

Sommaire

1. Notions fondamentales de la mesure.....	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Métrologie.....	1
1.2.1 Définition.....	1
1.2.2 Quelques termes de métrologie	1
1.2.3 Les types d'erreurs classiques.....	2
2. Généralités sur les capteurs.....	3
2.1 Définition d'un Capteur	3
2.4 Caractéristiques métrologiques d'un capteur.....	4
2.2 Constitution d'un capteur.....	6
2.3 Grandeur d'influence.....	7
3. Classification des capteurs.....	7
4. Les Capteurs de température.....	11
4.1 Les capteurs de température à résistance.....	11
4.2 Les Thermistances.....	11
4.3 Thermocouples.....	12
5. Capteurs de proximité inductifs ou magnétiques.....	13
5.1 Le détecteur de proximité inductif (D.P.I.).....	13
5.2 Le détecteur de Proximité Capacitifs D.P.C.....	13
6. Capteurs de proximité opto-électronique (ou photo électrique).....	14
7. Les Capteurs de Vitesse.....	15

1. Notions fondamentales de la mesure

1.1 Introduction

La mesure est un processus de connaissance qui grâce à l'expérience physique nous donne une information quantitative (valeur) du rapport entre la grandeur mesurable et une grandeur de même nature prise comme unité.

1.2 Métrologie

1.2.1 Définition

La métrologie au sens étymologique du terme se traduit par Science de la mesure. Dans le langage courant des « métrologues », on entend souvent dire mesurer c'est comparer !

Les résultats des mesures servent à prendre des décisions :

- Acceptation d'un produit (mesure des caractéristiques, des 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,
- Définition des conditions de sécurité d'un produit ou d'un système.

Un résultat de mesure est écrit sous la forme : $X = \{X\} [X]$

Où X est le nom de la grandeur physique, [X] représente l'unité et {X} est la valeur numérique de la grandeur exprimée dans l'unité choisie.

1.2.2 Quelques termes de métrologie

- **Grandeur (mesurable) :** définie comme attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, qui est susceptible d'être distinguée qualitativement et déterminée quantitativement
- **Unité de mesure :** c'est une grandeur particulière, définie et adoptée par convention, à laquelle on compare les autres grandeurs de même nature pour les exprimer quantitativement.
- **Mesurage :** c'est l'ensemble des opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.
- **Mesurande :** grandeur particulière soumise à mesurage.
- **Bruit de fond :** C'est une variation parasite, souvent aléatoire, du signal de sortie, dont la valeur moyenne est nulle et qui vient se superposer à la valeur à mesurer.

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 : $x-dx < X < x+dx$

Exemple : 3 cm \pm 10%, ou 3 cm \pm 3 mm.

- **Erreur absolue (e) :** Résultat d'un mesurage moins la valeur vraie du mesurande. Une erreur absolue s'exprime dans l'unité de la mesure.

$$e = x - X$$

Exemple : Une erreur de 10 cm sur une mesure de distance.

- **Erreur relative (er) :** Rapport de l'erreur de mesure à une valeur vraie de mesurande.

Une erreur relative s'exprime généralement en pourcentage de la grandeur mesurée.

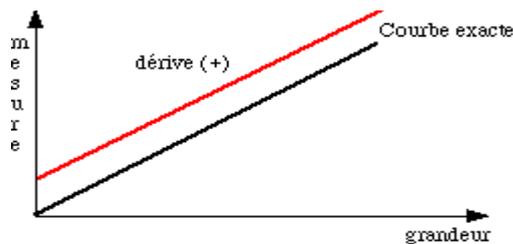
$$er = e/X ; er\% = 100 er$$

Exemple : Une erreur de 10 % sur une mesure de distance (10 % de la distance réelle).

- **Étalon de mesure :** en métrologie, un étalon est un dispositif auquel on doit se fier pour contrôler l'exactitude des résultats fournis par un appareil de mesure.

1.2.3 Les types d'erreurs classiques

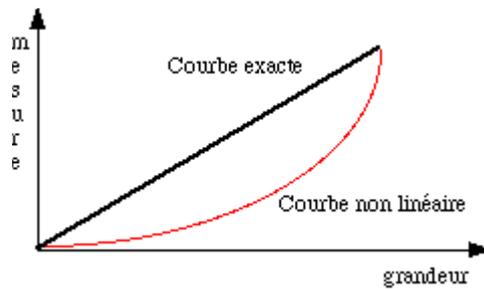
- **L'erreur de zéro (offset) :**



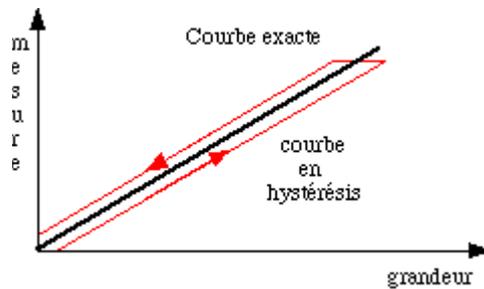
- **L'erreur d'échelle (gain) :** C'est une erreur qui dépend de façon linéaire de la grandeur mesurée.



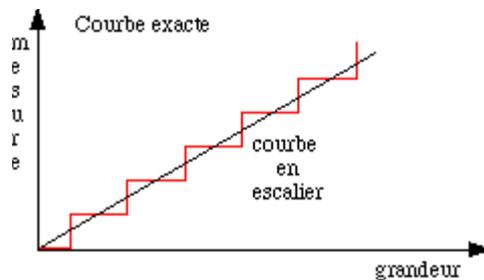
- **L'erreur de linéarité** : La caractéristique n'est pas une droite



- **L'erreur due au phénomène d'hystérésis** : Il y a phénomène d'hystérésis lorsque le résultat de la mesure dépend de la précédente mesure



- **L'erreur de quantification** : La caractéristique est en escalier, cette erreur est souvent due à une numérisation du signal.



2. Généralités sur les capteurs

2.1 Définition d'un Capteur : c'est un dispositif qui transforme une grandeur physique d'entrée, appelée mesurande [m], en une grandeur de nature électrique (en général) appelée réponse ou grandeur de sortie [s].



- **Mesurande** : température, force, vitesse, déplacement, ... c'est tout simplement la grandeur qu'on cherche à mesurer.

- **Grandeur de sortie** : elle est généralement de type électrique. Elle peut être soit : une charge, une tension, un courant ou une impédance (R, L, C).

La grandeur de sortie est donc un signal électrique qui pourrait être de type analogique ou numérique

- **Exemple** : capteur de pression à jauges de contraintes

mesurande : pression

réponse : tension

2.4 Caractéristiques métrologiques d'un capteur

De manière à classer les capteurs en fonction de leurs performances, on est amené à définir des paramètres qui permettent de les sélectionner en fonction de l'application.

Chaque capteur (ou élément de mesure) présente certaines caractéristiques métrologiques qui définissent ses limites d'utilisation et de précision. Ces limites dépendent non seulement du mesurande, mais aussi des grandeurs d'influence qui viennent perturber l'élément de mesure.

- **Etendue de mesure**

Domaine de mesure pour lequel les indications du capteur ne doivent pas être entachées d'une erreur supérieure à l'erreur maximale tolérée. On appelle les valeurs limites du domaine, « portée minimale » et « portée maximale ».

- **Sensibilité**

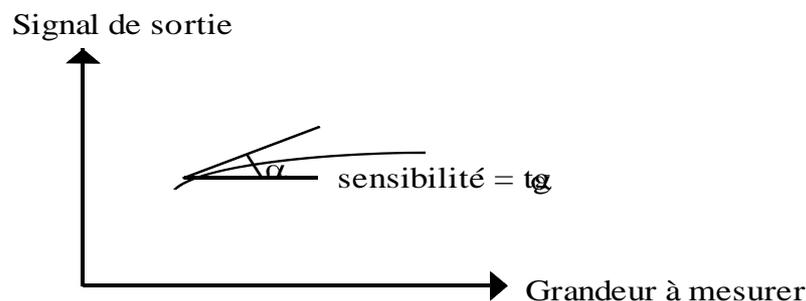
C'est le rapport de la variation du signal de sortie à la variation correspondante de la grandeur à mesurer.

C'est à dire à la pente de la courbe de réponse du capteur pour une valeur donnée :

$$S = ds/de$$

ds : variation de sortie

de : variation de l'entrée



- **Précision**

C'est l'aptitude du capteur à donner des indications proche de la valeur vraie de la grandeur mesurée.

- **Fidélité et justesse**

La **justesse** est la qualité d'un capteur à fournir des indications précises.

La **fidélité** est la qualité d'un capteur à fournir des indications identiques pour une même valeur de la grandeur à mesurer.

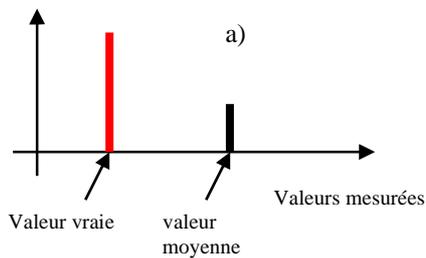
a : capteur ni fidèle, ni juste (erreurs et incertitudes de mesure importantes)

b : capteur fidèle mais non juste

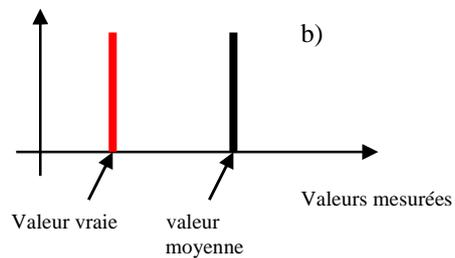
c : capteur juste mais non fidèle

d : capteur juste et fidèle, donc précis (erreurs et incertitudes de mesure réduites)

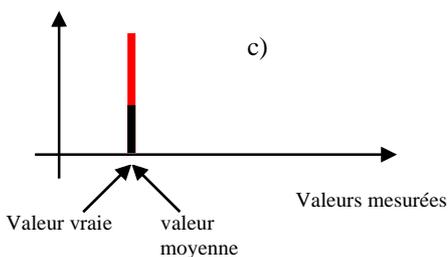
Répartition des mesures



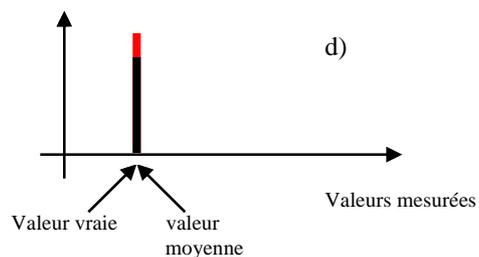
Répartition des mesures



Répartition des mesures



Répartition des mesures



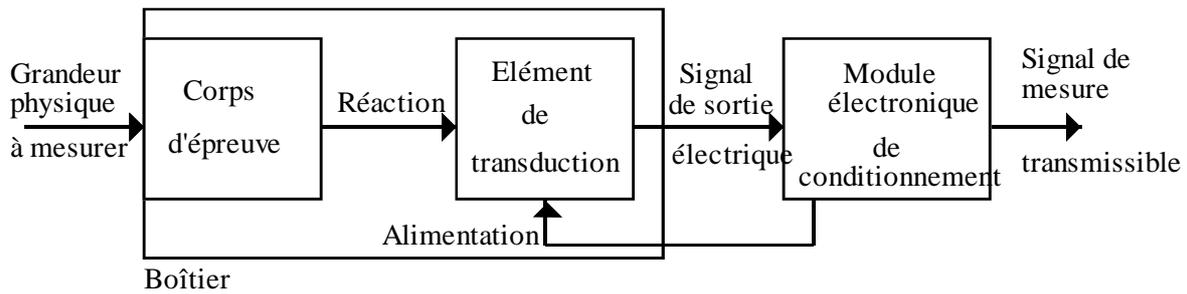
- **Rapidité**

C'est l'aptitude du capteur à suivre dans le temps les variations de la grandeur à mesurer. Il faut donc tenir compte du temps de réponse, de la bande passante et la fréquence de coupure du capteur.

- **Stabilité**

La stabilité qualifie la capacité d'un capteur à conserver ses performances pendant une longue durée (problème de dérive du zéro par exemple).

2.2 Constitution d'un capteur



- **Corps d'épreuve** : élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer (appelée aussi mesurande).

But : transformer la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dite mesurable.

- **Élément de transduction** : élément sensible lié au corps d'épreuve. Il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie.

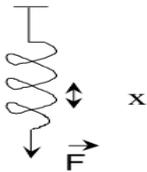
- **Boîtier** : élément mécanique de protection, de maintien et de fixation du capteur.

- **Module électronique de fonctionnement** : il a, selon les cas, les fonctions suivantes :

- alimentation électrique du capteur (si nécessaire)
- mise en forme et amplification du signal de sortie
- filtrage, amplification
- conversion du signal (CAN,...)

• Exemples

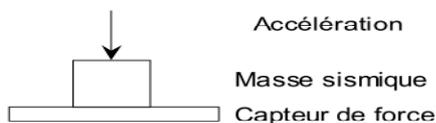
Mesure d'une force à partir d'un capteur de déplacement



Corps d'épreuve : ressort
 Force : Mesurande primaire
 Elongation : Mesurande secondaire

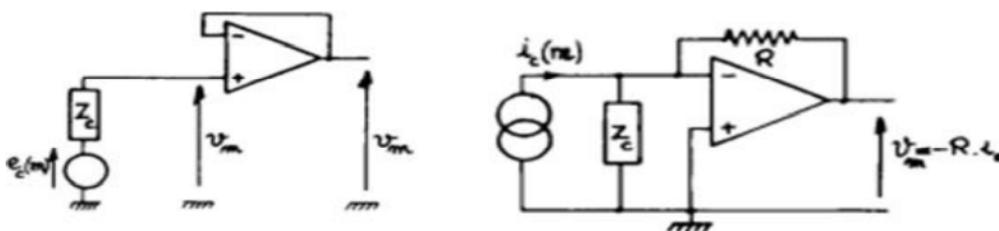
• Exemples

Mesure d'une accélération à partir d'un capteur de force



Corps d'épreuve : masse sismique
 accélération : Mesurande primaire
 Force : Mesurande secondaire

• Exemples des Conditionneurs



2.3 Grandeur d'influence

Les grandeurs d'influence sont des grandeurs étrangères qui, selon leur nature et leur im

agissant sur le signal de sortie. Les principales grandeurs d'influence sont :

- la température qui modifie les caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur ;
- La pression, l'accélération et les vibrations susceptibles de créer dans certains éléments constitutifs du capteur des déformations et des contraintes qui altèrent la réponse ;
- L'humidité à laquelle certaines propriétés électriques comme la constante diélectrique ou la résistivité peuvent être sensibles et qui risque de dégrader l'isolation électrique entre composants du capteur ou entre le capteur et son environnement ;
- Les champs magnétiques variables ou statiques ; les premiers créent des f.é.m. d'induction qui se superposent au signal utile, les seconds peuvent modifier une propriété électrique ;
- Tension d'alimentation : lorsque la grandeur de sortie du capteur dépend de celle-ci directement (amplitude ou fréquence)

3.3 Classification des capteurs

La classification se fait par :

1^{er} - de leur principe de fonctionnement :

2^{ème} - la mesurande qu'ils traduisent (capteur de température, de pression, ...)

3^{ème} - du signal qu'ils fournissent (capteur analogique, capteur logique, capteurs digitaux)

3.3.1 Première Classification

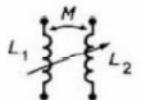
On classe les capteurs en deux grandes familles en fonction de la caractéristique électrique de la grandeur de sortie. On distingue

- Capteurs passifs

Le capteur se comporte en sortie comme un dipôle passif qui peut être résistif, capacitif ou inductif. Le tableau ci-dessous résume, en fonction du mesurande, les effets utilisés pour réaliser la mesure.

Mesurande	Effet utilisé (grandeur de sortie)	Matériaux
Température	Résistivité	Platine, Nickel, cuivre, semi-conducteurs.
Très basse température	Cste diélectrique	Verre.
Flux optique	Résistivité	semi-conducteurs
Déformation	Résistivité Permiabilité	Alliages nickel Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Magnétorésistances: Bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

Le tableau ci-contre montre les transformations possibles qu'offrent ces grandeurs.

Grandeur de traduction	Transformations possibles
	Résistance R : $R = f(\rho, \ell, s)$ ρ résistivité, ℓ longueur, s section
	Capacité C : $C = f(S, e, \epsilon)$ S surface des armatures, e distance entre armatures, ϵ permittivité
	Inductance L : $L = f(\ell, S, \mu, n)$ ℓ longueur, S surface d'une spire, n nombre de spires, μ perméabilité
	Inductance mutuelle : $M = f(L_1, L_2)$

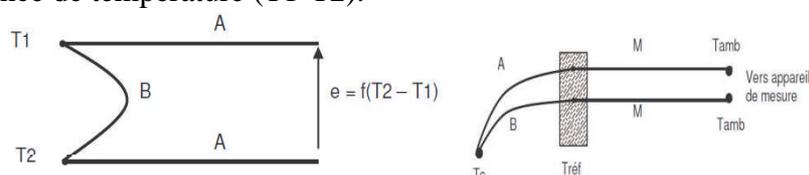
- Capteurs actifs :

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 au mesurande : énergie thermique, mécanique ou de rayonnement. Le tableau suivant présente les principes physiques de base des capteurs actifs :

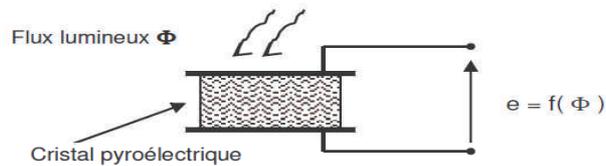
Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Pyroélectricité Photoémission Effet photovoltaïque Effet photoélectromagnétique	Charge Courant Tension Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

Précision sur les effets utilisés :

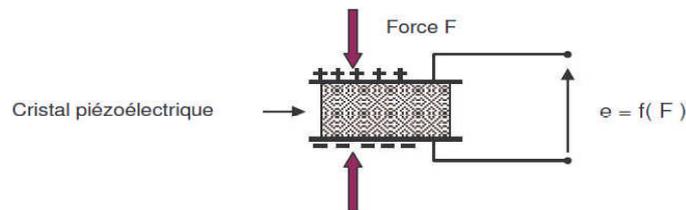
a. **Thermoélectricité** : c'est le principe de tout thermocouple. C'est un circuit constitué de deux conducteurs de nature chimique différente et dont les jonctions sont à des températures différentes T_1 et T_2 . Il apparaît aux bornes de ce circuit une tension (force électromotrice) liée à la différence de température ($T_1 - T_2$).



b. **Pyroélectricité** : certains cristaux présentent une polarisation électrique proportionnelle à leur température. Ainsi, en absorbant un flux de rayonnement, le cristal pyroélectrique va s'échauffer et ainsi sa polarisation va se modifier entraînant une variation de tension détectable.



c. **Piézoélectricité** : l'application d'une force sur ce type de matériau engendre l'apparition de charges électriques créées par la déformation du matériau. C'est un phénomène réversible.



d. **Induction** : la variation d'un flux magnétique engendre l'apparition d'une force électromotrice.

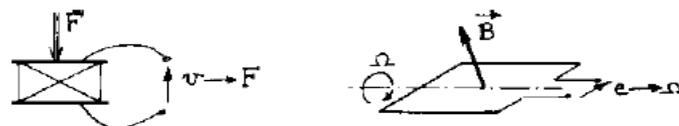
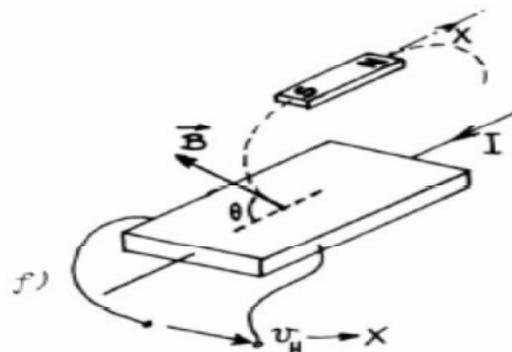


Figure 4 :Piézoélectricité et induction

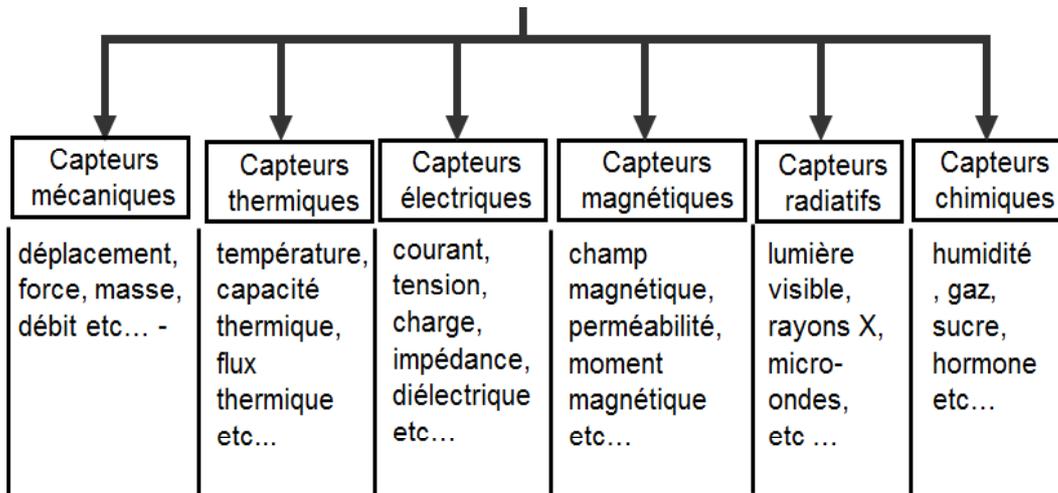
e. **Photoélectricité** : sous l'influence d'un rayonnement lumineux, le matériau libère des charges électriques et celles-ci en fonction du rayonnement.

f. **Effet Hall** : un semi-conducteur de type parallélépipède rectangle, placé dans une induction B et parcouru par un courant I , voit l'apparition, dans la direction perpendiculaire au courant et à l'induction, d'une différence de potentiel qui a pour expression : $V_H = K_H \cdot I \cdot B \cdot \sin \theta$; où K_H dépend du matériau et des dimensions de la plaquette.



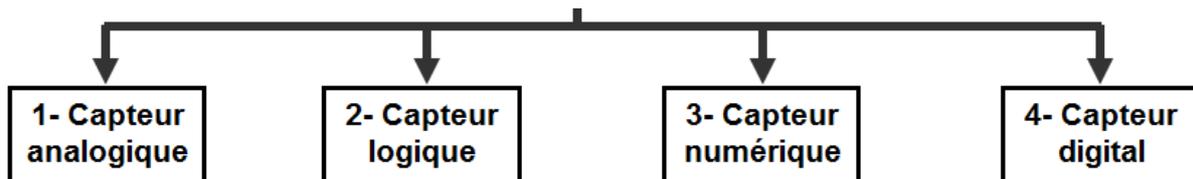
3.3.2 Deuxième classification

Classement en fonction du type de grandeurs physiques à mesurer (mesurande)



3.3.3 Troisième classification

Classement en fonction du type du signal de sortie du capteur



1- Catégorie la plus répandue. Ils fournissent un signal analogique en fonction d'une grandeur physique, électrique, mécanique,...

2- Ils présentent 2 états (0 et 1) dont le modèle est le contact ouvert ou fermé (fin de course, capteur de niveau...). Appelée «key sensor» en anglais.

3- Fournissent un signal fréquentiel, c'est à dire un certain nombre d'impulsions par unité de temps (n) en fonction de la grandeur mesurée (E). Le capteur type de cette catégorie est le tachymètre à optocoupleur. Facilement incorporable dans une chaîne de mesure et ne nécessitent qu'une électronique associée réduite.

Interviennent dans les éléments de sécurité.

4- Dispositifs donnant directement des informations binaires combinatoires. Les codeurs optiques sont l'exemple parfait. Ils sont intéressants car c'est des dispositifs qui peuvent être directement couplés au système informatique sans la nécessité d'amplification ni de CAN. Peut être influencé par les bruits extérieurs.

4. Les Capteurs de température

Il existe deux grandes familles de capteurs utilisés quotidiennement dans l'industrie pour la mesure des températures les couples thermoélectriques, dits **thermocouples** et les capteurs de température à résistances dits **Pt 100** ou sondes platine, les thermistances.

4.1 Les capteurs de température à résistance.

Les capteurs de température à résistance fonctionnent sur le principe de la détection des variations de résistance électrique des métaux purs : leur résistance varie de façon linéaire avec la température. Les éléments types utilisés pour réaliser ces capteurs 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.

Très connus pour leur stabilité, les capteurs de température à résistance présentent le signal le plus linéaire de tous les capteurs électroniques en matière de température, mais ils sont généralement plus onéreux que leurs équivalents à cause de leur construction plus délicate et du platine qu'ils contiennent. Les capteurs de température à résistance se caractérisent aussi par un temps de réponse élevé et par une faible sensibilité. En outre, ils nécessitent une excitation en courant et sont sujets à l'auto-échauffement.

Les sondes capteurs de température à résistance sont habituellement classées par résistance nominale à 0°C. Les valeurs de résistance nominale typiques pour les capteurs de température à résistance à film métallique en platine sont 100 Ω et 1 000 Ω . La relation entre résistance et température est presque linéaire.



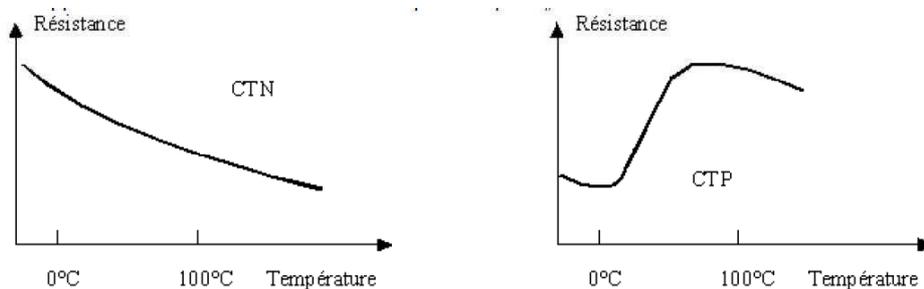
Sonde PT 100

4.2 Les 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*.



4.3 Thermocouples

En physique, les thermocouples sont utilisés pour la mesure de températures. Ils sont bon marché et permettent la mesure dans une grande gamme de températures. Leur principal défaut est leur précision :

il est relativement difficile d'obtenir des mesures avec une erreur inférieure à 0,1-0,2 °C. La mesure de température par des thermocouples est basée sur l'effet Seebeck.

- Différents types de thermocouples

- Type J

Composition : Fer / Constantan (alliage nickel+cuivre)

Fonctionne bien dans le vide et dans une plage de température de 0 à 750°C.

- Type K

Composition : Chromel (alliage nickel + chrome) / Alumel (alliage nickel + aluminium (5%) + silicium)

Il permet une mesure dans une gamme de température large : -200 °C à 1250°C.

- Type T

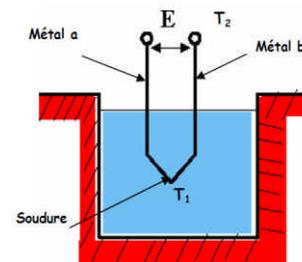
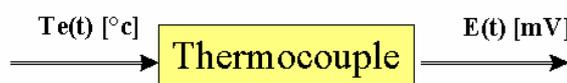
Composition : Cuivre / Constantan (alliage cuivre + nickel)

Ce thermocouple est particulièrement adapté pour une utilisation à basse température (-200 à 350°C) comme pour des applications cryogéniques

- Principe de mesure

Les deux métaux a et b, de natures différentes, sont reliés par deux jonctions (formant ainsi un thermocouple) aux températures T1 et T2.

Par effet Seebeck, le thermocouple génère une différence de potentiel qui dépend de la différence de température entre les jonctions, $E = T_1 - T_2$.



Pour mesurer une température inconnue, l'une des deux jonctions doit être maintenue à une température connue, par exemple celle de la glace fondante (0 °C). Il est également possible que cette température de référence soit mesurée par un capteur (température ambiante, par exemple). La mesure de température est donc une mesure indirecte, puisque les thermocouples mesurent en fait une différence de potentiel électrique.

5. Capteurs de proximité inductifs ou magnétiques

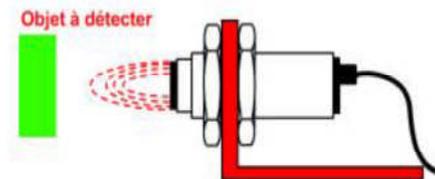
5.1 Le détecteur de proximité inductif (D.P.I)

Ce type de capteur permet de détecter sans contact tous les matériaux conducteurs d'électricité.

L'approche d'un matériau conducteur devant la face sensible du capteur provoque la rupture du champ magnétique, ce qui engendre la commutation de l'information électrique envoyée vers la partie commande.

Capteur de proximité inductif

D.P.I



5.2 Le détecteur de Proximité Capacitifs (D.P.C)

Ils permettent de détecter la présence sans contact physique et à faible distance de tous types d'objets. C'est la grande différence avec le capteur inductif qui ne peut détecter que des matériaux conducteurs de courant.

D'une mise en œuvre très simple, ils sont principalement utilisés pour le contrôle de remplissage de liquides dans des flacons ou des cuves.

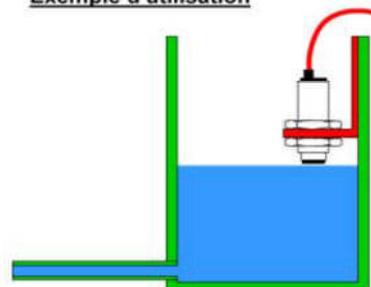
Son principe de fonctionnement est voisin de celui du détecteur inductif. Il produit contrairement au capteur inductif, un champ électrique qui est modifié à l'approche d'un objet quelconque.

Cette modification est détectée et transmise à l'unité de traitement.

Capteur de proximité capacitif



Exemple d'utilisation



- **Avantages :**

Pas de contact physique avec l'objet détecté.

Pas d'usure ; possibilité de détecter des objets fragiles, fraîchement peints...

Détecteur statique, pas de pièces en mouvement.

Durée de vie indépendante du nombre de manoeuvres.

Produit entièrement encapsulé dans la résine.

Très bonne tenue à l'environnement industriel : atmosphère polluante

- **Inconvénients :** ils sont assez chers mais très fiables

6. Capteurs de proximité opto-électronique (ou photo électrique)

- La cellule photoélectrique

Les cellules photoélectriques permettent de détecter sans contact tous les matériaux opaques (non transparents), conducteurs d'électricité ou non. Le signal de sortie est électrique.

Les différents types de montage des cellules photoélectriques sont les suivants :

- Type barrage

Ici le signal est envoyé lorsque le faisceau est coupé par l'objet à détecter.

- Type reflex

On dispose un émetteur récepteur et un réflecteur. Lorsque l'objet coupe le faisceau, celui-ci n'est plus renvoyé vers le récepteur. Cela déclenche le signal de sortie.

- Type reflex

On dispose un émetteur récepteur et un réflecteur. Lorsque l'objet coupe le faisceau, celui-ci n'est plus renvoyé vers le récepteur. Cela déclenche le signal de sortie.

Type reflex direct

Ici, c'est l'objet qui fait office de réflecteur. Lorsque l'objet passe devant le faisceau, celui-ci est renvoyé vers l'émetteur-récepteur qui va émettre un signal de sortie.

- Avantages :

Pas de contact physique avec l'objet détecté.

Pas d'usure ; possibilité de détecter des objets fragiles, fraîchement peints...

Détecteur statique, pas de pièces en mouvement.

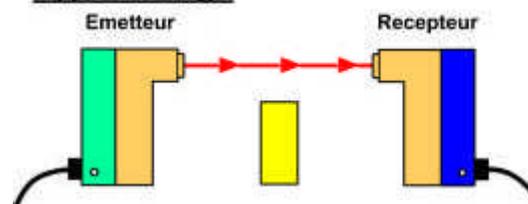
Durée de vie indépendante du nombre de manoeuvres.

- **Inconvénients** : Sensibles à la poussière et aux perturbations.

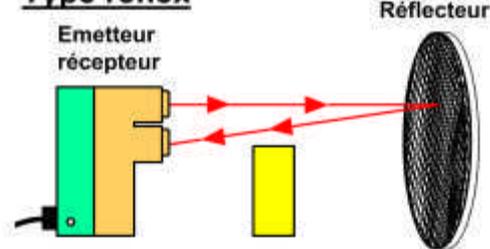
Capteur à effet photoélectrique



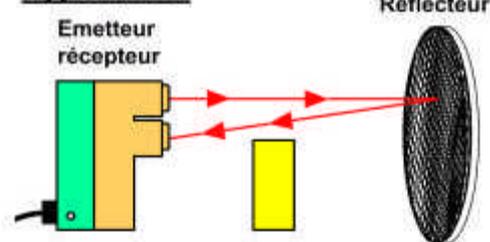
Type barrage



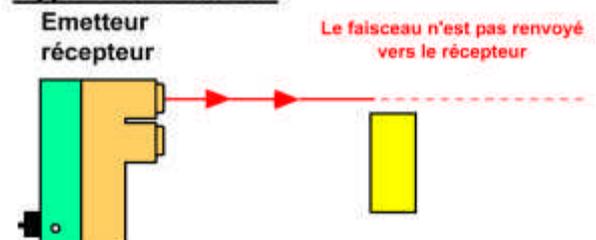
Type reflex



Type reflex



Type reflex direct



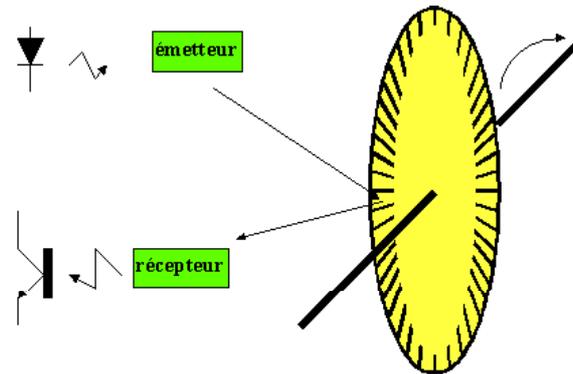
7. Les Capteurs de Vitesse

-Tachymétrie (génératrice tachymétrie)

Elle délivre une tension proportionnelle à sa vitesse de rotation. Son principal domaine d'application se situe dans la régulation de vitesse d'un moteur électrique.

-Codeur incrémental

Principe: une lumière émise par une diode électroluminescente est réfléchiée par les graduations d'un disque vers un phototransistor qui se sature et se bloque à la cadence du défilement des graduations.



Le codeur incrémental est surtout utilisé dans les systèmes dont le traitement de l'information est entièrement numérique. Ses impulsions sont comptabilisées de façon à donner une information concernant la position (nombre d'impulsions délivrées depuis une position d'origine) ou /et une information concernant la vitesse (nombre d'impulsions par unité de temps). Dans ce dernier cas, il évite l'emploi d'une génératrice tachymétrique (il est cependant peu précis aux très basses fréquences de rotation).