

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Polycopié du Cours

Capteurs et Instrumentation de mesure

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique

Niveau : 3 ème année Licence

Réalisé par :

Dr. MOUATSI Abdelmalek

Maitre de conférences « A » à l'université de Boumerdes

Année Universitaire 2022-2023

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	01
-----------------------------	----

CHAPITRE I :

GENERALITES SUR LA MESURE

I.1 Introduction	02
I.2. Définition	02
I.3. Quelques termes de métrologie	02
I.3.1. Grandeur physique (mesurable)	02
I.3. 2. Unité de mesure	02
I.3.3. Mesurage	02
I.3.4. Mesurande	03
I.4. L'incertitude de mesure (Δx)	03
I.5. Les Erreurs de Mesure	03
I.6. Les Différentes Erreurs Possibles	03
I.6.1. Les erreurs systématiques	03
I.6.2. Les Erreurs Aléatoires	03
I.6.3. Les Erreurs Accidentelles	04
I.7. Le Système International d'Unité (S.I)	04
I.8. Les Eléments Constitutifs d'une Chaîne de Mesure	05

CHAPITRE II

Caractéristiques Métrologiques Des Capteurs

II.1. Introduction	06
II.2. Définition Généralités sur les Capteurs :	06
II.2.1. le Capteur	06
II.2.2. Nature du Signal Fournie par le Capteur	07
II.2.2.1 Signal Analogique	07
II.2.2.2 Signal Numérique	07
II.2.3. Capteurs Composites (Corps d'Epreuve)	08
II.3. Différents Types de Grandeurs Physiques	09
II.4. Grandeur d'Influence	10
II.5. Les Caractéristiques des Capteurs	11

II.5.1. Les Caractéristiques Métrologiques	11
II.5.1.1 Etalonnage (Gamme de mesure)	11
II.5.1.2. La Courbe d'Etalonnage	11
II.5.1.3. Etendue de Mesure	11
II.5.1.4. La Sensibilité	13
II.5.1.5. Fidélité - Justesse – Précision	14
II.5.1.6. La Linéarité :	14
II.5.1.7. La Rapidité, Temps de réponse	15
II.5.1.8. La Bande Passante:	15
II.6. Les Différentes Types d'Erreurs Classiques	16
II.7. Traitement Statistique des Mesures	17
II.8. Critères de Choix d'un Capteur	19
II.9. Les Types des Capteurs	20
II.9.1. les Capteurs Actifs	20
II.9.2. Les Effets Utilisés dans les Capteurs Actifs	20
II.9.3. Les Capteurs Passifs	23

Chapitre III

Conditionneurs des capteurs passifs et actifs

III.1. Introduction	25
III.2. Conditionneur des Capteurs Passifs	25
III.2.1. Montage Potentiométrique	25
III.2.1.1. Fonctionnement en Petit Signaux	26
III.2.1.2. Seconde solution Montage Push-pull	27
III.2.2. Montage en Pont	30
III.2.2.1. Montage Quart de Pont, Un Capteur et Trois Résistances Fixes	30
III.2.2.2. Montage demi de pond, avec deux capteurs et deux résistances fixes	32
III.2.2.3. Montage Pond avec Deux Capteurs en Push-Pull.....	33
III.2.2.4. Montage pond entier avec quatre capteurs en push-pull	34
III.2.3. Les oscillateurs	34
III.3. Conditionneurs des Capteurs Actifs (Conditionneurs du Signal)	35
III.3.1. Adaptation d'Impédance	35
III.3.1.1. Cas d'un capteur source de tension	35
III.3.1.2. Cas d'un capteur source de courant	36

III.3.1.3. Cas d'un Capteur a Source de Charge	37
III.4. Utilisation des Amplificateurs Opérationnels	37
III.4.1. Cas d'un Capteur Source de Tension	37
III.4.2. Cas d'un Capteur Source de Courant	38
III.4.3. Cas d'un Capteur Source de Charge	39

CHAPITRE IV

QUELQUES EXEMPLES DES CAPTEURS INDUSTRIELLES

IV. 1. Capteurs de position/déplacement

IV.1.1. Définition	41
IV.1.2. Capteurs Potentiométriques de Déplacement Résistif	41
IV.1.2.1. Principe	41
IV.1.3. Les Capteurs Inductifs	43
IV.1.3.1. les Type des Capteurs Inductifs LVDT/RVDT	44
IV.1.3.2. Les Caractéristiques des Capteurs Inductifs	45
IV.1.4. Capteurs de Position Capacitive	45
IV.1.4.1. Principe	45
IV.1.4.2. Application	46
IV.1.5. Capteurs Ultrasonores	47
IV.1.5.1. Principe	47
IV.1.6. Capteurs de position optiques	48

IV. 2. Les capteurs d'efforts, force et pression

IV.2.1. Définition	49
IV.2.2. Les Capteurs de Force	49
IV.2.2.1. Capteurs a Jauges d'Extensomètre (ou de Contrainte)	49
IV.2.2.2. Capteurs à Effet Piézoélectrique	50
IV.2.3. les Capteurs de Pression	51
IV.2.3.1. Les Différentes Unités de Pression	52
IV.2.3.2 Mesure de la Pression	52
IV.2.3.3 Conversion par Jauges d'extensiométrie	52
IV.2.3.3. Autres Procédés	53
IV.2.4. Les différents types de pression	54
IV.2.4.1. La pression atmosphérique	54

IV.2.5.Pression pour les fluides (liquide et gaz)	55
IV.2.5.1. Pression hydrostatique	55
IV.2.5.2. Pression hydrodynamique	55
IV.2.6. Manomètres hydrostatiques	55
IV.2.6.1. Manomètre à tube en U	56
IV.2.6.2. Manomètres à déformation de solide	57

IV. 3. CAPTEURS DE TEMPERATURE

IV.3.1. Introduction	61
IV.3.2.Échelles des Températures	61
IV.3.3. Thermomètres A Dilatation	62
IV.3.4. Thermomètres Electriques	62
IV.3.4.1. Thermomètres a Résistance et a Thermistance	63
IV.3.4.1.1. Capteur De Température à Base d'une Résistance Métallique	63
IV.3.4.1.2. Thermomètres à Thermistance	64
IV.3.5.Capteurs de Température Electroniques	65
IV.3.5.1. Thermométrie par Diode et Transistor	65
a. Capteurs à variation Zéner (LM135)	66
IV.3.5.1. Capteurs Actifs, à Couple Thermoélectrique	67

IV. 4. Les Capteurs Optiques

IV.4.1. Définition	71
IV.4.2. Les Différents Types des Capteurs Optiques	71
IV.4.2.1. Photorésistance	71
IV.4.2.1. Photodiode	73
a- Principe de Fonctionnement	74
<u>b-Les Application</u>	75
IV.4.2.2. Phototransistor	75
IV.4.2.3. Cellules photovoltaïques	75
IV.4.2.4. Capteur d'Image CCD et CMOS	76
Bebliographie	78
Annexe.....	79

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La mesure devient donc un facteur essentiel de l'économie et rien ne se fera sans le **”capteur”** qui se trouve à la base de l'édifice ”Mesure”.

Nous tenons à souligné que l'objectif de ce cours est de permettre aux étudiants de la formation de License 3eme année électronique (L3 électronique), d'acquérir des notions générales concernant la métrologie, les différents types de paramètres (grandeurs physiques) inhérents aux systèmes électronique de mesure (comme par exemple : les paramètres météorologiques, les paramètres électriques), ainsi que les types de capteurs et procédés de mesures susceptibles d'être employés par les spécialistes dans la matière.

Ce support de cours peut s'adresser aux étudiants de 3eme année License spécialité Electronique car le contenu de ce polycopié est conforme au programme de la matière «Capteurs en instrumentation industrielle»

L'objectif de ce cours est l'étude de la chaîne de mesure, de l'électronique associée ainsi que les différents types de capteurs.

Dans un premier temps, ce cours aborde d'une façon approfondie les nécessaires définitions du capteur, de ses caractéristiques métrologiques, des différents types de capteurs et des éléments constituant.

Une partie de ce document est consacrée à l'étude de plusieurs montages permettant de ”conditionner” la grandeur de mesure en un signal de mesure exploitable par l'homme ou la machine. Enfin, nous terminons ce cours par une brève présentation de quelques capteurs utilisés en industries.

CHAPITRE I :
GENERALITES SUR LA MESURE

CHAPITRE I :

GENERALITES SUR LA MESURE

I.1 Introduction

« La science commence là où commence la mesure » ; cela signifie que nous n'avons pas de science sans mesure. 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.

I.2. Définition

La mesure C'est l'évaluation d'une grandeur par comparaison avec une autre grandeur de même nature prise pour unité. 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 :

$$\mathbf{G} = \{\text{val}\} [\text{unit}] \quad (\text{I.1})$$

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

Exemple : L=2 mètres, t=6 secondes.

I.3. Quelques termes de métrologie

I.3.1. Grandeur physique (mesurable) : définie comme attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, qui est susceptible d'être distinguée qualitativement et déterminée quantitativement

Exemple : pression, température, niveau.

I.3. 2. 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.

I.3.3. Mesurage : c'est l'ensemble des opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.

I.3.4. Mesurande : grandeur particulière soumise à mesurage.

I.4. L'incertitude de mesure (Δx) :

Le résultat de la mesure x d'une grandeur G n'est pas complètement défini par un seul nombre.

Il faut au moins la caractériser par un couple $(G, \Delta x)$ et une unité de mesure.

Δx est l'incertitude sur la mesure x . Les incertitudes proviennent des différentes erreurs liées à la mesure. Ainsi, on a :

$$G - \Delta x < G < G + \Delta x$$

Exemple : 3 cm $\pm$ 10%, ou 3 cm $\pm$ 1 mm.

I.5. Les Erreurs de Mesure :

Erreur de mesure c'est la différence entre le résultat de la mesure $m(G)$ et la vraie valeur G (inconnue en général) de la grandeur à mesurer. On peut l'exprimer en relatif ou en absolue

Erreur absolue : $\varepsilon = G - m(G)$ (même unité que G)

Erreur relative : $\varepsilon_r = \frac{G - m(G)}{G} (\%)$

I.6. Les Différentes Erreurs Possibles :

Les erreurs de mesure ont des causes systématiques que l'expérimentateur peut corriger ou non. Ces erreurs ont des causes clairement identifiées et prévisibles. Parmi ces erreurs, on trouve les erreurs systématiques, les erreurs accidentelles et les erreurs aléatoires.

I.6.1. Les erreurs systématiques :

Ce sont des erreurs reproductibles reliées à leur cause par une loi physique, donc susceptible d'être éliminées par des corrections convenables.

Exemple ;

Pour un instrument de mesure, c'est l'erreur d'étalonnage (biais), il s'agit d'erreurs reproductibles.

I.6.2. Les Erreurs Aléatoires :

Ce sont des erreurs, non reproductibles, qui obéissent à des lois statistiques.

Exemples d'erreurs aléatoires

- Erreurs dues aux appareils de mesure (seuil de mesure, résolution...)
- Erreurs dues aux conditions extérieures (température, pression, ...)

- Erreurs de lecture
- Parasite

I.6.3. Les Erreurs Accidentelles :

Elles résultent d'une fausse manœuvre, d'un mauvais emploi ou de dysfonctionnement de l'appareil. Elles ne sont généralement pas prises en compte dans la détermination de la mesure.

I.7. Le Système International d'Unité (S.I) :

Le Système International d'Unités a pour objet une meilleure uniformité, donc une meilleure compréhension mutuelle dans l'usage général. Cependant, dans quelques domaines spécialisés, en particulier physique théorique, il peut exister des raisons sérieuses justifiant l'emploi d'autres systèmes ou d'autres unités. Quelles que soient ces unités, il est important de respecter les symboles et leur représentation conformes aux recommandations internationales en vigueur. Le système SI est un système cohérent d'unités qui comporte sept unités de base. Le tableau ci-dessous donne ces unités de base (Tableau I.1).

Grandeur		Unité	
Nom	Symbole	Nom	Symbole
Unités de base			
Longueur	l	mètre	m
Masse	m	kilogramme	kg
Temps	t	seconde	s
Courant électrique	i	ampère	A
Température	T	kelvin	K
Quantité de matière		mole	mol
Intensité lumineuse	I	candela	cd

Tableau I.1 : Unité de bases du système international SI

I.8. Les Eléments Constitutifs d'une Chaîne de Mesure :

Généralement, la grandeur à mesurer, appelée mesurande, n'est pas accessible directement et les méthodes de mesure mises en œuvre font appel à différentes lois physiques et propriétés des matériaux. Une chaîne de mesure est généralement constituée des éléments schématisés sur la figure (I.1) suivante :

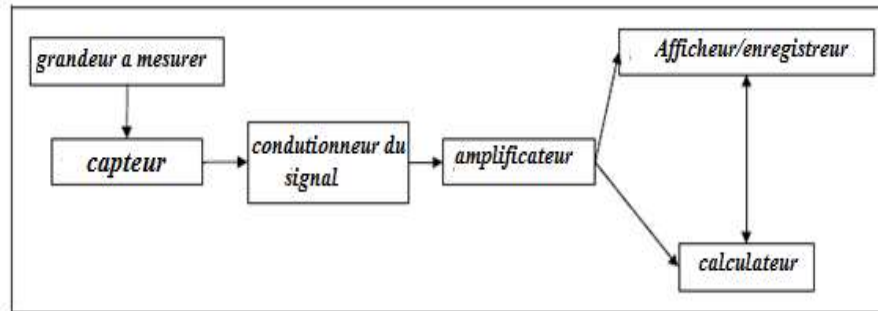


Figure I.1 : Schéma type d'une chaîne de mesure

- **Un capteur** : nous appellerons capteur la partie de la chaîne de mesure en contact avec le milieu où s'effectue le mesurage, et transmetteur le reste des éléments de la chaîne de mesure.
- **Un conditionneur** de signaux dont le rôle principal est l'amplification du signal délivré pour lui donner un niveau compatible avec l'unité de visualisation ou d'utilisation ; cet étage peut parfois intégrer un filtre qui réduit les perturbations présentes sur le signal.
- **Une unité de visualisation** et/ou d'utilisation qui permet de lire la valeur de la grandeur et/ou de l'exploiter dans le cas d'un asservissement, par exemple.

Cette structure de base se rencontre dans toutes les chaînes de mesure quelle que soit leur complexité et leur nature.

CHAPITRE II
CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES DES
CAPTEURS

CHAPITRE II

CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES DES CAPTEURS

II.1. Introduction :

Le domaine industriel a besoin de contrôler de très nombreux paramètres physiques (longueur, force, poids, pression, déplacement, vitesse, température, luminosité, ...).

A chacune de ces grandeurs à mesurer peuvent correspondre un ou plusieurs types de capteurs fonctionnant selon un phénomène physique: variation de résistance, variation d'induction magnétique, variation capacitive, de fréquence, de flux lumineux...

II.2. Définition Généralités sur les Capteurs

II.2.1. le Capteur :

On appelle “ **CAPTEUR** ” un dispositif qui permet de transformer une grandeur physique d'entrée, appelée mesurande **[m]**, une grandeur généralement de nature électrique (Elle peut être soit : une charge (Q), une tension (V), un courant (I), une impédance (R, L, C)) appelée réponse **[s]**.

Ou bien un capteur est un dispositif de mesure servant à la prise d'informations relatives à la grandeur à mesurer (également appelée mesurande).

Domaines d'utilisation des capteurs: Tous les domaines d'activité nécessitent l'emploi de Capteurs Ex : Automobile (domaine principal), contrôle de la production, agriculture, sécurité, médical (domaine du micro-capteur) et électroménager.....ex.

Le schéma de la figure (I.1), synthétise bien ce qu'est un capteur :

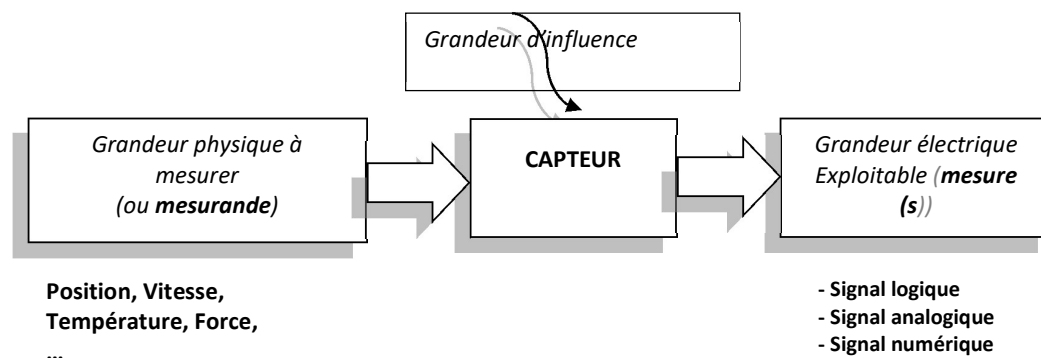


Figure II.1 : Schéma de principe d'un capteur

Le mesurande « **m** » c'est la grandeur physique en général non électrique que l'on veut mesurer (déplacement, température, pression, etc). C'est la grandeur d'entrée du capteur ou l'excitation.

La sortie « **s** » (**la mesure**) est le résultat du mesurage. Autrement dit La mesure de **s** doit permettre de connaître la valeur du mesurande **m**, avec :

$$s = F(m). \quad (II.1)$$

II.2.2. Nature du Signal Fournie par le Capteur:

Selon le type de capteur, le signal électrique de mesure peut être de différentes natures : analogique, numérique ou logique.

II.2.2.1 Signal Analogique :

Un signal est dit analogique si l'amplitude de la grandeur physique le représentant peut prendre une infinité de valeurs dans un intervalle donné. Une variation de la grandeur physique d'entrée du capteur produit une variation de la caractéristique électrique du capteur :

- Signal continu : C'est un signal qui varie 'lentement' dans le temps : température, débit, niveau.
- Forme : C'est la forme de ce signal qui est important : pression cardiaque, chromatographie, impact.
- Fréquentiel : C'est le spectre fréquentiel qui transporte l'information désirée : analyse vocale, sonar, spectrographie.

II.2.2.2 Signal Numérique

Un signal est numérique si l'amplitude de la grandeur physique le représentant ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs. En général ce nombre fini de valeurs est une puissance de 2.

- Tout ou rien (TOR) : Il informe sur un l'état bivalent d'un système. Le signal électrique en sortie de ce capteur est de type logique (signal acceptant 2 niveaux : niveau logique bas ou « 0 » et le niveau logique haut ou « 1 »).
Exemple : une vanne ouverte ou fermée.
- Train d'impulsion : Chaque impulsion est l'image d'un changement d'état. Ce type de capteur produit un nombre binaire N (combinaison de signaux logiques) qui dépend directement de la grandeur physique à mesure.
Exemple : un codeur incrémental donne un nombre fini et connu d'impulsion par tour.

- Echantillonnage : C'est l'image numérique d'un signal analogique. Exemple : température, débit, niveau.

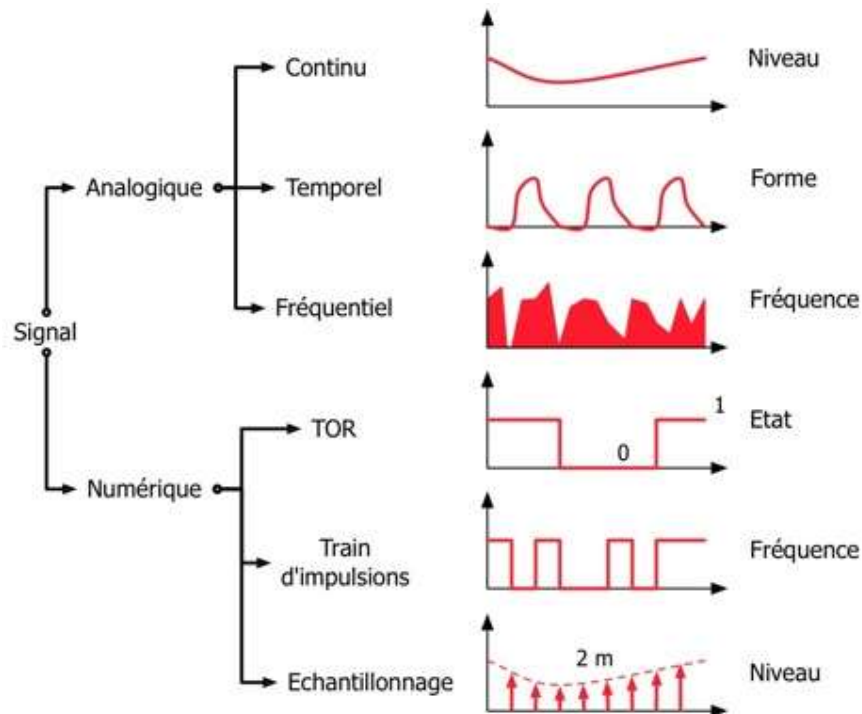


Figure II. 2 : Différents types de signaux

II.2.3. Capteurs Composites (Corps d'Epreuve):

Le corps d'épreuve est le dispositif qui assure une première traduction de la grandeur physique en une autre grandeur physique non électrique (appelée mesurande secondaire plus facile à mesurer), qui sera traduit par la suite en une grandeur électrique à l'aide d'un capteur adéquat (actif ou passif). L'ensemble formé par le corps d'épreuve et le capteur adéquat (actif ou passif) constitue un capteur composite (figure II.3).

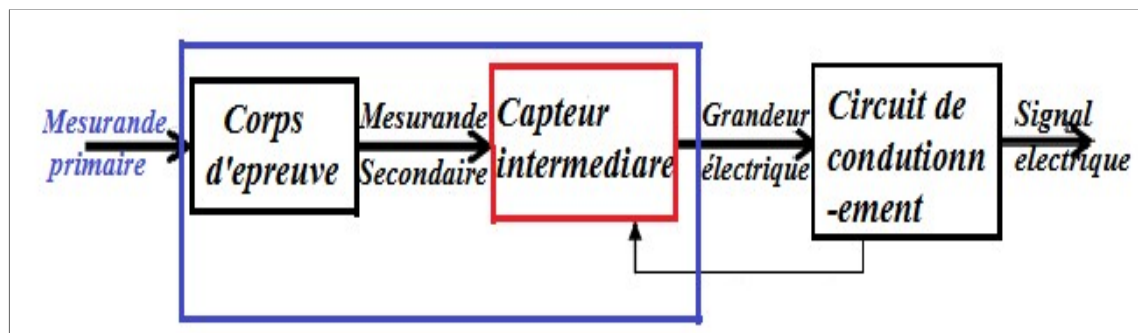


Figure II.3 : Capteur Composite

Les corps d'épreuve sont très utilisés pour la mesure des grandeurs mécaniques: Ces dernières imposent au corps d'épreuve des déformations ou des déplacements auxquels un capteur approprié (actif ou passif) est sensible.

Exemple :

Une traction F exercée sur une barre (de longueur L , de section A) entraîne une déformation $(\Delta L/L)$ qui est mesurable par la variation $(\Delta R/R)$ de la résistance d'une jauge collée sur la barre.

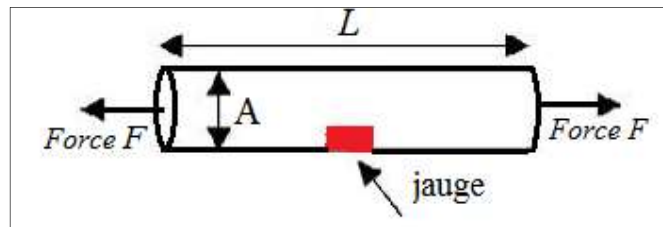


Figure II.4 : capteur à Corps d'Epreuve (jauge collée sur la barre)

L'équation du corps d'épreuve qui lie la traction à la déformation

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{Y} \frac{F}{A} \quad (\text{II. 2})$$

Où Y est le module de Young (Pa).

Connaissant d'autre part l'équation du capteur liant sa grandeur d'entrée, ici la déformation $(\Delta L/L)$, à sa réponse électrique $(\Delta R/R)$ soit:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{II. 3})$$

où K est le facteur de jauge. On en déduit la relation liant la traction à la variation de résistance :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{K}{E} \frac{F}{A} \quad (\text{II. 4})$$

La relation, que le corps d'épreuve établit entre les mesurandes primaires et secondaires, est très souvent linéaire. Les performances de l'association corps d'épreuve plus capteur doivent être déterminées par un étalonnage global afin de prendre en compte les modifications éventuelles que leur montage et leur liaison apportent à leurs caractéristiques à vide.

II.3. Différents Types de Grandeurs Physiques :

On peut classer les grandeurs physiques en six familles, chaque capteur sera obligatoirement associé à l'une de ces familles:

- *Mécaniques*: Déplacement, force, masse, débit
- *Thermiques*: Température, capacité thermique, flux thermique... .

- *Electriques*: Courant, tension, charge, impédance, diélectrique
- *Magnétiques*: Champ magnétique, perméabilité, moment magnétique
- *Radiatifs*: Lumière visible, rayons X, micro-ondes ...(Capteurs : Photodiodes, photorésistance, Phototransistor).
- *Chimiques*: Humidité, Gaz, pH

II.4. Grandeur d’Influence:

Les grandeurs d'influences sont des grandeurs étrangères qui, selon leur nature et leur importance, peuvent provoquer des perturbations sur les capteurs. C'est donc une cause d'erreurs agissant sur le signal de sortie.

Un capteur est bien sûr sensible à la grandeur à mesurer (mesurande), de par ses conditions d'emploi, peut se trouver soumis non seulement au mesurande mais à d'autres grandeurs physiques qui peuvent entraîner un changement de la grandeur électrique de sortie qu'il n'est pas possible de distinguer de l'action du mesurande. Ce sont les grandeurs d'influence, peuvent provoquer des perturbations sur les capteurs. C'est donc une cause d'erreurs agissant sur le signal de sortie. Les principales sont:

- ✓ La température qui modifie les caractéristiques électriques (résistance), mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur.
- ✓ La pression, l'accélération et les vibrations susceptibles de créer des déformations et des contraintes qui altèrent la réponse du capteur.
- ✓ L'humidité à laquelle, par exemple, 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 comme la résistivité lorsque le capteur utilise un matériau magnéto-résistif.
- ✓ La tension d'alimentation (amplitude et fréquence) lorsque la grandeur électrique de sortie en dépend de par le principe même du capteur.
- ✓ La lumière ambiante qui vient s'ajouter au flux lumineux à mesurer.

II.5. Les Caractéristiques des Capteurs :

Les capteurs et chaînes de mesure peuvent être définis par un certain nombre de caractéristiques. Nous indiquons ci-après les principales d'entre elles :

II.5.1. Les Caractéristiques Métrologiques :

II.5.1.1 Etalonnage (Gamme de mesure) :

L'étalonnage est l'ensemble des opérations qui permettent d'expliciter, sous forme graphique ou algébrique, la relation entre les grandeurs mesurées m et le signal (électrique le plus souvent) obtenu en sortie du système de mesure S , compte tenu des paramètres additionnels susceptibles de modifier la réponse du capteur.

$$S=f(M) \quad (\text{II.5})$$

Ces paramètres additionnels sont des grandeurs liées au mesurande (sa vitesse par exemple) ou non (température, humidité, ...).

II.5.1.2. La Courbe d'Etalonnage :

La courbe d'étalonnage est propre à chaque appareil. Elle permet de transformer la mesure brute en mesure corrigée. Elle est obtenue en soumettant l'instrument à une valeur vraie de la grandeur à mesurer, fournie par un appareil étalon, et en lisant avec précision la mesure brute qu'il donne.

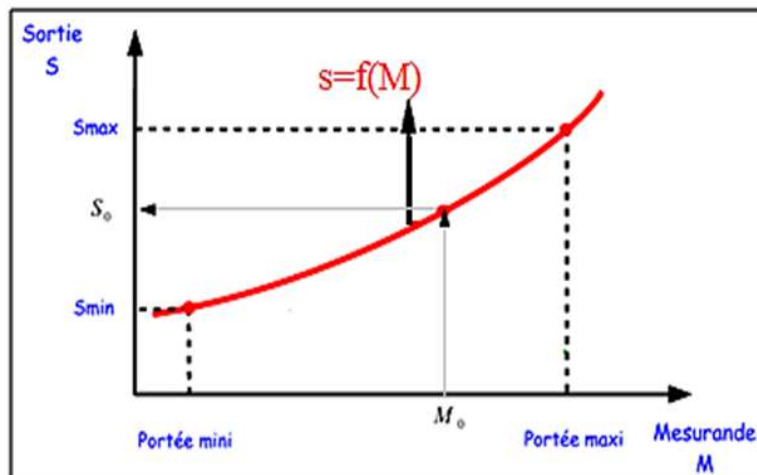


Figure II.5 : Courbe d'étalonnage

II.5.1.3. Etendue de Mesure :

L'étendue de mesure est définie sur la courbe d'étalonnage du capteur. C'est la différence algébrique entre les valeurs extrêmes pouvant être prises par la grandeur à mesurer, pour

laquelle les indications d'un capteur, obtenues à l'intérieur du domaine d'emploi en une seule mesure. L'étendue de mesure est définie lors de l'étalonnage du capteur.

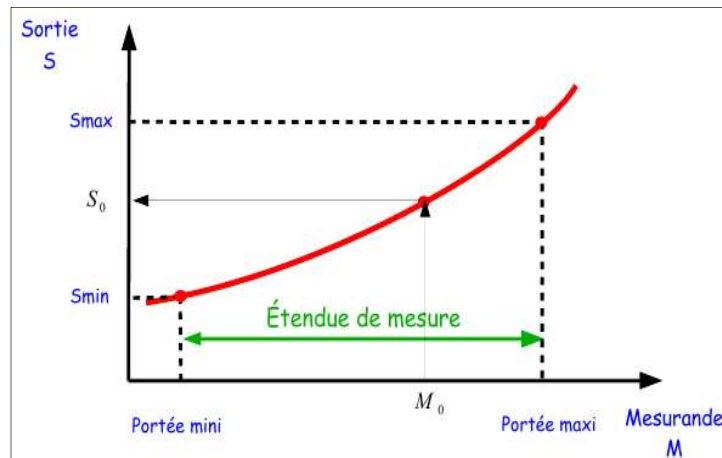


Figure II.6 : Etendue de mesure sur la courbe d'étalonnage

- le domaine de non détérioration : il est défini par les valeurs limites que peuvent atteindre et conserver le mesurande et les grandeurs d'influence sans que les caractéristiques métrologiques du capteur ne soient altérées après retour des valeurs dans le domaine nominal.
- le domaine de non détérioration : il est défini par les valeurs limites que peuvent atteindre et conserver le mesurande et les grandeurs d'influence sans que les caractéristiques métrologiques du capteur ne soient altérées après retour des valeurs dans le domaine nominal.

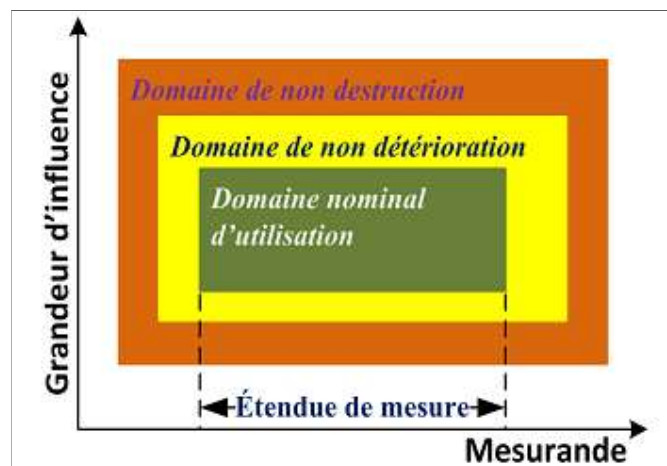


Figure II.6 : Limites d'utilisation d'un capteur

II.5.1.4. La Sensibilité :

Elle détermine l'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée en un point donné. C'est la pente de la tangente à la courbe issue de la caractéristique du capteur.

La sensibilité S_e de l'accroissement de la réponse ΔG_s d'un instrument de mesure par l'accroissement correspondant du signal d'entrée ΔG_e :

$$S_e = \frac{\Delta G_s}{\Delta G_e} \quad (\text{II. 6})$$

La valeur de la sensibilité peut dépendre de la valeur du signal d'entrée. Cette définition sous forme de quotient suppose que la relation liant le signal de sortie du capteur au signal d'entrée associé au mesurande soit linéaire, Si la fonction est non linéaire, la sensibilité de l'appareil devient :

$$S = \left(\frac{d\Phi}{dM} \right)_{M_0} \quad (\text{II. 7})$$

Exemple : variation de résistance avec la température :

- Cas une résistance a fil de platine (sonde Pt 100) :

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T) \rightarrow S_c = \frac{dR(T)}{dT} = \alpha \cdot R_0 = \frac{0,38\Omega}{^\circ\text{C}} = C^{te} \rightarrow \text{Capteur linéaire}$$

- Cas d'une thermistance :

$$R(T) = a \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right) \Rightarrow S_c = \frac{dR(T)}{dT} = -\frac{a \cdot B}{T^2} e^{\frac{B}{T}} \Rightarrow S_c \text{ dépend de } T \text{ ----- capteur non linéaire}$$

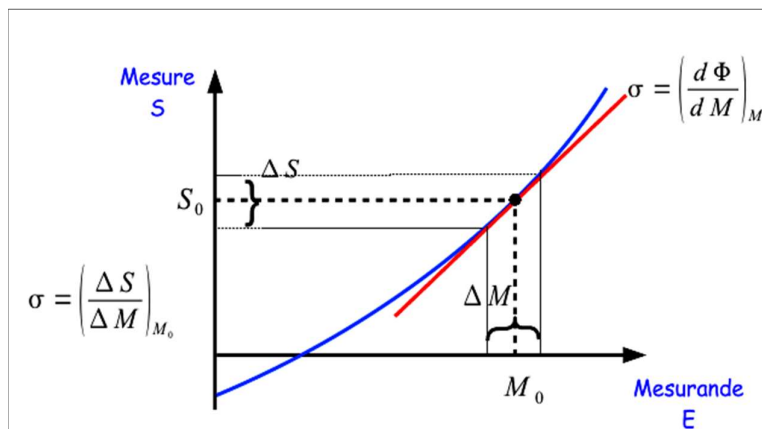


Figure II.7: la sensibilité d'un capteur

Il faut noter que la sensibilité d'un capteur peut être fonction du conditionneur auquel il est associé. Une autre caractéristique importante de la sensibilité est la fréquence du mesurande. Si le mesurande est constant ou que sa variation au cours du temps est très lente, le capteur

fonctionne dans un domaine statique. En revanche, si la fréquence du mesurande augmente alors la sensibilité peut varier. Le capteur est alors dans un régime dynamique.

II.5.1.5. Fidélité - Justesse – Précision :

Précision : C'est l'aptitude du capteur à donner une indication (mesure) proche de la valeur vraie de la grandeur mesurée (mesurande), comme illustré sur la figure II.8-a.

Fidélité : C'est l'aptitude du capteur à donner un bon accord entre des mesures successives d'une même grandeur (figure II.8-b). Un capteur est fidèle si ses valeurs ne changent pas au cours du temps (mesures reproductibles).

Justesse : C'est l'aptitude du capteur à donner en moyenne, un bon accord entre des mesures et le mesurande (figure II.8-c). Un capteur est juste si ses valeurs ne changent pas quand on les compare à des valeurs étalon, ou à des valeurs données par d'autres capteurs normalisés

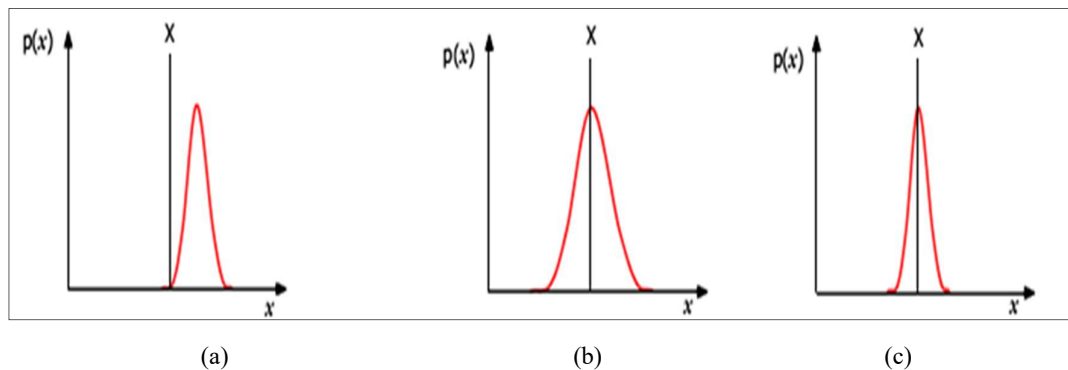


Figure II.8 : (a)- fidélité, (b)- justesse, (c)- précisions

II.5.1.6. La Linéarité :

La linéarité est une caractéristique qui définit la constance de la sensibilité sur toute la plage de mesure. C'est la zone dans laquelle la sensibilité du capteur est indépendante de la valeur du mesurande. Cette zone peut être définie à partir de la définition d'une droite obtenue comme approchant au mieux la caractéristique réelle du capteur, par exemple par la méthode des moindres carrés. On définit à partir de cette droite l'écart de linéarité qui exprime en % l'écart maximal entre la courbe réelle et la droite approchant la courbe.

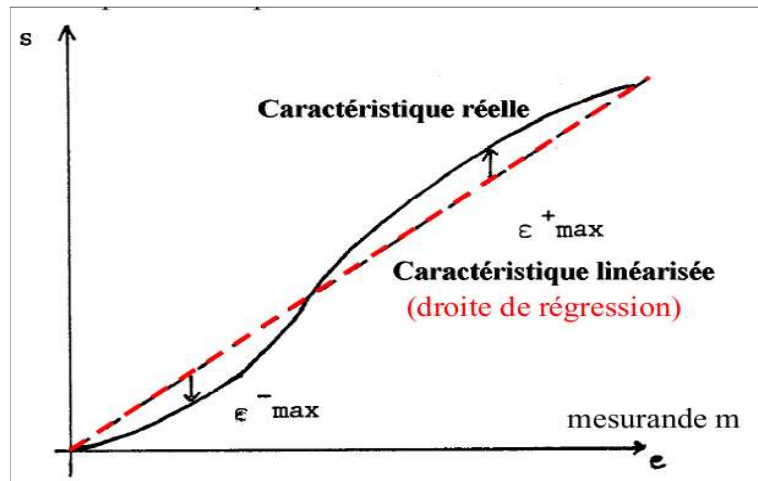


Figure II.9: Exemple de linéarisation de caractéristiques

II.5.1.7. La Rapidité, Temps de réponse

Elle caractérise l'aptitude d'un dispositif à répondre aux variations temporelles du mesurande. Le temps de réponse est défini comme étant le temps nécessaire pour que la réponse du capteur atteigne 90% de son amplitude maximale lorsqu'il est exposé au mesurande.

Dans le cas d'un échelon de la grandeur entraînant la croissance de la mesure on définit le temps de réponse à $\pm 10\%$, c'est le temps nécessaire pour que la mesure croisse, à partir de sa valeur initiale jusqu'à rester entre 90% et 110% de sa variation totale.

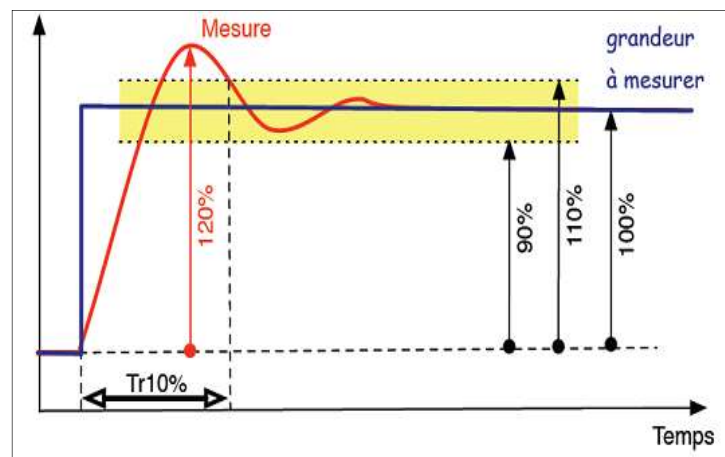


Figure II.9 : Temps indicielle d'un capteur

II.5.1.8. La Bande Passante:

C'est la plage de fréquence pour laquelle le fonctionnement du capteur est correct. On lui applique une variation périodique de la grandeur physique d'entrée, on mesure la sortie associée

et on trace la sensibilité du capteur en fonction de la fréquence (sensibilité dynamique). Ceci permet de mesurer sa bande passante à (-3dB).

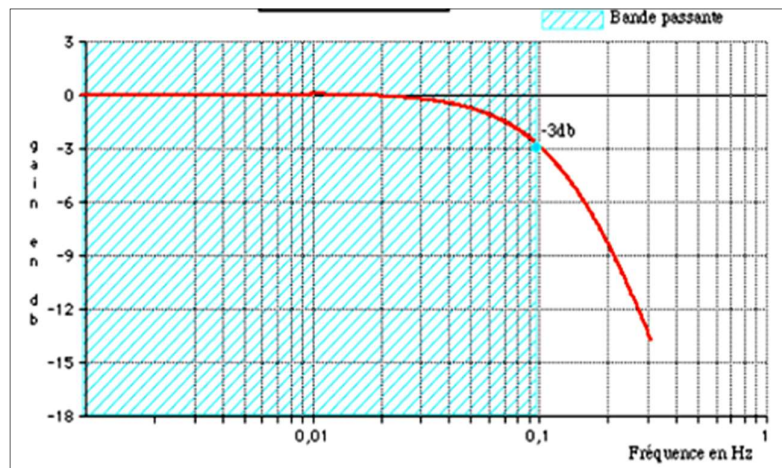


Figure II.10 : la bande passante

II.6. Les Différentes Types d'Erreurs Classiques :

Mesurer une grandeur (mesurande), revient à rechercher une valeur de cette grandeur et lui associer une incertitude afin d'évaluer la qualité de la mesure (mesurage). On distingue différents types d'erreurs, qui peuvent d'ailleurs se cumuler. On cite quelques erreurs les plus rencontrées lors d'une mesure avec une chaîne de mesure.

Elles sont illustrées sur la figure II.11.

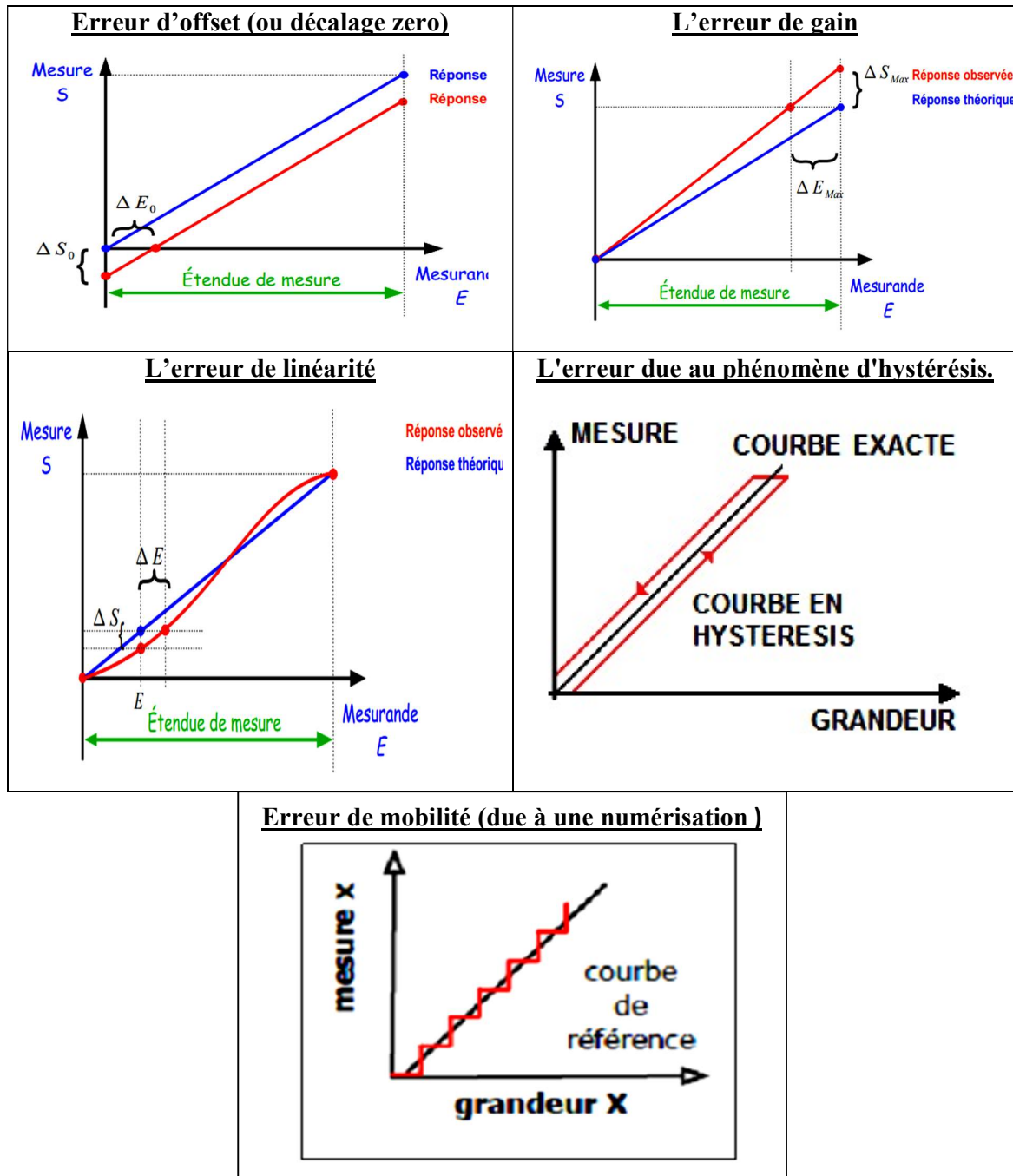


Figure II.11 : Les Différents types d'erreurs classiques.

II.7.Traitement Statistique des Mesures

Les erreurs entraînent une dispersion des résultats lors de mesures répétées. Leur traitement statistique permet :

- de connaître la valeur la plus probable de la grandeur mesurée,

- de fixer les limites de l'incertitude.

La Moyenne : soient les mesures $x_1, x_2, \dots, x_n$ d'une même grandeur X répétée n fois, la valeur moyenne de la mesure est :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum x_i \quad (\text{II. 8})$$

L'Écart : c'est la différence entre une mesure x et la moyenne ; elle peut être positive ou négative ; la moyenne des écarts est nulle pour une erreur aléatoire centrée.

$$Ecart = x_i - \bar{X} \quad (\text{II. 9})$$

La Variance : moyenne des carrés des écarts

$$V_x = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{X})^2 \quad (\text{II. 10})$$

L'Écart type : racine de la moyenne des carrés des écarts

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{X})^2} \quad (\text{II. 11})$$

Exemple :

La relation pour une thermistance ayant pour résistance R_0 à la température absolue T_0 , est :

$$R(T) = R_0 \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (\text{II. 12})$$

La sensibilité de ce capteur est donc :

$$S(T) = \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2} R_0 \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (\text{II. 13})$$

La Sensibilité moyenne sur l'étendue de mesure (*sensibilité calculée entre le premier et le dernier point figure II.12.*).

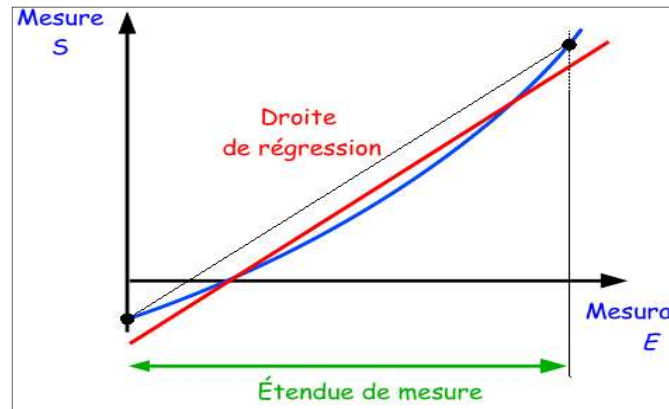


Figure II.12 : droite de régression

- moyenne des sensibilités évaluées pour N points sur l'étendue de mesure.

- pente de la droite de régression est : $s_{reg} = a e + b$ ou :

$$a = \frac{N \sum s_i \cdot e_i - \sum s_i \cdot \sum e_i}{N \sum e_i^2 - (\sum e_i)^2} \quad (\text{II. 14})$$

$$b = \frac{N \sum s_i \cdot e_i^2 - \sum s_i \cdot e_i \cdot \sum e_i}{N \sum e_i^2 - (\sum e_i)^2} \quad (\text{II. 15})$$

II.8. Critères de Choix d'un Capteur :

La grande variété des modèles, des technologies permettent un choix très large mais parfois difficile à maîtriser. Toutefois on peut définir des critères de choix qui porteront principalement sur :

- La fonction à réaliser (signal analogique, numérique, logique binaire),
- Le mode de fonctionnement (statique ou dynamique),
- La détection à réaliser : (type de matériaux à détecter, solide, liquide, etc.) contrôle de passage de pièces, déplacement, niveau, vitesse),
- La technologie du système (machine-outil, château d'eau, alarmes anti-intrusion et techniques (incendie),
- L'environnement : agents extérieurs corrosifs, humide, poussiéreux...
- Les contraintes mécaniques : vitesse de commutation (comptage rapide, vitesse à détecter très grande, fréquence de manœuvres par heure ...
- Les caractéristiques électriques : tension, nature de la tension, tension d'isolation, intensité, pouvoir de coupure, longueur matière et nombre de fils...

II.9. Les Types des Capteurs :

On classifie les capteurs en deux grandes familles en fonction de la caractéristique électrique de la grandeur de sortie. Cette classification influe sur le conditionneur qui lui est associé.

II.9.1. les Capteurs Actifs :

Ce capteur fonctionne comme un générateur, dès qu'il est soumis à l'action d'un mesurande 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 II.1 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

Tableau II.1 : les principes physiques de base des capteurs actifs

II.9.2. Les Effets Utilisés dans les Capteurs Actifs:

Effet thermoélectrique : C'est le principe de tout thermocouple. C'est un circuit basé sur la création d'une tension à la jonction de deux matériaux soumis à des différentes températures T_1 et T_2 . Il apparaît aux bornes de ce circuit une tension (force électromotrice : f.e.m)

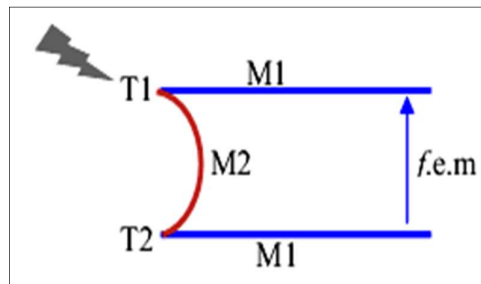


Figure II.13: Effet thermoélectrique – thermocouple.

Effet d'induction électromagnétique : La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique aux bornes de ce circuit, exemple : mesure de vitesse de déplacement.

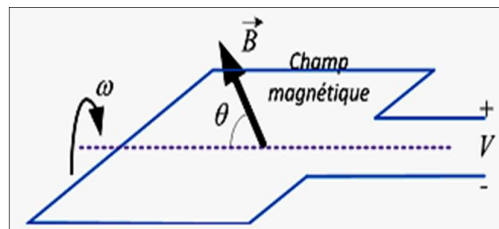


Figure II.14: Capteur à effet d'induction magnétique – capteur de vitesse

Effet pyroélectrique : certains cristaux dits pyroélectrique ont une polarisation électrique spontanée qui dépend de leur température (ou encore du flux thermique Φ reçu) ; ils portent en surface des charges électriques proportionnelles à cette polarisation et de signes contraires sur les faces opposées, exemple : mesure d'une température à distance ou d'un flux radiatif.

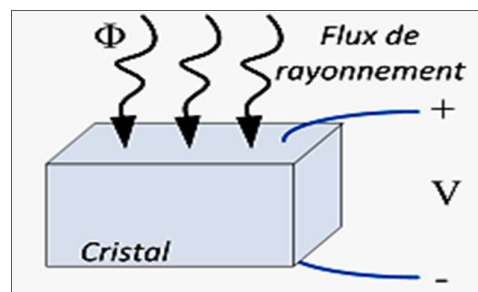


Figure II.15: Effet pyroélectrique

Effet piézoélectrique : La piézoélectricité est la propriété de certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une force : des charges apparaissent sur les faces du cristal. L'application d'une force F , à certains matériaux dits piézoélectriques (quartz), entraîne une déformation qui suscite l'apparition des charges électriques sur les faces de cristal.

exemple : mesure de forces ou pression.

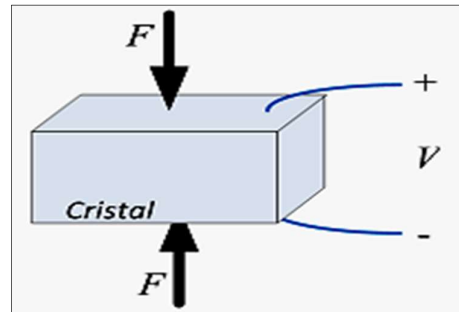


Figure II.16: L'effet piézoélectricité

Effets photoélectriques : Il en existe plusieurs effets photo-électriques, qui diffèrent par leurs manifestations, mais ils ont tous le même principe Basés sur la libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux, ou plus généralement d'une onde électromagnétique. Effet (photoémissif ; photovoltaïque ; photo-électromagnétique)

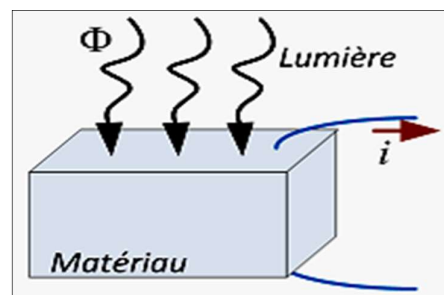


Figure II.17: Effet photoélectricité

exemple : mesure de lumière (capteur CCD, photodiode).

Effet Hall : On appelle effet Hall, lorsqu'un matériau, généralement une plaquette de semi-conducteur est parcouru par un courant i électrique et plongé dans une induction magnétique perpendiculaire B à la direction de ce courant, on constate l'apparition d'une différence de potentiel V et d'un champ électrique transversal E .

On peut le schématiser cet effet hall par la figure suivante:

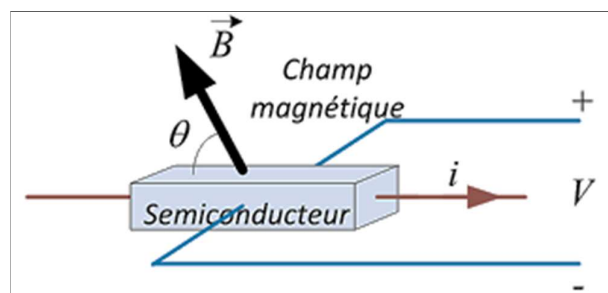


Figure II.18: Effet Hall

Un courant parcouru I et soumis à une induction B faisant un angle θ avec le courant. Il apparaît, dans une direction perpendiculaire à l'induction et au courant, une tension V_H qui a pour expression :

$$V_H = k.I.B.\sin\theta, \quad (\text{II. 15})$$

où k constant dépend du matériau et des dimensions de la plaquette.

II.9.3. Les Capteurs Passifs

Le capteur se comporte en sortie comme un dipôle passif qui peut être résistif, capacitif ou inductif dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée. La variation d'impédance résulte :

- d'une variation de dimension du capteur (capteurs de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile)
- d'une déformation résultant d'une force ou d'une grandeur s'y ramenant (pression accélération).

Exemples : armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensomètre liée à une structure déformable

Le tableau II.2 résumé les différents capteurs passifs :

Mesurande	Caractéristiques électriques sensibles	Types de matériaux utilisés
Température Très basse température	Résistivité Constante diélectrique	Métaux : platine, nickel, cuivre Verres
Flux lumineux	Résistivité	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité Perméabilité magnétique	Alliages de nickel, silicium dopé Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Matériaux magnéto- résistants : bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité Constante diélectrique	Chlorure de lithium Alumine, polymères
Niveau	Constante diélectrique	Liquides isolants

Tableau II.2 : les différents capteurs passifs

CHAPITRE III
CONDITIONNEURS DES CAPTEURS PASSIFS
ET ACTIFS

Chapitre III

Conditionneurs des capteurs passifs et actifs

III.1. Introduction :

Le conditionnement de la mesure consiste à rendre exploitable la mesure issue du capteur. L'association capteur-conditionneur détermine le signal électrique et ses caractéristiques. On effectue une adaptation de la source du signal à la chaîne de mesure complète.

III.2. Conditionneur des Capteurs Passifs

Le conditionneur a pour rôle d'apporter l'énergie nécessaire pour transformer la variation d'impédance en une grandeur électrique. Il s'agit soit d'un montage diviseur de tension ou potentiométrique soit d'un pont de Wheatstone. Dans le cas des capteurs inductifs ou capacitifs, il est possible d'employer des oscillateurs.

Les variations de l'impédance Z_c d'un capteur passif suite à une évolution d'un mesurande m ne peuvent être traduites sous la forme d'un signal électrique qu'en associant au capteur un circuit électrique appelé conditionneur qui nécessite une alimentation E ou de courant i et généralement d'autres impédances Z_k .

On peut distinguer deux groupes principaux de conditionneurs selon qu'ils transfèrent l'information liée aux variations d'impédance du capteur :

- Soit sur l'amplitude du signal de mesure ; C'est le cas des montages potentiomètres et des ponts,
- Soit Sur la fréquence du signal de mesure ; Il s'agit alors d'oscillations.

Le conditionneur est linéaire et sa sensibilité propre est indépendante de l'association d'un capteur linéaire. Un conditionneur linéaire délivre un signal de mesure proportionnel aux variations du mesurande. Si le conditionneur n'est pas linéaire, il peut être linéarisé en remplaçant l'un des composants fixes par un second capteur (fonctionnement push-pull).

III.2.1. Montage Potentiométrique :

Le capteur de résistance R_c monter en série avec une résistance R_I est alimenté par une source de résistance interne R_s et de f.é.m. e_s , continue ou alternative. La tension V_m est mesurée aux bornes du capteur par un appareil de résistance d'entrée R_d . (Figure III.1).

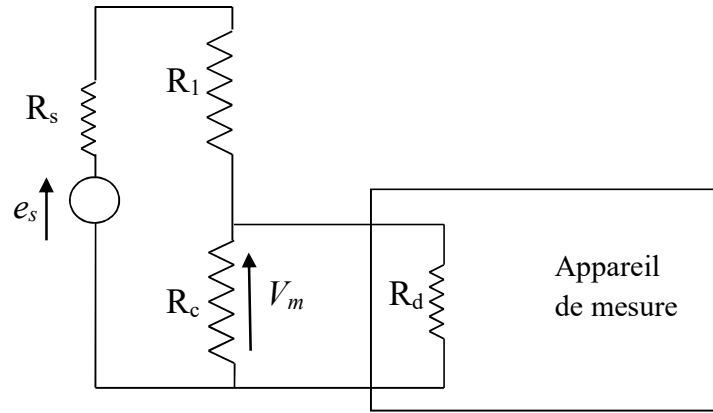


Figure III.1 : Montage potentiométrique

La tension V_m est mesurée aux bornes du capteur par un appareil de mesure de résistance interne $R_d \gg R_c$, donc on a Selon les lois d'électroniques, on peut écrire :

$$e_s = (R_s + R_1 + R_c) \cdot I \quad (\text{III. 1})$$

$$V_m = R_c \cdot I \quad (\text{III. 2})$$

$$I = \frac{V_m}{R_c} \quad (\text{III. 3})$$

Donc :

$$e_s = (R_s + R_1 + R_c) \cdot \frac{V_m}{R_c} \quad (\text{III. 4})$$

$$V_m = \frac{R_c}{R_s + R_1 + R_c} \cdot e_s \quad (\text{III. 5})$$

Comme R_s est négligeable donc on a :

$$V_m = \frac{R_c}{R_1 + R_c} \cdot e_s \quad (\text{III. 6})$$

La relation qui lie la tension de sortie (V_m) au paramètre image du mesurande (R_c) n'est pas linéaire. La sensibilité du montage n'est donc pas constante. On peut néanmoins faire une Linéarisation pour rendre la sensibilité constante

III.2.1.1. Fonctionnement en Petit Signaux :

Avec l'étude en petites variations du mesurande (étude petit signaux) :

$$R_c \rightarrow R_{c0} + \Delta R$$

$$V_m \rightarrow V_{m0} + \Delta V_m$$

Alors on obtient :

$$\Delta V_m = V_m - V_{m0} \quad (\text{III. 7})$$

$$V_{m0} = \frac{R_{c0}}{R_1 + R_{c0}} \cdot e_s \quad \text{et} \quad V_m = \frac{R_c}{R_1 + R_c} \cdot e_s \quad (\text{III. 8})$$

$$V_m = \frac{R_{c0} + \Delta R}{R_1 + R_{c0} + \Delta R} \cdot e_s \quad (\text{III. 9})$$

Donc :

$$\Delta V_m = \left[\frac{R_{c0} + \Delta R}{R_1 + R_{c0} + \Delta R} - \frac{R_{c0}}{R_1 + R_{c0}} \right] \cdot e_s \quad (\text{III. 10})$$

$$\Delta V_m = \left[\frac{(R_{c0} + \Delta R) \cdot (R_1 + R_{c0}) - R_{c0} \cdot (R_1 + R_{c0} + \Delta R)}{(R_1 + R_{c0} + \Delta R) \cdot (R_1 + R_{c0})} \right] \cdot e_s \quad (\text{III. 11})$$

$$\Delta V_m = \left[\frac{(R_{c0} \cdot R_1 + \Delta R \cdot R_1 + R_{c0}^2 + \Delta R \cdot R_{c0} - R_{c0} \cdot R_1 - R_{c0}^2 - \Delta R \cdot R_{c0})}{(R_1 + R_{c0} + \Delta R) \cdot (R_1 + R_{c0})} \right] \cdot e_s \quad (\text{III. 12})$$

On se place aux petites variations $\Delta R \ll R_{c0} + R_1$, donc la relation devienne

$$\Delta V_m = \frac{\Delta R \cdot R_1}{(R_1 + R_{c0})^2} \cdot e_s \quad (\text{III. 13})$$

Là, on retrouve une relation linéaire d'où on peut directement extraire la sensibilité du capteur $S = \Delta V_m / \Delta R_c$. Cette sensibilité est maximum pour $R_1 = R_{c0}$ soit :

$$\Delta V_m = \frac{e_s}{4 \cdot R_1} \cdot \Delta R \quad (\text{III. 14})$$

La sensibilité est donnée par :

$$S = \frac{e_s}{4 \cdot R_1} \quad (\text{III. 15})$$

III.2.1.2. Seconde solution Montage Push-pull

On reprend le montage potentiomètre et on remplace la résistance fixe R_1 par un second capteur, identique au premier mais dont les variations sont de signe contraire $R_{c1} = R_{c0} - \Delta R_c$.

On a alors (a l'état initiale pas de mesure on a $R_{c1}=R_{c2}=R_{c0}$). Cette association de deux capteurs fonctionnant en opposition est dite Push-pull (figure III. 2).

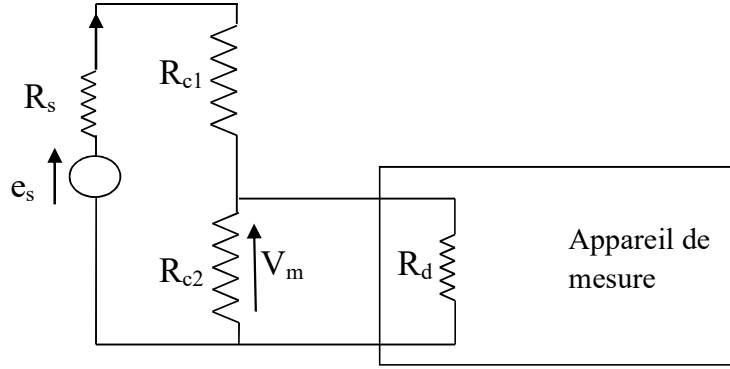


Figure III.2 : Montage potentiométrique Push-Pull

Avec : $R_{c1} = R_c - \Delta R_c$ et $R_{c2} = R_c + \Delta R_c$

$$e_s = (R_c - \Delta R_c).I + (R_c + \Delta R_c).I \quad (\text{III. 16})$$

$$I = \frac{V_m}{R_c + \Delta R_c} \quad (\text{III. 17})$$

$$e_s = \frac{V_m}{R_c + \Delta R_c} (R_c - \Delta R_c + R_c + \Delta R_c) \quad (\text{III. 18})$$

$$e_s = \frac{V_m}{R_c + \Delta R_c} (2.R_c) \quad (\text{III. 19})$$

$$V_m = e_s \cdot \frac{R_c + \Delta R_c}{2.R_c} \quad (\text{III. 20})$$

On calcule ΔV_m :

$$\Delta V_m = e_s \cdot \left(\frac{R_c + \Delta R_{c1}}{2.R_c} - \frac{R_c + \Delta R_{c2}}{2.R_c} \right) \quad (\text{III. 21})$$

$$\Delta V_m = e_s \cdot \frac{\Delta R_c}{2.R_c} \quad (\text{III. 22})$$

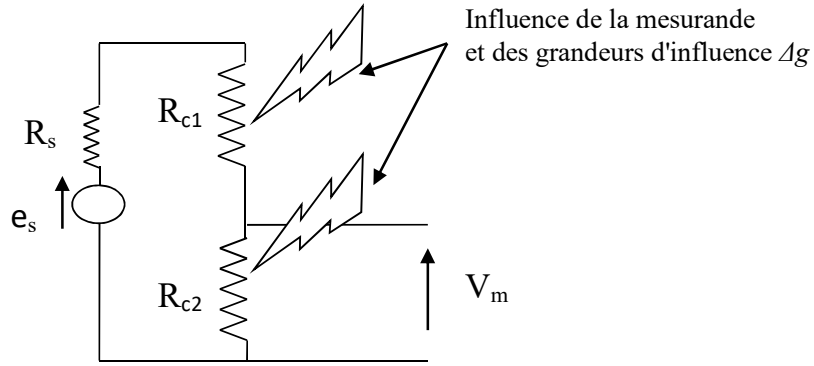
Avec ce type de montage on arrive avoir une sensibilité deux fois supérieure à celle obtenue en fonctionnement en petits signaux et cela si seulement ($R_s \ll R_c$) et une variation de tension linéaire avec (ΔR_c).

La sensibilité S est, donc, donnée :

$$S = \frac{e_s}{2 \cdot R_c} \quad (\text{III. 23})$$

Cette association de 2 capteurs fonctionnant en opposition est dite push-pull. C'est le cas, par exemple, pour 2 jauges d'extensomètre identiques subissant a des déformations égales et de signes contraires.

Le montage push-bull peut permettre une compensation des grandeurs d'influence. La compensation des grandeurs d'influence revient à pouvoir écrire l'expression de la tension ΔV_m ou de sa variation en fonction des variations de la résistance provoquées seulement par l'action de la mesurande, sans celle des grandeurs d'influence.



FigureIII.3 : Montage avec grandeur d'influence

Retrouvant l'expression de ΔV_m , a l'origine des variations on a :

$$m = m_0, \quad g = g_0, \quad R_{c1} = R_{c2} = R_{c0} \text{ et } V_m = V_{m0} = \frac{e_s}{2}$$

Après variation de la mesurande m_0 et de la grandeur d'influence g_0 , on a :

$$R_{c1} = R_{c0} + \Delta R_{c1} \quad , \quad \Delta R_{c1} = S_g \Delta g + S \Delta m_1$$

$$R_{c2} = R_{c0} + \Delta R_{c2} \quad , \quad \Delta R_{c2} = S_g \Delta g + S \Delta m_2$$

Selon les démonstrations précédentes, on a :

$$e_s = \frac{V_m}{R_{c0} + \Delta R_{c1}} \cdot (R_{c0} + \Delta R_{c1} + R_{c0} + \Delta R_{c2}) \quad (\text{III. 24})$$

$$V_m = e_s \cdot \frac{R_{c0} + \Delta R_{c1}}{2 \cdot R_{c0} + \Delta R_{c1} + \Delta R_{c2}} \quad (\text{III. 25})$$

$$\Delta V_m = \frac{e_s}{2} \cdot \left(\frac{R_{c0} + \Delta R_{c1}}{R_{c0} + (\Delta R_{c1} + \Delta R_{c2})/2} - 1 \right) \quad (\text{III. 26})$$

$$\Delta V_m = \frac{e_s}{2} \cdot \left(\frac{R_{c0} + \Delta R_{c1} - (R_{c0} + (\Delta R_{c1} + \Delta R_{c2})/2)}{R_{c0} + (\Delta R_{c1} + \Delta R_{c2})/2} \right) \quad (\text{III. 27})$$

$$\Delta V_m = \frac{e_s}{2} \cdot \left(\frac{\frac{\Delta R_{c1}}{2} - \frac{\Delta R_{c2}}{2}}{R_{c0} + (\Delta R_{c1} + \Delta R_{c2})/2} \right) \quad (\text{III. 28})$$

$$\Delta V_m = \frac{e_s}{4 \cdot R_{c0}} \cdot \frac{\Delta R_{c1} - \Delta R_{c2}}{1 + (\Delta R_{c1} + \Delta R_{c2})/2 \cdot R_{c0}} \quad (\text{III. 29})$$

A partir de là, on peut distinguer deux cas :

- Le premier capteur n'est pas soumis à la mesurande :

On peut donc écrire : $\Delta m_1 = 0$, donc : $\Delta R_{c1} = S_g \Delta g$

On considérant $S \Delta m_2 \ll R_{c0}$ on peut écrire :

$$\Delta V_m = \frac{e_s}{4 \cdot R_{c0}} \cdot \frac{S \Delta m_2}{1 + (S_g \Delta g)/R_{c0}} \quad (\text{III. 30})$$

- Les deux capteurs fonctionnent en push-pull :

On a donc :

$$\Delta m = \Delta m_2 = -\Delta m_1$$

L'expression de ΔV_m s'écrira :

$$\Delta V_m = \frac{e_s}{2 \cdot R_{c0}} \cdot \frac{S \Delta m}{1 + (S_g \Delta g)/R_{c0}} \quad (\text{III. 31})$$

III.2.2. Montage en Pont :

L'utilisation d'un montage potentiométrique présente le défaut d'avoir en sortie la présence d'une tension continue, et ceci en l'absence de variations du mesurande. L'emploi d'un montage en pont présente l'avantage de s'affranchir de cette tension continue.

III.2.2.1. Montage Quart de Pont, Un Capteur et Trois Résistances Fixes :

La figure III.4 présente un pont avec 03 résistances fixes et un capteur résistif

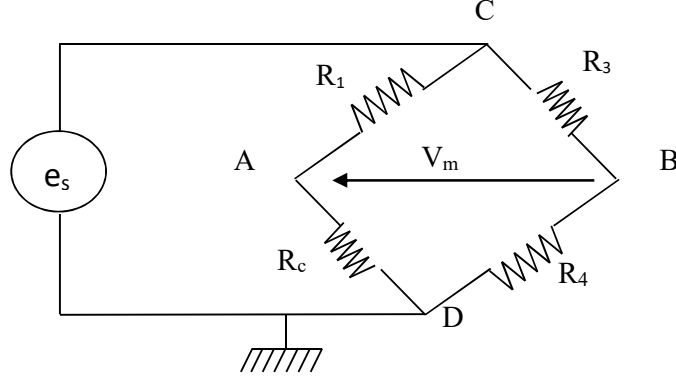


Figure III.4 : Montage en pont avec un capteur et trois résistances fixes

En A on a :

$$e_s = (R_1 + R_c) \cdot I_1 \quad \text{et} \quad I_1 = \frac{V_A}{R_c} \quad \text{donc :}$$

$$e_s = \frac{(R_c + R_1)}{R_c} V_A \quad (\text{III. 32})$$

$$V_A = \frac{R_c}{R_c + R_1} e_s \quad (\text{III. 33})$$

En B on a :

$$e_s = (R_3 + R_4) \cdot I_2 \quad \text{et} \quad I_2 = \frac{V_B}{R_4} \quad \text{donc :}$$

$$e_s = \frac{(R_3 + R_4)}{R_4} V_B \quad (\text{III. 34})$$

$$V_B = \frac{R_4}{R_4 + R_3} e_s \quad (\text{III. 35})$$

$$V_m = \frac{R_c \cdot R_3 - R_4 \cdot R_1}{(R_1 + R_c) \cdot (R_3 + R_4)} \cdot e_s \quad (\text{III. 36})$$

On dit que le pont est en équilibre si $V_A = V_B$ donc $V_m = 0$, Si on veut avoir une tension nulle en absence de mesurande, il faut avoir :

$$R_{c0} \cdot R_3 = R_4 \cdot R_1 \quad (\text{III. 37})$$

Avec une variation de ΔR de R_c on aura V_A qui prendra la forme suivante :

$$V_A = \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{R_1 + R_{c0} + \Delta R_c} \cdot e_s \quad (\text{III. 38})$$

Alors V_m deviendra :

$$V_m = \left(\frac{R_{c0} + \Delta R_c}{R_1 + R_{c0} + \Delta R_c} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot e_s \quad (\text{III. 39})$$

On remplacera $\frac{R_4}{R_3 + R_4}$ par $\frac{R_c}{R_1 + R_c}$ parce que à l'équilibre la tension V_m est nulle, ce qui fait que ces deux éléments sont égaux. On aura donc :

$$V_m = \left(\frac{R_{c0} + \Delta R_c}{R_1 + R_{c0} + \Delta R_c} - \frac{R_{c0}}{R_1 + R_{c0}} \right) \cdot e_s \quad (\text{III. 40})$$

$$V_m = \frac{R_{c0} \cdot R_1 + R_{c0}^2 + \Delta R_c \cdot R_1 + R_{c0} \cdot \Delta R_c - R_{c0} \cdot R_1 - R_{c0}^2 - R_{c0} \cdot \Delta R_c}{(R_1 + R_{c0} + \Delta R_c) \cdot (R_1 + R_{c0})} \cdot e_s \quad (\text{III. 41})$$

$$V_m = \frac{\Delta R_c \cdot R_1}{(R_1 + R_{c0} + \Delta R_c) \cdot (R_1 + R_{c0})} \cdot e_s \quad (\text{III. 42})$$

Comme $\Delta R_c \ll R_c$, on écrit :

$$V_m = \frac{\Delta R_c \cdot R_1}{(R_1 + R_{c0})^2} \cdot e_s \quad (\text{III. 43})$$

Si on a $R_1 = R_{c0}$, on aura :

$$V_m = \frac{e_s}{4 \cdot R_{c0}} \cdot \Delta R_c \quad (\text{III. 45})$$

III.2.2.2. Montage demi de pond, avec deux capteurs et deux résistances fixes :

Pour ce type de montage, on choisit les deux résistances du pond $R_3 = R_4 = R_{c0}$ et les deux résistances restantes seront des capteurs, avec $R_{c1} = R_{c0} + \Delta R_{c1}$ et $R_{c2} = R_{c0} + \Delta R_{c2}$

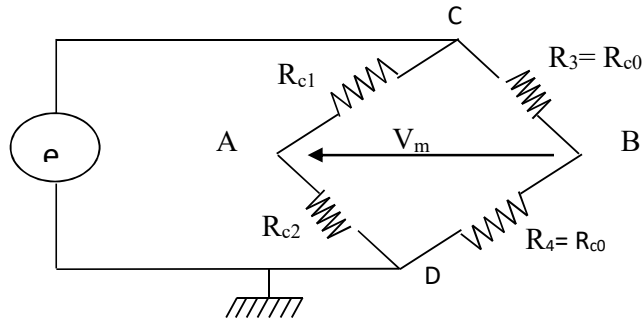


Figure III.5 : Montage en demi de pond

Calculant l'expression de la tension V_m :

$$V_A = \frac{R_{c2}}{R_{c1} + R_{c2}} \cdot e_s \quad (\text{III. 46})$$

$$V_B = \frac{e_s}{2} \quad (\text{III. 47})$$

$$V_m = \left(\frac{R_{c2}}{R_{c1} + R_{c2}} - \frac{1}{2} \right) \cdot e_s \quad (\text{III. 48})$$

$$V_m = \left(\frac{R_{c0} + \Delta R_{c2}}{R_{c0} + \Delta R_{c1} + R_{c0} + \Delta R_{c2}} - \frac{1}{2} \right) \cdot e_s \quad (\text{III. 49})$$

$$V_m = \left(\frac{2 \cdot R_{c0} + 2 \cdot \Delta R_{c2} - 2 \cdot R_{c0} - \Delta R_{c1} - \Delta R_{c2}}{2 \cdot (2 \cdot R_{c0} + \Delta R_{c1} + \Delta R_{c2})} - \frac{1}{2} \right) \cdot e_s \quad (\text{III. 50})$$

$$V_m = \frac{\Delta R_{c2} - \Delta R_{c1}}{4 \cdot R_{c0} + 2 \cdot \Delta R_{c1} + 2 \cdot \Delta R_{c2}} \cdot e_s \quad (\text{III. 51})$$

$$V_m = \frac{e_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_{c2} - \Delta R_{c1}}{R_{c0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_{c1} + \Delta R_{c2}}{2 \cdot R_{c0}}} \quad (\text{III. 52})$$

III.2.2.3. Montage Pond avec Deux Capteurs en Push-Pull:

Dans ce cas, dans le montage ci-dessus, les deux capteurs présentent des résistances variables d'une manière identique mais de sens opposé sous l'influence de le mesurande, si les variations provoquées par les grandeurs d'influence sont négligeables devant la résistance des capteurs, on peut écrire $\Delta R_{c2} = -\Delta R_{c1} = \Delta R_c$ donc :

$$V_m = \frac{e_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_{c2} - \Delta R_{c1}}{R_{c0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_{c1} + \Delta R_{c2}}{2 \cdot R_{c0}}} = \frac{e_s}{4} \cdot \frac{2 \cdot \Delta R_c}{R_{c0}} \quad (\text{III. 53})$$

$$V_m = \frac{e_s}{2} \cdot \frac{\Delta R_c}{R_{c0}} \quad (\text{III. 54})$$

On remarque que V_m est linéaire et que la sensibilité est améliorée, elle est double de celle du montage quart du pond.

III.2.2.4. Montage pond entier avec quatre capteurs en push-pull :

Pour ce cas, on utilise quatre capteurs montés en push-pull. On a donc :

$$\Delta R_{c2} = -\Delta R_{c1} = \Delta R_{c3} = -\Delta R_{c4} = \Delta R_c$$

On a :

$$V_A = \frac{R_{c2}}{R_{c1} + R_{c2}} \cdot e_s \quad (\text{III. 55})$$

$$V_B = \frac{R_{c4}}{R_{c4} + R_{c3}} \cdot e_s \quad (\text{III. 56})$$

$$V_m = \frac{R_{c0} + \Delta R_{c2}}{R_{c0} + \Delta R_{c1} + R_{c0} + \Delta R_{c2}} \cdot e_s - \frac{R_{c0} + \Delta R_{c4}}{R_{c0} + \Delta R_{c4} + R_{c0} + \Delta R_{c3}} \cdot e_s \quad (\text{III. 57})$$

$$V_m = e_s \cdot \left(\frac{R_{c0} + \Delta R_c}{2 \cdot R_{c0} - \Delta R_c + \Delta R_c} - \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{2 \cdot R_{c0} - \Delta R_c + \Delta R_c} \right) \quad (\text{III. 58})$$

On retrouve donc l'expression de V_m très simple, linéaire avec une très grande sensibilité.

$$V_m = e_s \cdot \frac{\Delta R_c}{R_{c0}} \quad (\text{III. 59})$$

III.2.3. Les oscillateurs :

L'emploi d'un oscillateur comme conditionneur permet de transférer sur la fréquence des oscillations, l'information liée à la valeur de l'impédance du capteur. Le signal délivré par l'oscillateur est dit modulé en fréquence. Cette méthode de conditionnement offre plusieurs avantages :

- L'information portée par la fréquence possède une immunité aux parasites supérieures et à celle d'une information portée sur l'amplitude.
- La conversion sous forme numérique est simple ; elle consiste à compter les périodes du signal pendant un temps déterminé.
- Le signal modulé en fréquence peut être transmis par voie Hertzienne permettant alors des télémesures, utiles en particulier sur des pièces tournantes.

Un circuit Oscillateurs sinusoïdaux (L_0C_0), série ou parallèle, Le circuit présente une impédance purement résistive à la fréquence de résonance F_0 dont l'expression est :

- Pour un circuit oscillant série : $F_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}$

- Pour un circuit oscillant parallèle : $F_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{Q_L^2}}$

Q_L : est le coefficient de qualité de la bobine

Si on insère un capteur capacitif ou inductif dans un circuit résonnant, ses variations entraîneront une variation ΔF de la fréquence d'oscillation du circuit. En supposant des petites variations de sa réactance on obtient une évolution selon le type de capteur et en supposant le cas des faibles amplitudes :

$$\frac{\Delta F}{F_0} = \frac{-\Delta C}{2C_0} \text{ ou } \frac{\Delta F}{F_0} = \frac{-\Delta L}{2L_0} \quad (\text{III. 60})$$

$$\Delta F = F_0 \left(1 - \frac{-\Delta C}{2C_0} \right) \text{ ou } \Delta F = F_0 \left(1 - \frac{-\Delta L}{2L_0} \right) \quad (\text{III. 61})$$

Comme pour l'oscillateur sinusoïdal, la fréquence du multivibrateur est modulée par les variations de l'impédance du capteur.

III.3. Conditionneurs des Capteurs Actifs (Conditionneurs du Signal) :

III.3.1. Adaptation d'Impédance :

Le capteur et son conditionneur éventuel sont la source du signal électrique dont la chaîne de mesure doit assurer le traitement de la façon la plus appropriée au but poursuivi.

Le capteur, associé à son conditionneur, équivaut à un générateur constitué d'une source et d'une impédance interne délivrant le signal au circuit qui le charge. Afin que le signal soit obtenu dans les meilleures conditions de sensibilité et de stabilité vis-à-vis des variations éventuelles de l'impédance interne, le générateur équivalent doit être chargé par une impédance appropriée.

III.3.1.1. Cas d'un capteur source de tension :

Lorsqu'un capteur délivre une tension $e_c(m)$, sous l'influence de mesurande, cette tension est en série avec une impédance Z_c du capteur. Pour minimiser l'influence de cette dernière, Le dispositif de mesure doit avoir une impédance d'entrée, Z_i , très grande devant Z_c .

$$V_m = e_c(m) \cdot \frac{Z_i}{Z_i + Z_c} \quad (\text{III. 62})$$

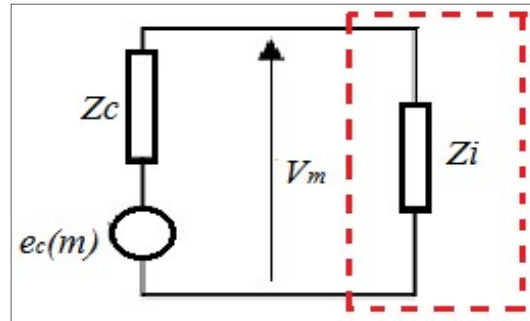


Figure III.6 : Conditionneur a source de tension

Si $Z_i \gg Z_c$ on a alors : $V_m = e_c(m)$

Les dispositifs à grande impédance d'entrée utilisable pour réaliser l'adaptation d'impédance sont à base

- d'amplificateur opérationnel en montage suiveur simple ou suiveur/amplificateur,
- d'amplificateur différentiel sous forme d'amplificateur d'instrumentation ou d'amplificateur d'isolement.

III.3.1.2. Cas d'un capteur source de courant :

Le capteur peut aussi se présenter sous une forme équivalente à une source de courant ($i_c(m)$) en parallèle avec une impédance Z_c . Le signal électrique V_m est alors donné par (figure III.7)

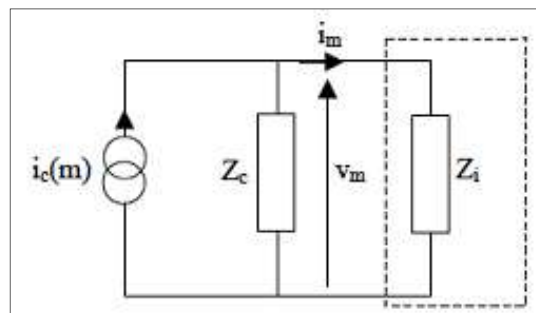


Figure III.7 : Conditionneur a source de courant

Pour que le courant i_m généré par le capteur soit peu différent de i_c , il faut que l'impédance du capteur soit très importante devant celle du dispositif de mesure :

$$V_m = Z_i \cdot i_m \quad (\text{III. 63})$$

$$i_m = i_c \frac{Z_c}{Z_i + Z_c} \quad (\text{III. 64})$$

Si $Z_i \ll Z_c$ on aura : $i_m = i_c$

Cependant, la tension V_m aux bornes de Z_i risque dans ce cas d'être elle-même très faibles. L'emploi d'un convertisseur courant/tension permet à la fois de réduire l'influence de Z_c et d'obtenir une tension V_m importante.

III.3.1.3. Cas d'un Capteur à Source de Charge :

Dans ce cas, le capteur est un générateur de charge $q_c(m)$ d'impédance interne capacitive C_c , il est en général impossible de placer à ses bornes un circuit dont l'impédance d'entrée serait résistive.

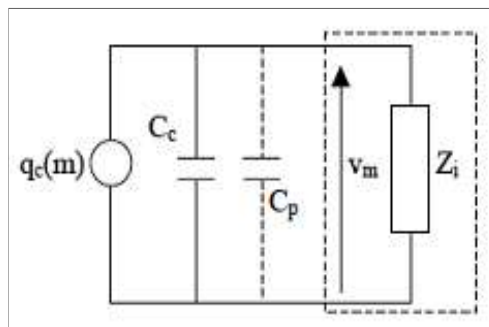


Figure III.8 : Conditionneur à source de charge

En effet, d'une part la décharge de la capacité risquerait d'être trop rapide pour permettre l'exploitation du signal et d'autre part, la tension recueillie (qui dépend de l'ensemble des capacités montage) serait sensible à leurs variations erratiques.

III.4. Utilisation des Amplificateurs Opérationnels :

Les amplificateurs opérationnels, en plus de l'adaptation d'impédance qu'ils peuvent garantir, ils permettent aussi en plus de l'amplification du signal, de convertir les signaux de sorties, quand ils sont un courant ou une charge, à un signal de sortie tension. On rappelle ici les trois montages fondamentaux, correspondant aux trois types des capteurs actifs

III.4.1. Cas d'un Capteur Source de Tension :

Le capteur est équivalent à une source de tension $e_c(m)$ en série avec une impédance Z_c .

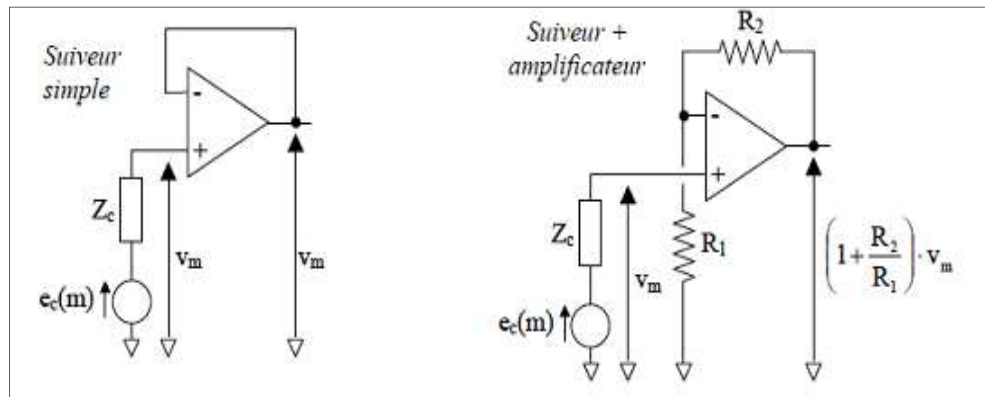


Figure III.9 : Conditionneur a amplificateur suiveur simple

L'utilisation d'un amplificateur opérationnel avec le montage ci-dessus permet, avec l'approximation de l'amplificateur opérationnel idéal, d'écrire :

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_m \quad (\text{III. 65})$$

On remarque donc :

- Que le capteur ne débite pas ($i_+ = i_- = 0$ dans l'amplificateur idéal) ou encore qu'il débite sur une impédance infinie. La condition de non influence de l'impédance interne Z_c du capteur sur la mesure est réalisée.
- qu'en sortie, V_s est indépendant du courant débité dans la charge R_L . La tension V_s débitée par l'amplificateur se comporte comme une source de tension d'impédance interne nulle.
- Que le choix de R_1 et R_2 permet de régler le gain G désiré.

Ce montage permet, donc, d'adapter l'impédance au signal du capteur et d'amplifier la sortie de ce dernier.

III.4.2. Cas d'un Capteur Source de Courant :

Le capteur, cette fois, est équivalent à une source de courant placée en parallèle sur une impédance Z_c , on peut alors utiliser le montage de la figure III.10 :

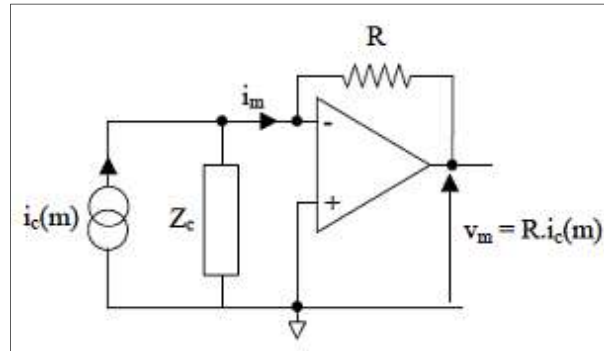


Figure III.10 : Conditionneur à amplificateur pour capteur source de courant

Puisque l'entrée de l'amplificateur idéal ne débite aucun courant, et que la tension d'entrée différentielle est nulle, il n'y a aucun courant qui circule dans l'impédance Z_c du capteur. Le courant i_c se retrouve intégralement dans R et on peut écrire :

$$V_s = -R \cdot i_c \quad (\text{III. 66})$$

Comme pour l'amplificateur de tension ce montage élémentaire appelle quelques remarques fondamentales :

- la valeur choisie pour la résistance R de contre-réaction n'influence pas le capteur équivalent à une source de courant.
- La résistance d'entrée est nulle puisque les bornes de la source sont maintenues au même potentiel à l'entrée de l'amplificateur idéal.
- En sortie, on obtient une source de tension dont la résistance est nulle (V_s est indépendant de la résistance de charge qui peut être placée en sortie).

III.4.3. Cas d'un Capteur Source de Charge :

Enfin dans le cas du capteur équivalent à un générateur de charge, il est souvent souhaitable d'utiliser un convertisseur charge-tension qui réalise pratiquement la mise en court-circuit des électrodes. Le montage le plus élémentaire est celui de la figure III. 11 :

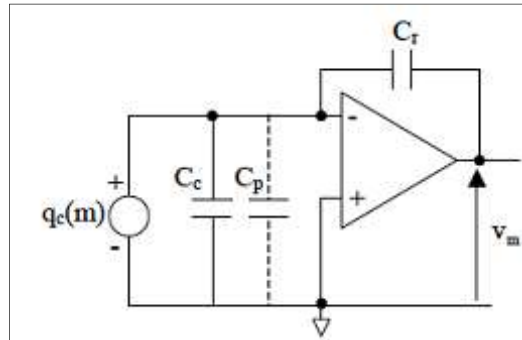


Figure III.9 : Conditionneur à amplificateur pour capteur source de charge

Le dispositif à utiliser dans ce cas est l'amplificateur de charge qui délivre une tension proportionnelle à la charge et indépendante de la capacité du capteur et des câbles de liaison

$$V_m = \frac{q_{c(m)}}{C_r} \quad (\text{III. 66})$$

CHAPITRE IV
QUELQUES EXEMPLES DES CAPTEURS
INDUSTRIELLES

IV. 1. Capteurs de position/déplacement

IV.1.1. Définition :

Un capteur de position est un élément de mesure ayant un contact avec l'objet dont on doit vérifier s'il occupe une position donnée par exemple les Capteurs potentiométriques, le capteur fournit un signal qui est fonction de la position de l'une de ses parties liée à l'objet mobile.

Par-contre un capteur de proximité est caractérisé par l'absence de liaison mécanique avec l'objet dont ils mesurent la distance ou le déplacement.

Mode de transduction	Type	
Résistif	Potentiomètre résistif	Avec contact
Inductif	Inductance variable	Avec contact
	Transformateur différentiel	Sans contact
Capacitif	Surface variable	Avec contact
	Écartement variable	Sans contact
Émission/réception	Capteur ultrasonore	Sans contact
	Capteur optique	

Tableau IV.1 les différents type de transduction d'un capteur de position

Chaque technologie possède une plage de distance sur lequel elle opère bien. Le choix de la technologie sera donc en partie, basé sur la plage distance à mesurer pour l'application.

IV.1.2. Capteurs Potentiométriques de Déplacement Résistif :

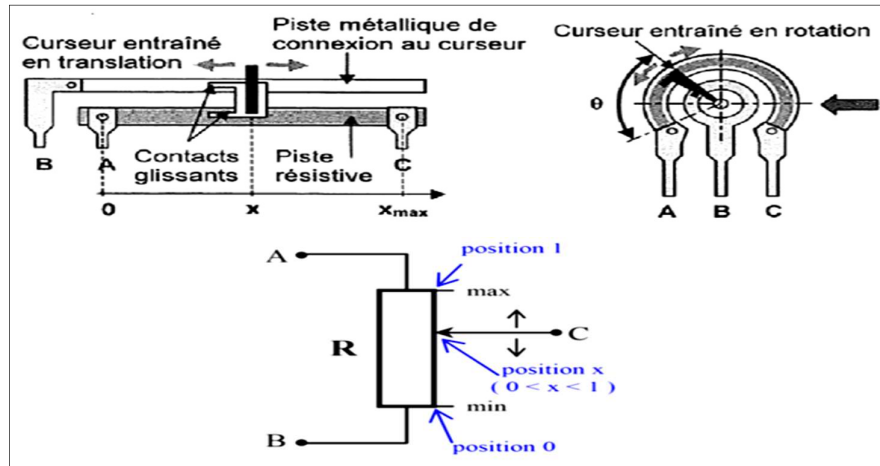
IV.1.2.1. Principe :

Ce capteur est en fait un potentiomètre résistif. C'est un capteur passif qui sert à la mesure :

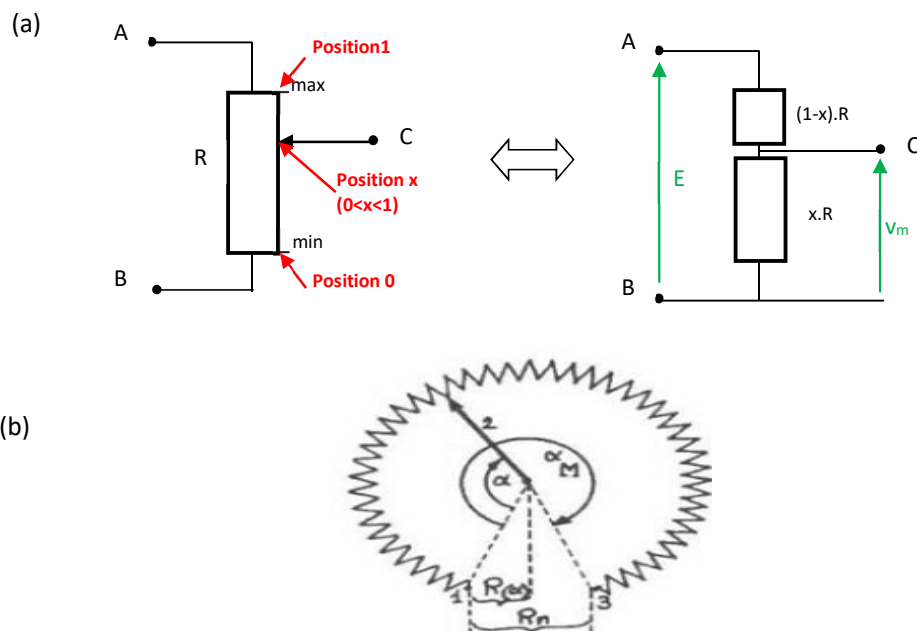
- de position (fonctionnement statique).
- de déplacement (fonctionnement dynamique).

Il est constitué d'une résistance fixe R_n (fil bobiné ou piste conductrice) sur laquelle se déplace un curseur qui assure le contact électrique est lié mécaniquement à la pièce dont on veut traduire le déplacement (Figure IV.1). La résistance entre un des points fixes et le curseur traduit la

position. Selon la forme géométrique de la résistance fixe et donc du mouvement du curseur, on distingue que les mouvements peuvent être rectilignes ou rotatifs.



FigureIV.1 : capteur potentiométrique



FigureIV.2 : Géométries différentes pour les capteurs de position résistif : (a)Potentiomètre de déplacement linéaire (b) Potentiomètre de déplacement angulaire

On applique une tension continue E entre les extrémités A et B du potentiomètre. La tension V en sortie aura l'expression suivante :

Le potentiomètre de déplacement linéaire

$$V = E \frac{(x.R)}{(1-x).R + (x.R)} = \frac{(x.R)}{R} = x.E \quad (IV.1)$$

Le potentiomètre de déplacement angulaire

$$V = E \frac{\alpha}{\alpha_M} \quad (IV.2)$$

Avantage :

- simplicité
- peu coûteux
- angle de mesure 10° à 3600°
- la sortie est indépendante R => stable

Inconvénients :

- charge mécanique
- influence de la source
- influence de l'appareil de mesure.
- Le frottement du curseur provoque une usure de la piste.

IV.1.3. Les Capteurs Inductifs:

Le capteur de proximité inductif détecte tout objet qui a un effet sur un champ magnétique. Donc, le détecteur de proximité inductif détectera uniquement des objets métalliques. Tout objet non-métallique ne sera pas détecté.

Ces capteurs se composent d'un oscillateur ayant pour fonction de générer un champ magnétique de fréquence 100 à 600Hz selon les modèles. Lorsqu'une pièce métallique pénètre dans ce champ, elle est le siège de courants induits circulaires qui se développent à sa périphérie. Ces courants constituent une surcharge pour le système oscillateur et entraînent de ce fait une réduction de l'amplitude des oscillations au fur et à mesure de l'approche de l'objet métallique, jusqu'à blocage complet. La détection est effective lorsque la réduction de l'amplitude des oscillations est suffisante pour provoquer un changement d'état de la sortie du détecteur (figure IV.3).

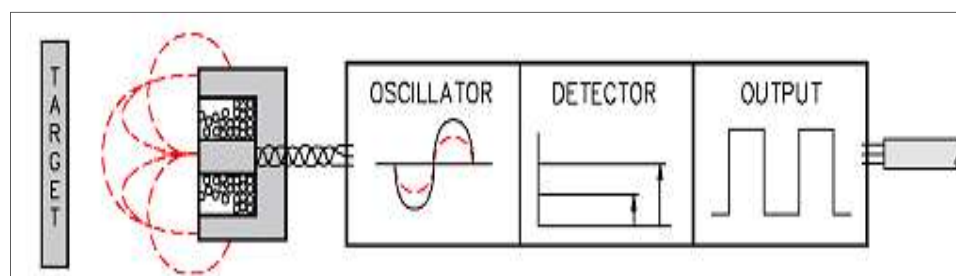


Figure IV.3 : Schéma de principe d'un capteur de proximité inductif

Ces capteurs incluent notamment: commutateurs de proximité, capteurs à inductance variable, capteurs à réluctance variable, synchro machines, résolveurs et capteurs de déplacement linéaires/rotatif LVDT (Linear Variable Differential Transformer)/RVDT (Rotary Variable Differential Transformer)

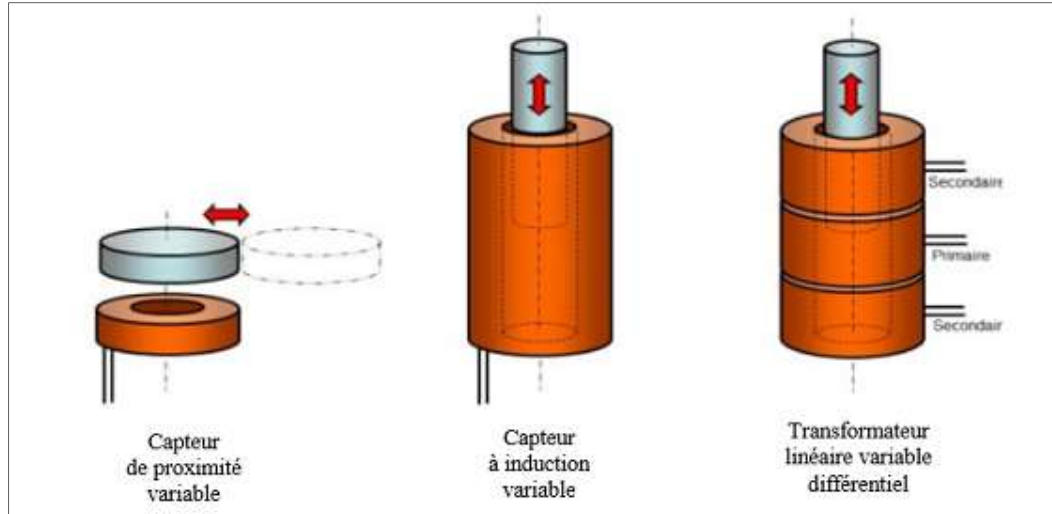


Figure IV.4 : Différents type de capteur inductifs

IV.1.3.1. les Type des Capteurs Inductifs LVDT/RVDT :

Capteur de déplacement inductif utilisant le principe de variation de flux dus au mouvement du noyau. Le primaire est attaqué par un signal sinusoïdal. Un signal sinusoïdal est induit dans les 2 bobines du secondaire.

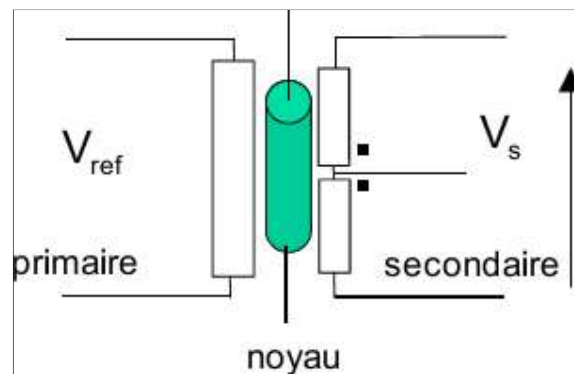


Figure IV.5 : Capteur de déplacement inductif à noyau

Quand le noyau est au milieu du transformateur, on a $V_s=0$, car les tensions induites dans les deux bobines sont d'amplitudes égales mais de sens opposé. Fonction de Transfert du LVDT c'est un capteur linéaire

$$V_m = \frac{-2j\Omega \cdot a \cdot E}{Z_1} \cdot x \quad (IV.3)$$

Z_1 : impédance dans le primaire

x : déplacement du noyau

E : amplitude de la tension d'excitation

(Ωa) : propriété de la bobine

Les capteurs inductifs LVDT et RVDT et les résolveurs permettent de mesurer la variation de couplage inductif entre des bobines, généralement appelées enroulements primaires et secondaires. L'enroulement primaire transmet de l'énergie aux enroulements secondaires, mais le rapport de l'énergie transmise à chacun des enroulements secondaires varie proportionnellement au déplacement relatif d'une cible magnétiquement perméable.

- Dans un capteur inductif LVDT, il s'agira généralement d'une tige métallique passant à travers l'alésage des enroulements.
- Dans un capteur inductif RVDT ou un résolveur, il s'agit généralement d'un rotor ou d'une pièce polaire tournant par rapport aux enroulements disposés autour de la périphérie du rotor.

IV.1.3.2. Les Caractéristiques des Capteurs Inductifs :

Les caractéristiques principales des capteurs de proximité inductifs sont :

- ✓ Robustes et fiables.
- ✓ Ne détectent que les métaux.
- ✓ Les portées disponibles vont de 25 micromètres à 6 centimètres.
- ✓ Ces détecteurs utilisent des principes basés sur le magnétisme, ils sont sensibles aux champs magnétiques.
- ✓ indépendants des facteurs suivants: contacts électriques mobiles-température, humidité, eau et condensation, corps étrangers (saleté, graisse, gravier, sable, etc.).

Il faut donc éviter de les utiliser dans un environnement où des champs magnétiques sont présents

IV.1.4. Capteurs de Position Capacitive :

IV.1.4.1. Principe :

Il s'agit de condensateurs plans ou de condensateurs cylindriques dont l'une des armatures subit le déplacement à traduire $\Rightarrow$ variation de la capacité :

Plan:

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{e} \cdot S \quad (IV.4)$$

Cylindrique:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (IV.5)$$

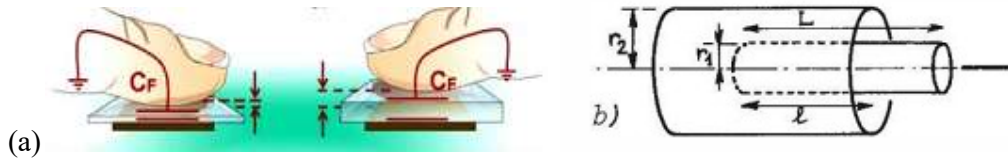


Figure IV.6 : Principe des capteurs capacitifs à surface variable.(a) plan, (b) cylindrique.

Le déplacement de l'armature peut s'effectuer :

- ✓ dans le cas d'un condensateur plan,
 - soit dans son propre plan : S variable, e constant,
 - soit perpendiculairement à son plan : S constant, e variable ;
- ✓ dans le cas d'un condensateur cylindrique
 - uniquement parallèlement à l'axe : l variable.

Le principe de mesure le plus adéquat est celui qui assure la meilleure linéarité entre déplacement et signal de mesure. Selon le conditionneur associé au capteur, ce signal peut être fonction linéaire :

- de la variation de capacité ΔC ;
- ou de la variation d'impédance ΔZ ;
- ou enfin de la variation relative $\Delta Z/Z$, ($\Delta Z/Z = - \Delta C/C$) .

Afin d'utiliser le dispositif de mesure le plus approprié, il faut déterminer pour chaque type de capteur capacitif les différentes sensibilités au déplacement.

IV.1.4.2. Application :

Le capteur capacitif est très utilisé pour les faibles déplacements, ainsi que pour les capteurs miniaturisés MEMS (Micro-Electro Mechanical System, tels que les accéléromètres. Grâce à sa simplicité de fabrication il peut être utilisé à très haute température, des capteurs ont été

construits pour fonctionner à plus de 1000°C, en utilisant des isolants céramiques les principaux défauts sont :

- Une étendue de mesure faible (quelques millimètres).
- Un fonctionnement non linéaire.
- La dépendance de leur réponse (assez souvent) de la forme, des dimensions, du matériau de la cible (étalonnage délicat et spécifique à l'application).
- Une sensibilité importante à son environnement (pollution électromagnétique).

IV.1.5. Capteurs Ultrasonores :

IV.1.5.1. Principe :

Émission et réception d'une onde acoustique. La distance entre l'émetteur et l'obstacle est donnée par le temps de vol de l'onde acoustique. L'émetteur et le récepteur sont situés dans le même boîtier. L'émetteur envoie un train d'ondes qui va se réfléchir sur l'objet à détecter et ensuite revenir à la source. Le temps mis (1 temps + 2 temps) pour parcourir un aller-retour permet de déterminer la distance de l'objet par rapport à la source. Plus l'objet sera loin plus il faudra longtemps pour que le signal revienne. La mesure dépend de :

- l'amplitude de l'écho
- de l'angle d'incidence du faisceau sur l'objet

$$d = \frac{T \cdot v \cdot \cos \theta}{2} \quad (\text{IV. 6})$$

v : vitesse de l'onde dans le milieu

T : temps entre l'émission et la réception de l'onde

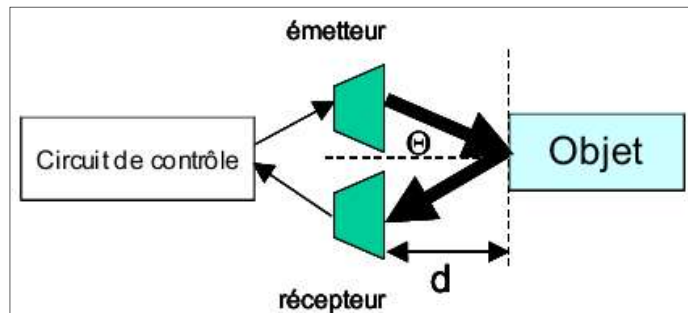


Figure IV.7 : Principe de fonctionnement d'un capteur à ultrasons

Avantage

- Le capteur permet de détecter tout type de matériau réfléchissant le son indépendamment de la forme et de la couleur sauf les objets absorbants les ondes sonores tel que la ouate, le feutre,...
- Le signal est transmis grâce à la présence de l'air, il faut donc éviter les courants d'air qui détourneraient le signal de leurs destinations.
- Aucun fonctionnement possible dans le vide.

Inconvénients

- E.M à partir du cm
- dépend de l'angle de réflexion

IV.1.6. Capteurs de position optiques :

Émission et réception d'un faisceau optique et mesure de distance suivant un principe de triangulation optique. La lumière réfléchiée est focalisée sur la surface du capteur PSD (Position sensitive detector).

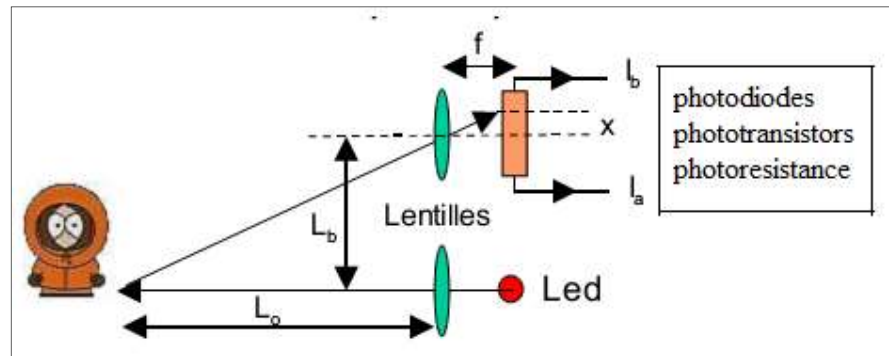


Figure IV.8 : Principe de fonctionnement d'un capteur position optique.

Un montage avec ce type de capteurs nécessite :

- Une source lumineuse directive. (ex : Led)
- Un miroir sur l'objet pour renvoyer le rayon (Lentilles).
- Une partie réceptrice faite par des PSD (photodiodes, phototransistors.....).

Le capteur délivre alors un courant I_a et I_b proportionnelle à la distance x du point d'impact du faisceau au milieu du capteur. Le courant délivré par chaque diode dépend de la surface éclairée et donc de la position de l'objet (du miroir).

IV. 2. Les capteurs d'efforts, force et pression

IV.2.1. Définition :

Un capteur d'effort est un transmetteur qui transforme un effort physique (force, un poids, une tension, une compression ou une pression) en un signal électrique proportionnel qui peut être mesuré, converti et analysé. Lorsque l'effort appliqué au capteur augmente, le signal électrique change proportionnellement.

La technologie de capteur à jauge de contrainte facilite la conception de capteurs adaptés à tous types d'applications

IV.2.2. Les Capteurs de Force :

Un capteur de force est un transmetteur qui transforme une force physique (un poids, une tension, une compression ou une pression) en un signal électrique proportionnel qui peut être mesuré, converti et analysé. Un capteur de force ou cellule de charge est un système qui produit un signal de sorti proportionnel à la force ou au poids appliqué. En mesure de force, un capteur est souvent composé d'un bloc sur lequel sont collées des jauges de contraintes.

Les capteurs de force reposent sur la déformation de divers corps d'épreuve. Les technologies les plus utilise pour mesurer cette déformation sont :

- ✓ Jauge extensiométrique (ou jauge de contraintes);
- ✓ La transduction piézoélectrique;
- ✓ La transduction capacitive;

IV.2.2.1. Capteurs a Jauges d'Extensomètre (ou de Contrainte) :

Le principe de fonctionnement de la jauge de contrainte repose sur le changement de résistance que subit un conducteur électrique soumis à une déformation. La résistance d'un conducteur ou d'un semi-conducteur, dépend aussi de la géométrie. Ainsi, pour un fil cylindrique de résistivité ρ , longueur l et de section S , la résistance est donnée par la relation

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (IV. 7)$$

Si cette géométrie est modifiée, cela entrainera des changements aux valeurs des variables l et S , ce qui fera varier la valeur de la résistance R . Cela est utilisé dans les jauges de

contraintes qui sont basées sur la modification de la résistance sous l'effet d'une déformation mécanique liée à un effort (flexion, torsion, ...) ou à une pression. La déformation du conducteur. La relation générale pour les jauges est :

$$\frac{\Delta R}{R_0} = K \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{IV.8})$$

où K est le facteur de jauge.

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.

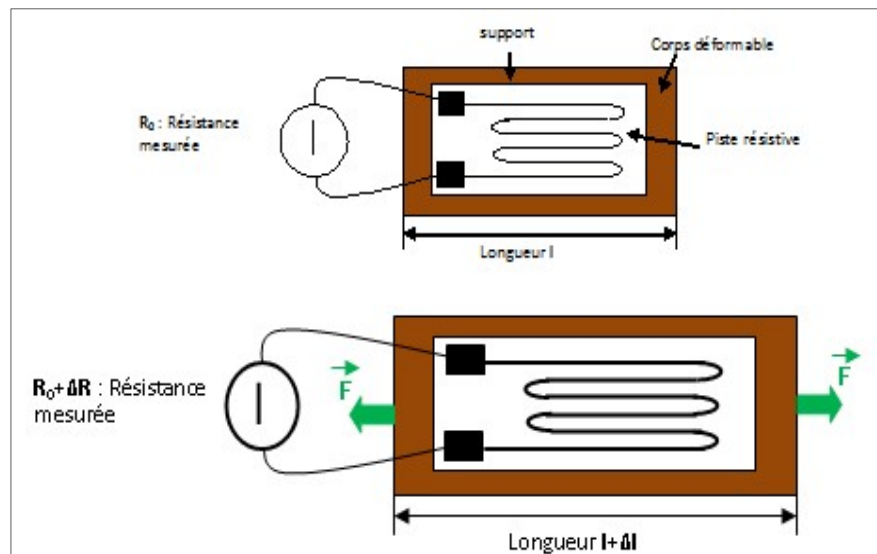


Figure IV.9 : jauges d'extensomètre avant et après l'effet d'une déformation

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

IV.2.2.2. Capteurs à Effet Piézoélectrique :

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

La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains corps (quartz par ex.) de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique. De façon simple, on peut retenir que la charge électrique Q (Coulomb) qui apparaît sur les électrodes du capteur est proportionnelle à l'effort F. La charge générée par unité de surface est donnée par la relation

$$q = k \cdot \chi \quad (\text{IV.9})$$

La variable k représente le nombre de charges (en Coulomb par Newton) et χ représente la contrainte mécanique. Pour une tige rectangulaire de section A soumise à une force de compression F , la contrainte est :

$$\chi = \frac{F}{A}$$

La charge totale est donc donnée par :

$$Q = q \cdot A = k \cdot F \quad (\text{IV. 10})$$

Schéma :

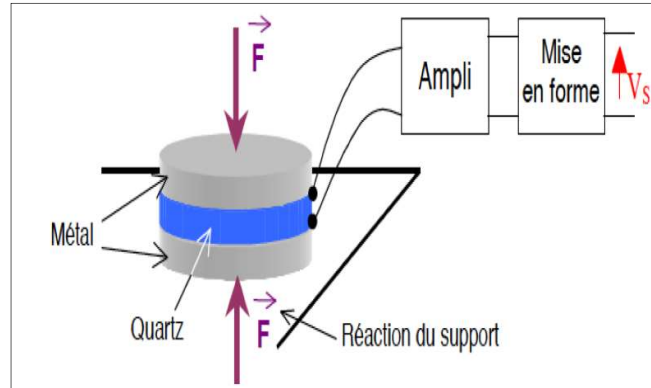


Figure IV.10 : Capteur de force à piézoélectrique

$$V_0 = -\frac{1}{C} \int i \, dt = -\frac{k \cdot F}{C} \quad (\text{IV. 11})$$

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

$$V_S = k \cdot (F + F) = 2k \cdot F \quad (\text{IV. 12})$$

Avec k constante pour le quartz, $k=2,3 \cdot 10^{-12}$ Coulomb/Newton.

IV.2.3. les Capteurs de Pression :

Un corps liquide ou gazeux enfermé dans un récipient, qu'il remplit entièrement, exerce sur toutes les parois de celui-ci une force dite de pression. La pression est une grandeur dérivée du système international. Elle est définie comme le quotient d'une force F par une surface S .

$$P = \frac{F}{S} \quad (\text{IV. 13})$$

Ce quotient est indépendant de l'orientation de la surface. La pression s'exerce perpendiculairement à la surface considérée.

IV.2.3.1. Les Différentes Unités de Pression :

La relation de p définit, à la fois, la pression et l'unité de pression en tant qu'unité dérivée. Cette unité, le pascal (Pa), correspond dans le Système International (S.I.) à une pression uniforme exerçant sur une surface de un mètre carré, une force totale de un newton.

$$\checkmark \quad 1 \text{ Pascal} = 1 \text{ Newton} / 1\text{m}^2 \quad \text{ou} \quad 1\text{Pa} = 1\text{N}/1\text{m}^2$$

La pression d'un pascal étant relativement faible on utilise de préférence pour la mesure des pressions dans l'industrie son multiple le bar.

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

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

IV.2.3.2 Mesure de la Pression :

La mesure de la pression se ramène à la mesure de la force F s'exerçant sur la paroi de séparation de deux milieux. L'information obtenue est convertie en une grandeur exploitable, qui peut être :

- ✓ un déplacement.
- ✓ une grandeur électrique (le plus souvent, une résistance).

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).

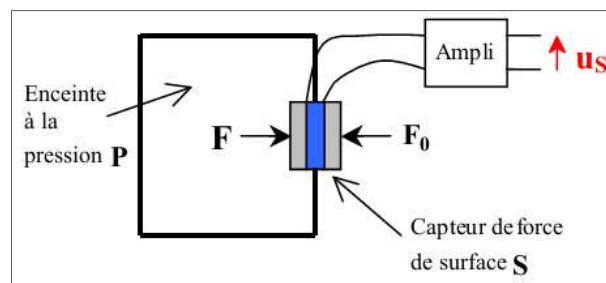


Figure IV.11 : Capteur de pression à piézoélectrique

$$\text{On a } F = P.S ; F_0 = P_0.S \text{ et } U_S = k.(F + F_0)$$

(Capteur de force, k = constante).

$$\text{Donc: } U_S = k.S (P + P_0) = k' (P + P_0) \Rightarrow U_S = k' (P + P_0) .$$

Il s'agit ici d'un capteur de pression qui mesure la somme de la pression extérieure P_0 et de la pression de l'enceinte P .

IV.2.3.3 Conversion par Jauges d'extensiométrie :

Des jauges de contraintes sont collées sur le corps d'épreuve. Elles sont montées sur un pont de Wheatstone, par deux, ce qui permet une compensation des grandeurs d'influences. Le curseur

d'un potentiomètre est lié, avec ou sans démultiplication, à une membrane. Le déplacement de la membrane entraîne le curseur. Le potentiomètre est relié à une source électrique et la mesure de la tension au niveau du curseur donne une image de la pression.

IV.2.3.3. Autres Procédés :

* Mesure de pression par Variation de Capacité.

On peut considérer que la membrane, si elle est métallisée, est une plaque de condensateur. La variation de la pression entraîne un déplacement de cette plaque et s'il existe une autre plaque fixe, il y a variation de la distance entre ces deux plaques quand la pression varie. S'il y a un diélectrique entre ces deux plaques (de l'air le plus souvent), l'ensemble forme une capacité variable en fonction de la pression puisque l'épaisseur du diélectrique varie en fonction de la pression.

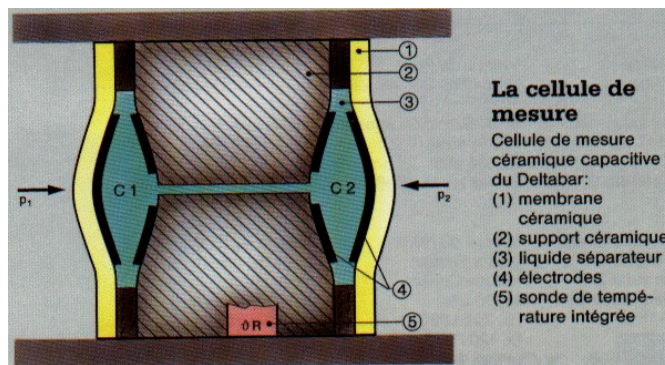


Figure IV.12 : Variation différentielle de capacité

* Mesure de pression par un Système piézoélectrique.

Par pression sur une des faces (munies d'armatures métalliques) d'un cristal de quartz, on fait apparaître des charges électriques. Ces charges sont donc image de la pression exercée sur la face du cristal. Pour mesurer une pression, il faut qu'une des faces du cristal soit en contact avec le milieu dont on veut connaître la pression.

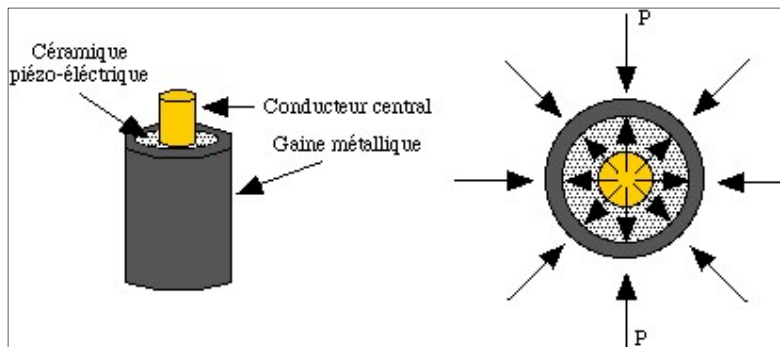


Figure IV.13 : Mesure de P par un piézoélectrique

Des structures piézo-électriques tubulaires ont été développées sous forme de câble coaxial blindé. Elles permettent la mesure de faibles variations de pressions en milieu haute pression ou pour le contrôle de trafic.

IV.2.4. Les différents types de pression :

IV.2.4.1. La pression atmosphérique :

La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer, à 15 °C, est de 1013 mbar. Elle peut varier, de ± 25 mbar, avec la pluie ou le beau temps. Elle est fonction de l'altitude (hydrostatique).

La pression relative

C'est la différence de pression par rapport à la pression atmosphérique. C'est la plus souvent utilisée, car la plupart des capteurs, soumis à la pression atmosphérique, mesurent en relatif. Pour mesurer en absolu, il leur faut un vide poussé dans une chambre dite de référence.

Exemple : La pression de gonflage d'un pneu de voiture.

La pression absolue

C'est la pression réelle, dont on tient compte dans les calculs sur les gaz. Elle est comptée à partir de zéro.

Remarque : on peut rajouter 1 bar à la pression relative pour avoir une approximation de la pression absolue.

Le vide

Le vide est une pression inférieure à la pression atmosphérique. Le vide parfait correspond théoriquement à une pression absolue nulle. Il ne peut être atteint, ni dépassé. Quand on s'en approche, on parle alors de vide poussé.

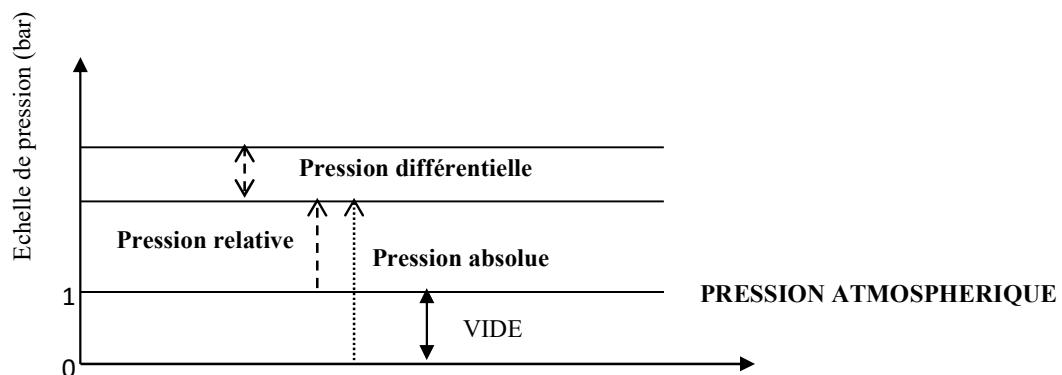


Figure IV.14 : présentation des pressions mesurables par les capteurs de pression

IV.2.5. Pression pour les fluides (liquide et gaz) :

Les fluides sont également soumis à la force de pesanteur. C'est pourquoi par exemple, dans le cas d'une colonne liquide, contenue dans un tube ouvert, placé verticalement, la pression en un point M, à la distance h de la surface libre, est égale à la pression atmosphérique p_0 augmentée du poids de la colonne s'exerçant sur l'unité de surface. De même, pour un fluide soumis à une accélération quelconque, il y a lieu de tenir compte de l'influence de la force d'inertie sur la pression.

IV.2.5.1. Pression hydrostatique :

À l'intérieur d'une colonne de fluide se crée une pression due au poids de la masse de fluide sur la surface considérée. Cette pression est :

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (\text{IV. 14})$$

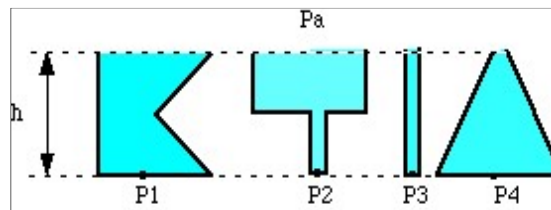


Figure IV.15 : Pression hydrostatique a différents colonne de fluide

Pour chacun des trois récipients, la pression au fond de ceux-ci est identique :

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = \rho \cdot g \cdot h + P_a$$

IV.2.5.2. Pression hydrodynamique :

Un fluide se déplaçant crée une pression supplémentaire P :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad (\text{IV. 15})$$

avec V la vitesse de déplacement du fluide. La pression totale est la somme de la pression hydrostatique, de la pression due aux forces extérieures et de la pression hydrodynamique. Celle-ci a la même valeur en tous points pour un fluide en mouvement horizontal (incompressible de viscosité négligeable), c'est le théorème de Bernouilli.

IV.2.6. Manomètres hydrostatiques :

Un manomètre est un instrument servant à mesurer une pression. On a développé depuis les débuts de l'époque moderne de nombreux appareils pour mesurer les pressions et le degré de vide.

IV.2.6.1. Manomètre à tube en U :

Les manomètres à colonne de liquide couvrent un domaine de 0 à $5 \cdot 10^5$ Pa pour la mesure de pression de gaz uniquement. La sensibilité de l'appareil est :

$$S = \frac{dh}{dP} = \frac{1}{\rho \cdot g} \quad (\text{IV. 16})$$

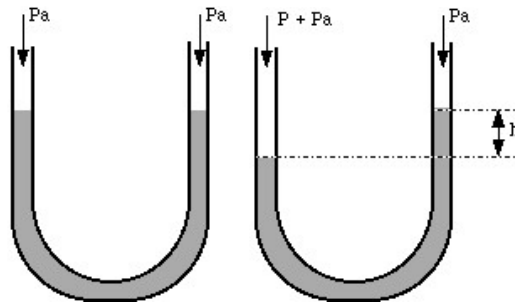


Figure IV.16: Manomètres à colonne U de liquide

On peut augmenter la lisibilité en utilisant un tube en U de sections inégales

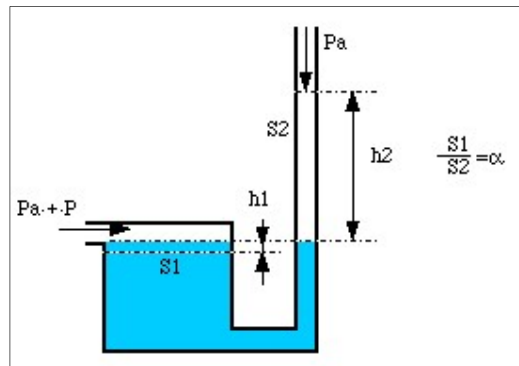


Figure IV.17 : manomètres à colonne a deux sections différents

Les avantages des manomètres à tubes sont :

- Bonne précision, on peut dépasser 0,1 %.
- Bonne stabilité.
- Construction simple et peu coûteuse.

Inconvénients :

- Encombrant et fragile.
- Ils sont sensibles à la température et aux vibrations.
- Les tubes doivent être parfaitement calibrés.

- Les liquides visqueux, malpropres, les tubes gras, sont des causes d'erreurs.
- Ces appareils ne traduisent pas la pression mesurée en un signal analogique exploitable en régulation industrielle.

IV.2.6.2. Manomètres à déformation de solide :

Le manomètre à tube de Bourdon :

Le tube de Bourdon est brasé, soudé ou vissé avec le support de tube qui forme généralement une pièce complète avec le raccord. Par l'intermédiaire d'un trou dans le raccord, le fluide à mesurer passe à l'intérieur du tube. La partie mobile finale du tube se déplace lors de changement de pression (effet Bourdon). Ce déplacement qui est proportionnel à la pression à mesurer, est transmis par l'intermédiaire du mouvement à l'aiguille et affiché sur le cadran en tant que valeur de pression. Le système de mesure, le cadran et l'aiguille sont montés dans un boîtier. Les manomètres à tube de Bourdon sont utilisés pour la mesure de pressions positives ou négatives de fluides gazeux ou liquides, à condition que ceux-ci ne soient ni hautement visqueux ni cristallisant.

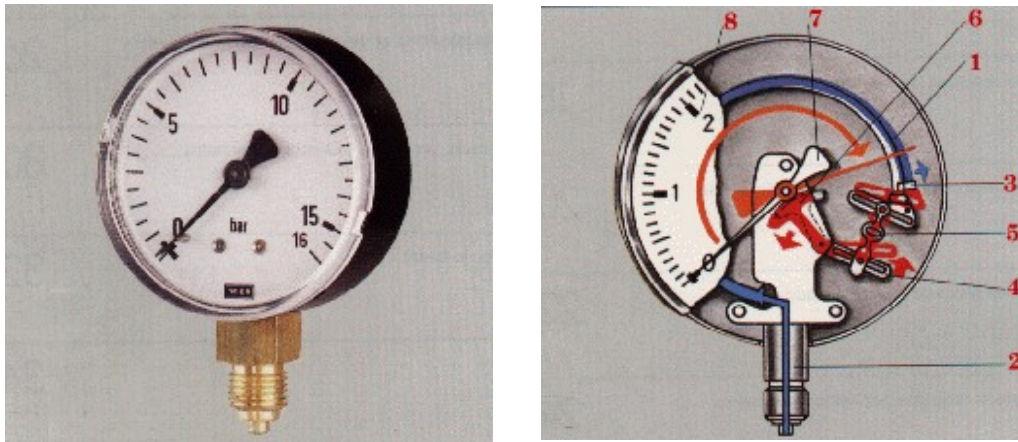


Figure IV.18: manomètres à tube de Bourdon : 1. Organe moteur, tube de Bourdon , 2. Support de tube 3.

Capuchon du tube, 4. Secteur denté, 5. Bielle, 6. Engrenage, 7. Aiguille, 8. Cadran

Manomètre à membrane

La membrane est tendue entre deux brides. Par un trou dans le raccord, le fluide à mesurer arrive dans la chambre de pression en dessous de la membrane. La membrane se déplace sous l'effet de la pression. Le déplacement de la membrane est proportionnel à la pression mesurée et est transmis par l'intermédiaire du mouvement à l'aiguille et affiché sur le cadran en tant que valeur de pression. Afin d'être protégés contre des détériorations, le système de mesure, le cadran et l'aiguille sont montés dans un boîtier. En cas de risque de corrosion due à des fluides agressifs, on peut protéger toutes les parties en contact avec le fluide par enduction de plaque ou par un film de protection.

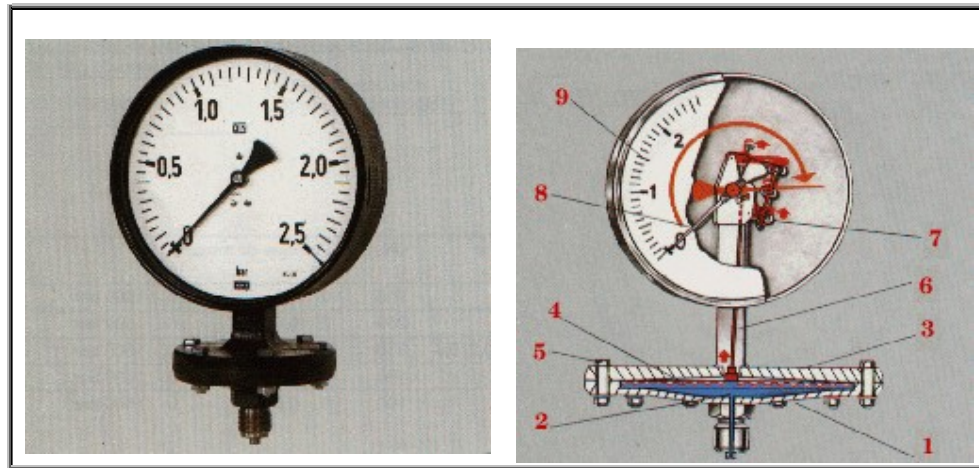


Figure IV.19 : manomètres à membrane : 1. Bride inférieure, 2. Chambre de pression, 3. Bride supérieure, 4. Organe moteur, la membrane, 5. Vis, 6. Bielle, 7. Engrenage, 8. Aiguille, 9. Cadran

Les manomètres à membrane sont utilisés principalement pour la mesure de faibles pressions positives ou négatives de fluides gazeux ou liquides

Manomètre de pression absolue

Le principe de mesure de la pression absolue est indépendant de la forme de l'organe moteur. La pression du fluide à mesurer est mesurée par rapport à une pression de référence qui doit être égale à la pression absolue (vide absolu). C'est à dire le côté de l'organe moteur qui n'est pas en contact avec le fluide à mesurer doit se trouver à cette pression de référence. Selon la forme de l'organe moteur, on l'atteint en évacuant et étanchéifiant soit une chambre de référence soit le boîtier enveloppant le système. La transmission du mouvement de l'organe moteur s'effectue comme pour les manomètres pour pression relative.

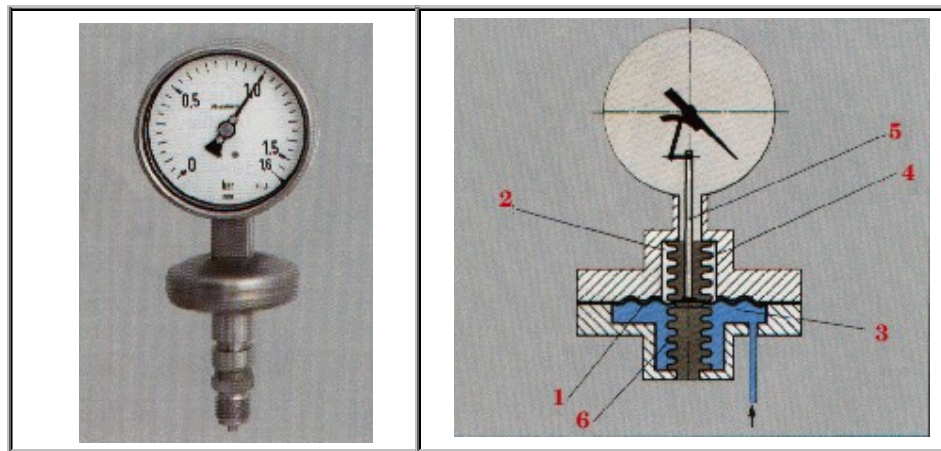


Figure IV.20 : manomètres pour pression absolue : 1. Organe moteur, 2. Chambre de référence, 3. Chambre de mesure, 4. Soufflet métallique, 5. Bielle

Les manomètres pour pression absolue sont utilisés pour la mesure de pression sans subir les variations de la pression atmosphérique environnante.

Manomètre à capsule

La capsule est montée sur le raccord soit directement soit par l'intermédiaire d'un tube métallique. Par un trou dans le raccord le fluide à mesurer passe à l'intérieur de la capsule. Sous l'effet de la pression les demi-parties de la capsule se bombent. Ce déplacement proportionnel à la pression mesurée est transmis par l'intermédiaire du mouvement à l'aiguille et affiché sur le cadran en tant que valeur de pression. Afin d'être protégés contre des détériorations, le système de mesure, le cadran et l'aiguille sont montés dans un boîtier.

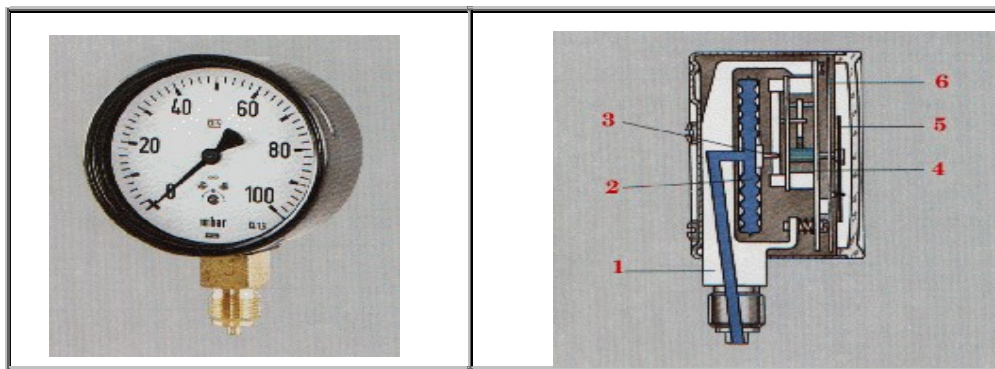


Figure IV.21 : manomètres à capsule : 1. Support de l'organe moteur, 2.Organe moteur, la capsule, 3.Biellette, 4.Mouvement, 5.Aiguille, 6.Cadran

Les manomètres à capsule sont utilisés pour la mesure de faibles et très faibles pressions positives ou négatives, spécialement pour des fluides gazeux. Il y a certaines restrictions pour la mesure de liquides.

Manomètres Pour Pression Différentielle

Une capsule montée dans un boîtier étanche résistant à la pression, est soumise, de l'intérieur et de l'extérieur, à une pression. La différence de pression entre les deux parties provoque un mouvement de la capsule. Ce déplacement proportionnel à la différence de pression mesurée est transmis, par l'intermédiaire du mouvement à l'aiguille sur le cadran en tant que valeur de pression différentielle. Les deux pressions individuelles ne sont pas affichées.

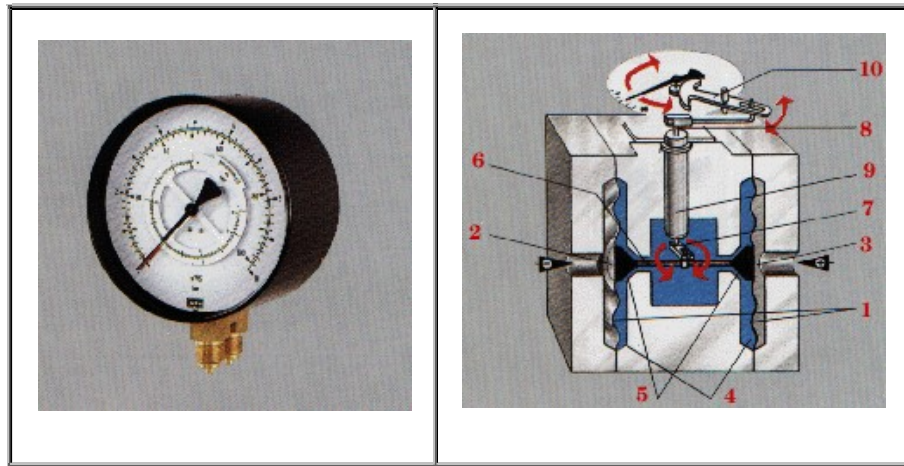


Figure IV.22 : manomètres pour pression différentielle : 1. Organe moteur, 2. la membrane, 3. Chambre de mesure (-), 4. Chambre de mesure (+), 5. Chambre de mesure, 6. Soupape double, 7. Bielle, 8. Levier de transmission, 9. Axe d'entraînement, 10. Tube de torsion, 11. Mouvement.

Les manomètres pour pression différentielle sont utilisés pour mesurer la différence de pression de deux pressions individuelles. Ils sont construits avec toutes les formes d'organe moteur tel qu'ils sont utilisés dans les manomètres pour pression relative. Les plus courants sont les tubes de Bourdon, les membranes et les capsules.

IV. 3. CAPTEURS DE TEMPERATURE

IV.3.1. Introduction :

La mesure de la température est très importante puisque la température détermine de façon décisive les propriétés de la matière (solide, liquide ou gazeuse). Elle agit sur les propriétés physiques de la matière: Pression, Résistivité électrique, Changement de phase Pour cette raison la température est l'une des grandeurs physiques les plus mesurées.

Les capteurs de température sont les plus utilisés dans l'industrie et les domaines de la science et la technologie. On trouve les instruments manuel, les sondes industrielles : thermocouples, sondes Pt100 et thermistances ; enfin le cas des mesures par infrarouge.

La mesure de température a lieu avec des éléments qui varient en fonction de la température : thermistances, thermocouples. Sondes.

On décompose les capteurs de température en deux sous-catégories :

- Les capteurs passifs, à résistance ou thermistance ;
- Les capteurs actifs, à couple thermoélectrique.

IV.3.2. Échelles des Températures :

Une échelle de température a été mise au point au niveau international, (Echelle Internationale de Température EIT) qui a été défini sur des points de référence fixe de température basés sur des phénomènes physiques de changement d'état d'un corps

Il faut tout d'abord rappeler les correspondances entre les différentes échelles de température :

Échelle de Kelvin :

L'unité est le Kelvin (K). Cette échelle se base sur la valeur de la température du point triple de l'eau étant fixé à 273,16. Le point triple de l'eau est la température d'équilibre entre la phase solide, liquide et vapeur.

Échelle de Rankin :

L'unité est le degré Rankin (°R) qui est égal à 9/5 de kelvin ; la température du point triple de l'eau est donc de 491,69 CR.

Échelle de Celsius :

L'unité est le degré Celsius (°C). Cette échelle se base sur l'échelle absolue de Kelvin :

$$T(^{\circ}C) = T(K) - 273,15 \quad (IV. 17)$$

Échelle de Fahrenheit :

L'unité est le degré Fahrenheit (°F). Cette échelle s'obtient par décalage de l'échelle absolue de Rankin :

$$T(^{\circ}F) = T(^{\circ}R) - 459,67 \quad (\text{IV. 18})$$

La relation de la conversion entre l'échelle de Celsius et celle de Fahrenheit :

$$T(^{\circ}C) = (T(^{\circ}F) - 32) \cdot \frac{5}{9} \quad (\text{IV. 19})$$

La figure IV.22 donne l'équivalence entre les différentes échelles :



Figure IV.22 : Echelles de températures

IV.3.3. Thermomètres A Dilatation :

C'est la dilatation des corps qui sera le phénomène image de la grandeur thermométrique. On constate en effet que le volume d'un corps augmente en général, lorsque sa température s'élève (sans qu'il y ait de changement d'état physique). La dilatation étant réversible, elle fournit un mode pratique de repérage des températures. Ce phénomène se retrouve de façon analogue, mais avec une ampleur différente pour les liquides, les gaz et les solides. D'où les trois types de thermomètres à dilatation.

- Thermométrie à dilatation de liquide
- Thermométrie à dilatation de gaz
- Thermométrie à dilatation de solide

IV.3.4. Thermomètres Electriques :

Les capteurs électriques qui suivent auront l'avantage d'une plus grande souplesse d'emploi (information transmissible, enregistrement) tout en gardant une précision suffisante pour les emplois industriels et beaucoup d'emplois de laboratoire.

On décompose les capteurs de température en deux sous-catégories :

- Les capteurs passifs, à résistance ou thermistance ;
- Les capteurs actifs, à couple thermoélectrique.

IV.3.4.1. Thermomètres à Résistance et à Thermistance :

Le fonctionnement des thermomètres à résistance et thermistances est basé sur le même phénomène physique ; l'influence de la température sur la résistance électrique d'un conducteur. La mesure d'une température est donc ramenée à la mesure d'une résistance. On parlera du thermomètre à résistance d'une part et de thermistance d'autre part.

IV.3.4.1.1. Capteur De Température à Base d'une Résistance Métallique :

Le conducteur est un élément métallique. On peut établir une relation entre la résistance R et la température T et ainsi mesurer T en mesurant R . le domaine de température exploré jouent un rôle important dans la variation de $R(T)$. Dans le cas d'un matériau en PLATINE, sa résistance électrique dépend de la température suivant la relation :

$$R(T) = R(T_0) \cdot (1 + AT + BT^2 + CT^3) \quad (\text{IV. 20})$$

Pour une PT100 est une sonde platine où A , B et C des constantes caractéristiques du matériau et T et la température de mesure.

La sensibilité thermique d'une résistance métallique dépend de la nature du métal de sa pureté ainsi que de la plage de température explorée.

Pour des petites variations ΔT de température autour d'une valeur T la loi générale de variation de résistance peut être linéarisée :

$$R(T + \Delta T) = R(T_0) \cdot (1 + \alpha_R \cdot \Delta T) \quad (\text{IV. 21})$$

$$\alpha_R = \frac{1}{R(T_0)} \cdot \frac{dR(T)}{dT} \quad (\text{IV. 22})$$

α_R : Représente la sensibilité thermique à la température T appelé également coefficient de température de la résistance, dépend évidemment de la température et du matériau.

Exemple, la sonde PT100 est un thermomètre à résistance de platine ; elle est caractérisée par :

- Il est constitué d'un film ou d'un fil de platine, sa résistance vaut : $100 \, \Omega$ à 0°C et $138,5 \, \Omega$ à 100°C .
- La sensibilité pour la PT100 est environ $0,4 / ^\circ\text{C}$; si le courant de mesure est de 5mA , on aura alors $2\text{mV} / ^\circ\text{C}$ aux bornes de la sonde.
- Le temps de réponse (la rapidité) dépend de la résistance thermique de l'enrobage et de la gaine. En général, $\sim 1 \text{ s}$ dans l'eau, $\sim 10 \text{ s}$ dans l'air.

- Influence du courant de mesure. Pour éviter l'auto-échauffement de la sonde on limite le courant de mesure de la sonde $< 10\text{mA}$.

Avantages :

- simplicité de mise en oeuvre,
- mesure de températures élevées et très basses (-220°C à 780°C),
- Précision.

Inconvénients :

- sujet à l'auto-échauffement.

IV.3.4.1.2. Thermomètres à Thermistance :

Les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température du milieu où il est plongé. L'exploitation de cette caractéristique a permis leur utilisation en tant que capteur de température et la fabrication de composants « thermiques » tels que les THERMISTANCES.

Une thermistance est un composant électronique dont la résistance électrique est très sensible à la température. L'expression de sa résistance s'écrit

$$R(T) = R(T_0) \cdot \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

Où $R(T_0)$ est la résistance de la thermistance à $T=T_0$

B : une constante caractéristique du matériau formant la thermistance, généralement comprise entre 3000K et 5000K

T : la température à mesurer en Kelvin $[T]=\text{K}$.

Dans ces conditions : La sensibilité thermique de la thermistance s'écrit sous la forme suivante :

$$\alpha_R = \frac{1}{R(T)} \cdot \frac{dR(T)}{dT} = - \frac{B}{T^2}$$

La composition d'une thermistance peut-être, par exemple :

- Fe_2O_3 (oxyde ferrique) ;
- MgAl_2O_4 (aluminate de magnésium) ;
- Zn_2TiO_4 (titane de zinc).

Il existe deux types de thermistance, les CTN à coefficient de température négatif, et les CTP à coefficient de température positif.

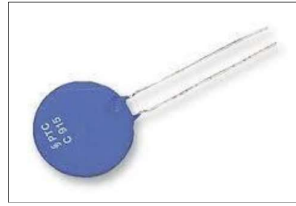


Figure IV.23 : Thermomètre à base de thermistances

Un résistor à CTN (coefficient de température négatif) :**Avantage :**

- ✓ simplicité de la mise en œuvre
- ✓ très économique (prix bas).

Inconvénients :

- ✓ La variation n'est pas très linéaire
- ✓ La température ne doit pas excéder 120°C à 150°C

Un Résistor à CTP (coefficient de température positif) :

Sa courbe de variation n'est absolument pas linéaire et présente un seuil marqué. On l'utilise pour détecter le seuil de température pour lequel il est fabriqué.

Avantage :

- ✓ très économique (prix bas).

Inconvénients :

- ✓ on ne peut pas faire de mesure mais seulement de la détection,
- ✓ la température ne doit pas excéder 150°C à 170°C

IV.3.5. Capteurs de Température Electroniques :**IV.3.5.1. Thermométrie par Diode et Transistor.**

La valeur de la température est obtenue via la mesure de la tension aux bornes d'une jonction.

En effet, en polarisation directe, on peut écrire :

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (\text{IV. 23})$$

avec :

I_0 , courant inverse de saturation (dépendant de T).

q , charge élémentaire.

k , constante de Boltzmann.

T , température (en K).

V , tension appliquée à la jonction.

Montages utilisés :

- ✓ des diodes.
- ✓ des transistors montés en diodes (base et collecteur reliés).
- ✓ des transistors appariés (fabriqués sur la même "puce") montés en diodes. Dans ce cas, le capteur fonctionne de façon quasi linéaire.

Les capteurs doivent être associés à une source de courant constante. Ils peuvent être utilisés de -50°C à $+150^{\circ}\text{C}$. Ils existent souvent sous forme de circuit intégré.

a. Capteurs à variation Zéner (LM135) :

Ce type de capteur est électriquement équivalent à une diode Zener dont la tension disruptive serait proportionnelle à la température absolue ; sa sensibilité est de 10 mV/K . Un schéma de principe simplifié est indiqué en Figure IV.23 :

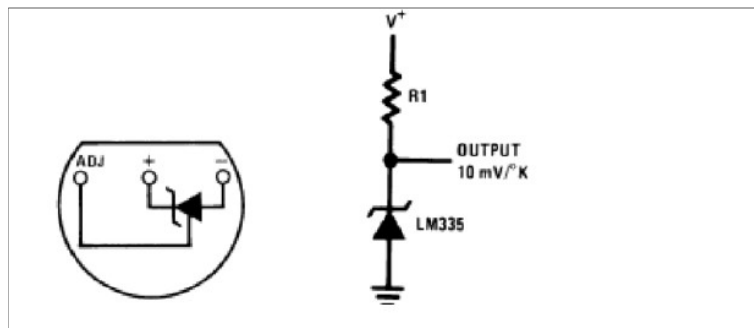


Figure IV.24 : Capteur LM135, Application d'un capteur de température de base

Avantage :

- simplicité de mise en œuvre.
- linéarité.
- amplitude relativement importante.

Inconvénients :

- La température ne doit pas excéder 150°C à 170°C .
- on ne peut pas faire de mesure mais seulement de la détection.

IV.3.5.1. Capteurs Actifs, à Couple Thermoélectrique :

Un thermocouple est constitué de deux conducteurs A et B formant entre eux deux jonctions aux températures T_1 et T_2 . Ce circuit induit une f.é.m qui dépend d'une part de la nature des conducteurs A et B et d'autre part des températures T_1 et T_2 . En générale l'une des températures est fixe, connue et sert comme référence ($T_1 = T_{\text{réf}}$) ; l'autre température T_2 est celle T_c cherchée.

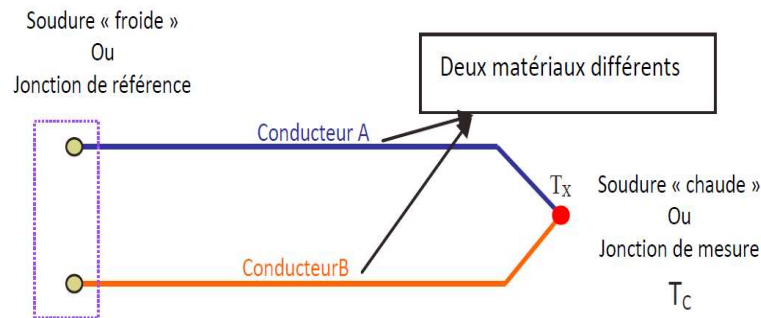


Figure IV.25 : Principe de base d'un thermocouple

Cette tension thermoélectrique ($E_{A/B}^{T_1 T_2}$) est connue sous le nom de tension de Seebeck, d'après Thomas Seebeck qui l'a découverte en 1821.

Le principe du thermocouple est basé sur l'effet Seebeck (Figure IV.24 (c)), qui n'est autre que la combinaison de l'effet Thomson (Figure IV.24 (a)) et de l'effet Peltier (Figure IV.24 (b)).

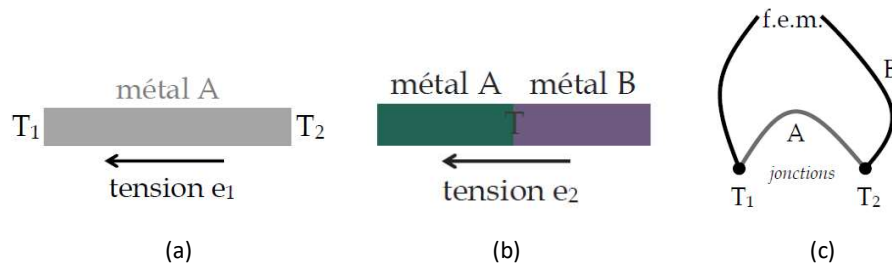
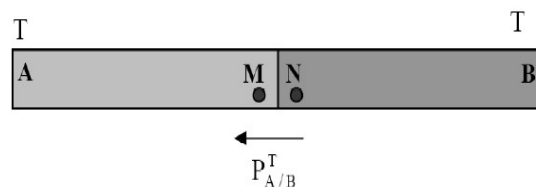


Figure IV.26 : Le principe du thermocouple; (a) Effet Thomson , (b) Effet Peltier,(c) Effet Seebeck.

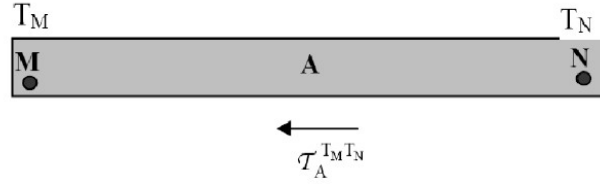
Le fonctionnement d'un couple s'appuie sur les trois effets :

-l'effet PELTIER : à la jonction de deux conducteurs A et B différents, à la même température, s'établit une d.d.p qui ne dépend que de A, B et T, c'est la f.e.m Peltier $P_{A/B}^T$

$$V_M - V_N = P_{A/B}^T$$



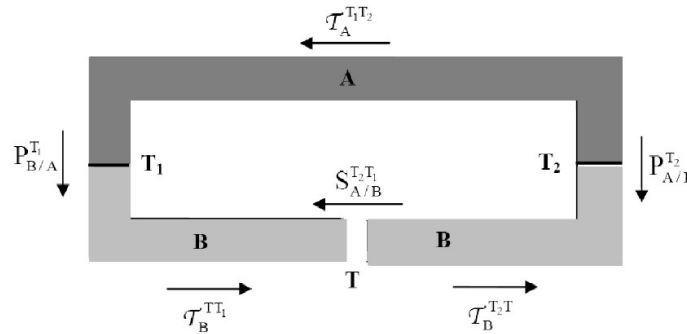
-l'effet THOMSON : Entre deux points M et N, à températures différentes, à l'intérieur d'un conducteur homogène s'établit une f.e.m qui dépend du conducteur et des températures de M et N, c'est la f.e.m Thomson $T_A^{T_M T_N}$



$$T_A^{T_M T_N} = \int_{T_N}^{T_M} h_A \cdot dT$$

Avec h_A coefficient de Thomson du conducteur A est une fonction de température.

-l'effet SEEBECK : Un circuit constitué de deux conducteurs A et B dont la jonction est à une température (T) constitue un couple thermoélectrique qui est le siège d'une f.e.m résultant des effets Peltier et Thomson.



$$S_{A/B}^{T_2 T_1} = T_B^{T_2 T} + P_{A/B}^{T_2} + T_A^{T_1 T_2} + P_{B/A}^{T_1} + T_B^{T T_1}$$

$$S_{A/B}^{T_2 T_1} = (T_B^{T_2 T} - T_A^{T_2 T_1}) + (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1})$$

$S_{A/B}^{T_2 T_1}$: C'est la FEM de Seebeck dont le thermocouple est le siège qui fournit l'information de température cherchée. Donc la f.e.m d'un thermocouple est donnée par :

$$E_{A/B}^{T_2 T_1} = S_{A/B}^{T_2 T_1}$$

Convention :

$$E_{A/B}^{T_2 T_1} = -E_{B/A}^{T_2 T_1} = E_{B/A}^{T_1 T_2} = -E_{A/B}^{T_1 T_2}$$

Loi des températures successives : la f.e.m de Seebeck du couple **A/B** est donnée par :

$$E_{A/B}^{T_3 T_1} = E_{A/B}^{T_3 T_2} + E_{A/B}^{T_2 T_1}$$

Loi des métaux successifs : la f.e.m de Seebeck du couple **A/C** est donnée par:

$$E_{A/C}^{T_2 T_1} = E_{A/B}^{T_2 T_1} + E_{B/C}^{T_2 T_1}$$

où C est un métal intermédiaire entre les deux métaux A et B.

Des tables donnant les valeurs de F.E.M. (E) ont été établies pour chaque thermocouple, la jonction froide étant à la température $T=0^{\circ}\text{C}$. Si on connaît la température ambiante T_a à l'instant de la mesure, et T_c étant la température à mesurer, on peut écrire la F.E.M. du thermocouple par la relation suivante:

$$E_{A/B}^{T_c 0^{\circ}\text{C}} = E_{A/B}^{T_c T_a} + E_{A/B}^{T_a 0^{\circ}\text{C}}$$

$E_{A/B}^{T_c T_a}$: est la tension mesurée à l'aide d'un millivoltmètre. La F.E.M. (E) délivrée par le thermocouple, dépend des températures T_a et T_c . donc on peut déterminer la F.E.M. fournie par un thermocouple ainsi que la température chaude T_c .

Avantage :

- les températures peuvent être très élevées 1100°C à 2320°C
- Prix

Inconvénients :

- non linéaire
- amplitude très faible de la tension à pleine échelle
- sensibilité très faible.

Le tableau IV.1 présente quelques types de thermocouples :

type	métaux		gamme d'utilisation	tolérance
T	cuiivre	cuiivre-nickel <i>constantan</i>	-270 à 400°C	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ (de -40 à 133°C) $\pm 0,0075 T $ (de 133 à 350°C)
E	nickel-chrome	nickel-chrome <i>chromel</i>	-270 à 1000°C	$\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ (de -40 à 333°C) $\pm 0,0075 T $ (de 333 à 900°C)
J	fer	cuiivre-nickel <i>constantan</i>	-210 à 1200°C	$\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ (de -40 à 333°C) $\pm 0,0075 T $ (de 333 à 750°C)
K	nickel-chrome <i>chromel</i>	nickel-aluminium <i>alumel</i>	-270 à 1370°C	$\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ (de 40 à 333°C) $\pm 0,0075 T $ (de 333 à 1200°C)
R	platine rhodié (13 %)	platine	-50 à 1760°C	$\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ (de 0 à 600°C) $\pm 0,0025 T $ (de 600 à 1600°C)
S	platine rhodié (10 %)	platine	-50 à 1760°C	$\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ (de 0 à 600°C) $\pm 0,0025 T $ (de 600 à 1600°C)
B	platine rhodié (30 %)	platine rhodié (6 %)	0 à 1820°C	$\pm 0,0025 T $ (de 600 à 1700°C)
N	nickel-chrome-silicium <i>nicrosil</i>	nickel-silicium <i>nisil</i>	-270 à 1300°C	$\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ (de 40 à 333°C) $\pm 0,0075 T $ (de 333 à 1200°C)

Tableau IV.1 : Couples de métaux pour thermocouples.

L'erreur de mesure avec des thermocouples peut atteindre plusieurs degrés. La figure IV.27 représente les courbes d'étalonnage classiques des différents types de thermocouples.

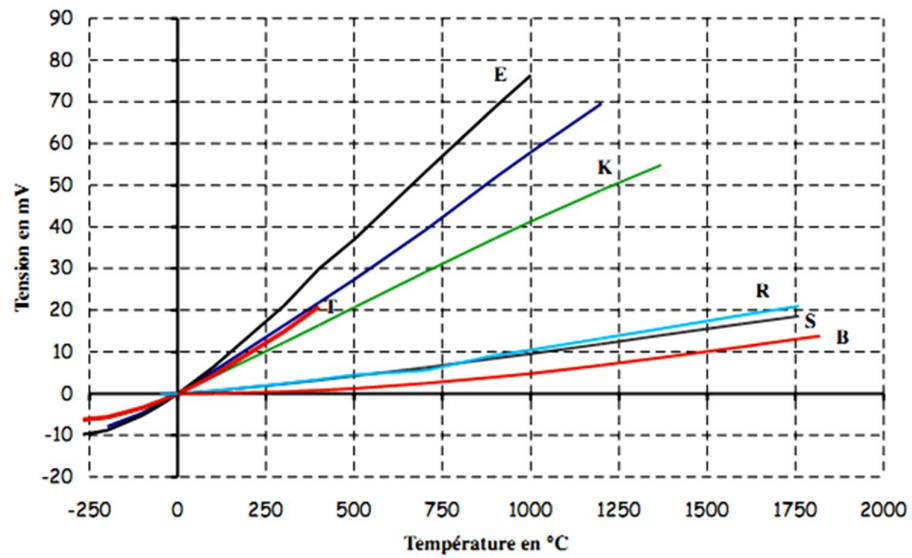


Figure IV.27 : Courbes typiques d'étalonnage de thermocouples

IV. 4. Les Capteurs Optiques

IV.4.1. Définition :

Un capteur optique et l'œil sont tous les deux des « instruments optiques », dans le sens où tous les deux sont des récepteurs de lumière. Un capteur optique est un dispositif capable de détecter l'intensité ou la longueur d'onde des photons.

Les capteurs optiques sont les capteurs qui convertissent le signal des ondes lumineuses (d'ultraviolet au l'infrarouge) en signal électrique. Ils sont omniprésents dans la société d'aujourd'hui. Ses utilités sont diverses et on peut les présenter en quatre grandes classes :

Un capteur optique est un dispositif capable de détecter l'intensité ou la longueur d'onde des photons. On les utilise pour détecter un grand nombre de phénomènes :

- ✓ L'intensité lumineuse,
- ✓ La chaleur (capteur pyrométrique),
- ✓ La présence,

La couleur (et donc certains gaz ou produits chimiques), On les utilise également pour :

- ✓ acquérir des informations numériques transmises par des conducteurs (fibres) optiques.
- ✓ des images.

IV.4.2. Les Différents Types des Capteurs Optiques :

Il existe plusieurs types des capteurs optiques à savoir s'ils sont passifs ou actifs.

IV.4.2.1. Photorésistance :

Certains semi-conducteurs ont les caractéristiques d'avoir leur résistance variée lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Cette caractéristique a été mise à profit pour donner naissance aux photorésistances. Il s'agit d'un capteur passif. Sa résistance varie inversement en fonction de l'intensité lumineuse (Figure IV.28). L'application des photorésistances est multiple, mais on les utilise le plus souvent dans des structures ne nécessitant pas une grande précision et où l'encombrement n'est pas un critère essentiel. En effet, La résistance de la photorésistance varie inversement en fonction de l'intensité.

L'application des photorésistances nécessitant pas une grande précision et où l'encombrement n'est pas un critère essentiel est multiple, mais on les utilise le plus souvent dans des structures

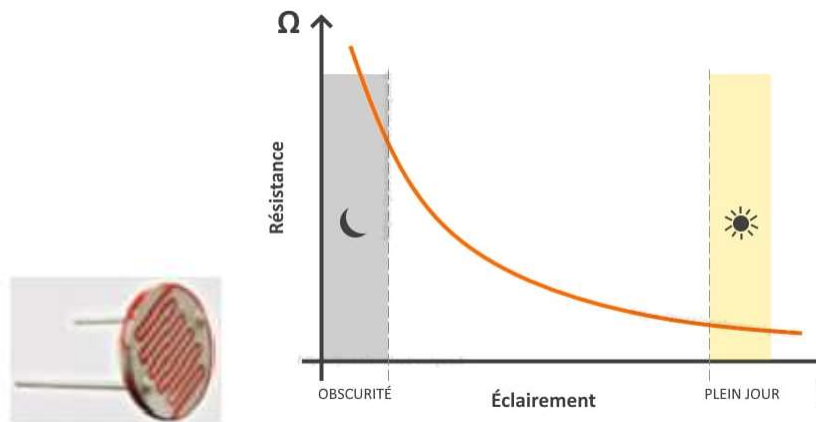


Figure IV.28 : La photorésistance avec la variation en fonction de l'éclairement Principe

Pour conserver la conduction, il faut limiter le nombre de recombinaisons des paires électron-trou. La surface réceptrice du flux lumineux est un ruban. Cette forme minimise la largeur séparant les électrodes et les laissent en contact avec le ruban sur une grande surface. C'est cette configuration qui donne la résistance la plus faible. Seules les photorésistances utilisées sous haute tension sont constituées d'un ruban large. En effet le courant traversant la photorésistance s'écrit:

$$I = q \cdot \mu \cdot n \cdot \frac{A}{L} \cdot V \quad (IV.24)$$

Dans cette expression :

q : est la charge de l'électron.

μ : est la mobilité de l'électron.

n : est la densité d'électrons présents.

A : est l'aire de la surface de contact entre les électrodes et la zone photosensible.

L : est la largeur du ruban.

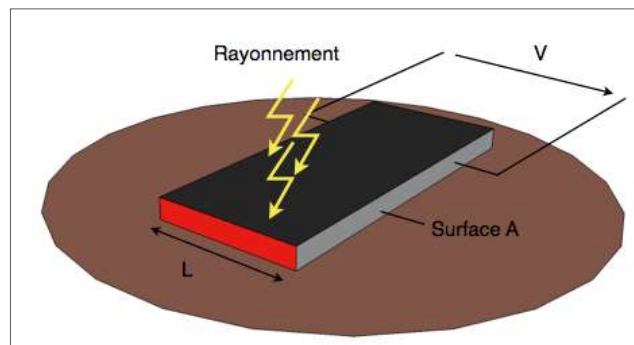


Figure IV.29 : Principe d'une photorésistance.

La photorésistance ou cellule photoconductrice est un capteur résistif, donc passif, de la famille des capteurs optiques dont le principe physique est la photoconductivité. Associée à un conditionneur, la photorésistance est parmi l'un des plus sensibles.

=>Avantages :

- ✓ Faible coût.
- ✓ Larges gammes spectrales.
- ✓ Facilité de mise en œuvre.
- ✓ Rapport de transfert statique.
- ✓ Sensibilité élevée.

=>Inconvénients :

- ✓ Non linéarité de la réponse en fonction du flux.
- ✓ La vitesse de variation de R avec l'éclairement est faible et non symétrique.
- ✓ Sensibilité thermique.
- ✓ Refroidissement nécessaire dans certains cas (capteurs thermiques).
- ✓ Temps de réponse élevé (0,1 us à 100 ms).
- ✓ Bande passante limitée.
- ✓ Instabilité dans le temps (vieillesse dû aux échauffements).

IV.4.2.1. Photodiode :

Une photodiode est un composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique.

Les photodiodes sont des diodes qui exploitent l'effet photoélectrique. Sous éclairage, les photons libèrent des paires électrons trous. Leur polarisation en inverse produit un courant qui augmente proportionnellement à l'intensité lumineuse.

Comme pour les photorésistances, la sensibilité spectrale dépend du type de la diode utilisée, Cependant, ces capteurs disposent d'une très bonne répétabilité, ils sont très utilisés pour leur grande stabilité, leur cout réduit et leur faible encombrement. Leur inconvénient majeur, est le faible courant de sortie.

En l'absence complète de lumière, la photodiode génère un courant appelé courant d'obscurité.

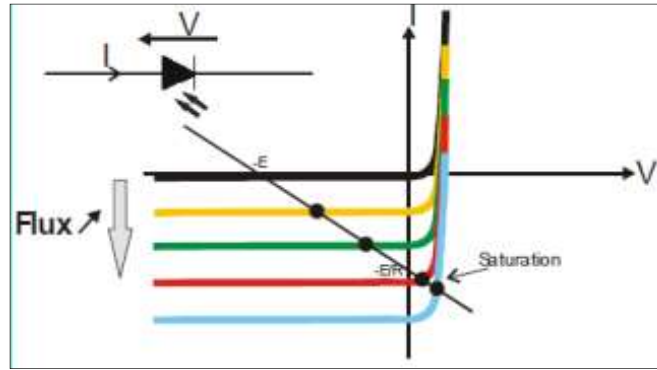


Figure IV.30 : Le courant varie linéairement avec le flux lumineux

a- Principe de Fonctionnement :

Quand un semi-conducteur est exposé à un flux lumineux, les photons sont absorbés à condition que l'énergie du photon ($E_{ph} = h \cdot \nu$) soit supérieure à la largeur de la bande interdite (E_g). Ceci correspond à l'énergie nécessaire que doit absorber l'électron afin qu'il puisse quitter la bande de valence vers la bande de conduction, le rendant ainsi mobile et capable de générer un courant électrique. L'existence de la bande interdite entraîne l'existence d'un seuil d'absorption tel que $E_g = h \cdot \nu_0$. Lors de l'absorption d'un photon, deux phénomènes peuvent se produire :

- *La photoémission* : c'est la sortie de l'électron hors du matériau photosensible. L'électron ne peut sortir que s'il est excité près de la surface.
- *La photoconductivité* : l'électron est libéré à l'intérieur du matériau. Les électrons ainsi libérés contribuent à la conductivité électrique du matériau.

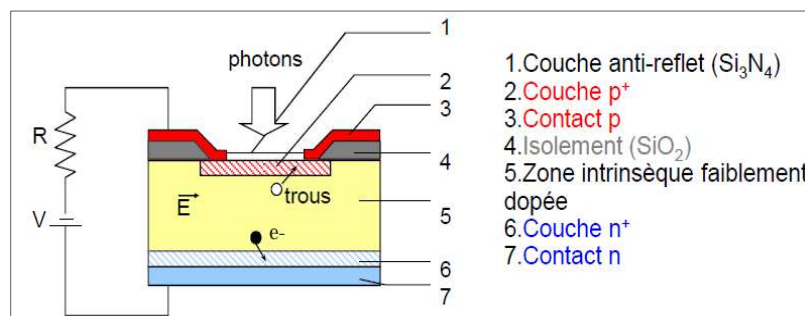


Figure IV.30 : Principe de fonctionnement d'une photodiode

Lorsque les photons pénètrent dans le semi-conducteur munis d'une énergie suffisante, ils peuvent créer des photoporteurs (électrons et trous d'électrons) en excès dans le matériau. On observe alors une augmentation du courant. Deux mécanismes interviennent simultanément :

- Il y a création de porteurs minoritaires, c'est-à-dire des électrons dans la région P et des trous dans la région N. Ceux-ci sont susceptibles d'atteindre la ZCE par diffusion et d'être ensuite propulsés vers des zones où ils sont majoritaires. En effet, une fois dans la ZCE, la polarisation étant inverse, on favorise le passage des minoritaires vers leur zone de prédilection. Ces porteurs contribuent ainsi à créer le courant de diffusion.
- Il y a génération de paires électrons trous dans la ZCE, qui se dissocient sous l'action du champ électrique ; l'électron rejoignant la zone N, le trou la zone P. Ce courant s'appelle le courant de transit ou photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour créer le photocourant I_{ph} qui s'additionne au courant inverse de la jonction. L'expression du courant traversant la jonction est alors :

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{E_g}{nU_t}} - 1 \right) - I_{ph} \quad (IV.25)$$

Photosensibilité: elle est définie par $S_{ph} = \frac{\Delta I_{ph}}{\Delta E}$ et détermine les conditions d'utilisation (200nA/Lux pour les photodiodes à germanium (Ge), 10nA/Lux pour les photodiodes à silicium (Si)). Les photodiodes Ge présentent une photosensibilité plus importante mais leur courant d'obscurité est notable $I_0 = 10 \text{ uA}$. Il est donc préférable d'utiliser des photodiodes Si ($I_0 = 10 \text{ pA}$) pour la détection des éclaircissements faibles.

b-Les Application :

Une association avec une LED infrarouge, les utilisations les plus courantes sont dans la robotique avec le cas du suiveur de ligne ou de la détection d'obstacle sur de courte distance ; et aussi dans les télécommandes les récepteurs numériques. Les photodiodes sont souvent utiliser dans la télécommunication. Les photodiodes sont souvent utiliser les capteur de vitesse et détection des obstacles.

IV.4.2.2. Phototransistor :

Le faible courant électrique transmis par les photodiodes a poussé les constructeurs de semi-conducteurs à rajouter à ce composant un transistor donnant ainsi naissance au phototransistor. Les caractéristiques sont sensiblement les mêmes que celle des photodiodes. Mais on remarque un courant beaucoup plus important. Certains phototransistors disposent d'une troisième patte permettant d'affiner la sensibilité du capteur.

IV.4.2.3. Cellules photovoltaïques :

Utilisant le principe de la photodiode, une cellule photovoltaïque (aussi appelée souvent pile solaire) se comporte comme un générateur en présence de lumière (Figure IV.31). On la

distingue d'une photodiode par le fait que sa surface est nettement plus grande afin d'obtenir un courant plus important.

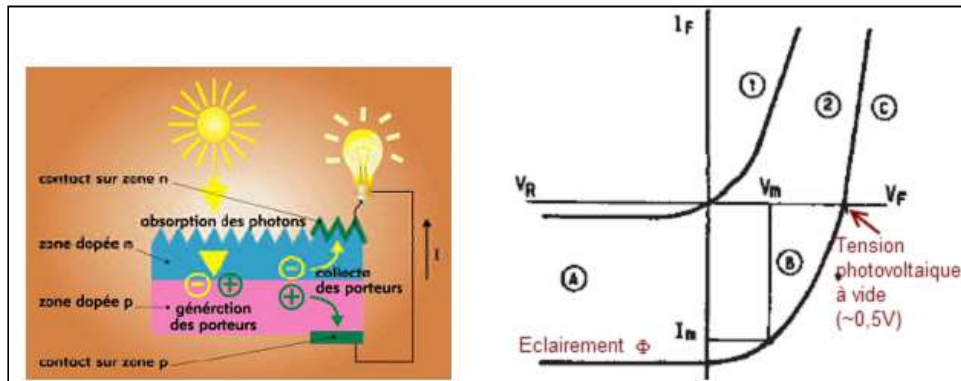


Figure IV.31 : Caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque.

Les caractéristique du courbe est la suivante :

- la courbe 1 est celle d'une cellule dans l'obscurité
- la courbe 2 correspond à une cellule soumise à un éclairement :
- la partie C, cette courbe ne passe plus par 0 mais par une tension photoélectrique d'environ 0,5v.
- - la partie A, un courant inverse existe, la cellule travaille en photodiode (dans la pratique ce mode de fonctionnement conduirait à la destruction de la cellule).
- - la partie B enfin, la cellule travaille en générateur d'énergie. Les valeurs V_m , I_m permettent d'obtenir une puissance maximale.

IV.4.2.4. Capteur d'Image CCD et CMOS

Capteurs images Capteurs CMOS, CCD, MOS, BSI-CMOS, 3MOS, SuperCCD... une flopée de technologies équipant nos appareils photos numériques dont il est bien souvent difficile de distinguer les différences sur le papier.

Les capteurs fonctionnent tous sur le principe de conversion de la lumière (photons) en signaux électriques grâce aux cellules photosensibles dont ils sont recouverts. Le tout passe ensuite via un convertisseur analogique/numérique pour traduire ces signaux et récupérer au final une restitution en pixels de couleurs, calculés et traités par le processeur d'imagerie. Le résultat est enregistré dans la mémoire tampon de l'appareil avant d'être transféré sur carte mémoire. Historiquement, les premiers capteurs sont apparus entre les années 1970 et 1980 pour les CCD (Charge Couple Device) et les CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). De nos jours, ces capteurs équipent toujours nos appareils photos numériques, avec leur lot

d'améliorations et variantes, propres à chaque constructeur (SuperCCD et BSI-CMOS de Fujifilm, 3MOS de Panasonic...).

A- Principe de Fonctionnement

Le principe des capteurs **CCD** repose sur un champ de photosites, petites cellules qui accumulent la lumière individuellement. La couleur est ensuite déterminée par un filtre analogique (Bayer) en fonction de l'intensité reçue. On peut donc imaginer qu'un photosite correspond à un pixel qui compose une image. On obtient une image fidèle avec des nuances de couleurs calculées par rapport aux tensions relevées sur chaque photosite

Les capteurs **CMOS** fonctionnent par champ de photodiodes (PD), chacune étant sensible à une seule des couleurs primaires (rouge, vert et bleu). C'est un champ de "oui" et de "non" qui recouvrent le capteur. Au final, c'est une combinaison des valeurs de chaque photodiodes (0 ou 1) qui permet d'obtenir la couleur "estimée" de chaque pixel. Le résultat final sera donc un ensemble de calcul des pixels, ce qui est souvent à l'origine du bruit électronique.

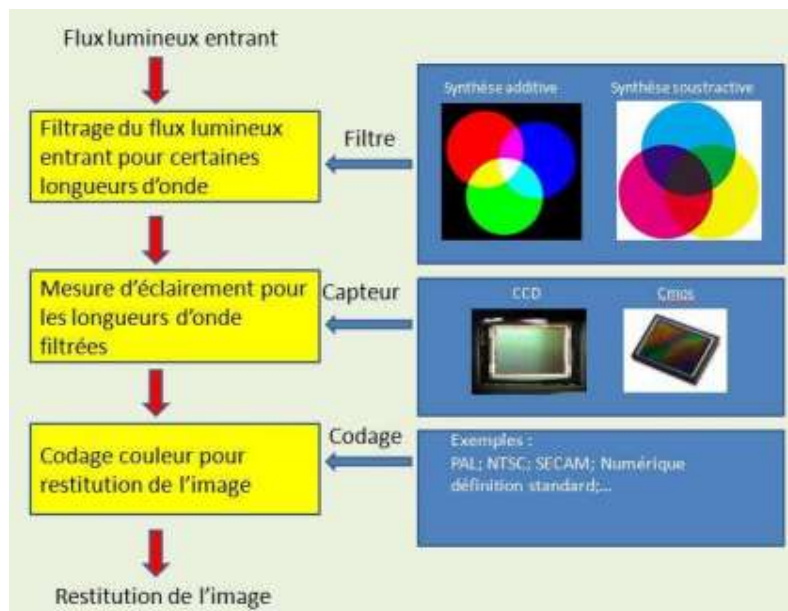


Figure IV.32 : principe du processus de numérisation

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. G. Asch, « Les Capteurs en Instrumentation Industrielle », 6^{ème} édition Dunod Dunod, 2010.
- [2]. G. Asch et al. « Acquisition de données », 3e édition, Dunod, 2011.
- [3]. Stéphane DURAND, « Capteurs de déplacement », R 1 810, Techniques de l'ingénieur.
- [4]. Alain DEVAL et Yvon AMAND, Accélération R 1 812, Techniques de l'ingénieur.
- [5]. R. BEN JEDDOU et L. MABROUKI, « Cours Capteurs et actionneurs en instrumentation », Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Tunisie, 2012.
- [6]. P. Dassonville, « Les Capteurs : Exercices et problèmes corrigés », Dunod, 2005.
- [7]. M. Cerr, « Instrumentation industrielle », Tomes 1 et 2 ; Edition Tech et Doc.
- [8]. I. Hafsaoui, « capteurs optiques », polycopié de Cours, université de Jijel.
- [9]. F. Boudoin, M. Lavabre, « Capteurs : principales utilisations », Edition Casteilla, 2007.

Semestre: S6

Unité d'enseignement: UEF 3.2.1

Matière: Capteurs et Instrumentation

Crédits: 04

Coefficient: 02

Objectifs de l'enseignement:

L'objectif de ce cours est l'étude de la chaîne de mesure numérique, de l'électronique associée ainsi que les différents types de capteurs.

Connaissances préalables recommandées:

Electronique fondamentale 1 et 2, Mesures électriques et électroniques.

Contenu de la matière:

Chapitre 1. La chaîne de mesure numérique et Electronique associée (3 semaines)

Généralités sur la mesure, structure globale d'une chaîne de mesure complète: acquisition, traitement, restitution. Description des constituants d'une chaîne de mesure et circuits électroniques : éléments constitutifs d'une chaîne, le capteur (types, caractéristiques), le conditionnement du capteur (Montage potentiométrique, montage push-pull, Montage en pont), les circuits de conditionnement du signal mesuré (Amplificateur d'isolation, Amplificateur d'instrumentation (notion de tension en mode commun, amplificateur différentiel), filtrage, linéarisation, détection du signal de mesure modulé), l'échantillonneur-bloqueur, la conversion analogique numérique (CAN), la conversion numérique analogique (CNA), traitement numérique des données (logique programmée, stockage et affichage), compatibilité magnétique.

Chapitre 2. Les capteurs: Caractéristiques métrologiques (3 semaines)

Définitions et généralités sur les capteurs, grandeurs électriques et grandeurs non électriques, différents types de capteurs (passif, actif, numérique, intelligent, composite), phénomènes physiques utilisés dans les capteurs (Loi d'induction électromagnétique, effet hall, effet thermoélectrique, effet magnéto-résistif, effet photoélectrique, effet piézo-électrique, effet Doppler, ...), caractéristiques métrologiques (Sensibilité, Linéarité, Courbe d'étalonnage, Résolution, Rapidité, temps de réponse et bande passante, limites d'utilisation, étalonnage-étendue de mesure, domaine nominal d'emploi, zone de non détérioration), critères de choix d'un capteur.

Chapitre 3. Les Capteurs en Instrumentation Industrielle (9 semaines)

Classification des capteurs, capteurs de température, capteurs de position et de déplacement, capteurs de vitesse et d'accélération, capteurs de pression, capteurs de force et de déformation, capteurs de pression, de niveau et de débit, capteurs optiques.

Mode d'évaluation: Contrôle continu: 40%, Examen : 60%.

Références bibliographiques:

1. G. Asch ; Les Capteurs en Instrumentation Industrielle ; Dunod, 2010.
2. P. Dassonville ; Les Capteurs : Exercices et problèmes corrigés ; Dunod, 2005.
3. T. Lang ; Electronique des systèmes de mesure, Masson, 1992.
4. G. Asch ; Acquisition de données : du capteur à l'ordinateur ; Dunod, 2003.
5. F. Cottet ; Traitement des signaux et acquisition de données : Cours et exercices, Dunod, 1999.
6. M. Cerr ; Instrumentation industrielle : Tomes 1 et 2 ; Edition Tech et Doc.

7. G. Asch et al. ; Acquisition de données, 3^e édition, Dunod, 2011.
8. P. Oguic ; Mesures et PC ; Edition ETSF.
9. F. Boudoin, M. Lavabre ; Capteurs : principes utilisations ; Edition Casteilla, 2007
10. J. G. Webster ; Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook ; Taylor & Francis Ltd
11. A. Migeon ; Applications industrielles des capteurs : Volume 2, Secteur médical, chimie et plasturgie ; Hermes Science Publications, 1997.