrie



Les jauges sont des éléments résistifs (métaux, semi-conducteurs) déposés sur un substrat isolant solidaire de la structure dont on veut mesurer la déformation $\frac{\Delta l}{l}$.

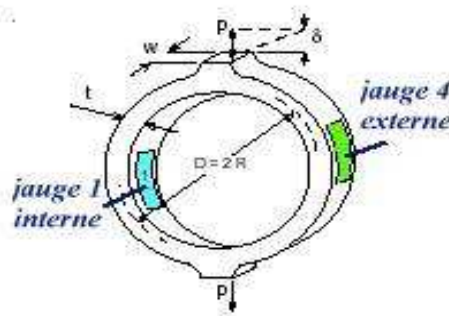
Pour la jauge, on aura une variation proportionnelle à la déformation, qui sera donnée par :

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

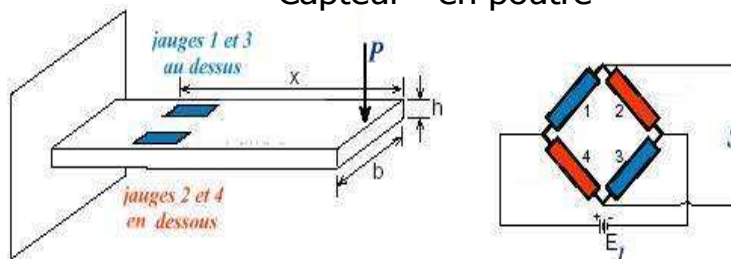
k est appelé facteur de jauge et vaut entre 2 et 4 pour les résistances métalliques ou entre 50 et 200 pour les jauges à semi-conducteur.

Les jauges de déformation sont surtout utilisées comme mesure secondaire dans un capteur comprenant un corps d'épreuve, structure mécanique sur laquelle est fixée la jauge.

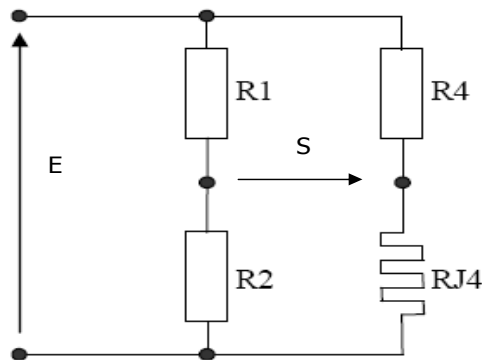
Capteur en anneau :



Capteur en poutre



Dans ces 2 exemples, La force s'applique différemment suivant les éléments résistifs. Ainsi, à l'extrémité de la poutre, les deux jauges au dessus seront en extension tandis que les deux jauges inférieures seront comprimées. Il en résulte dans le montage en pont un signal S peu sensible aux variations de température qui affecte les résistances de la même façon.



$$R_1 = R_2 = R_4 = R \text{ et } R_{J4} = R + \Delta R$$

Exprimer alors S en fonction de R, ΔR et E.

$$S = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} E ; \text{ En général } \Delta R \ll R, \text{ alors : } S \approx \frac{\Delta R}{4R} E$$

VI. Les capteurs inductifs.

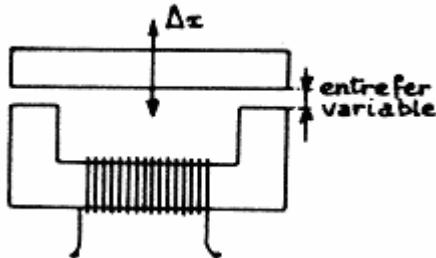
Ils sont utilisés pour détecter un moment précis, synchroniser des informations, déterminer des vitesses, compter le nombre de tours...

Ces capteurs comportent des enroulements de mesure traversés par un flux d'induction magnétique fonction du mesurande. Le mesurande peut être une position, un déplacement linéaire ou angulaire.

Certains de ces capteurs font jouer le coefficient d'auto-induction d'une bobine traversée par un courant alternatif.

D'autres capteurs inductifs font appel à 2 bobinages, dont on fait varier le couplage par déplacement du noyau par exemple.

1. à entrefer variable :



$$\text{L'inductance (L) de ce capteur est : } L = \frac{\mu_0 N^2 A}{x_0}$$

Où μ_0 = perméabilité magnétique du vide

N = nombre de spires

A = l'aire de l'entrefer

x_0 = distance de départ de l'entrefer

En première approximation, la variation de l'inductance (ΔL) est directement proportionnelle

à la variation de la distance de l'entrefer: $\Delta L \approx \frac{2\mu_0 N^2 A}{x_0^2} \cdot \Delta x \approx k \cdot \Delta x$

Cette variation d'inductance est donc non linéaire.

La sensibilité, définie selon la relation $\text{Sensibilité} = \frac{\Delta L}{\Delta x}$, est donc relativement constante.

L'emploi de ce type de capteur est limité à des déplacements faibles, de l'ordre du mm.

2. bobine à noyau plongeur

L'inductance L du bobinage dépend de l'enfoncement du noyau. Le déplacement Δl_f du noyau entraîne une variation ΔL de l'inductance qui dépend de l_f et qui est une fonction non linéaire de Δl_f .

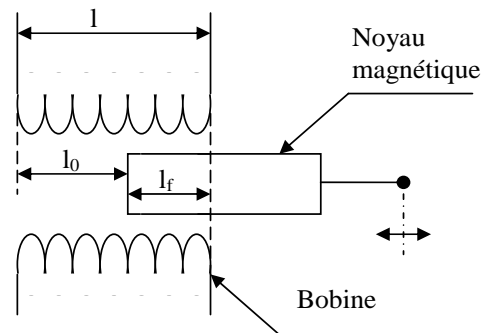


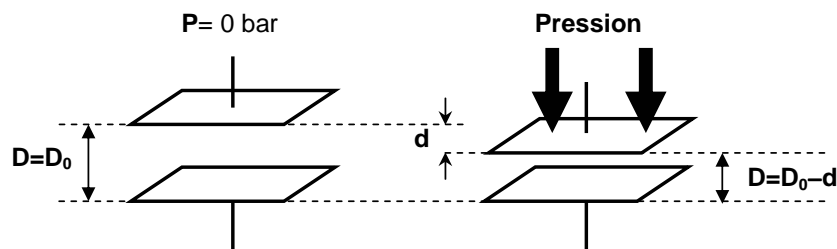
Schéma de principe d'une bobine à noyau plongeur

VII. capteurs capacitifs :

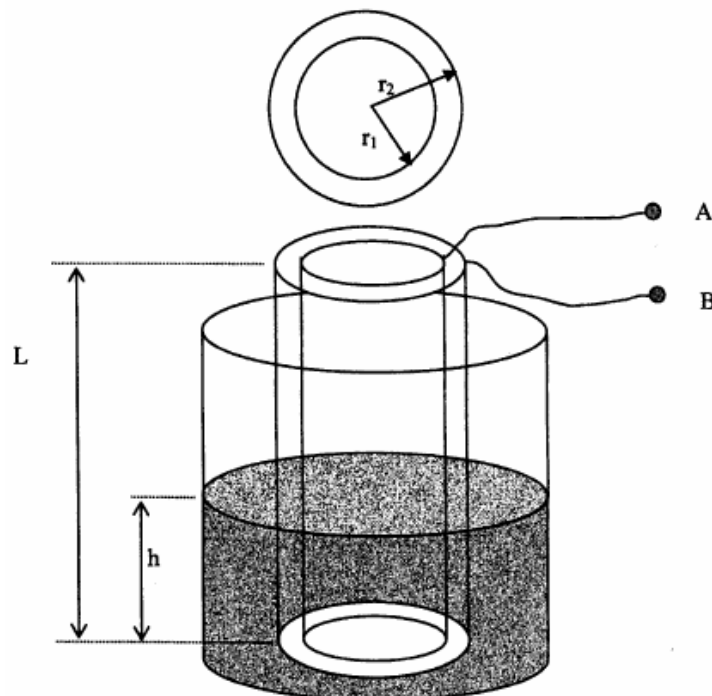
1. Principe :

Ces capteurs font appel à :

- Un condensateur plan : $C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}$; avec : ϵ_r la permittivité du milieu, ϵ_0 celle du vide ($= 8.85 \cdot 10^{-12}$ USI) et A l'aire des armatures en regard et d la distance qui les sépare.



- Un condensateur cylindrique : $C = 2\pi \epsilon_r \epsilon_0 \frac{l}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$.



Avec r_2 et r_1 respectivement les rayons intérieur de l'armature externe et extérieur de l'armature interne, et l leur longueur.

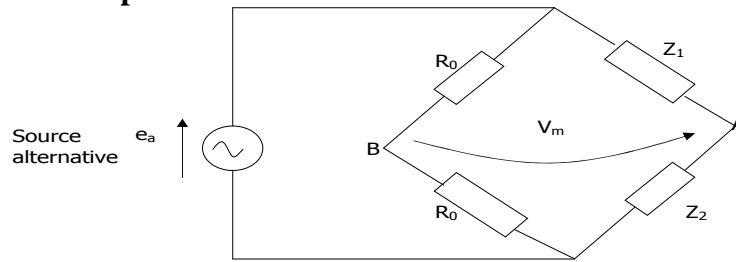
On peut donc faire varier la permittivité du milieu qui sépare les armatures ou la distance qui les sépare.

2. Conditionneurs pour capteurs réactifs

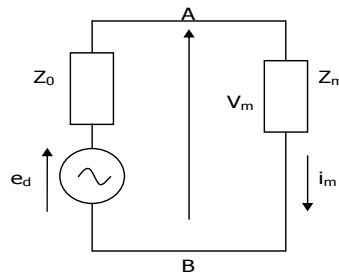
L'information associée à la valeur de l'impédance d'un capteur réactif peut être transférée

- sur l'amplitude d'une tension par un pont d'impédances,
- sur la fréquence d'un signal par l'intermédiaire d'un oscillateur.

a. Pont d'impédances



On peut montrer que le schéma précédent est équivalent au schéma de Thévenin suivant :



$$\text{Avec : } e_d = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \frac{e_a}{2} \quad \text{Tension en circuit ouvert}$$

$$Z_0 = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} + \frac{R_0}{2} \quad \text{Impédance interne}$$

$$i_d = \frac{e_d}{Z_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{(Z_1 + Z_2) R_0 + 2 Z_1 Z_2} e_a \quad \text{Courant de court-circuit}$$

Si l'impédance de l'appareil de mesure branché entre A et B est Z_m ,

On choisira une mesure de tension ou de courant en fonction des valeurs d'impédance que l'on mesure ;

$$\text{En effet, de manière évidente : } V_m = \frac{Z_m}{Z_m + Z_0} \cdot e_d ; I_m = \frac{1}{Z_m + Z_0} \cdot e_d$$

Puisqu'il faut que la mesure soit indépendante de Z_m , on choisira :

- une mesure de tension quand $Z_0 \ll Z_m$ ainsi $v_m = e_d$

C'est le cas des capteurs inductifs : Z_0 est de l'ordre du kW (ex. 30 mH à 10kHz)

- Une mesure de courant quand $Z_0 \gg Z_m$ ainsi $i_m = i_d$

C'est le cas des capteurs capacitifs : Z_0 est de l'ordre de 100kW (ex. 100 pF à 10kHz). On fait suivre généralement d'un convertisseur courant/tension.

b. Par oscillateur

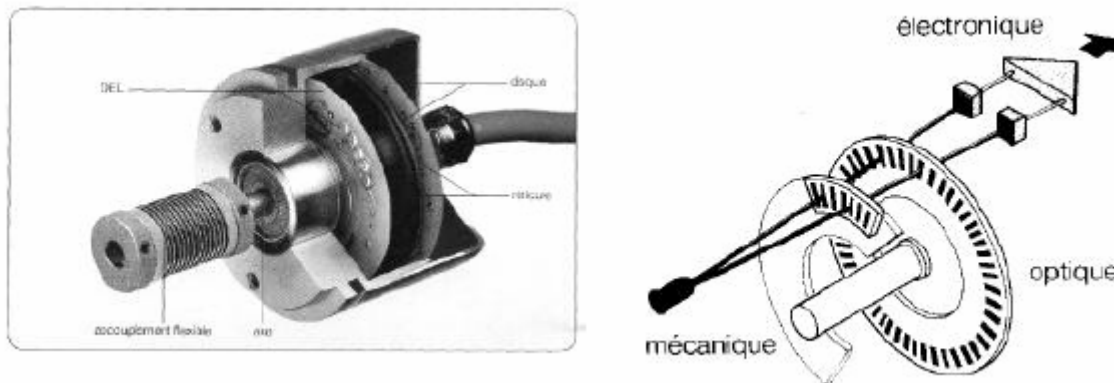
L'oscillateur permet de transférer l'information liée à la valeur de l'impédance, sur la fréquence des oscillations.

Avantages :

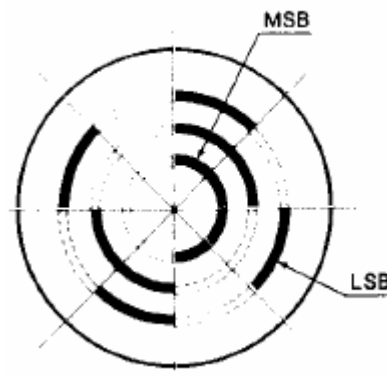
- Immunité aux parasites supérieure
- Conversion sous forme numérique simple : comptage de périodes pendant un temps déterminé
- Le signal modulé en fréquence peut être transmis sans fil.

VIII. Détecteurs optiques (ou photoélectriques)

Ce type de détecteurs utilise un *émetteur de lumière* (généralement une **LED** infrarouge) associé à un *récepteur photosensible* (généralement un phototransistor).



La détection de l'objet se fait lorsque le récepteur détecte une importante variation du flux *lumineux* reçu. Un traitement du signal (intégré ou non dans le capteur) permet d'obtenir un **signal logique** commutant au passage de l'objet devant l'émetteur.

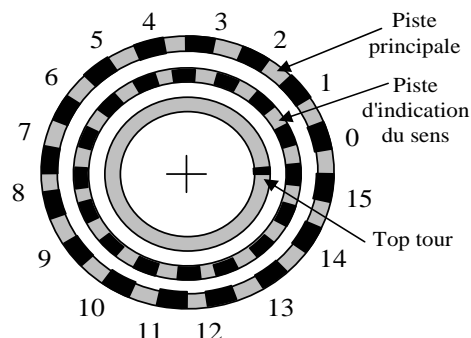


1. Codeurs optiques

Les codeurs optiques utilisent un principe comparable mais ils fournissent un signal *numérique*.

a) Codeurs incrémentaux

Pour déterminer la *position angulaire* d'un axe on peut fixer sur cet axe un disque sur lequel sont gravés des secteurs alternativement opaques et transparents. Sur l'exemple suivant, ce disque est appelé '*Piste principale*'. Un système **optique** est disposé à proximité du disque pour lire (optiquement) les secteurs. Une partie électronique conditionne le signal pour obtenir un **signal logique** représentatif de la lecture d'un secteur opaque ou transparent.



Exemple de codeur
incrémental à 16 positions

Si les N secteurs sont régulièrement espacés sur le pourtour du disque, alors la détection d'une impulsion électrique correspond à un déplacement angulaire θ tel que : $\theta = 360^\circ / N$. Ce plus petit déplacement mesurable correspond à la **résolution** du capteur. On dit aussi qu'il s'agit d'un capteur à N positions.

Si on compte n impulsions électriques, c'est à dire un déplacement de n pas, alors le déplacement angulaire θ est tel que : $\theta = 360^\circ \cdot n / N$

Ce comptage se fait en incrémentant un compteur, d'où le nom de **codeur incrémental**.

Une impulsion "top tour" permet de compter les tours à partir d'une position angulaire connue. Une **prise d'origine** est généralement nécessaire pour initialiser ce comptage des tours.

De plus, si le disque change de sens de rotation il faut non plus compter mais **décompter** les impulsions.

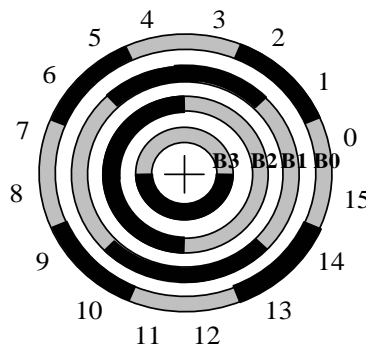
Pour déterminer le sens de rotation on utilise une autre piste identique à la piste principale mais **décalée d'un quart de pas**. Sur l'exemple ci-dessus, cette piste est appelé *Piste d'indication du sens*.

Le traitement électronique des deux signaux logiques obtenus permet d'en déduire une **information logique** sur le sens de rotation.

b) Codeurs absolus

Les **codeurs absolus** utilisent un principe comparable mais fournissent un signal *numérique codé en binaire sur N bits*.

À chaque bit correspond une *piste* de manière que la lecture de toutes les pistes **en parallèle** donne un mot binaire image de la **position angulaire** du disque.



Exemple de codeur absolu à 16 positions (code Gray)

Le code utilisé pour représenter les positions n'est généralement pas le binaire naturel mais le **code Gray** (ou binaire réfléchi).

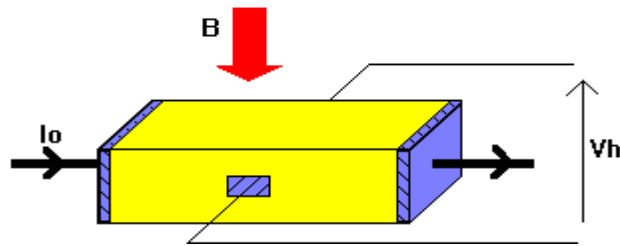
Ce code permet de n'avoir qu'un seul bit qui commute à la fois (et donc d'éviter toute lecture erronée durant la commutation).

La **résolution** de ce type de capteur est de $360^\circ / 2N$, on dit aussi qu'il s'agit d'un capteur à $2N$ positions.

Un disque est divisé en pistes. Chaque piste comporte une alternance de secteurs réfléchissants et absorbants. Comme pour le codeur incrémental, un émetteur-récepteur par piste fournit les informations. Le nombre de pistes fixe le nombre de positions discrètes pouvant être définies: 1 piste = 2 positions, 2 pistes = 4 positions, 3 pistes = 8 positions... n pistes = 2^n positions.

Son principal avantage est qu'il donne une information de position absolue, alors que le codeur incrémental donne la position relative (par rapport à une position initiale variable). En revanche, il est plus complexe, du fait qu'une grande précision de position dépend du nombre de pistes (alors que la précision d'un codeur incrémental dépend seulement du nombre de graduations sur la piste).

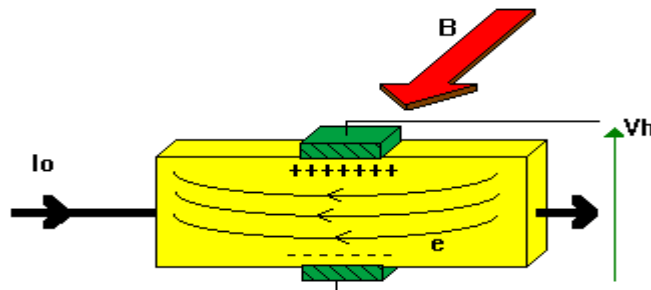
IX. Les capteurs à effet Hall :



Si un courant I_0 traverse un barreau en matériau conducteur ou semi-conducteur, et si un champ magnétique d'induction B est appliqué perpendiculairement au sens de passage du courant, une tension V_h , proportionnelle au champ magnétique et au courant I_0 , apparaît sur les faces latérales du barreau. C'est la tension de Hall (du nom de celui qui remarqua le phénomène en 1879).

$V_h = K_h * B * I_0$ avec K_h : constante de Hall, qui dépend du matériau utilisé.

Cause de l'effet Hall :



Les électrons sont déviés par le champ magnétique, créant une différence de potentiel appelée tension de Hall.

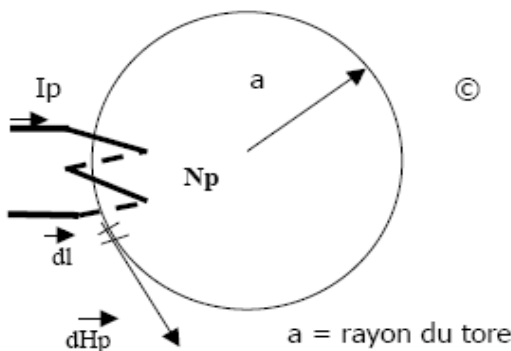
Application à la mesure avec isolation galvanique :

Ce Type de capteur de courant à effet Hall, exploite le principe de la compensation des At au primaire et au secondaire. (Capteur de courant à flux nul).

On insère ds l'entrefer d'un CM torique, une sonde de courant à effet Hall.

Le CM par analogie avec un transfo de courant, est constitué :

- d'une bobine secondaire de N_s spires (fils fins de l'enroulement de compensation).
- D'un bobinage primaire de N_p spires (gros fils) dans lequel circule le courant $i_1(t)$ à mesurer. Ce courant à travers les n_p spires va créer un champ H_p le long du tore.



Théorème d'Ampères :

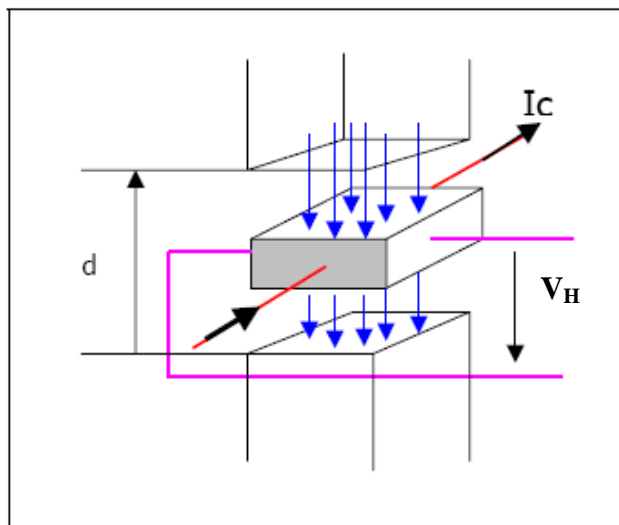
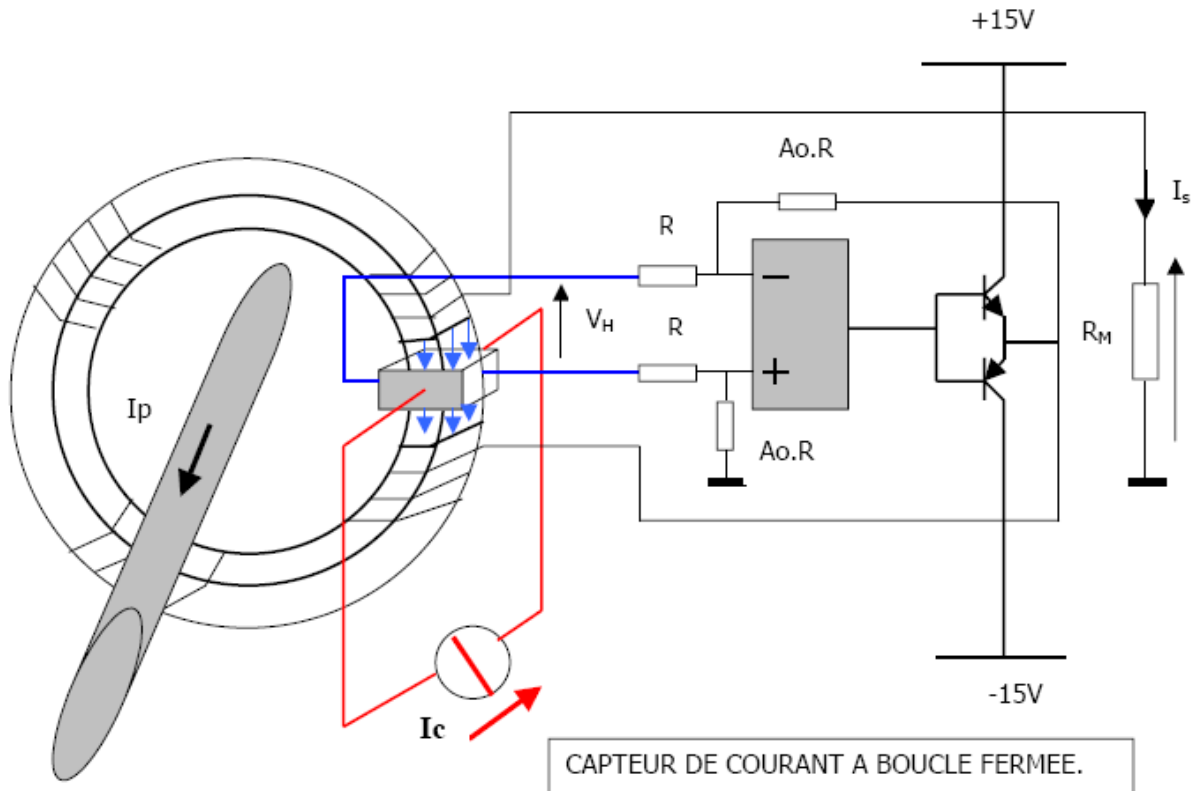
$$N_p \cdot I_p = \int_{J \odot} H_p \cdot dl$$

$$N_p \cdot I_p = H_p \cdot \int_{J \odot} dl = H_p \cdot 2\pi \cdot a$$

$$H_p = N_p \cdot I_p / 2\pi \cdot a$$

Ce champ H_p crée ds l'entrefer une induction radiale $B_{pe} = \mu_0 \cdot H_p$

$$B_{pe} = \mu_0 \cdot N_p \cdot I_p / 2\pi \cdot a$$



Dans ces conditions de polarisation par le courant de cde I_c et de l'induction B_{pe} , il apparaît aux bornes du capteur de Hall une tension V_H soit :

$$V_H = R_H \cdot I_c \cdot B_{pe} / d$$

$$V_H = R_H \cdot I_c \cdot \mu_0 \cdot N_p \cdot I_p / 2\pi \cdot a \cdot d$$

En posant :

$$K_H = R_H \cdot \mu_0 \cdot N_p \cdot I_c / 2\pi \cdot a \cdot d = C^{te}$$

$$V_H = K_H \cdot I_p$$

V_H est l'image de $I_p(t)$ à K_H près.

La tension V_H issue du générateur de Hall est faible et doit-être amplifiée.

La tension de Hall V_H est ensuite appliquée à l'entrée d'un AOP différentiel, constitué d'un AOP et d'un étage Push - Pull.

Cet amplificateur différentiel, globalement a un très fort gain en tension. $A_v = s / V_H$

L'amplificateur débite alors un courant I_s à travers l'enroulement secondaire de N_s spires en fils fins dit de compensation. Dans les N_s spires, le courant I_s va créer un champ H_s égale à H_p tel que le flux résultant soit nul dans le tore. Capteur de courant à flux nul.

$$N_p \cdot I_p = N_s \cdot I_s \text{ (compensation des } A_t \text{)}$$

D'où $I_s = N_p \cdot I_p / N_s = m \cdot I_p$ I_s dépend donc de m et de I_p ; $m = N_p / N_s$