

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA – Bejaia, Faculté de Technologie



Département de Génie Electrique

Polycopié de cours

Capteurs et Conditionneurs

Enseignant: Dr BENDAHMANE Née MESSAOUDENE Akila

AVANT PROPOS

Ce polycopié représente le cours du module Capteurs et Conditionneurs enseigné aux étudiants de la troisième année électromécanique.

Le contenu est une synthèse détaillée des travaux pratiques du module Instrumentation assurés aux étudiants de la troisième année (LAGE) depuis l'année universitaire 2010/2011, ainsi que des travaux pratiques du module Capteurs et conditionneurs assurés pour les étudiants du niveau troisième année électromécanique à partir de l'année 2015/2016 jusqu'à ce jour.

TABLE DES MATIERES

Chapitre I : Généralités sur les capteurs

I.1 Métrologie	1
I.2 Eléments constitutifs d'une chaîne de mesure.....	3
I.3 Caractéristiques des capteurs et appareils de mesure.....	4
I.4 Classification des capteurs.....	5
I.4.1 Capteurs passifs	5
I.4.2 Capteurs actifs.....	6
I.5 Conditionneurs des capteurs	6
I.5.1 Conditionneurs des capteurs passifs	6
I.5.2 Conditionneurs des capteurs actifs.....	12

Chapitre II : Capteurs de température

II .1 Résistances métalliques	16
II.1.1 Choix du métal	17
II.2. Les Thermistances.....	18
II.2.1 Conductivité des thermistances.....	19
II.2.2 Relation résistance- température.....	20
II.3 Thermocouple.....	21
II.3.1 Effet thermoélectrique.....	21
II.3.2 Principaux types de thermocouples et limites d'emploi	23
II.3.3 Comparaison thermocouple, résistance métallique et thermistance.....	24

Chapitre III : Capteurs photométriques

III.1 Lumières- Propriétés fondamentales.....	25
III.2 Photométrie.....	26
III.3 Capteurs optiques- semi-conducteurs	27
III.3.1 Applications.....	28
III.3.2 Photorésistance	28
III.3.3 Photodiode	29
III.3.4 Phototransistor.....	33

Chapitre IV : Capteurs de position photométriques

IV.1 Capteur potentiométrique.....	35
IV.1.1 Résistance	35
IV.1.2 Curseur	36
IV.1.3 Types de capteurs potentiométriques.....	36
IV.2 Capteurs inductifs.....	39
IV.3 Capteurs capacitifs.....	44
IV.3.1 Condensateurs à surfaces variables.....	44
IV.3.2 Condensateur à écartement variable.....	47

Chapitre V : Capteurs tachymétriques

V.1 Tachymètre électromagnétique de vitesse angulaire.....	50
V.1.1 Génératrice tachymétrique à courant continu.....	51
V.1.2 Génératrice tachymétrique à courant alternatif.....	52
V.2 Tachymètre mécanique.....	54
V.3 Tachymètre numérique.....	55
V.3.1 Tachymètre à réluctance variable.....	56
V.3.2 Capteurs à courants de Foucault.....	57
V.3.3 Tachymètres optiques.....	58

Chapitre VI : Capteurs de force

VI.1 Capteurs piézoélectriques	59
VI.2 Capteurs à magnétostriction.....	63
VI.2.2 Capteur à variation d'inductance.....	63
VI.2.3 Capteur à variation de couplage.....	64
VI.3 Jauge extensomètre.....	65
VI.3.1 Constitutions des jauges.....	65
VI.3.2 Principe de fonctionnement des jauges.....	66
VI.3.4 Matériaux utilisés.....	68
VI.3.6 Conditionnement de Jauges : pont de WEATSTONE.....	69

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES CAPTEURS

La connaissance scientifique s'est développée grâce à l'expérimentation qui repose sur la mesure des grandeurs physiques et qui, en leur associant une valeur numérique conduit à définir quantitativement les propriétés des objets, de définir numériquement certaines lois de physiques et d'établir empiriquement leur forme. La technique qui était un recueil de procédés empiriques, fruits de l'observation, de tâtonnement et d'essais successifs, est devenue une science de réalisation. Dès lors, la mesure joue un rôle capital. En effet la construction d'une machine ou la mise au point d'un matériau recommande d'attribuer à leur éléments constitutifs des caractéristiques que uniquement la mesure permet d'ajuster. Dans le monde industriel, il est impératif d'effectuer les mesures des grandeurs physiques pour conditionner le déroulement correct des fabrications. Afin d'être menée à bien, l'opération de mesure nécessite dans certaines situations que l'information qu'elle délivre soit automatiquement transmise ou transmise à distance du point où elle est saisie, protégée contre l'altération des parasites, amplifiée si c'est nécessaire, affichée et traitée. C'est bien le capteur qui permet d'assurer cette duplication de l'information en la transférant au point où s'effectue la mesure, de la grandeur physique (non électrique) qui lui est propre, sur une grandeur électrique (courant- tension ou impédance).

I.1 Métrologie

La métrologie est la science de la mesure. Elle définit les principes et les méthodes permettant de garantir et maintenir la confiance envers les mesures résultant des processus de mesure. Il s'agit d'une science transversale qui s'applique dans tous les domaines où des mesures quantitatives sont effectuées.

Les résultats des mesures servent à prendre des décisions :

- Acceptation d'un produit (mesure des caractéristiques, des performances, conformité à une exigence),
- Réglage d'un instrument de mesure, validation d'un procédé,
- Réglage d'un paramètre dans le cadre d'un contrôle d'un procédé de fabrication,
- Validation d'une hypothèse,
- Définition des conditions de sécurité d'un produit ou d'un système.

Un résultat de mesure est écrit sous la forme : $X = \{X\} [X]$ (I.1)

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



Figure I.1 : Coudée de Maya (ca. 1330 av. J.-C.) et divers poids au second plan.

▪ Quelques termes de métrologie

- **Grandeur (mesurable)** : définie comme attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, qui est susceptible d'être distinguée qualitativement et déterminée quantitativement
- **Unité de mesure** : c'est une grandeur particulière, définie et adoptée par convention, à laquelle on compare les autres grandeurs de même nature pour les exprimer quantitativement. Le système d'unités principalement utilisé dans le monde est le Système international d'unités (SI) mis en place en 1960.
- **Mesurage** : c'est l'ensemble des opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.
- **Mesurande** : grandeur particulière soumise à mesurage.
- **Incertitude de mesure** : c'est un paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande
- **Étalon de mesure** : en métrologie, un étalon est un dispositif auquel on doit se fier pour contrôler l'exactitude des résultats fournis par un appareil de mesure.



Figure I.2 : Un jeu de cales étalon

I.2 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 oeuvre font appel à différentes lois physiques et propriétés des matériaux. Une chaîne de mesure est généralement constituée des éléments suivants :

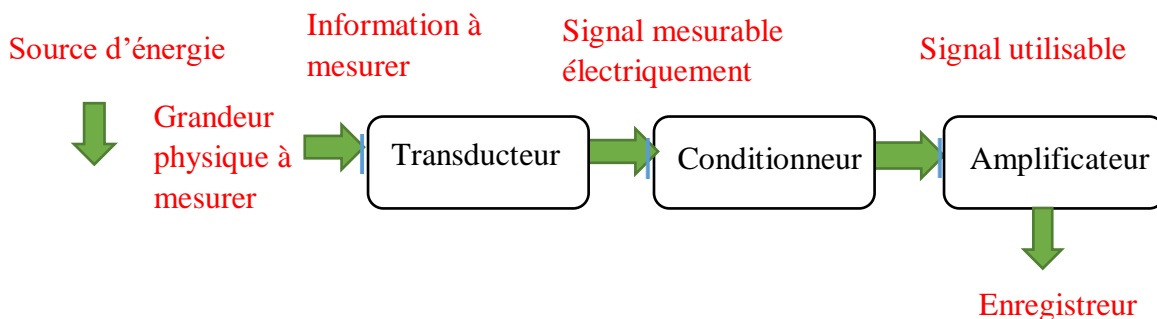


Figure I.3: Schéma synoptique d'une chaîne de mesure

- **Un transducteur** : c'est l'élément fondamental du dispositif, fondé sur l'utilisation d'une loi physique particulière. Il fait correspondre à une valeur G_e de la grandeur à mesurer une valeur G_s d'une autre grandeur, généralement électrique, appelée grandeur de sortie. On recherche généralement des transducteurs tels que la relation entre la variation du mesurande et la variation du signal sortant du transducteur soit linéaire, ou tout au moins à utiliser la partie linéaire de cette relation si celle-ci est plus complexe.

- **Le conditionneur** : c'est un circuit électrique ou électronique qui convertit, compense ou modifie le signal de sortie du transducteur afin de le transformer en un signal électrique usuel. Le conditionneur est souvent physiquement indissociable du transducteur. Le pont de Wheatstone évoqué à l'alinéa précédent permet ainsi de transformer la variation de résistance du transducteur en une variation de tension aux bornes du pont.

- **l'amplificateur** : c'est un élément indispensable lorsque le signal de sortie du conditionneur est faible, il est très souvent nécessaire de les amplifier dans des rapports de 10 à 1000, ou plus. Après amplification, on atteint des tensions comprises généralement entre 0 et 5 ou 10V.

- **l'afficheur/enregistreur** : c'est un élément qui mesure le signal (courant ou tension) sortant de l'amplificateur pour le restituer sous une forme lisible et interprétable par l'utilisateur.

I.3 Caractéristiques des capteurs et appareils de mesure

- **l'étendue de mesure (EM)** : ensemble des valeurs du mesurande pour lesquelles l'erreur de mesure est supposée comprise entre des limites spécifiées.

- **le domaine de non détérioration** : il est défini par les valeurs limites que peuvent atteindre et conserver la 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-destruction** : il est défini par les valeurs limites que peuvent atteindre le mesurande et les grandeurs d'influence sans qu'il y ait détérioration irréversible ou destruction physique du capteur. Dans le cas contraire, le capteur doit être changé.

- **la sensibilité** : quotient S_e de l'accroissement de la réponse d'un instrument de mesure par l'accroissement correspondant du signal d'entrée : $S_c = \frac{\Delta G_s}{\Delta G_e}$

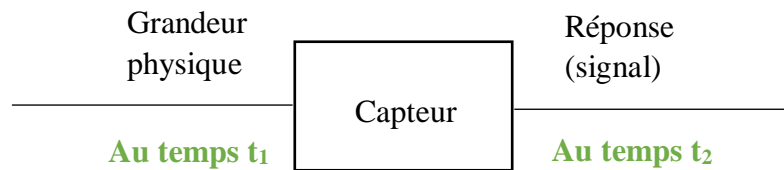
La valeur de la sensibilité peut dépendre de la valeur du signal d'entrée. Cette définition sous forme de quotient suppose que la relation liant le signal de sortie du capteur au signal d'entrée associé au mesurande est linéaire.

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

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

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

-**Rapidité et temps de réponse** : La valeur t_2-t_1 représente le temps de réponse du capteur. Dans certains systèmes, les temps de réponse lents ne sont pas importants, mais dans d'autre, comme celui utilisé dans l'automobile, la vitesse de transmission du signal est majeure pour intervenir avant le blocage des roues.



I.4 Classification des capteurs

On classe 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.

I.4.1 Capteurs passifs

Le capteur passif se comporte en sortie comme un dipôle passif qui peut être résistif, capacitif ou inductif.

Tableau I.1 : principes physiques d'un capteur passif

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

I.4.2 Capteurs actifs

Ce type de capteur fonctionne en générateur. Un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre au mesurande : énergie thermique, mécanique ou de rayonnement. Les principes physiques de base des capteurs actifs sont regroupés dans le tableau I.2.

Tableau I.2 : principes physiques d'un capteur actif

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

I.5 Conditionneurs des capteurs

I.5.1 Conditionneurs des capteurs passifs

Les variations de l'impédance Z_c d'un capteur passif liées aux évolutions d'une mesurande ne peuvent être traduites sous forme d'un signal électrique qu'en associant aux capteurs une source de tension ou de courant et généralement d'autres impédance constituant le conditionneur du capteur. 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 potentiométriques et des ponts.
- Soit sur la fréquence du signal de mesure, il s'agit alors d'oscillateurs.

Les montages potentiométriques simples, qu'ils soient alimentés en source de tension ou de courant simples mais ils ont un inconvénient majeur, c'est celui d'être sensibles aux parasites.

Le pont par contre qui est un double potentiomètre permet une mesure différentielle réduisant de façon importante l'influence des parasites.

Lorsque le capteur et le conditionneur sont purement résistifs on utilise de préférence une source de courant ou tension continue. Il faut cependant veiller à ce que le circuit ne soit le siège d'aucune force électromotrice thermoélectrique.

▪ Montage potentiométrique

Le capteur de résistance R_c en série avec une résistance R_1 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 voltmètre de résistance R_v .

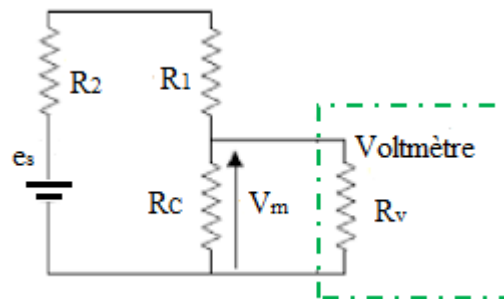


Figure I.4 : Montage potentiométrique

A partir des lois des mailles et des nœuds, on aura:

$$e_s = (R_s + R_1 + R_c).I \quad (\text{I. 2})$$

Les expressions de la tension aux bornes du capteur et le courant le traversant sont données par :

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

$$I = \frac{V_m}{R_c} \quad (\text{I. 4})$$

Ce qui conduit aux expressions suivantes :

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

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

Comme R_s est négligeable, donc on a :

$$V_m = \frac{R_c}{(R_1 + R_c)} \cdot e_s \quad (I.7)$$

Cette dernière relation en fonction de la résistance du capteur R_c n'est pas linéaire, ce qui veut dire que la sensibilité du capteur n'est pas constante. La solution est de linéariser cette fonction pour rendre la sensibilité constante.

Pour des petites variations de mesurande, c'est-à-dire $\Delta R < R_c + R_1$:

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

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

$$\Delta V_m = V_m - V_{m0}$$

L'équation (I.7) permet d'établir les équations suivantes :

$$V_{m0} = \frac{R_{c0}}{(R_1 + R_{c0})} \cdot e_s \quad (I.8)$$

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

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

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

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

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

Cette dernière relation signifie qu'on retrouve une fonction linéaire, ce qui nous permet d'extraire la sensibilité du capteur : $\frac{\Delta V_m}{\Delta R}$. Cette sensibilité est maximale lorsque

($R_1 = R_{c0}$), ce qui permet d'avoir :

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

La sensibilité est donnée par :

$$S_c = \frac{e_s}{4.R_1} \quad (\text{I. 15})$$

Pour une alimentation en courant, d'après le montage de la figure I.5 et en négligeant l'impédance interne de la source, on obtient :

$$\Delta V_m = I \cdot \Delta R \quad (\text{I. 16})$$

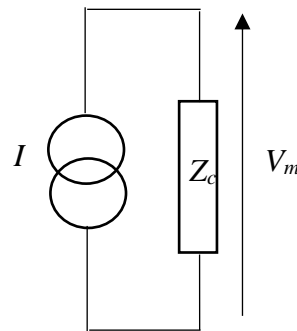


Figure I.5 : Capteur alimenté en courant

▪ 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.

Montage quart de pont, avec un capteur et trois résistances fixes

Au nœud A :

$$e_s = (R_1 + R_c)I_1 \quad (\text{I. 17})$$

$$I_1 = \frac{V_A}{R_c} \quad (\text{I.18})$$

$$e_s = \frac{(R_1 + R_c)}{R_c} V_A \quad (\text{I.19})$$

$$V_A = \frac{R_c}{(R_1 + R_c)} e_s \quad (\text{I.20})$$

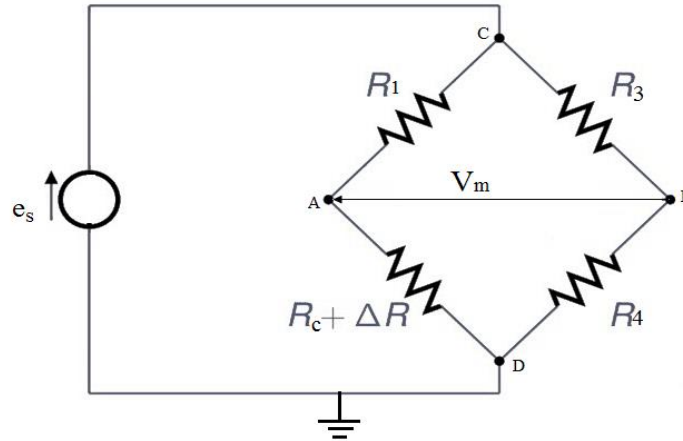


Figure I.6 : Montage en pont

Au nœud B :

$$e_s = (R_3 + R_4) I_2 \quad (\text{I.21})$$

$$I_2 = \frac{V_B}{R_4} \quad (\text{I.22})$$

$$e_s = \frac{(R_3 + R_4)}{R_4} V_B \quad (\text{I.23})$$

$$V_B = \frac{R_4}{(R_3 + R_4)} e_s \quad (\text{I.24})$$

$$V_m = V_A - V_B = \left(\frac{R_c}{(R_1 + R_c)} - \frac{R_4}{(R_3 + R_4)} \right) e_s \quad (\text{I.25})$$

$$V_m = \left(\frac{R_c \cdot (R_3 + R_4) - R_4 \cdot (R_1 + R_c)}{(R_1 + R_c)(R_3 + R_4)} \right) e_s \quad (\text{I.26})$$

$$V_m = \frac{R_c R_3 - R_4 \cdot R_1}{(R_1 + R_c)(R_3 + R_4)} e_s \quad (\text{I. 27})$$

Pour une tension nulle en absence de mesurande :

$$R_c R_3 = R_4 \cdot R_1 \quad (\text{I. 28})$$

Pour une variation de ΔR de R_c , le potentiel V_A s'exprime comme suit :

$$V_A = \frac{R_c + \Delta R}{(R_c + \Delta R + R_1)} e_s \quad (\text{I. 29})$$

L'expression de V_m devient :

$$V_m = \left(\frac{R_c + \Delta R}{(R_c + \Delta R + R_1)} - \frac{R_4}{(R_3 + R_4)} \right) e_s \quad (\text{I. 30})$$

$$\text{A l'équilibre } \frac{R_4}{(R_3 + R_4)} = \frac{R_c}{(R_1 + R_c)} \quad (V_m = 0) \quad (\text{I. 31})$$

Alors V_m se réécrit comme suit :

$$V_m = \left(\frac{R_c + \Delta R}{(R_c + \Delta R + R_1)} - \frac{R_c}{(R_1 + R_c)} \right) e_s \quad (\text{I. 32})$$

$$V_m = \left(\frac{R_c \cdot R_1 + R_c^2 + \Delta R \cdot R_1 + \Delta R \cdot R_c - R_c^2 - R_c \cdot \Delta R - R_c \cdot R_1}{(R_c + \Delta R + R_1)(R_1 + R_c)} \right) e_s \quad (\text{I. 33})$$

$$V_m = \left(\frac{\Delta R \cdot R_1}{(R_c + \Delta R + R_1)(R_1 + R_c)} \right) e_s \quad (\text{I. 34})$$

Pour $\Delta R \ll R_c$, on aura :

$$V_m = \frac{\Delta R \cdot R_1}{(R_1 + R_c)^2} e_s \quad (\text{I. 35})$$

Si on prend $R_1 = R_c$ (une meilleure sensibilité du pont et une condition d'équilibre) ;

$$V_m = \frac{e_s}{4R_{c0}} \Delta R \quad (\text{I. 36})$$

I.5.2 Conditionneurs des capteurs actifs

a/Adaptation d'impédance

Le capteur (actif) associé à ce type de conditionneur représente un générateur constitué d'une source et d'une impédance interne délivrant le signal au circuit. 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.

▪ 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 .

$$V_m = e_c(m) \cdot \frac{Z_i}{Z_i + Z_c} \quad (\text{I. 37})$$

Pour \gg :

$$V_m = e_c(m) \quad (\text{I. 38})$$

De tels dispositifs sont à base d'amplificateur opérationnel.

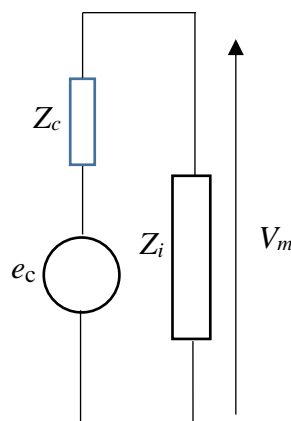


Figure I.7: Adaptation d'impédance, capteur source de tension

- **Cas d'un capteur source de courant**

Ce capteur se présente sous une forme équivalente à une source de courant (i_c) en parallèle avec une impédance Z_c . Le signal électrique V_m est alors donné par :

$$V_m = Z_i \cdot i_m \quad (\text{I. 39})$$

$$i_m = i_c \frac{Z_c}{Z_i + Z_c} \quad (\text{I. 40})$$

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

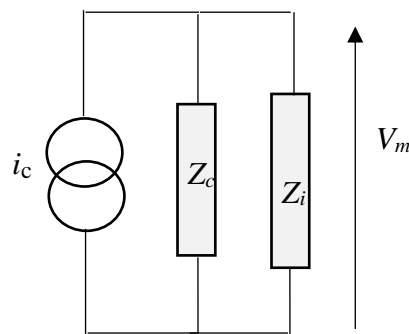


Figure I.8 : Adaptation d'impédance, capteur alimenté en courant

b / Amplificateurs opérationnels

Les amplificateurs opérationnels sont utilisés pour l'adaptation d'impédance, ils permettent aussi l'amplification du signal et de convertir les signaux de sorties à partir d'un courant ou d'une charge, à un signal de sortie tension.

- **Capteur source de tension**

Le capteur est équivalent à une source de tension en série avec une impédance. En supposant que l'amplificateur opérationnel est idéal, on peut écrire :

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) e_c \quad (\text{I. 50})$$

L'utilisation de l'amplificateur idéal ($i^+ = i^- = 0$), vérifie bien la supposition que le capteur débite sur une impédance infinie. On constate que le choix de R_1 et R_2 permet de régler le gain.

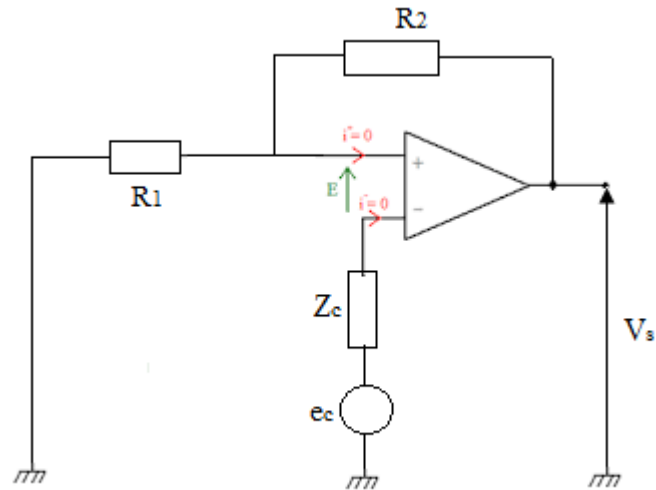


Figure I.9 : Capteur source de tension

▪ Capteur source de courant

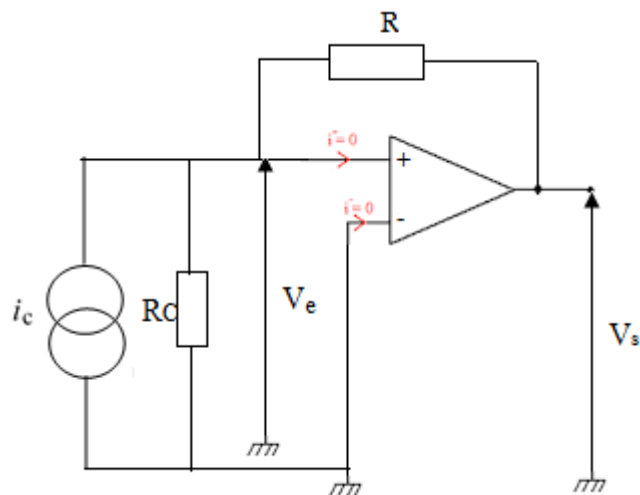


Figure I.10 : Capteur source de courant

Le capteur du montage de la figure I.10 représente une source de courant en parallèle avec une résistance R_c .

Puisque il s'agit d'un amplificateur idéal, son entrée ne débite aucun courant et la tension d'entrée différentielle est nulle. Alors aucun courant ne circule dans la résistance R_c du capteur. Le courant se retrouve intégralement dans la branche de la résistance R :

$$V_s = -R \cdot i_c \tag{I.51}$$

- **Capteur source de charge**

Dans le cas du capteur équivalent à un générateur de charge, il est recommandé d'utiliser un convertisseur charge-tension qui réalise pratiquement la mise en court-circuit des électrodes.

Puisque aucun courant ne traverse les entrées de l'amplificateur, toute variation de charge aux bornes du capteur se retrouve aux bornes de C :

$$V_s = -\frac{Q}{C} \quad (I.52)$$

Avec :

Q : charge délivrée par le capteur ;

C : valeur de la capacité.

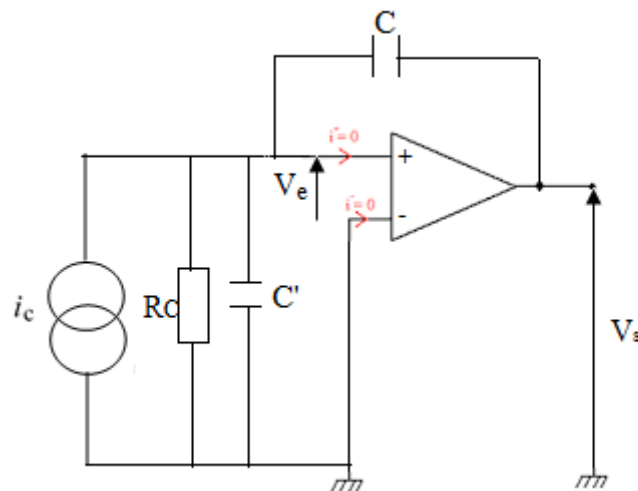


Figure I.11 : Capteur source de charge

CHAPITRE II

CAPTEURS DE TEMPERATURE

De toutes les grandeurs physiques, la température est mesurée fréquemment. La température détermine de façon décisive les propriétés de la matière. C'est pourquoi, on cherche particulièrement dans l'industrie, la mesure précise et le contrôle très strict de températures. La température est une grandeur différente des autres grandeurs physiques (longueur, masse, ...) qui sont des grandeurs extensives qu'on peut définir numériquement par rapport à une grandeur de même nature prise comme référence. La température est une grandeur intensive, multiplier ou diviser une température n'a pas, à priori, de signification physique évidente.

Pour transformer la température en une grandeur électrique on exploite plusieurs phénomènes physiques.

Il est possible de mesurer la température de plusieurs façons différentes qui se distinguent par le coût des équipements et la précision ainsi que le temps de réponse.

Les types les plus courants de capteurs sont les résistances métalliques, les thermistances et les thermocouples.

II .1 Résistances métalliques

D'une manière générale, la résistance électrique d'un conducteur augmente avec la température. Cette variation étant parfaitement réversible. On peut établir une relation comme suit :

$$R(T) = R_0 * F(T - T_0) \quad (\text{II. 1})$$

R_0 étant la résistance à la température T_0 et la fonction F est une caractéristique du matériau.

Dans le cas des métaux on a :

$$R(T) = R_0 * (1 + A * T + B * T^2 + C * T^3) \quad (\text{II. 2})$$

T est exprimé en °C, $T_0 = 0$ °C .

Les coefficients A, B et C de la relation précédente peuvent être déterminés par un ensemble de mesures à températures connues.

Pour de petites variations ΔT autour de la température T, la loi de variation de la température peut être linéarisée de la manière suivante :

$$\frac{dR(T)}{dT} = \frac{R(T + \Delta T) - R(T)}{\Delta T} \quad (\text{II. 3})$$

$$R(T + \Delta T) = R(T) * (1 + \alpha \Delta T) \quad (\text{II. 4})$$

$$\text{Avec } \alpha = \frac{1}{R(T)} * \frac{dR(T)}{dT}$$

α étant la sensibilité thermique du capteur à une température T

II.1.1 Choix du métal

Selon le domaine de température à utiliser et les qualités particulières recherchées, les résistances, on réalise les résistances en platine, en nickel, et plus rarement en cuivre ou en tungstène.

- ❖ Le platine peut être obtenu avec une très grande pureté (99,999 %), ce qui permet de fixer ces propriétés électriques et mécaniques. Elles sont utilisées de -200 à 1000°C .
- ❖ L'intérêt du Nickel réside de sa sensibilité thermique élevée : entre 0 à 100°C . Cependant ses caractéristiques électriques et chimiques sont beaucoup moins stables et limitent son utilisation à des températures inférieures à 250°C .
- ❖ L'avantage du Cuivre réside de ses grandes plages d'application du fait de sa grande linéarité de variation
- ❖ En dépassant 100 K, le tungstène a une sensibilité thermique de la résistance supérieure à celle de platine. Il présente une linéarité supérieure à celle de platine, mais il possède une stabilité inférieure.

Tableau II.1 : Comparaison des caractéristiques électriques des différents métaux

	Cuivre	Nickel	Platine	Tungstène
Température de Fusion ($^\circ\text{C}$)	1083	1453	1769	3380
Résistivité ($\Omega\cdot\text{m}$) à 20°C	$1,72 \cdot 10^{-8}$	$10 \cdot 10^{-8}$	$10,6 \cdot 10^{-8}$	$5,52 \cdot 10^{-8}$
Plage d'utilisation ($^\circ\text{C}$)	-190 à $+150^\circ\text{C}$	-60 à $+180^\circ\text{C}$	-250 à $+1100^\circ\text{C}$	-269 à $+27^\circ\text{C}$

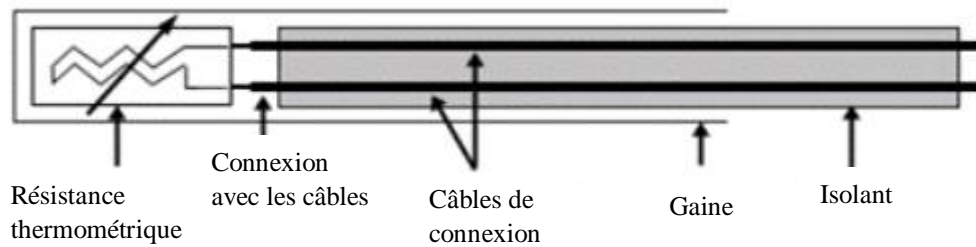


Figure II.1 : Architecture physique d'une RTD

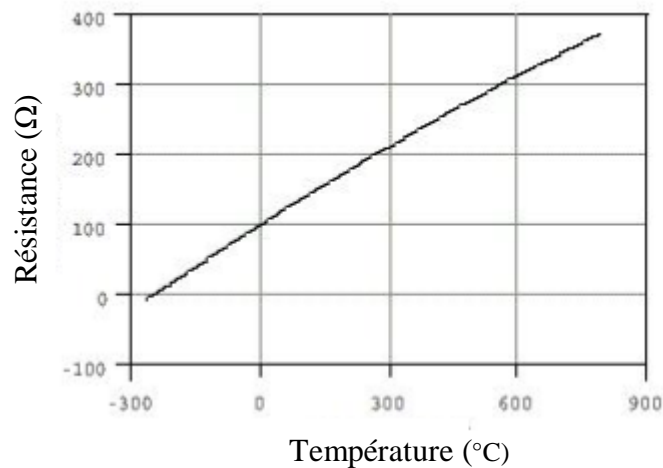


Figure II.2 : Courbe résistance/température pour un RTD en platine de 100 Ω, Pt100

II.2. Les Thermistances

Leurs propriétés principales résident de leur sensibilité thermique très élevée, et qui est de l'ordre 10 fois supérieure à celle des résistances métalliques. La courbe de variation de la thermistance présente un coefficient de température négatif et dépendant fortement de T. Ceci signifie que la résistance diminue lorsque la température augmente contrairement à la résistance métallique.

Elles sont constituées à partir de mélanges d'oxydes métalliques semi-conducteurs polycristallins tels que :

MgO, MgAl₂O₄, Mn₂O₃, Fe₃O₄, CO₂O₃, NiO, ZnTiO₄.

La stabilité d'une thermistance dépend de sa réalisation et des conditions d'emploi. L'enrobage ou l'encapsulage de la résistance la protège et accroît sa stabilité. Le domaine

d'emploi des thermistances, selon leur type, est compris entre quelques degrés et environ 300 °C.

II.2.1 Conductivité des thermistances

La conductivité d'un semi-conducteur s'exprime comme suit :

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p) \quad (\text{II.5})$$

Avec :

μ_n et μ_p : Mobilité des électrons libres de densité n , et des trous de densité p .

q : Charge de l'électron, $1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Dans le cas des métaux, l'augmentation de la température affecte la mobilité des électrons, sachant que la densité de charges est constante. Par contre dans le cas des semi-conducteurs, c'est la densité de charges libres qui est influencée par la température. En effet l'agitation thermique provoque la rupture de liaison interatomique entraînant la libération de paires électron-trou, ce qui explique l'augmentation de la conductivité du semi-conducteur et par conséquent la diminution de la résistance lorsque la température augmente.

Le nombre de paires d'électron- trou, par unité de temps et de volume NP est donné par :

$$NP = A * T^a \exp\left(\frac{-qE_i}{KT}\right) \quad (\text{II.6})$$

Où T est la température absolue du semi-conducteur, E_i l'énergie nécessaire pour rompre une liaison, A et a des constantes qui dépendent du matériau.

Il existe une probabilité qu'un électron et un trou libres se recombinent et reconstituent une liaison. Le nombre R de recombinaisons par unité de temps et de volume est proportionnel aux densités n et p de charges libres :

$$R = r.n.p \quad (\text{II.7})$$

r est le coefficient de recombinaison et, puisque :

$$n = p \text{ (nombre d'électrons générés égale au nombres de trous)}$$

On aura :

$$R = r.n^2 \quad (\text{II.8})$$

A l'équilibre la densité de charges libres est constante :

$$n = \left(\frac{AT^4}{r}\right)^{1/2} \cdot \exp(q \cdot E_i/2KT) \quad (\text{II.9})$$

Etant donné que T a une influence sur μ_n et μ_p , la conductivité peut se mettre sous la forme :

$$\sigma = C \cdot T^b \exp(-\beta/T) \quad (\text{II.10})$$

C et b sont des caractéristiques du matériau (b de l'ordre 1 à 4), $\beta = q E_i/2K$.

II.2.2 Relation résistance- température

A partir de l'expression de la conductivité σ , la résistance peut s'écrire sous la forme suivante :

$$R(T) = R_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-b} \cdot \exp\left(\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) \quad (\text{II.11})$$



Figure II.3 : Thermistance



Figure II.4 : Symbole communément utilisé pour représenter une thermistance

II.3 Thermocouple

Un thermocouple est un capteur servant à mesurer la température. Il se compose de deux métaux de natures différentes reliés à une extrémité. Quand la jonction des métaux est chauffée ou réfrigérée, une tension variable est produite, qui peut être ensuite transcrite en température. En général si on réunit à une extrémité deux fils métalliques de natures différentes et que l'on élève la température de cette extrémité, il apparaît une f.e.m e_{AB} aux extrémités restées libres. Il est possible de déterminer la température de l'extrémité chauffée à partir de la mesure de e_{AB} .

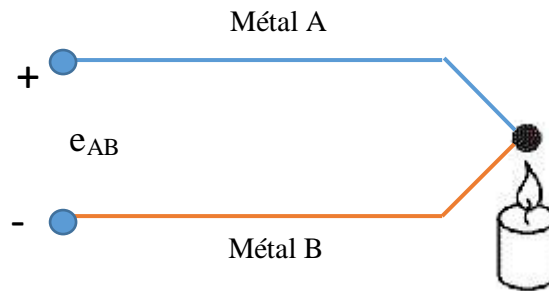


Figure II.5 : Thermocouples

On appelle :

Soudure chaude : Jonction de l'ensemble thermocouple soumis à la température à mesurer : c'est la jonction Capteur.

Soudure froide : Jonction de l'ensemble thermocouple maintenu à une température connue ou à 0 °C : c'est la jonction Référence.

II.3.1 Effet thermoélectrique

Les phénomènes thermoélectriques dans les conducteurs métalliques ou dans les semi-conducteurs mettent en évidence les conversions d'énergie qui existent à leur sein, l'effet Joule, énergie d'agitation thermique et énergie électriques des charges en mouvement.

La grandeur thermométrique est la fem thermoélectrique fournie par un couple de deux métaux différents soudés entre eux, appelé "thermocouple"

A/ Effet PELTIER

A la jonction entre deux conducteurs A et B différents, mais à même température T, apparaît une f.e.m. qui ne dépend que de la nature de A et B ; c'est la f.e.m. PELTIER

Lorsqu'on met en contact 2 conducteurs différents, les électrons passent de l'un à l'autre et il en résulte une f.e.m appelée f.e.m PELTIER. Cette f.e.m qui dépend de la température est due à la différence du travail d'extraction W dans chaque conducteur et à la différence de concentrations n des électrons dans le conducteur A et B :

$$U_{pel} = (w_B - w_A + KT (\ln \frac{n_A}{n_B})) / e \quad (\text{II. 12})$$

Où k est la constante de BOLTZMANN et e la charge de l'électron.

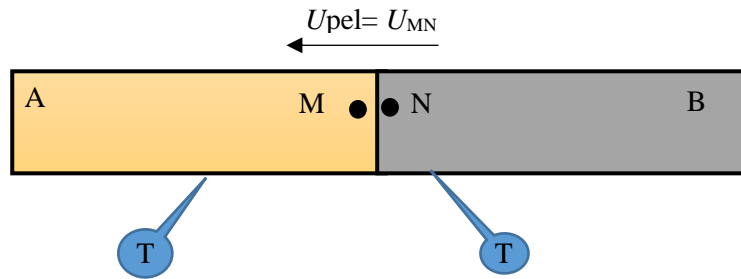


Figure II.6 : Effet Peltier

B/ Effet THOMSON

Entre deux points M et N d'un même conducteur homogène, placés à des températures différentes, s'établit une f.e.m . C'est l'effet THOMSON.

D'autre part, entre 2 extrémités d'un même conducteur portées à des températures différentes $T(M)$ et $T(N)$, comme de la figure suivante, s'établit une f.e.m de THOMSON :

$$U_{thom} = \int_{T_M}^{T_N} h(T) dT \tag{II.13}$$

$h(T)$ est caractéristique du matériau.

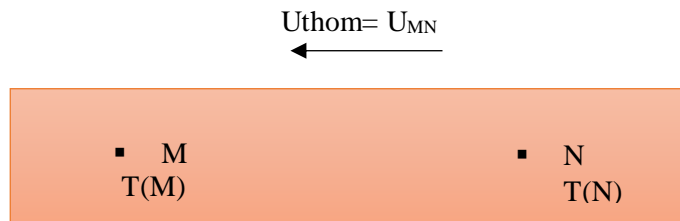


Figure II.7 : Effet Thomson

Application pour le cas association série de deux thermocouples

Soit U_{ab} la f.e.m dans le cas de l'association série de deux thermocouples constitués par deux conducteurs de matériaux A et B.

$$U_{ab} = U_{ae} + U_{ef} + U_{fg} + U_{hi} + U_{ij} + U_{jb} \tag{II.14}$$

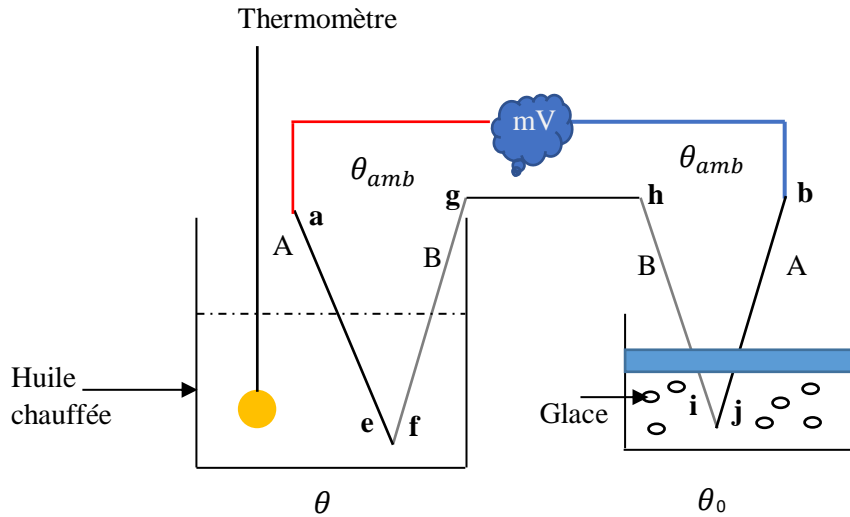


Figure II.8: Association série de deux thermocouples

$$U_{ab} = \int_{\theta_{amb}}^{\theta} h_A dT + \frac{W_B - W_A}{e} + \frac{KT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} + \int_{\theta}^{\theta_{amb}} h_B dT - \frac{W_B - W_A}{e} + \frac{KT}{e} \ln \frac{n_B}{n_A} + \int_{\theta_{amb}}^{\theta_0} h_B dT + \int_{\theta_0}^{\theta_{amb}} h_A dT \tag{II. 15}$$

$$U_{ab} = \int_{\theta_{amb}}^{\theta} h_A dT + \int_{\theta}^{\theta_{amb}} h_B dT + \int_{\theta_{amb}}^{\theta_0} h_B dT + \int_{\theta_0}^{\theta_{amb}} h_A dT \tag{II. 16}$$

Etant donné que h_A et h_B sont des coefficients constants, l'expression de U_{ab} se simplifie et s'écrit sous la forme suivante :

$$U_{ab} = h_A(\theta - \theta_{amb}) + h_A(\theta_{amb} - \theta_0) + h_B(\theta - \theta_{amb}) + h_B(\theta_{amb} - \theta_0) \tag{II. 17}$$

$$U_{ab} = h_A(\theta - \theta_0) + h_B(\theta - \theta_0) \tag{II. 18}$$

$$U_{ab} = (h_A + h_B)(\theta - \theta_0) \tag{II. 19}$$

$$U_{ab} = K_{th}(\theta - \theta_0) \tag{II. 20}$$

Ce qui nous permet de constater la linéarité en associant deux thermocouples.

II.3.2 Principaux types de thermocouples et limites d'emploi

Sur le tableau ci-dessous sont présentés les différents types de thermocouples, les températures d'utilisation ainsi que la précision, pour certains diamètres. Par contre les courbes de variation de la résistance de la thermistance et de la résistance platine (Pt 100) en fonction de la température sont illustrées sur la figure II.9.

Tableau II.2 : Plages de température et de f.e.m pour différents thermocouples

Thermocouples	Plages de température	f.e.m en (mV)
Cuivre / Constantin Type T (diamètre 1.63)	-270-370°C	-6,258- 19,027
Fer/ Constantin Type J (diamètre 3.25)	-210-800°C	-8,096- 45,498
Chromel/ Alumel Type J (diamètre 3.25)	-270-1250°C	-5,354- 50,633
Chromel/ Constantin Type E (diamètre 3.25)	-270-870°C	-9,835- 66,473
Platine-Rodium (10%)/ Platine Type S (diamètre 0.51)	-50-1500°C	-0,236- 15,576
Platine-Rodium (30%)/ Platine-Rodium Type B (diamètre 0.51)	-50-1500°C	-0,226- 17,445
Platine-Rodium (10%)/ Platine Type S (diamètre 0.51)	0-2760°C	0- 12,426

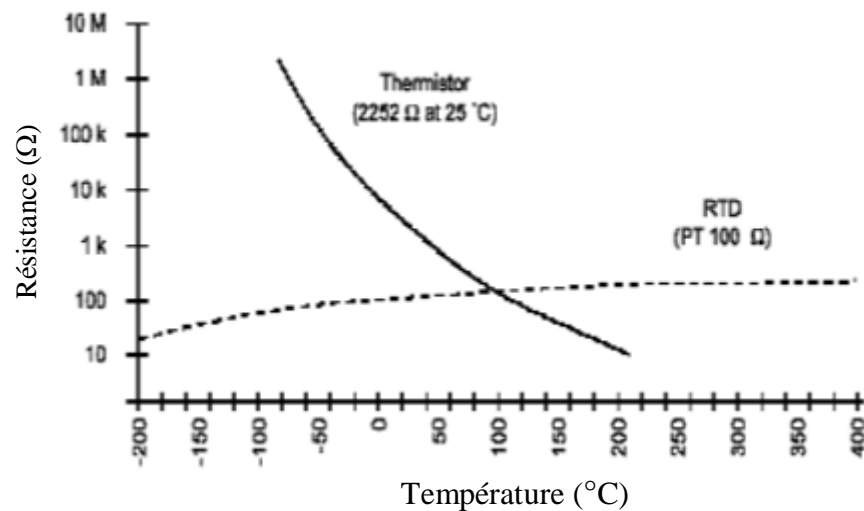


Figure II.9 : Courbes de Résistance en fonction de la température.

La relation concernant la RTD semble relativement linéaire, mais un ajustement de courbes est souvent le moyen le plus précis pour relever une mesure avec précision.

III.3.3 Comparaison thermocouple, résistance métallique et thermistance

Tableau II.3 : Avantages et inconvénients des capteurs de température

	Thermocouple	Résistance métallique	Thermistance
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Simple ❖ Robuste ❖ Peu couteux ❖ Mesures ponctuelles ❖ rapide ❖ Gammes de températures large 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Très stable ❖ Très précis ❖ Meilleure linéarité que le thermocouple 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Très sensible ❖ Faibles encombrement
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Non linéaire ❖ Stabilité faible ❖ Sensibilité faible ❖ Nécessite une température de référence 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Couteux ❖ Lent ❖ Sensibilité faible ❖ Erreur par auto-échauffement (effet Joule) 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Non linéaire ❖ Gammes réduite de température ❖ Stabilité faible ❖ Fragile ❖ autoéchauffement

CHAPITRE III

CAPTEURS PHOTOMETRIQUES

III.1 Lumières- Propriétés fondamentales

Les capteurs optiques permettent de transformer en signaux électriques l'information portée par la lumière visible ou des rayonnements de longueurs d'onde voisines : infrarouge et ultraviolets. Ils sont performants pour détecter la chaleur, la couleur ou encore la présence de certains gaz ou composants chimiques. Déjà largement utilisés pour la lecture des codes-barres, les capteurs optiques ont donc un potentiel d'application très large allant jusqu'à la détection et la reconnaissance de personnes.

La lumière présente à la fois deux aspects : un aspect ondulatoire et un autre corpusculaire.

❖ Aspect ondulatoire

La lumière est constituée d'ondes électromagnétiques émises lors de transitions électroniques entre les niveaux d'énergie des atomes de la source. Ces ondes se propagent dans le vide à la vitesse $C = 299792 \text{ km/s}$. La fréquence ν et la longueur d'onde λ sont liées par la relation :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (\text{III.1})$$

❖ Aspect Corpusculaire

L'aspect corpusculaire ressort lors de l'interaction matière-lumière. Dans cet aspect, le rayonnement électromagnétique apparaît constitué de particules qui sont les photons. A chaque photon est associée une énergie : $w_\phi = h\nu$ (III.2)

h étant la constante de Planck égale à : $6.6256 \cdot 10^{-36} \text{ J.s}$

L'énergie nécessaire pour libérer les électrons liés aux atomes doit dépasser l'énergie de leur liaison w_1 . l'absorption d'un photon permettra de libérer un électron si la condition suivante est

$$\text{vérifiée : } w_\phi \geq w_1 \quad (\text{III.3})$$

La libération de porteurs sous l'influence d'un rayonnement lumineux constitue l'effet photoélectrique. Ce qui provoquera des modifications des propriétés électriques du matériau et c'est bien le principe de base de capteurs optiques.

En ce qui concerne l'intensité de l'effet photoélectrique, cette grandeur est proportionnelle aux nombres de porteurs libérés chaque seconde. Cependant chacun des photons de rayonnement ne libère pas forcément un porteur ; en effet certains photons sont réfléchis par la surface du matériau et encore d'autres auront leur énergie convertie en énergie d'agitation thermique.

III.2 Photométrie

A/Grandeurs photométriques

a/ Flux lumineux

Le flux lumineux est la puissance lumineuse émise par une source lumineuse. Il permet de comparer l'efficacité lumineuse des différentes lampes, exprimée en lumens émis par watt de puissance électrique consommée (lm/W)

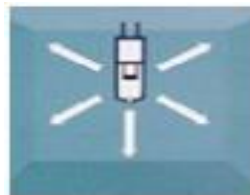


Figure III.1 : Flux lumineux

b/ Intensité lumineuse

L'intensité lumineuse est la quantité de flux lumineux émise dans une direction particulière. Elle permet de caractériser les luminaires en indiquant sur un graphe leur intensité lumineuse dans les différentes directions.



Figure III.2 : Intensité lumineuse

c/Luminance

La luminance est l'intensité lumineuse produite (ou réfléchie) par une surface et vue d'une direction donnée. Elle décrit l'effet de la lumière sur l'oeil.

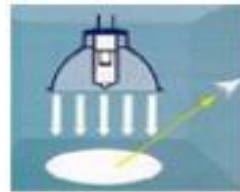


Figure III.3 : Luminance

d/Eclairement

L'éclairement est la quantité de flux lumineux éclairant une surface.

La grandeur la plus représentative de la qualité de l'éclairage est la luminance. C'est en effet la lumière réfléchie que perçoit l'oeil humain. Cependant celle-ci étant difficilement mesurable, ce sera l'éclairement, représentant la lumière incidente, qui sera dans la pratique considéré.

B/Sources de lumière

Lampe incandescente, 5.3%, lumière visible, 1.2% IR, 93% UV.

Tube fluorescent : 14% lumière visible- lampe à décharge : plus de 20% du visible.

LED : avec une tension, elle émet de la lumière.

Laser : concentré en faisceau.

III.3 Capteurs optiques- semi-conducteurs

Les capteurs optiques s'appuient sur les semi-conducteurs.

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé, en physique quantique des solides, à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Selon celle-ci, un matériau semi-conducteur possède une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la

bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction. Si un potentiel électrique est appliqué à ses bornes, un faible courant électrique apparaît, provoqué à la fois par le déplacement des électrons et par celui des « trous » qu'ils laissent dans la bande de valence. Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, du fait de ses bonnes propriétés, et de son abondance naturelle même s'il existe également des dizaines d'autres semi-conducteurs utilisés, comme le germanium, l'arséniure de gallium ou le carbure de silicium.

III.3.1 Applications

- Les détecteurs de flammes qui sont les photorésistances à détection d'infrarouges ou d'UV.
- Les détecteurs de présences se déclinent sous deux principes différents . Un premier détectant l'augmentation du flux induit par la présence d'un champ, le deuxième détectant la diminution du flux induit par l'ombre du corps présent dans le champ du capteur qui est plus limité que celui à infrarouges
- L'allumage des lumières lorsque la luminosité diminue (éclairage public ou domestique).

III.3.2 Photorésistance

Une photorésistance est composée d'un semi-conducteur à haute résistivité. Si la lumière incidente est de fréquence suffisamment élevée (donc d'une longueur d'onde inférieure à la longueur d'onde seuil), elle transporte une énergie importante. Au-delà d'un certain niveau propre au matériau, les photons absorbés par le semi-conducteur donneront aux électrons liés assez d'énergie pour passer de la bande de valence à la bande de conduction. La compréhension de ce phénomène entre dans le cadre de la théorie des bandes. Les électrons libres et les trous d'électron ainsi produits abaissent la résistance du matériau.

Lorsque le photon incident est suffisamment énergétique, la production des paires électron-trou est d'autant plus importante que le flux lumineux est intense. La résistance évolue donc comme l'inverse de l'éclairement. Cette relation peut être considérée comme linéaire sur une plage d'utilisation limitée :

$$\sigma = e \cdot \mu \cdot n \quad (\text{III.4})$$

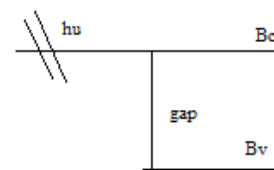


Figure III.4 : Théorie des bandes

μ : La mobilité des électrons

n : la densité d'électrons résultants de l'ionisation par rayonnement.

e : la charge de l'électron

n est proportionnel à $\sqrt{\phi}$. Donc la conductivité σ aussi. Alors R inversement proportionnel.

$$R = \frac{k}{\sqrt{\phi}} \quad (\text{III. 5})$$

Avec $k = \frac{1}{\mu \cdot e}$

ϕ : le flux de lumière

Si $\phi=0$; $R=R_0$ Obscurité

Les matériaux utilisés dans les photorésistances dans le domaine visible et à faible coût, on a le plus souvent le sulfure de cadmium (CdS) ou le séléniure de cadmium (CdSe). Pour des utilisations dans l'infrarouge on utilise le sulfure de plomb (PbS).

III.3.3 Photodiode

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

Un semi-conducteur, est une jonction p-n qui désigne une zone de cristal formée par deux zones une dopée en P et l'autre dopée en n. Lorsque la région dopée en p est mise en contact avec la région dopée en n, les électrons et les trous diffusent spontanément de part et d'autre de la jonction, créant ainsi une zone de déplétion.

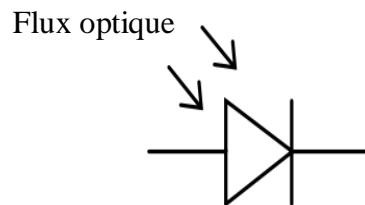


Figure III.4 : Une photodiode

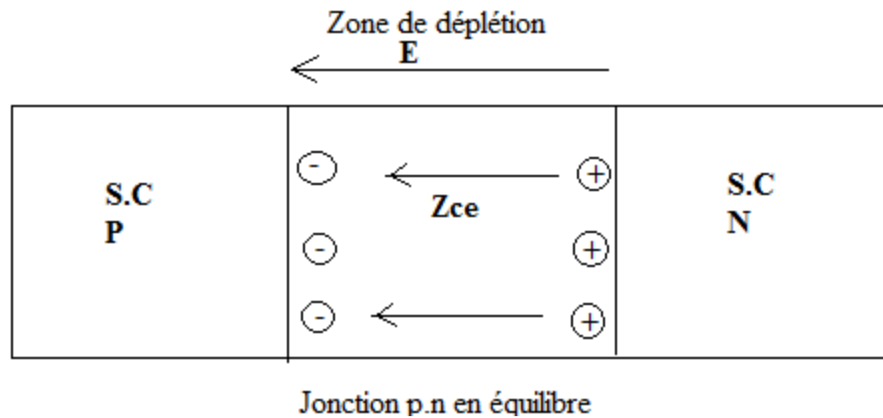


Figure III.5 : Une jonction p.n

Quand un semi-conducteur est exposé à un flux lumineux, les photons sont absorbés à condition que l'énergie du photon ($h\nu$) 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 (où il sert à assurer la cohésion de la structure) vers la bande de conduction, le rendant ainsi mobile et capable de générer un courant électrique. 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 électron-trou 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.

Le courant totale dans la jonction est le suivant :

$$I_{tot} = I_0 \left(1 - \exp\left(\frac{e \cdot V}{K \cdot T}\right) \right) + I_{ph} \quad (\text{III.6})$$

Ainsi, on aura:

$$I_{tot} = (1 - R) \eta \Phi_e / h\nu \quad (\text{III.7})$$

Le photo courant est :

$$I_{ph} = k'\Phi \quad (\text{III.8})$$

I_0 courant d'obscurité égale à 0,1 nA.

h : constante de planck

ν : fréquence optique

R : coefficient de réflexion, Φ : puissance optique

Φ : flux de lumière incident

a /Mode photoconducteur

La jonction p-n est polarisée en inverse, le courant total s'écrit :

$$I_{tot} = I = I_0 + I_{ph} = I_0 + k'\Phi = k'\Phi \quad (\text{III.9})$$

Le mode photoconducteur est utilisé pour les grands flux.

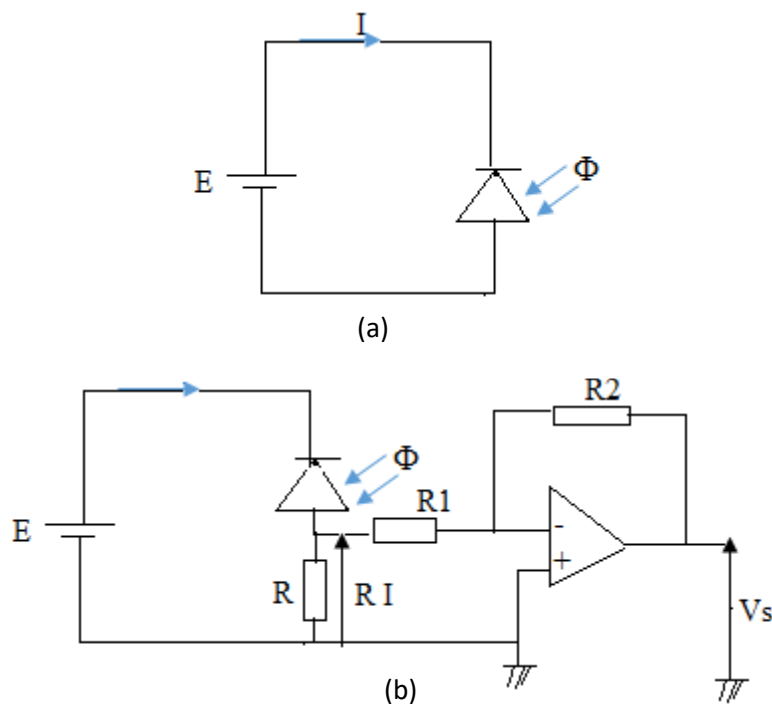


Figure III.6 : Fonctionnement en mode photoconducteur

L'expression du potentiel de sortie est :

$$V_s = \frac{R_2}{R_1} R \cdot I \tag{III.10}$$

$$V_s = \frac{R_2}{R_1} k' \Phi \tag{III.11}$$

b/Mode photovoltaïque

Ce mode de fonctionnement est sans polarisation extérieure

-Circuit ouvert

$$I_{tot} = I_0 \left(1 - \exp\left(\frac{e \cdot V}{K \cdot T}\right) \right) + I_{ph} = 0 \tag{III.12}$$

$$V_{CO} = \left(\frac{K \cdot T}{e}\right) \cdot \ln\left(1 + \frac{K' \Phi}{I_0}\right) \tag{III.13}$$

Dans le cas des petits flux, $K' \Phi \ll 1$

$$V_{CO} = \left(\frac{K \cdot T}{e}\right) \cdot \ln\left(\frac{K' \Phi}{I_0}\right) \tag{III.14}$$

Le mode photovoltaïque est utilisé pour les faibles flux.

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_{CO} \tag{III.15}$$

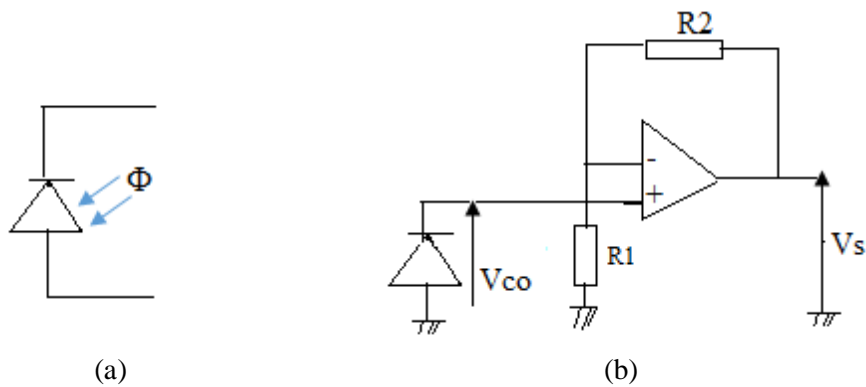


Figure III.7 : Photodiode, circuit ouvert, mode photovoltaïque

- En court-circuit

Le courant de court-circuit peut être mesuré.

Le potentiel d'entrée est nul, $I_{cc} = I_{ph} = I$

$$V_s = -R \cdot I = -R \cdot k' \phi \quad (\text{III. 16})$$

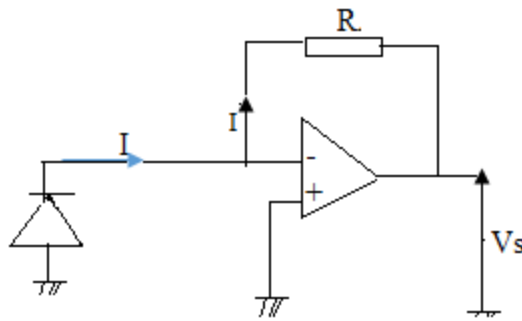


Figure III.8 : Photodiode, en circuit ouvert, mode photovoltaïque

III.3.4 Phototransistor

Il s'agit généralement d'un transistor en silicium et de type NPN dont l'élément semi-conducteur constituant la base peut être éclairé ; entre le collecteur et l'émetteur la polarisation est normale.

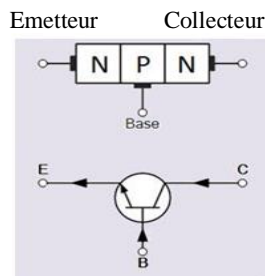


Figure III.9 : Phototransistor

Lorsque la région voisine de la jonction est éclairée, elle se comporte comme une photodiode en mode photoconducteur dont le courant est :

$$I_t = I_0 + I_{ph}, \quad I_{ph} = k'' \phi$$

I_{ph} est le courant d'origine photoélectrique dû au flux incident Φ . Le courant I_t joue le rôle d'un courant de base et entraîne donc, par effet transistor, la circulation d'un courant collecteur I_C :

$$I_C = (1 + \beta)I_t = (1 + \beta)I_0 + (1 + \beta)I_{ph} \quad (\text{III.17})$$

β est le gain en courant du transistor en émetteur commun.

$(1 + \beta)I_0 = I_{C0}$ est le courant d'obscurité du phototransistor.

$(1 + \beta)I_{ph} = I_{Cph}$ est le courant collecteur provoqué par le flux incident.

On peut considérer le phototransistor comme l'association d'une photodiode et d'un transistor :

- ❖ la première délivrant à la base le courant photoélectrique I_{ph} ;
- ❖ le second apportant l'amplification β

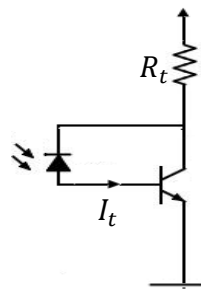


Figure III.10: Montage électrique d'un phototransistor

CHAPITRE IV

CAPTEURS DE POSITION

Ces capteurs sont utilisés d'une manière très générale. En effet le contrôle des positions et déplacement est important pour le fonctionnement correct de plusieurs machines. Certaines grandeurs physiques sont mesurables par le déplacement qu'elles engendrent et c'est le cas des forces et des pressions... etc

Les capteurs de position sont utilisés dans un large éventail d'applications industrielles et commerciales, du matériel militaire de pointe aux appareils ménagers et automobiles de grande consommation. De fait, après la mesure de la température, la position est la deuxième propriété étant la plus couramment mesurée dans nos vies quotidiennes. On distingue :

- ❖ capteur potentiométrique
- ❖ capteur inductif
- ❖ capteur capacitif
- ❖ capteur de proximité
- ❖ capteur digital

IV.1 Capteur potentiométrique

Ce type de capteur est constitué d'une résistance fixe R sur laquelle peut se déplacer un contact électrique, le curseur. Celui-ci est solidaire mécaniquement de la pièce et isolé électriquement. La valeur de la résistance R entre le curseur et l'une des extrémités est fonction de la position du curseur et donc de la pièce mobile dont on veut traduire électriquement la position.

IV.1.1 Résistance

Elle peut être constituée par un fil bobiné ou une piste conductrice.

Le fil doit avoir un coefficient de températures de la résistivité et une fem thermoélectrique avec le cuivre faibles. Aussi le fil doit présenter une stabilité cristallographique et une résistance à la corrosion. Le fil est bobiné sur un mandrin isolant constitué du verre, du céramique ou du plastique.

Les pistes conductrices sont fabriquées à partir d'un plastique chargé par une poudre conductrice en carbone ou en métal. Les valeurs des résistances R sont généralement comprises entre 1 k Ω et 100 k Ω et peuvent atteindre quelques M Ω .

IV.1.2 Curseur

Le curseur doit assurer un bon contact électrique en absence de f.e.m de contact. La résistance du contact doit être faible et stable dans le temps et en présence de vibrations ou de vitesses élevées du déplacement du curseur. La résistance du contact doit être dépend de la pression du curseur, de la nature et de l'état des surfaces en contact.

IV.1.3 Types de capteurs potentiométriques

Selon la forme géométrique du mouvement du curseur, on distingue :

- ✓ Le potentiomètre de déplacement rectiligne
- ✓ Le potentiomètre de déplacement angulaire
- ✓ Le potentiomètre sans contact
- ✓ Le potentiomètre bobiné

▪ Potentiomètre de déplacement rectiligne

La résistance électrique d'un matériau est directement proportionnelle à longueur de ce matériau. Ce qui permet de réaliser un capteur de déplacement et c'est le capteur potentiométrique. L'objet est fixé au curseur mobile.

Le potentiel pour chaque position est le suivant :

$$V = V_S \cdot \frac{x}{L} \quad (\text{IV. 1})$$

La résistance s'exprime comme suit :

$$R_x = \frac{x}{L} \cdot R \quad (\text{IV. 2})$$

Avec :

x : déplacement rectiligne

L : déplacements rectiligne maximale et c 'est la longueur totale de la résistance.

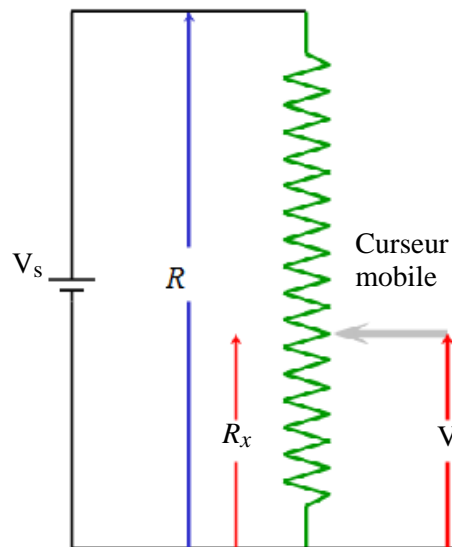


Figure IV.1: Montage potentiométrique

▪ **Potentiomètre de déplacement angulaire**

Ce type potentiomètre existe sous forme circulaire. On mesure dans ce cas α_x au lieu de x .

La résistance peut s'écrire sous la forme suivante :

$$R_x = \frac{\alpha_x}{\alpha} \cdot R \quad (\text{IV. 3})$$

Avec :

α_x : déplacement angulaire

α : déplacement maximale

Ces caractéristiques sont les suivantes :

- Leur principe est simple
- Un coût faible
- Amplitude du signal électrique peut être importante
- Frictions et erreurs de finesse

- Usures et modification des performances
- Nombre maximal de manœuvres est environ de 10^6
- Sensible à l'environnement : poussières, humidité, ...

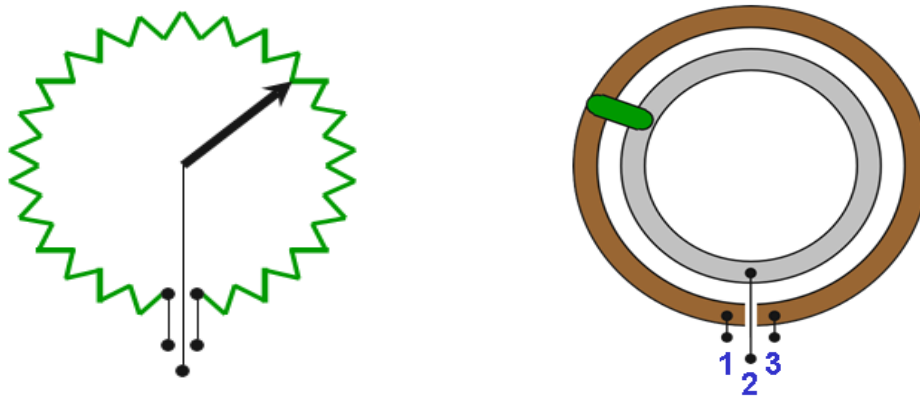


Figure IV.2: Potentiomètre en forme circulaire

▪ Potentiomètre sans contact

Les potentiomètres sans contact sont réalisés pour réduire les problèmes de friction et d'usure. La résistance du matériau photoconducteur (présenté sur la figure) varie inversement en fonction de l'éclairement.

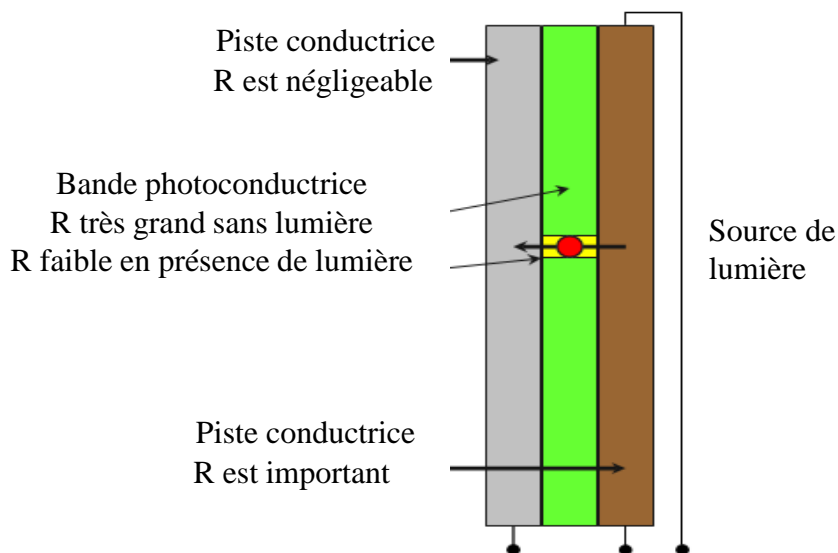


Figure IV.3: Potentiomètre sans contact

▪ Potentiomètre bobiné

Il s'agit du premier type de potentiomètre, il est constitué d'un long fil conducteur enroulant un

support.

Des curseurs mobiles peuvent se déplacer contre cet enroulement et assurent un bon contact électrique. Dans ce cas R ne varie pas linéairement selon x .

Le plus petit déplacement détectable est de $10\ \mu\text{m}(\delta x)$.

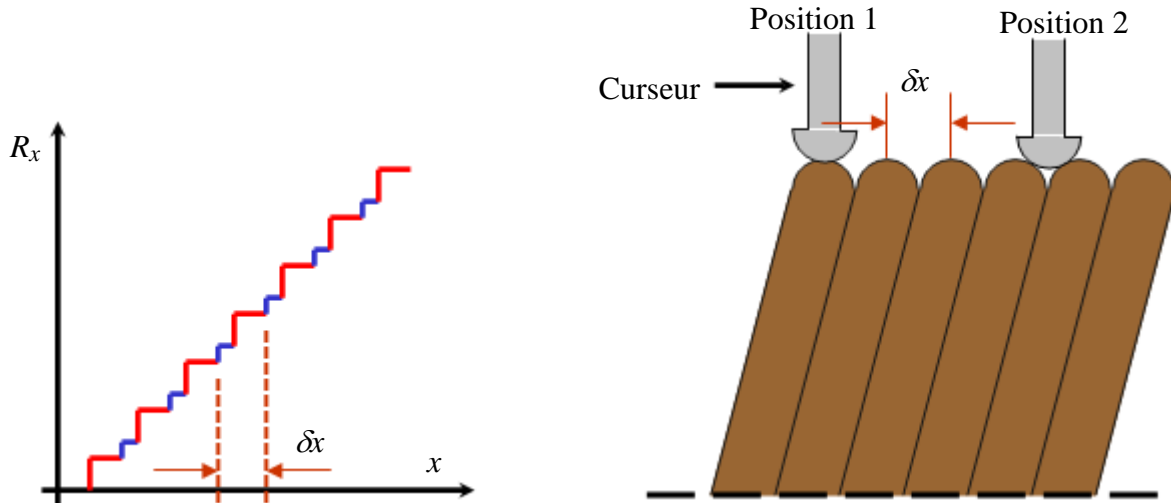


Figure IV.4: Potentiomètre bobiné

IV.2 Capteurs inductifs

Le déplacement qu'on désire traduire électriquement est imposé au niveau d'un élément du circuit magnétique, ce qui est à l'origine d'une variation du flux dans un enroulement de mesure.

Le coefficient d'auto-induction L d'une bobine de N tours de fil s'exprime en fonction de la réluctance R du circuit magnétique :

$$L = \frac{N^2}{R} \quad (\text{IV. 4})$$

$$\text{où } R = \int \frac{dl}{\mu s} \quad (\text{IV. 5})$$

μ étant la perméabilité magnétique et s la section du circuit.

Si les sections des différents tronçons du circuit magnétique sont constantes :

$$R = \frac{l_f}{\mu_0 \mu_f s_f} + \frac{l_0}{\mu_0 s_0} \quad (\text{IV. 6})$$

l_f et l_0 sont respectivement la longueur moyenne d'une ligne de force dans le matériau ferromagnétique et dans l'air ; s_f et s_0 sont les sections du circuit magnétique et de l'entrefer.

μ_f est la perméabilité magnétique relative du matériau ferromagnétique et μ_0 est la perméabilité du vide ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$).

▪ **Capteur à entrefer variable**

L'expression du coefficient d'auto-induction s'obtient facilement :

$$L = \mu_0 N^2 S \cdot \frac{1}{l_0 + \frac{l_f}{\mu_f}} \quad (\text{IV.7})$$

L'expression précédente signifie que l'inductance dépend de l'entrefer. On peut donc en déduire le déplacement d'un objet physiquement relié à la partie mobile du noyau ferromagnétique.

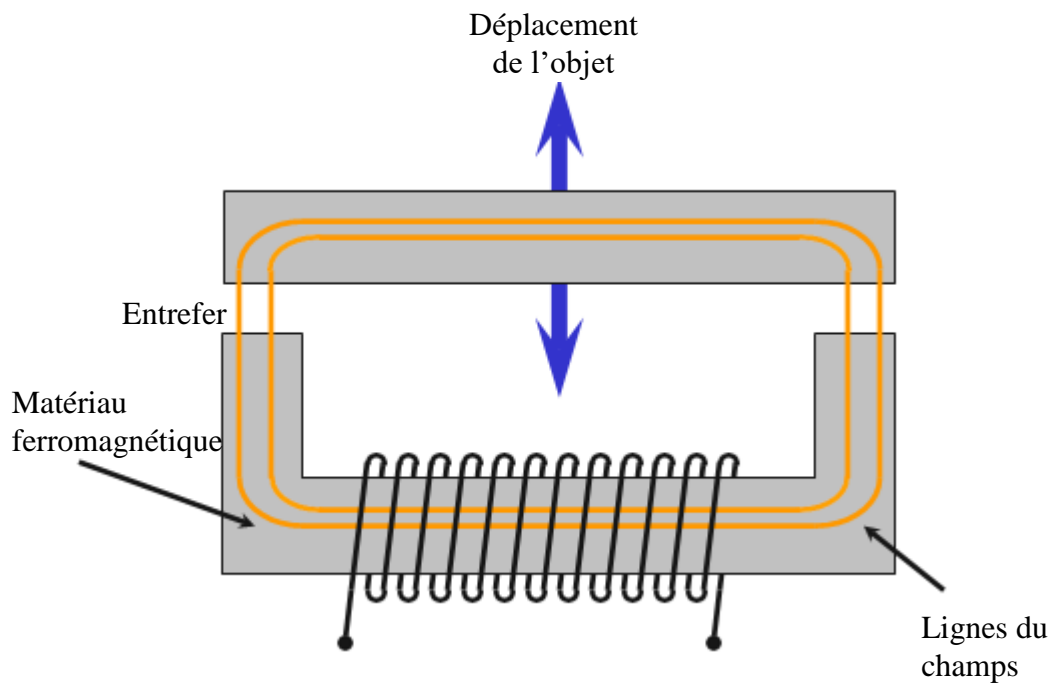


Figure IV.5: Capteur inductif

On choisit $l_0 \gg \frac{l_f}{\mu_f}$.

Il en résulte l'expression suivante :

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l_0} \quad (\text{IV.8})$$

Un déplacement de Δx de l'armature qui entraîne une variation $\Delta l_0 = 2\Delta x$ de l'entrefer, l'inductance prend une nouvelle forme :

$$L + \Delta L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l_0} \cdot \frac{1}{l_0 + 2 \frac{\Delta x}{l_0}} \quad (\text{IV.9})$$

En développant en série de Taylor et en prenant $\Delta x \ll l_0$ on a pratiquement :

$$\Delta L = -\frac{2\mu_0 N^2 S}{l_0^2} \cdot \Delta x \left(1 - 2 \frac{\Delta x}{l_0} + \left(\frac{2\Delta x}{l_0} \right)^2 + \dots \right) \quad (\text{IV.10})$$

Et la sensibilité S s'écrit :

$$S = \frac{\Delta L}{\Delta x} = -\frac{2\mu_0 N^2 S}{l_0^2} \cdot \Delta x \left(1 - 2 \frac{\Delta x}{l_0} + \left(\frac{2\Delta x}{l_0} \right)^2 + \dots \right) \quad (\text{IV.11})$$

La sensibilité dépend de la position initiale l_0 de l'armature ; et elle est d'autant plus élevée que l_0 est petit.

Ceci limite l'emploi de ce type de capteurs à des déplacements faibles (de l'ordre de mm).

L'étendue de mesure d'un tel système est de l'ordre du mm La précision peut être de l'ordre du μm .

La sensibilité et la linéarité sont améliorées en association à l'inductance précédente, un autre bobinage et un noyau identiques aux premiers placés symétriquement par rapport à l'armature mobile. Dans ce cas l'entrefer subit des variations opposées.

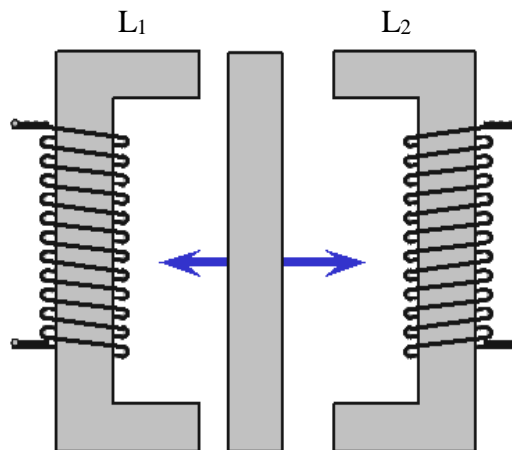


Figure IV.6: Capteur à entrefer variable, montage push pull

La variation du coefficient d'auto induction L' du deuxième bobinage est :

$$\Delta L' = \frac{2\mu_0 N^2 S}{l_0^2} \cdot \frac{\Delta x}{1 - \frac{2\Delta x}{l_0}} \tag{IV.12}$$

Pour $\Delta x \ll l_0$, on aura :

$$\Delta L' = \frac{2\mu_0 N^2 S}{l_0^2} \cdot \Delta x \left(1 + 2 \frac{\Delta x}{l_0} + \left(\frac{2\Delta x}{l_0} \right)^2 + \dots \right) \tag{IV.13}$$

Les deux inductances L et L' sont placées sur deux branches opposées.

$$\Delta L' - \Delta L = \frac{4\mu_0 N^2 S}{l_0^2} \cdot \Delta x \left(1 + \left(\frac{2\Delta x}{l_0} \right)^2 + \dots \right) \tag{IV.14}$$

La sensibilité résultante de cette association est doublée. Sa non linéarité est réduite au second ordre.

▪ **Capteur à noyau plongeur**

La figure suivante est une autre configuration d'un capteur de déplacement inductif. Un noyau ferromagnétique est associé à la pièce où on veut traduire la position ou le déplacement. Ce noyau est enfoncé d'une longueur l_f variable dans un bobinage de N tours de fils régulièrement répartis sur une longueur l .

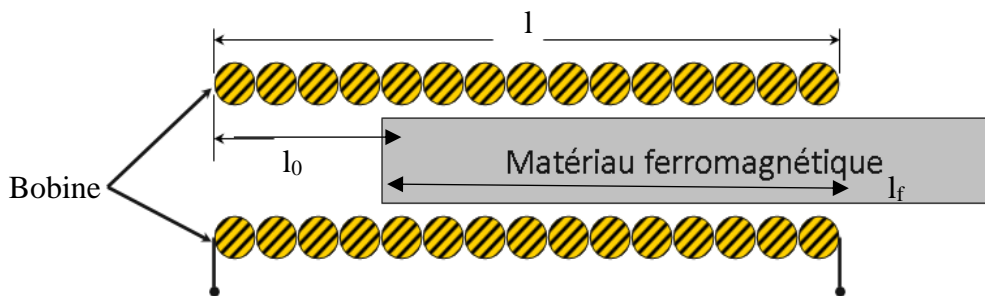


Figure IV.7: Capteur à noyau plongeur

Le modèle électrique de ce capteur est le suivant :

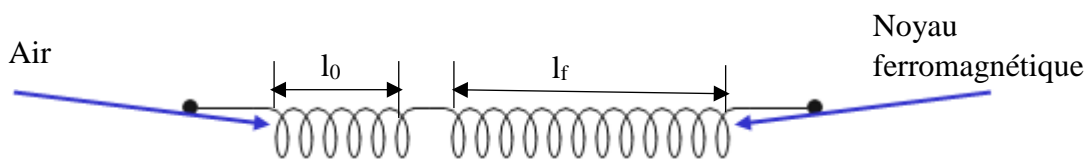


Figure IV.8: Modèle électrique du capteur à noyau plongeur

L'inductance totale de ce capteur est donnée par :

$$L = L_0 + L_f + 2.M \quad (\text{IV.15})$$

L_0 et L_f sont respectivement les coefficients d'auto-induction de l'air et de l'inductance à noyau de fer. M étant la mutuelle induction.

Avec

$M = k\sqrt{L_0 \cdot L_f}$; k étant le coefficient de couplage supposé constant.

$$L_0 = \mu_0 \frac{N^2}{l^2} s_0 \cdot l_0 = \mu_0 \frac{N^2}{l^2} s_0 (l - l_f)$$

$$L_f = \mu_0 \frac{N^2}{l^2} [s_0 + (\mu_f - 1)s_f] \cdot l_f$$

Alors l'expression de L est :

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l^2} \left(s_0 \cdot l + (\mu_f - 1)s_f \cdot l_f + 2 \cdot k \sqrt{s_0 [s_0 + (\mu_f - 1)s_f]} \cdot \sqrt{(l - l_f) \cdot l_f} \right) \quad (\text{IV.16})$$

Cette relation n'est pas linéaire, sauf si on s'intéresse à des petits déplacements.

Comme dans le cas de l'inductance à entrefer variable, cette non linéarité peut être réduite en plaçant dans les branches d'un pont deux bobines identiques ayant un noyau unique qui se déplace de part et d'autre de la médiane entraînant des variations de sens opposé (voir le montage push pull suivant :

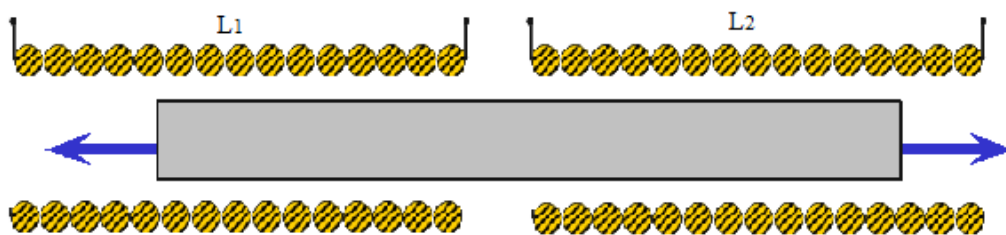


Figure IV.9: Montage push pull d'un capteur à noyau plongeur

La sensibilité est une fois doublée et la non linéarité est diminuée.

Dans ce cas, il faut tenir compte de l'établissement d'une mutuelle inductance entre les deux bobines qui peut être réduite par un choix adéquat du circuit magnétique.

IV.3 Capteurs capacitifs

Ce sont des condensateurs plans ou des condensateurs cylindriques dont l'une des armatures subit le déplacement et entraînant une variation de la capacité. En négligeant les effets de bord, celle-ci a pour expression :

$$\text{➤ Condensateur plan : } C = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d} \quad (\text{IV. 17})$$

ϵ_r étant la perméabilité relative du milieu placé entre les armatures, A et d étant respectivement leur surface en regard et leur distance.

$$\text{➤ Condensateur cylindrique : } C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l}{\text{Log} \frac{r_2}{r_1}} \quad (\text{IV. 18})$$

l étant l'enfoncement du cylindre intérieur de rayon r_1 dans le cylindre creux de rayon r_2 .

Ces capacités dépendent des dimensions géométriques.

Les capteurs capacitifs sont simples et leur constitution permet des réalisations robustes et fiables. Bien que les diélectriques ne dépendent que des caractéristiques géométriques, l'influence de la température n'est pas négligeable (variation de la surface et de l'écartement des armatures), ainsi cette influence peut décelable grâce à un choix convenable du métal des armatures et de l'isolant du sport. Le capteur doit être protégé contre certains facteurs d'environnement qui peuvent réduire l'isolement entre armatures : poussière, corrosion, humidité, radiation ionisante.

IV.3.1 Condensateurs à surfaces variables

Il s'agit soit d'un condensateur plan avec armature tournante soit d'un condensateur cylindrique avec armature translatable le long de l'axe.

a / Condensateur tournant

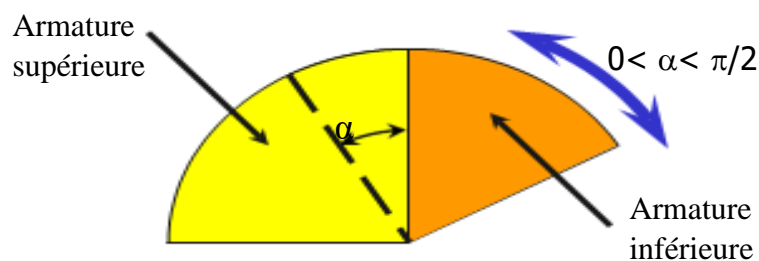


Figure IV.10: Condensateur à surface variable, déplacement angulaire, montage simple

Dans ce cas la capacité s'exprime comme suit :

$$C = \frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2 \alpha}{2d} \quad (IV.19)$$

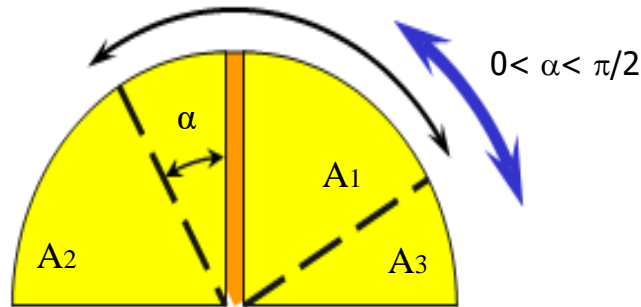


Figure IV.11: Condensateur à surface variable, déplacement angulaire, montage push pull

L'armature mobile A1 se déplace entre deux armatures fixes A2 et A3 constituant deux condensateurs dont les capacités C_{21} et C_{31} varient en sens contraire en fonction du déplacement.

Les capacités sont données comme suit :

$$C_{21} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{r^2}{2d} \alpha = C_0 \cdot \alpha \quad (IV.20)$$

$$C_{31} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{r^2}{2d} (\alpha_{max} - \alpha) = C_0 \cdot (\alpha_{max} - \alpha) \quad (IV.21)$$

En appliquant le diviseur de tension :

$$\frac{Z_{21}}{Z_{21} + Z_{31}} = \frac{C_{21}}{C_{21} + C_{31}} = \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_{max}}\right) \quad (IV.22)$$

Ce rapport potentiométrique est une fonction linéaire du déplacement.

b/Déplacements rectilignes

On distingue le cas avec un condensateur unique et le cas avec un condensateur double.

✓ Condensateur unique

La capacité s'exprime comme suit :

$$C = 2\pi\varepsilon_r\varepsilon_0 \cdot \frac{l}{\log \frac{r_1}{r_2}} \quad (IV.23)$$

✓ **Condensateur double différentiel**

L'armature mobile est placée symétriquement par rapport aux deux armatures fixes et les deux capacités résultantes sont égales mais au sens inverse. La position prise comme origine de déplacement est celle de l'armature mobile.

$$C_{21} = 2\pi\epsilon_r\epsilon_0 \cdot \frac{L+l}{\log \frac{r_1}{r_2}} \tag{IV.24}$$

$$C_{31} = 2\pi\epsilon_r\epsilon_0 \cdot \frac{L-l}{\log \frac{r_1}{r_2}} \tag{IV.25}$$

Par association de ces deux condensateurs, il 'établit le diviseur de tension suivant :

$$\frac{Z_{21}}{Z_{21}+Z_{31}} = \frac{C_{21}}{C_{21}+C_{31}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{l}{L} \right) \tag{IV.26}$$

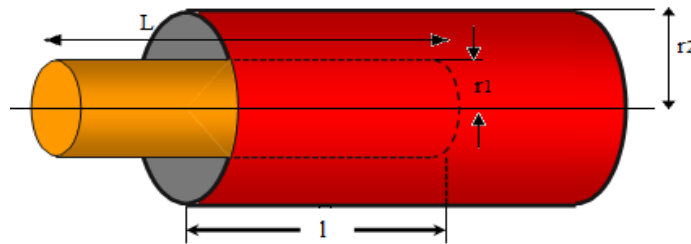


Figure IV.12: Condensateur à surface variable, déplacement linéaire, montage simple

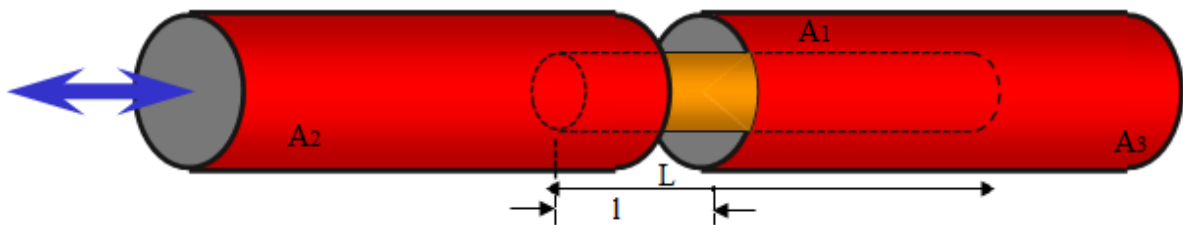


Figure IV.13: Condensateur à surface variable, déplacement linéaire, montage double différentiel

IV.3.2 Condensateur à écartement variable

On peut également jouer sur la distance entre les armatures d'un condensateur.

L'armature mobile est déplacée entre le plan des deux armatures fixes d'une manière perpendiculaire.. d est le déplacement par rapport à la position d'origine équidistante de D_0 des deux plans :

$$C_{21} = \frac{\varepsilon_0.A}{D_0 - d} = \frac{\varepsilon_0.A}{D_0} \frac{1}{1 - \frac{d}{D_0}} = C_0 \cdot \frac{1}{1 - \frac{d}{D_0}} \quad (\text{IV. 27})$$

$$C_{31} = \frac{\varepsilon_0.A}{D_0 + d} = \frac{\varepsilon_0.A}{D_0} \frac{1}{1 + \frac{d}{D_0}} = C_0 \cdot \frac{1}{1 + \frac{d}{D_0}} \quad (\text{IV. 28})$$

Avec $C_0 = \frac{\varepsilon_0.A}{D_0}$

Similairement au cas du condensateur différentiel à variation de surface, l'association des deux condensateurs présente des propriétés intéressantes, à savoir des rapport potentiomètres (diviseurs de tensions) variant linéairement avec le déplacement :

$$\frac{Z_{21}}{Z_{21} + Z_{31}} = \frac{C_{21}}{C_{21} + C_{31}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D_0} \right) \quad (\text{IV. 29})$$

C'est de ces relations que le montage de mesure associé au capteur doit tirer avantage.

Exemple de caractéristiques métrologiques TOC :

Capteur de déplacement linéaire AL102 à électronique incorporé (fabriquant E.A .M.STOPCOTE) ;

- Etendue de mesure : ± 1 mm
- Sensibilité : 0.5 mV/ μ m
- Ecart de linéarité : 0.1% de l'étendue de mesure
- Précision : erreurs de mobilité et d'hystérésis : non décelable

Dans le cas d'un condensateur unique, la capacité s'exprime comme suit :

$$C(d) = \frac{\varepsilon_0.A}{D_0 + d} \quad (\text{IV. 30})$$

Avec d le déplacement par rapport à l'écartement origine D_0 .

La sensibilité du capteur $S = \frac{-\varepsilon_0.A}{(D_0 + d)^2}$ (IV. 31)

$$\text{L'impédance } Z = \frac{1}{\epsilon_0 A \omega} \quad (\text{IV. 32})$$

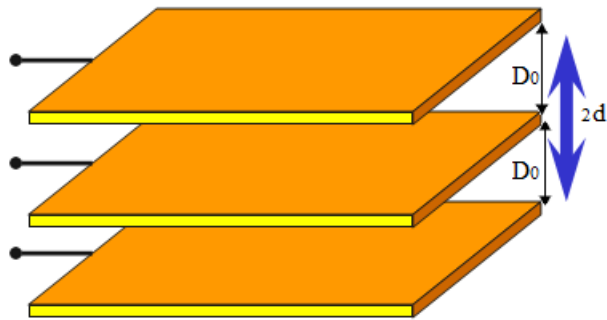


Figure IV.14: Condensateur à écartement variable, montage double

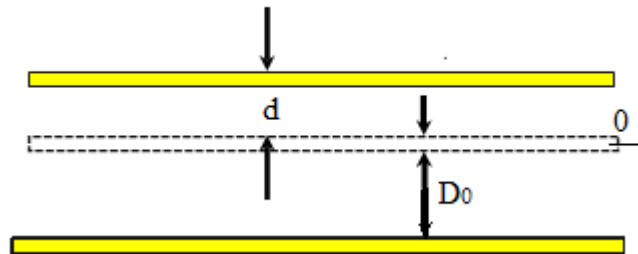


Figure IV.15: Condensateur à écartement variable, montage unique

La sensibilité est d'autant plus élevée que D_0 est plus petit. Elle peut être considérée constante dans la mesure où $D_0 \gg d$.

Le condensateur à écartement variable ne peut être utilisé que pour des étendus de mesures faibles (inférieur à mm).

CHAPITRE V

CAPTEURS TACHYMETRIQUES

Dans la pratique industrielle, la mesure de la vitesse en particulier la vitesse de rotation des machines tournantes est indispensable dont l'objectif est soit de surveiller, pour des raisons de sécurité ou soit de réguler. Le tachymètre est un instrument de mesure permettant de déterminer la vitesse de déplacement d'un objet en mouvement. Le capteur peut être analogique (électromagnétique, mécanique...) ou numérique (optique ou à courants de Foucault...). La connaissance de la vitesse de rotation d'un moteur est absolument nécessaire et la précision requise pour la mesure est assez élevée en particulier pour les moteurs spéciaux (turbomoteurs,...).



*



Figure V.1 : Modèles de tachymètres utilisés dans les avions

V.1 Tachymètre électromagnétique de vitesse angulaire

V.1.1 Génératrice tachymétrique à courant continu

Les éléments qui constituent la génératrice sont:

- ❖ le stator ou inducteur, carcasse ferromagnétique portant deux ou plus $2P$ pièce polaires canalisant le champ d'induction magnétique produit par des bobinages parcourus par un courant ou par des aimants permanents ;
- ❖ le rotor ou induit, cylindre de fer feuilleté tournant entre les pôles du stator, son axes étant confondu avec celui du stator ; à sa périphérie sont disposés parallèlement à son axe et à l'intérieur d'encoches, $n=2k$ conducteurs de cuivre. Ces conducteurs actifs sont reliés deux à deux à leur extrémités par d'autres conducteurs dits passifs, placés le long du diamètre du rotor ;
- ❖ le collecteur, cylindre de même axe que le rotor mais de diamètre très inférieur, portant des lames de cuivres isolées entre elles et reliées chacune à un conducteur actif ;
- ❖ les deux balais, reliés aux bornes de la génératrice et s'appuyant sur le collecteur, en contact avec deux lames diamétralement opposées, les balais sont placés le long de la ligne neutre, perpendiculairement à la direction moyenne de l'induction afin d'avoir une fem maximale.

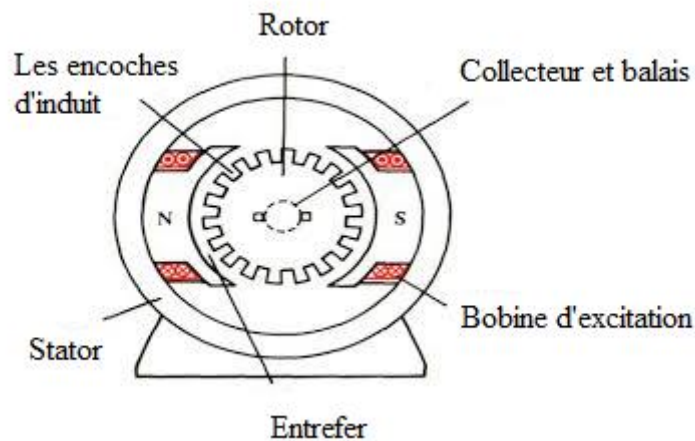


Figure V.2 : Structure d'une génératrice tachymétrique à courant continu

F.e.m aux bornes d'un contour d'un conducteur

Le j -ième conducteur actif, du fait de sa rotation, il sera le siège d'une f.e.m qui a pour

$$\text{expression : } e_j = - \frac{d\phi_j}{dt} \quad (\text{V.1})$$

Avec $d\Phi_j$ est le flux coupé pendant l'intervalle de temps dt ,

$$d\Phi_j = \overrightarrow{ds_c} \cdot \overrightarrow{B_j} = ds_c B_{jN} \quad (\text{V. 2})$$

ds_c étant la surface coupé pendant l'intervalle dt , $\overrightarrow{ds_c}$ étant un vecteur perpendiculaire à la surface ds_c et B_{jN} est la composante normale de l'induction B_j à la surface ds_c

On obtient :

$$e_j = -\omega \cdot r \cdot l \cdot B_{jN} \quad (\text{V. 3})$$

Par contre sur le conducteur j' diamétralement opposé, par raison de symétrie, on obtient :

$$e_{j'} = \omega \cdot r \cdot l \cdot B_{jN} \quad (\text{V. 4})$$

Réaction d'induit

L'induit est le siège d'une f.e.m qui provoque lorsqu'il est relié à un circuit extérieur, la circulation d'un courant I qui parcourt en sens inverse les conducteurs. En associant deux à deux les conducteurs symétriques par rapport à ligne neutre, on constate qu'il créent une induction perpendiculaire à la ligne des poles et proportionnelle à I : cette induction est appelée réaction d'induit.

Caractéristiques de fonctionnement

Dans le fonctionnement à vide ($I=0$), le f.e.m de la génératrice a pour expression générale :

$$E = \omega \cdot k_m \cdot \Phi_0 \quad (\text{V. 5})$$

Φ_0 étant le flux créé par l'inducteur, k_m est une constante pour une machine donnée.

Lorsque la génératrice est reliée à une charge R , elle débite un courant I entraînant une chute interne de tension et une réaction magnétique d'induit. La f.e.m de la génératrice s'écrit :

$$E = \omega \cdot k_m \cdot \Phi_0 \left(1 - \frac{k_r I}{\Phi_0} \right) \quad (\text{V. 6})$$

k_r caractérise l'importance de la réaction d'induit.

V.1.2 Génératrice tachymétrique à courant alternatif

Ce type de génératrices a l'intérêt de n'avoir ni collecteur ni balais : il en résulte un accroissement de la durée de vie, l'absence de chute de tension fluctuante aux balais. Cependant les circuits associés sont généralement complexes. On distingue la génératrice tachymétrique synchrone et asynchrone.

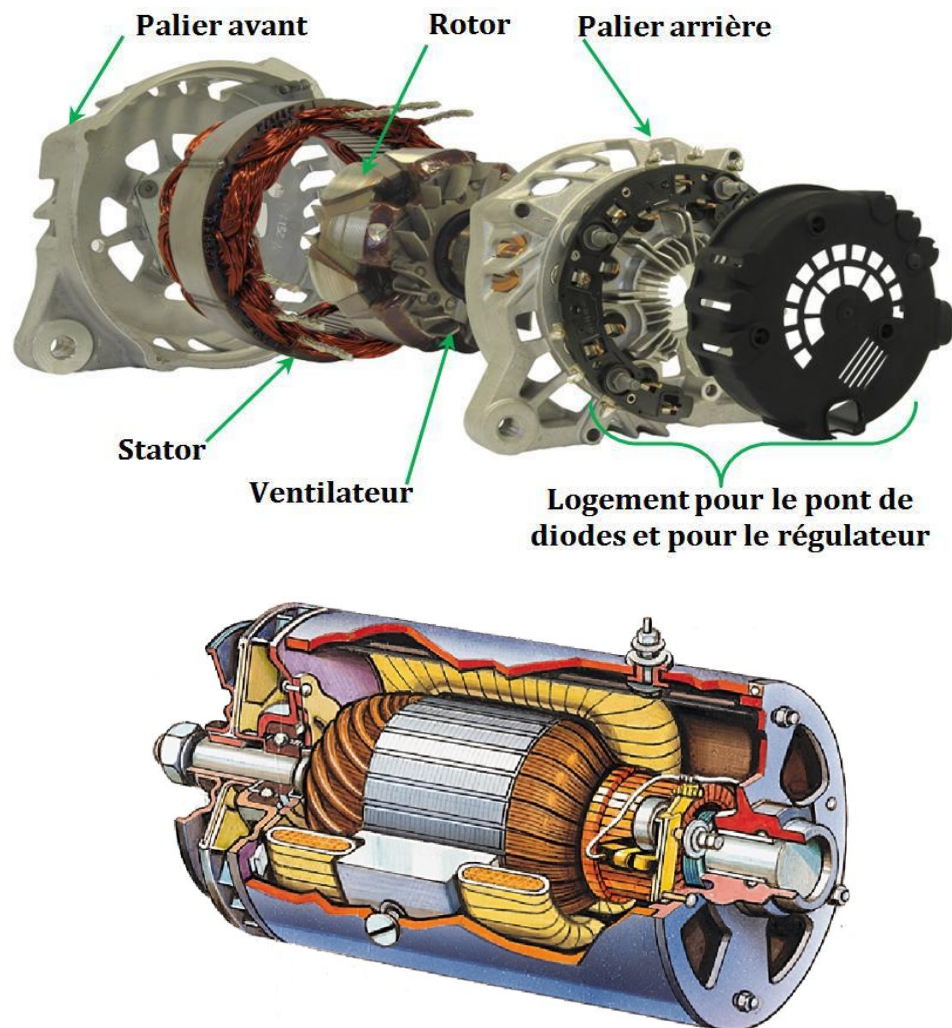


Figure V.3 : Types de génératrices tachymétriques à courant continu

▪ Génératrice tachymétrique synchrone

Il s'agit d'un petit alternateur. Le rotor est constitué d'un aimant ou d'un ensemble d'aimants. Le stator constitue le bobinage induit. Le stator porte le bobinage induit.

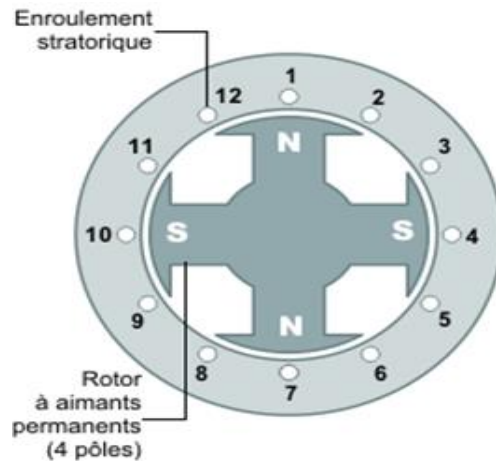


Figure V.4 : Génératrice tachymétrique synchrone

▪ Génératrice tachymétrique asynchrone

La réalisation est semblable à celle du moteur asynchrone biphasé. Le rotor est formé d'un cylindre métallique mince et amagnétique entraîné à une vitesse angulaire. Sa masse et son inertie sont très faibles. Le stator est en tôles magnétiques porte deux enroulements en quadrature.

Ce type de génératrice présente les caractéristiques métrologiques suivantes :

- Etendue de mesure : 10 tr/min à $2 \cdot 10^4$ tr/min ;
- Ecart de linéarité : 0.1 à 2% de l'étendue de mesure ;

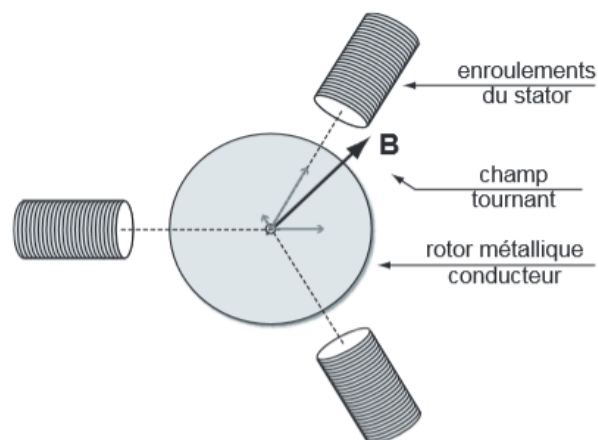


Figure V.5 : Machine asynchrone

V.2 Tachymètre mécanique

Le tachymètre mécanique est essentiellement utilisé dans les avions monomoteurs légers. Il comporte un transmetteur en liaison avec le moteur via un arbre d'entraînement flexible. Le transmetteur est constitué de plusieurs masselottes couplées à un mécanisme d'engrenage qui entraîne une aiguille. Quand l'arbre d'entraînement tourne, la force centrifuge agit sur les masselottes et les déplace vers l'extérieur. La position des masselottes dépend de la vitesse de rotation du moteur. L'amplitude du mouvement des masselottes est transmise par un mécanisme d'engrenage à une aiguille, qui indique directement sur l'instrument la vitesse de rotation du moteur.

L'étendue de mesure de ce type de tachymètre est relativement faible : 500 à 3000 tours/min.

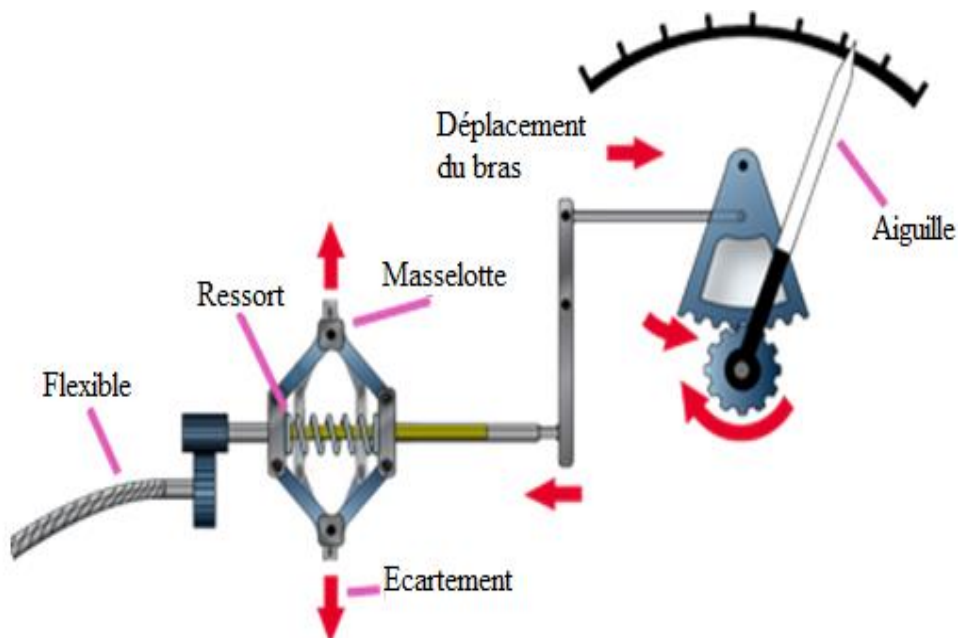


Figure V.6 : Tachymètre mécanique

Un nouveau tachymètre mécanique portatif est conçu pour mesurer avec précision les tours par minute ainsi que la vitesse en surface sur une large gamme d'applications. Employés dans plusieurs industries, comprenant la maintenance des ascenseurs, l'industrie minière et autres. Ces tachymètres mécaniques utilisent un pointeur et un cadran pour afficher les tours par minute ou la vitesse en surface.



Figure V.7 : Tachymètre mécanique portatif

V.3 Tachymètre numérique

Le corps d'épreuve est fréquemment un disque solidaire de l'arbre. Ce disque a une configuration périodique, sa surface étant divisée en p secteurs égaux, chacun porte un repère (trou, fente, denture...). Un capteur du type inductif est placé en regard du corps d'épreuve permet de détecter le passage de ces repères par variation du flux magnétique et délivre un signal impulsionnel dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de rotation. La fréquence f des impulsions délivrées par le capteur a pour valeur :

$$f = p \cdot N \text{ (Hz)} \quad (\text{V.7})$$

N est le nombre de tours par seconde du corps d'épreuve et p est le nombre de repères.

Le signal est ensuite converti en tension par un convertisseur dans un boîtier électronique, et la lecture se fait en pourcentage selon une référence définie par le constructeur.

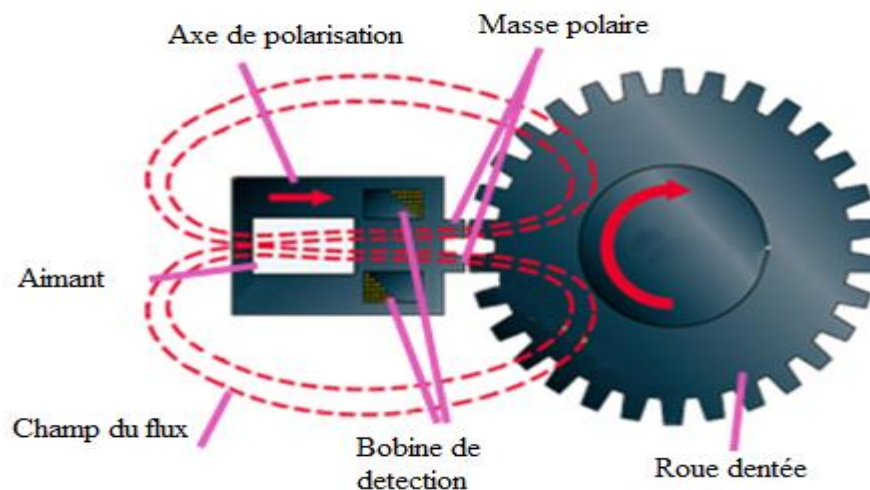


Figure V.8: Principe d'un tachymètre à impulsions

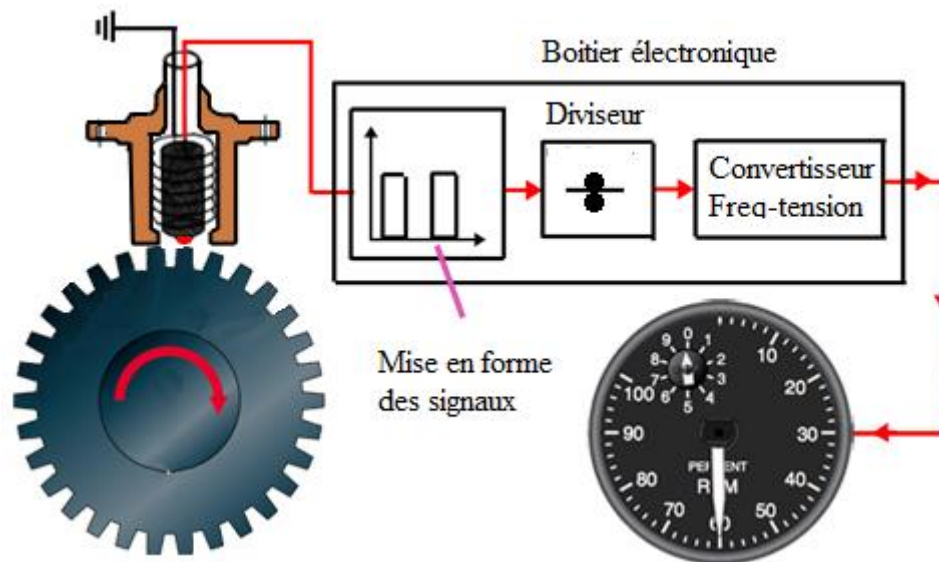


Figure V.9: tachymètre électronique



Figure V.10: tachymètre électronique portatif

V.3.1 Tachymètre à réluctance variable

Dans l'objectif de contrôler le bon fonctionnement d'une machine tournante nécessitant une grande sécurité de fonctionnement, en particulier un moteur d'avion, il est essentiel de disposer d'au moins deux sondes à réluctance variable afin de fournir des signaux indépendants à des moyens de contrôle. Chaque sonde à réluctance variable comporte une bobine entourée autour d'une pièce polaire fixée à un aimant permanent. La pièce polaire est montée en regard d'une roue dentée en matériau magnétique avec un entrefer déterminé.

Lorsque la roue dentée tourne, la bobine qui est soumise au flux de l'aimant permanent, est excitée par les variations de flux dans la masse polaire générées par le passage des dents de la roue, délivrant un courant électrique alternatif dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de rotation de cette roue.

V.3.2 Capteurs à courants de Foucault

Le capteur est placé en regard d'une pièce tournante métallique non ferromagnétique. La bobine génère un champ magnétique pour permettre la détection des variations de position du capteur par rapport à la surface de la pièce métallique. Ces capteurs sont utilisés dans de nombreuses applications dans les domaines de la recherche et de la production. Ils sont employés pour mesurer des épaisseurs ou des positions de pièces métalliques, des vibrations, des centrages d'axes, des usures de paliers ou encore des déplacements de pièces en vibration. Ils interviennent dans un grand nombre d'applications dans tous les secteurs de l'industrie automobile, aéronautique, mécanique, production ou ferroviaire.

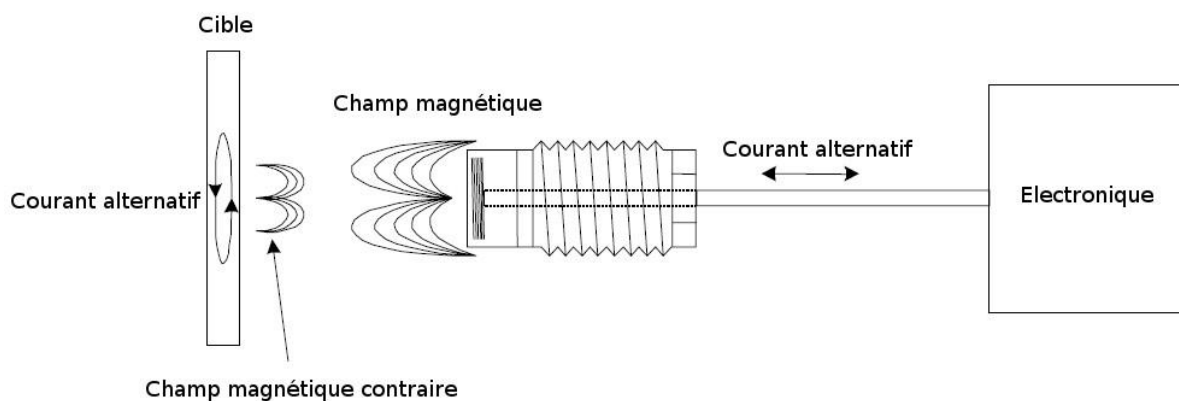


Figure V.11 : Principe de capteurs à courants de Foucault



Figure V.12: Capteurs à courants de Foucault KAMAN

V.3.3 Tachymètres optiques

Ce capteur comprend une source lumineuse et un détecteur optique : photodiode ou phototransistor.

La pièce en rotation peut être munie de repères réfléchissants espacés sur une circonférence ou associée à un disque à secteurs alternativement translucides et opaques placé entre une source et un détecteur. Le détecteur reçoit un flux modulés et délivre un signal électrique de fréquence proportionnelle à la vitesse de rotation.

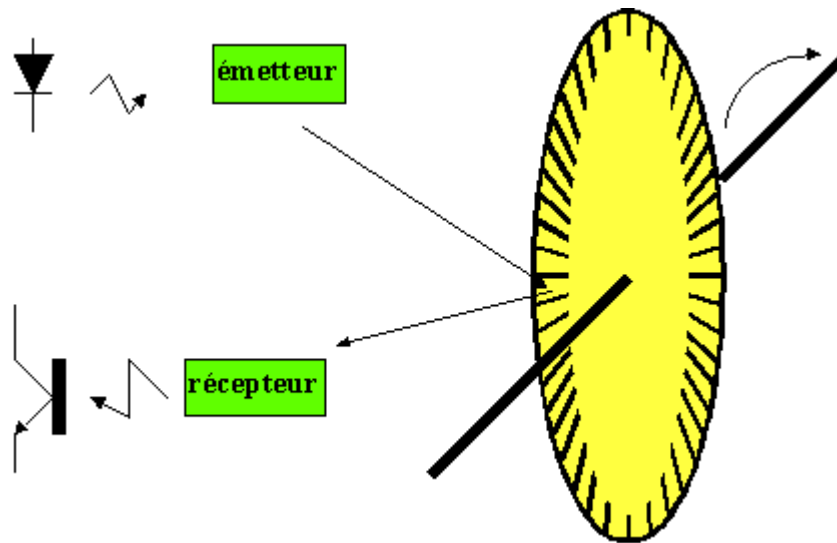


Figure V.13: Tachymètre optiques

CHAPITRE VI

CAPTEURS DE FORCE

Un capteur de force est un dispositif utilisé pour convertir une force appliquée sur un objet en signal électrique. La mesure de la force consiste à mesurer l'effet de cette grandeur physique sur un corps d'épreuve. L'effet principale de cette force sur un corps d'épreuve est sa déformation. On distingue différentes technologie pour mesurer la déformation ou la force :

- directes à l'aide des jauges extensométrique ou de capteurs de déplacement,
- indirectes, transduction piézoélectrique ou magnétostrictive.



Figure VI.1 : Certains types de capteurs de force

VI.1 Capteurs piézoélectriques

Le phénomène de piézoélectricité consiste en l'apparition d'une polarisation électrique dans certains diélectriques naturels (quartz , tourmaline ...) ou artificiels (sulfate de lithium, céramique traités) lorsqu'ils sont déformés sous l'effet d'une force.

Si on dépose une paire d'armatures sur les faces opposées d'une lame piézoélectrique, il apparait des charges de signes contraires et une différence de potentiel proportionnelle à la force appliquée.

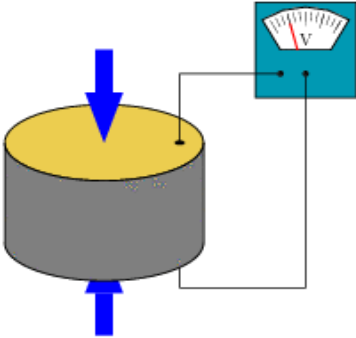


Figure VI.2 : Pastille piézoélectrique

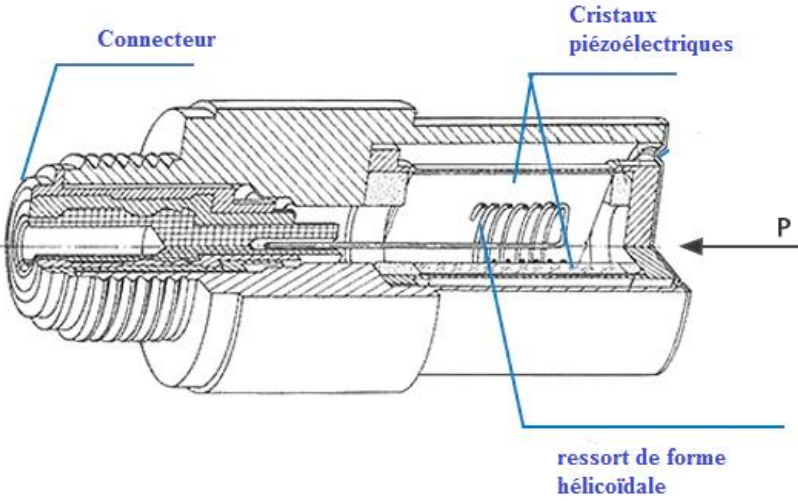


Figure VI.3: Capteur piézoélectrique

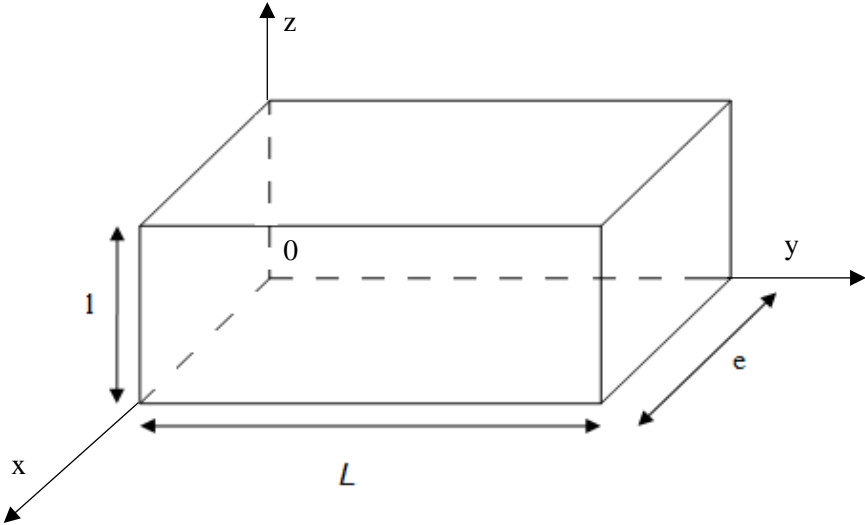


Figure VI.4: Lame de quartz

Effet longitudinal

En appliquant une force F_1 dans la direction Ox.

$$\text{La contrainte } \sigma_1 = \frac{F_1}{L.l} \quad (\text{VI.1})$$

Il apparait sur les armatures une densité superficielle de charge :

$$q_1 = d_{11}\sigma_1 \quad (\text{VI.2})$$

La charge totale Q_1 est proportionnelle à la force pressante :

$$Q_1 = L.l.q_1 = d_{11}F_1 \quad (\text{VI.3})$$

$$\text{Pour une force transversale, d'amplitude } F_2 \text{ et de contrainte } \sigma_2 = \frac{F_2}{L.e} \quad (\text{VI.4})$$

La densité superficielle est :

$$q'_1 = d_{12}\sigma_2 \quad (\text{VI.5})$$

La charge totale :

$$Q'_1 = L.l.q'_1 = -d_{11}\frac{L}{e}F_2 \quad (\text{VI.6})$$

Ce type de capteur est très sensible, cependant son étendue de mesure est limitée.

d_{11}, d_{12} sont des coefficients exprimant l'effet piézoélectrique et qui relie entre les densités de charges libres et les contraintes appliqués sur les armatures (σ_1, σ_2).

Un problème est rencontré c'est que les capteurs piézoélectriques génèrent de très faibles signaux de tension proportionnels à la charge et c'est le rôle de l'amplificateur de charge. En métrologie, un amplificateur de charge est généralement un convertisseur qui convertit de très faibles signaux de charge, tels que ceux générés par des capteurs piézoélectriques, en signaux de tension proportionnels à la charge (Volt).

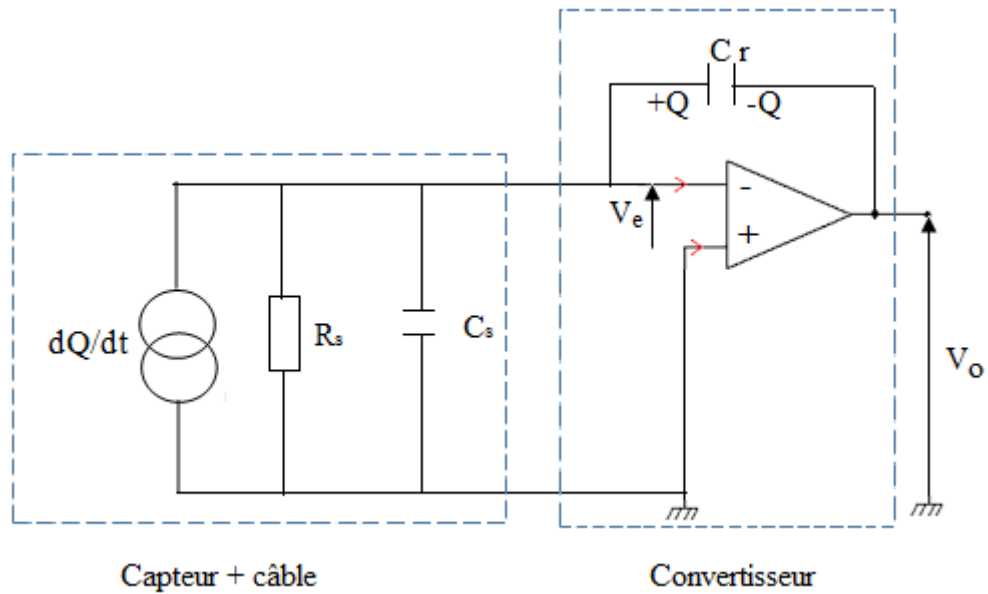


Figure VI.5 : Capteur piézoélectrique relié à un convertisseur de

En supposant le gain de l'amplificateur infini, la tension d'entrée égale à zéro. L'impédance d'entrée du convertisseur de charge idéale est nulle, ainsi le gain de conversion est :

$$\frac{v_o}{Q} = - \frac{1}{C_r} \quad (\text{VI. 7})$$

La tension de sortie est proportionnelle à la force.

- **Caractéristiques métrologiques**

Sensibilité, finesse

La sensibilité propre du capteur dépend de la valeur des coefficients piézoélectriques du matériau, du type de déformation qu'il subit et de la position des armatures.

Linéarité, étendue de mesure

La linéarité et l'absence de l'hystérésis implique que la déformation sous charge se situe dans le domaine d'élasticité, ce qui permet de définir une bonne étendue de mesure.

Grandeur d'influence

- **Température** : cette grandeur modifie l'impédance interne et la valeur des coefficients piézoélectriques ainsi que la sensibilité.

- **Variations de température** : Plusieurs substances piézoélectriques sont polaires, ce qui les rend sensibles aux variations thermiques qu'on ne peut pas distinguer de celles dues au mesurande.
- **Contraintes mécaniques** : L'intégration entre ces contraintes est à l'origine de signaux parasites.

VI.2 Capteurs à magnétostriction

Les matériaux ferromagnétiques soumis à un champ magnétique subissent une modification soit géométrique (variation de dimensions, torsion, flexion) soit mécanique (variation de module d'Young). Ces effets magnétostrictifs sont mis en œuvre dans la réalisation des transducteurs ultrasonores, où l'élément ferromagnétique fonctionne à la résonance mécanique. Aussi toute contrainte créée sous l'effet d'une force à déterminer, elle modifie la courbe d'aimantation. Pour déterminer la force, on peut exploiter la variation de la perméabilité ou de l'induction rémanente.

VI.2.1 Capteur à variation de perméabilité

La variation de la perméabilité μ sous l'influence d'une contrainte est traduite sur son effet sur l'inductance d'une bobine ou le couplage entre deux enroulements.

VI.2.2 Capteur à variation d'inductance

Il est constitué d'une bobine dont le noyau est déformé par la force à mesurer. La variation $\Delta\mu$ de la perméabilité moyenne du noyau (de sa réluctance). Les variations relatives de l'inductance, de la réluctance et de μ sont proportionnelles à la contrainte σ , et à la force F à mesurer :

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{\Delta L}{L} = k\sigma \quad (\text{VI. 8})$$

La variation de l'inductance est déjà présentée au chapitre I.

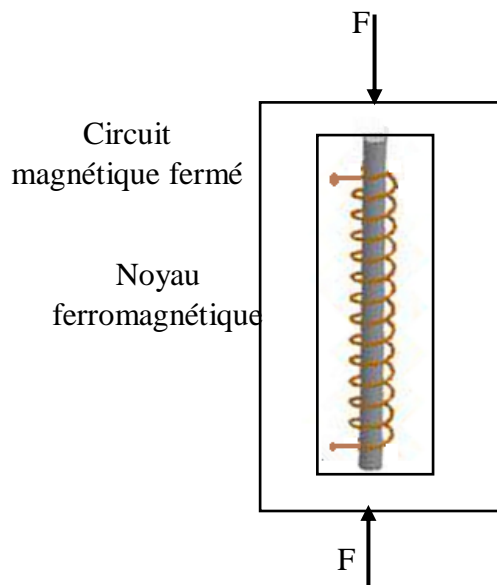


Figure VI.6 : Capteur magnétostrictif à variation d'inductance

VI.2.3 Capteur à variation de couplage

Il est constitué d'un bloc ferromagnétique feuilleté, ayant quatre ouvertures disposés en carré, à travers les quelles sont bobinés deux enroulements constituant le primaire et secondaire d'un transformateur. Les deux enroulements sont disposés à 45° de l'axe où doit être appliquée la force. Lorsque une force est appliquée dans cette direction, il en résulte, une altération de la symétrie des lignes d'induction et donc un signal induit par le primaire au secondaire d'amplitude proportionnelle à la force.

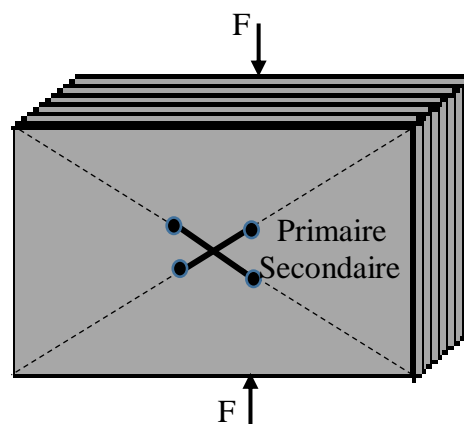


Figure VI.7 : Capteur magnétostrictif à variation de couplage

- **Caractéristiques métrologiques**

Les capteurs de force à magnétostriction se caractérisent par :

- une bonne finesse, due à une raideur élevée,

- une grande robustesse et une limite élevée de leur domaine de non-détérioration, en raison de la dureté des matériaux utilisés.
- une impédance électrique faible,
- une linéarité médiocre,
- une sensibilité aux grandeurs d'influence : température, champ magnétique parasites.
- Leur précision de l'ordre de quelques % de l'étendue de mesure est généralement inférieure à celle des autres capteurs de force.

VI.3 Jauge extensomètre

Pour déterminer certains paramètres (forces, pression ...) on mesure les déformations grâce à des jauges extensomètre appelées aussi jauges de contraintes.

VI.3.1 Constitutions des jauges

La jauge : Circuit métallique peu épais (de l'ordre du μm), ayant une résistance électrique qui varie lorsqu'il subit une déformation. La jauge doit être apte à résister à haute température et à l'usure. La jauge de contrainte est fixée sur un support.

Le support : Il sert de lien entre le corps d'épreuve et la jauge. Il doit donc être souple et isolant. Ce support est en résine. La fabrication de la jauge et du support est identique à celle des circuits imprimés.

Le corps d'épreuve : C'est le corps qui subira la déformation. Il doit être souple et élastique. Le support est fixé dessus. Il faut éviter de sortir de sa gamme de déformation élastique pour éviter tout risque de déformation permanente.

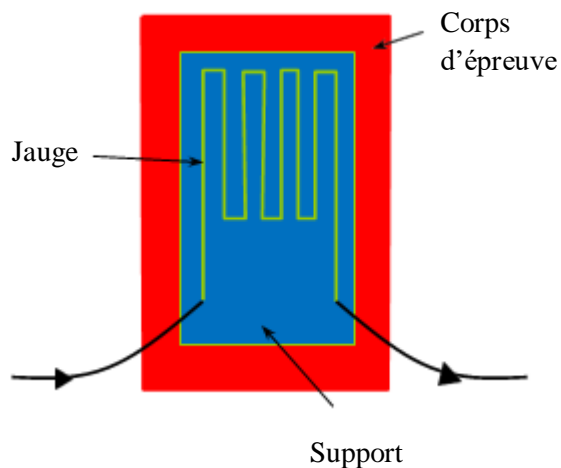


Figure VI.8 : Constitution d'une jauge de contrainte

VI.3.2 Principe de fonctionnement des jauges

Sous l'action d'une déformation mécanique la conductivité du métal varie.

Pour un fil cylindrique de résistivité ρ , de longueur l et de section S , la résistance est donnée par la relation :

$$R = \rho \frac{l}{S} = 4\rho \frac{l}{\pi D^2} \quad (\text{VI. 9})$$

Lorsque ce conducteur est soumis à une contrainte entraînant sa déformation, la conductivité du métal varie. Pour une déformation ΔL de la longueur, plusieurs effets se superposent. En raison de l'allongement ΔL , la résistance change de valeur. Aussi cet allongement résulte d'une contrainte qui a comme effet de réduire la section du conducteur. Et ceci en s'appuyant sur la résistance de matériaux, une barre s'allonge et en vertu de la loi de Poisson, sa section diminue (le cas d'élastique qu'on étire). Le rapport entre l'allongement et la variation de surface traduit la relation de Poisson :

$$\frac{\Delta S}{S} = -2\nu \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{VI. 10})$$

ν est le coefficient de Poisson.

L'effet piézoélectrique produit un allongement unitaire $\frac{\Delta L}{L}$. Cet effet a provoqué un changement de mobilité des électrons dans le conducteur. En effet la contrainte affecte la structure du matériau. Ceci a engendré un changement de résistivité. Ce qui permet d'établir la relation suivante :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = B \frac{\Delta V}{V} \quad (\text{VI. 11})$$

B est la constante de Bridgman. V est le volume du conducteur.

En remplaçant le volume par le produit de la section par la longueur L , il s'établit :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = B(1 - 2\nu) \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{VI. 12})$$

Par superposition des effets causés par la contrainte, se résume la relation suivante :

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu + B(1 - 2\nu)) \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{VI. 13})$$

On pose : $G = 1 + 2\nu + B(1 - 2\nu)$.

Ce terme est caractéristique du matériau utilisé.

La relation précédente se réécrit de la manière suivante :

$$\frac{\Delta R}{R} = G \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{VI. 14})$$

G est le facteur de jauge.

Pour les jauges métalliques, il est compris entre 2 et 6. Comme $\frac{\Delta L}{L}$ est de l'ordre de $1 \mu\text{m} / \text{mm}$ les variations de résistance sont de l'ordre du $\text{m}\Omega$. La résistance standard des jauges est 120Ω et typiquement il faut détecter des variations relatives de résistance de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-6} . Une déformation axiale du support de la jauge s'accompagne en général d'une déformation transversale qui va agir sur les boucles du fil de la jauge et va également modifier la valeur de sa résistance. La variation ΔR due à la déformation étant petite, il faut contrôler les effets de la température sur la résistance de la jauge.

Pour la réalisation des jauges, on utilise des alliages comme le constantan (Cu 60 %, Ni 40 %) ou comme le Nichrome (Ni 80 %, Cr 20 %). Il existe aussi des jauges à semi-conducteurs avec un G bien plus grand mais très sensibles aux variations de température.

VI.3.2 Principe de fonctionnement des jauges

Il existe différentes formes de capteurs à jauges (figure VI.9) :

- capteurs de force en « S » pour des mesures en traction / compression ;
- capteurs de force « *pancake* » pour des mesures en traction / compression ;
- pesons de compression standard ou miniature ;
- capteurs à moment constant ou à cisaillement utilisés pour des applications de pesage...

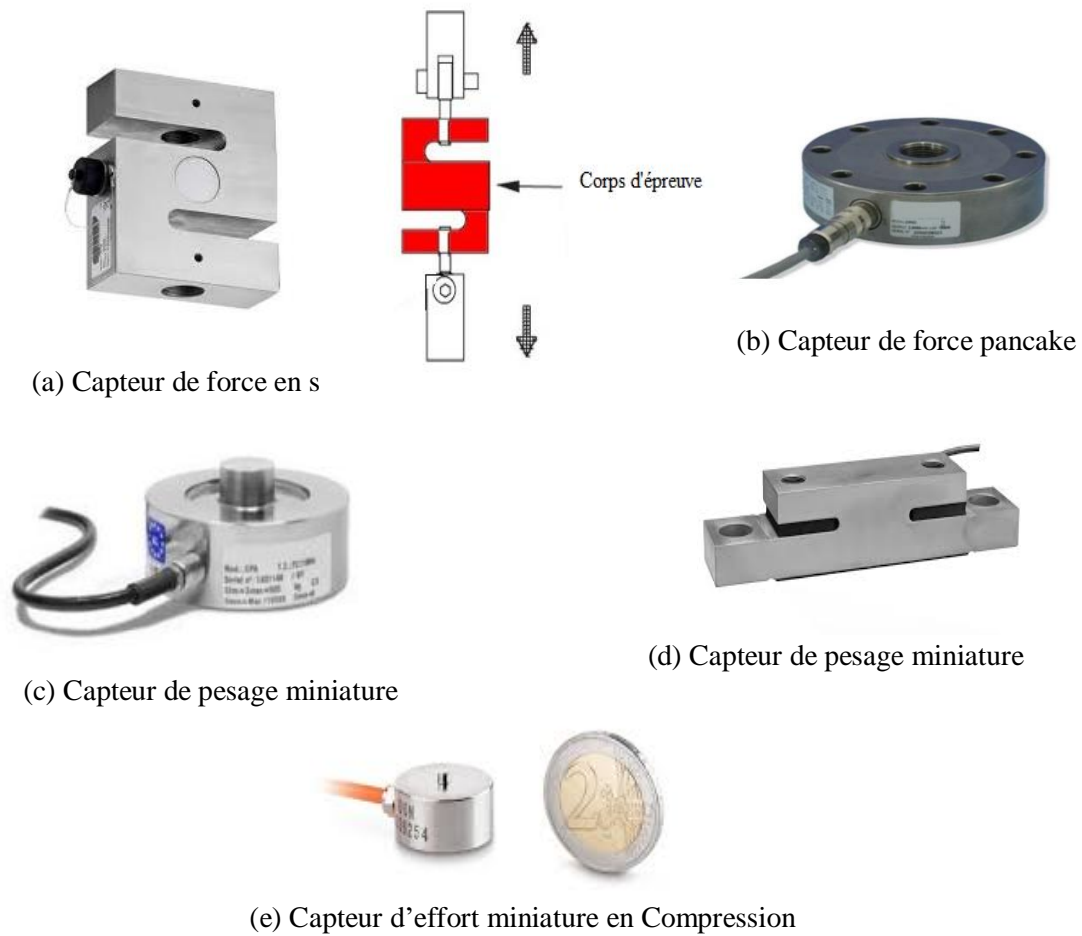


Figure VI.9 : Illustrations de certains types de corps d'épreuve

VI.3.4 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés pour la réalisation du corps d'épreuve sont les suivants :

- Aciers alliés.
- Aciers inoxydables utilisés en milieu corrosif.
- Alliages d'aluminium.

En fonction du choix du matériau et de la forme du capteur, la déformation mesurée sera importante et l'amplitude du signal de sortie élevée.

VI.3.5 Quelques Caractéristiques

- Effets parasites

Les variations de température. Elles entraînent deux conséquences majeures : la dilatation des matériaux et une variation de résistance des jauges.

- **Dérive thermique du zéro**

En l'absence de contrainte, la résistance augmente avec la température. Le signal même très proche de zéro, n'est pas nul.

- **Effet thermique sur la sensibilité**

L'élasticité du corps d'épreuve ainsi que le coefficient de jauge dépendent de la température. Cela implique une variation de la sensibilité.

- **Fluage**

Le fluage est la déformation du corps d'épreuve soumis à une force constante dans le temps.

- **Hystérésis**

Un capteur de force présente un phénomène d'hystérésis si l'information qu'il délivre est différente suivant que les mesures sont effectuées en traction ou en compression.

- **Écart de linéarité**

L'information délivrée en sortie n'est pas toujours proportionnelle à la valeur d'entrée. Un capteur présente une erreur de linéarité lorsque la courbe force / signal du capteur n'est pas parfaitement linéaire.

VI.3.6 Conditionnement de Jauges : pont de WEATSTONE

- **Montage quart de pont**

Dans le montage en quart de pont, on ne dispose que d'une jauge ; trois résistances viennent en complément.

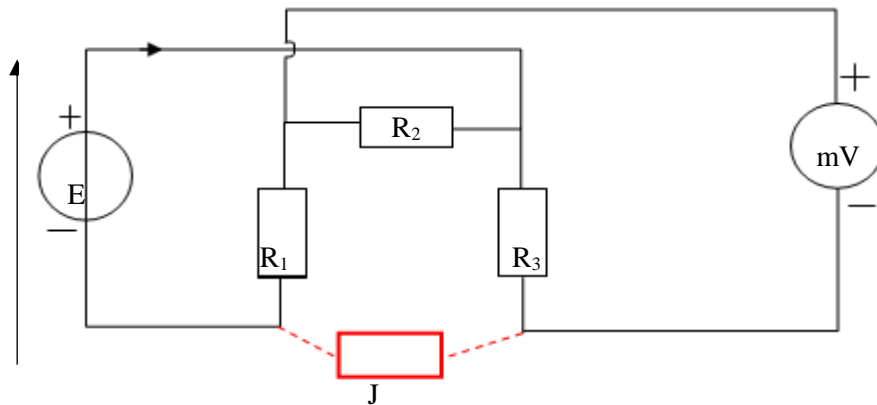


Figure VI.10 : Pont de Wheatstone, montage quart de pont

Ce montage est le plus simple et le moins cher, mais présente de nombreux inconvénients :

- la jauge étant éloignée des autres résistances, il faut prendre en compte la résistance des fils de liaison. Celle-ci dépend de la température ambiante, d'où une mesure imprécise.
- le signal sortant de la jauge est détérioré à cause de la résistance des fils.

▪ Montage demi pont

Pont de Wheatstone composé de 2 jauges et 2 résistances. Il est plus sensible (double) que le montage quart de pont, par contre il est plus cher.

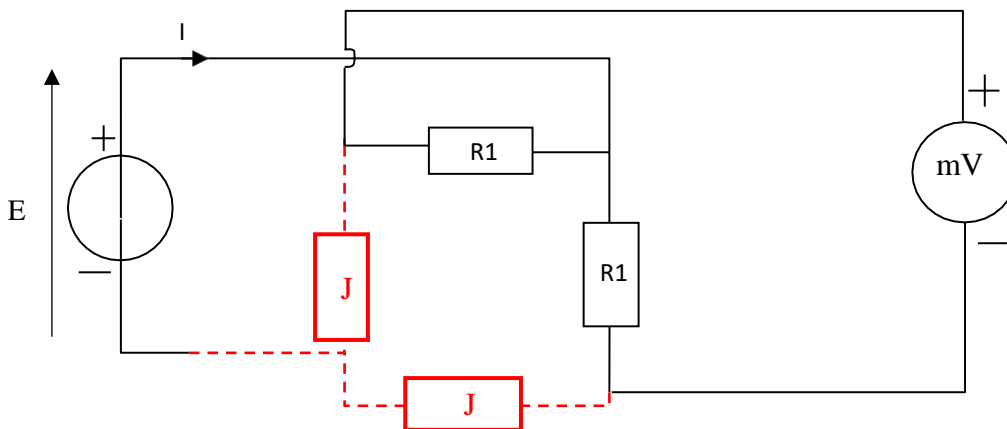


Figure VI.11 : Pont de Wheatstone, montage demi- pont

▪ Montage pont complet

Le pont complet de Wheatstone est composé de 4 jauges placées sur le corps d'épreuve. Il est plus précis que le montage en demi pont et encore plus que celui en quart de pont (4 fois plus). Mais c'est le plus cher des 3 montages.

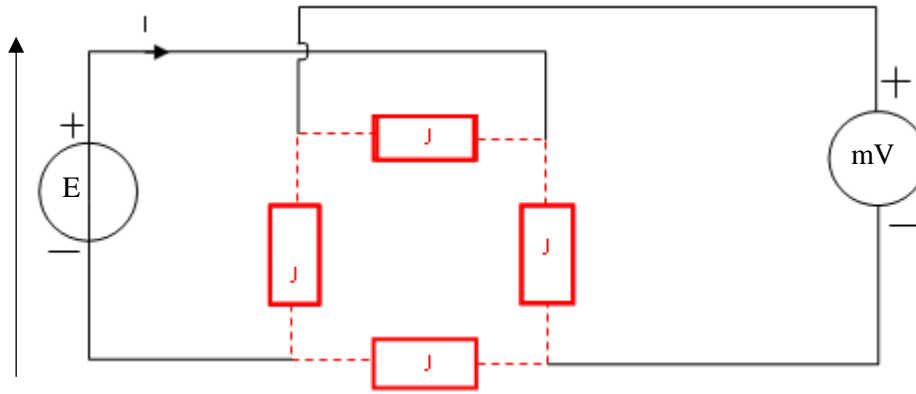


Figure VI.12 : Pont de Weatstone, montage pont complet

▪ **Application d'une jauge dans un peson industriel**

Le peson est constitué d'une jauge de contrainte. Le poids de l'objet pesé exerce une force sur la jauge de contrainte, faisant ainsi varier sa résistance électrique. Ainsi, selon l'étalonnage du peson, on peut connaître directement le poids, et donc la masse du corps solide qui repose dessus.

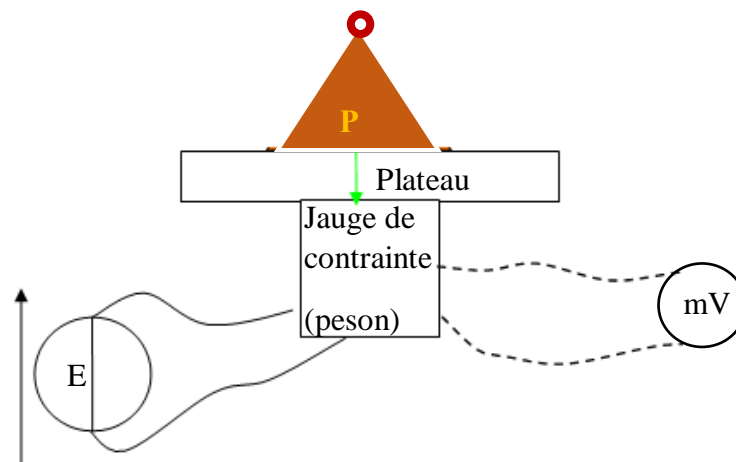


Figure VI.13 : Peson avec une jauge de contrainte

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Georges Asch et Collaborateurs, Les capteurs en instrumentation industrielle, Dunod, 1998.
- [2] John Wiley, Sensors and signal Conditioning, Canada 2001.
- [3] R. Palas-Areny, J. G. Webster, Sensors and signal conditioning, Wiley and Sons-2nd ed, 1991.
- [4] John G. Webster, Halit Eren, Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook, Taylor & Francis Group, 2014.
- [5] Ian. R. Sinclair, Sensors and Transducers, Newness, Oxford 2001.
- [6] Jean-Luc Le GOËR, Jean Avril, Capteurs à jauges extenso métriques, Technique de l'ingénieur, 1992.
- [7] M. Grout, Instrumentation industrielle : Spécification et installation des capteurs et des vannes de régulation, 4^{ème} édition, Dunod, 2015.