

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et la Technologie

Département d'Electronique

Cours : Capteurs & Actionneurs

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Electrique

Licence : Informatique Industrielle

Chargé de cours : Dr. Mustapha SARRA

E-mail : sarramust1@yahoo.fr

Mise à jour : 2014

Ce cours constitue une présentation non exhaustive des capteurs et actionneurs les plus couramment rencontrés dans l'industrie.

Cette version est améliorable et évolutive ; ainsi elle pourra être complétée par la consultation des ouvrages de base et des sites Internet listés à la fin de ce document.

Sommaire

Introduction	6
Chapitre 1 : Généralités sur les capteurs	8
Chapitre 2 : Capteurs de proximité, de position et de déplacement	36
Chapitre 3 : Capteurs de température	54
Chapitre 4: Capteurs de pression	71
Chapitre 5 : Les actionneurs	79
Bibliographie	90

INTRODUCTION

Tous les dispositifs industriels, qu'ils appartiennent au monde des grands systèmes de l'aéronautique et de l'espace, des transports ou de la production et du traitement de l'énergie, ne peuvent fonctionner correctement que s'ils sont capables de réguler certains paramètres, de limiter les variations de certains autres, et de s'affranchir des fluctuations des variables qui les entourent. La mesure des grandeurs physiques traditionnelles s'avère de ce fait fondamentale.

Les capteurs, véritables dispositifs de mesure de ces grandeurs physiques, font partie de notre vie de tous les jours, et parfois sans que les utilisateurs s'en rende réellement compte.

Les capteurs sont les premiers éléments de toute chaîne de traitement de l'information, dont la qualité dépend de la précision et de l'exactitude avec laquelle la grandeur que l'on souhaite traiter est effectivement mesurée.

Le monde des capteurs est celui de la physique, car leur principe de fonctionnement est toujours basé sur la mise en œuvre d'un principe mis au jour par un grand physicien, dont le nom est souvent associé au phénomène utilisé. Le traitement actuel de l'information moderne se fait au moyen de systèmes électronique et la notion de transducteur, dispositif qui transforme une grandeur non électrique en une grandeur électrique, est fondamentale.

Cependant, quelque soit le soin apporté à leur fabrication, les capteurs restent imparfaits et véhiculent un complément d'information indésirable, appelé bruit, qu'il convient d'éliminer. Les capteurs deviennent alors inséparables des dispositifs électroniques de conditionnement qui les accompagnent, grâce auxquels la grandeur désirée subsistera seule.

Les apports des capteurs et/ou des actionneurs intelligents sont relatifs, en premier lieu, à leurs fonctions primitives (mesurer pour un capteur, agir pour un actionneur) et relèvent alors d'amélioration de performances (exactitude, temps de réponse...). Les capteurs et actionneurs étant utilisés dans de nombreux systèmes de production de biens (processus continus ou manufacturiers) ou de services (tertiaire, systèmes embarqués), l'apport essentiel est lié à l'accroissement de la crédibilité de la mesure et aux conditions dans lesquelles elle a été effectuée pour les capteurs, à la garantie de la réalisation de l'ordre transmis et à la surveillance des conditions d'exécution pour un actionneur. Cependant, les utilisateurs ont formulé d'autres besoins d'informations qui concernent :

- **le contrôle/commande** ou la conduite, afin d'être renseigné en temps réel de façon qualitative ou quantitative sur l'état du système et/ou sur les caractéristiques du produit fabriqué ou du service fourni ;
- **la sûreté**, certaines mesures, étant à l'origine d'arcs réflexes qui permettent de protéger les opérateurs, l'équipement ou l'environnement ;
- **la maintenance** pour connaître l'état de dégradation du système et par conséquent son état de fonctionnement ;
- **la gestion de production** pour obtenir des bilans, des caractéristiques des différents flux de produit ou d'énergie ;
- **la gestion technique** pour connaître la disponibilité du processus.

Chapitre 1

Généralités sur les capteurs

1.1 Définitions et caractéristiques générales

La grandeur physique objet de la mesure : déplacement, température, pression, etc. est désignée comme le **mesurande** et représentée par m ; l'ensemble des opérations expérimentales qui concourent à la connaissance de la valeur numérique du mesurande constitue son **mesurage**. Lorsque le mesurage utilise des moyens électroniques de traitement du signal, il est nécessaire de produire à partir du mesurande une grandeur électrique qui en soit une représentation aussi exacte que possible : ceci signifie que la grandeur électrique et ses variations apportent toute l'information nécessaire à la connaissance du mesurande.

Le **capteur** est le dispositif qui soumis à l'action d'un mesurande non électrique présente une caractéristique de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) désignée par s et qui est fonction du mesurande :

$$s = F(m)$$

s est la **grandeur de sortie** ou **réponse du capteur**, m est la **grandeur d'entrée** ou **excitation**.

La mesure de s doit permettre de connaître la valeur de m (figure 1.1).

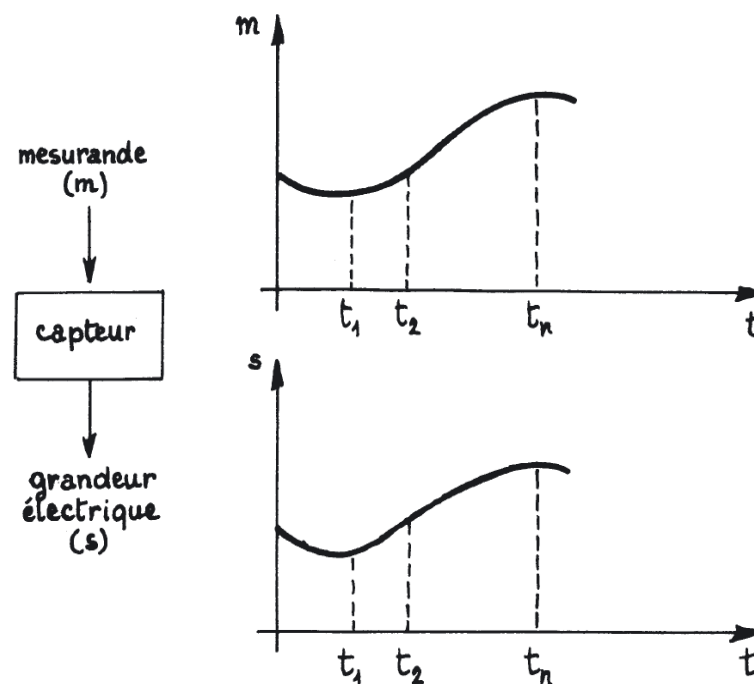


Figure 1.1 – Exemple d'évolution d'un mesurande m et de la réponse s correspondante du capteur.

La relation $s = F(m)$ résulte dans sa forme théorique des lois physiques qui régissent le fonctionnement du capteur et dans son expression numérique de sa

construction (géométrie, dimensions), des matériaux qui le constituent et éventuellement de son environnement et de son mode d'emploi (température, alimentation).

Pour tout capteur la relation $s = F(m)$ sous sa forme numériquement exploitable est explicitée par **étalonnage** : pour un ensemble de valeurs de m connues avec précision, on mesure les valeurs correspondantes de s ce qui permet de tracer la courbe d'étalonnage (Figure 1.2a) ; cette dernière, à toute valeur mesurée de s , permet d'associer la valeur de m qui la détermine (Figure 1.2b).

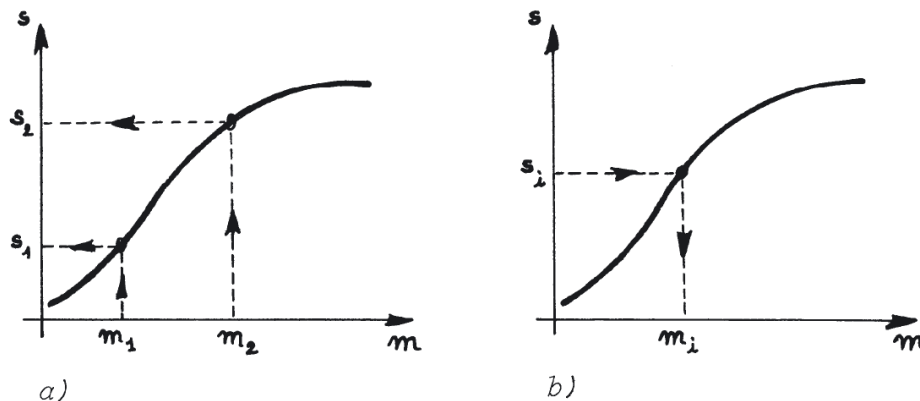


Figure 1.2 – Courbe d'étalonnage d'un capteur : a) son établissement, à partir de valeurs connues du mesurande m ; b) son exploitation, à partir des valeurs mesurées de la réponse s du capteur.

Pour des raisons de facilité d'exploitation on s'efforce de réaliser le capteur, ou du moins de l'utiliser, en sorte qu'il établisse une relation linéaire entre les variations Δs de la grandeur de sortie et celles Δm de la grandeur d'entrée :

$$\Delta s = S \cdot \Delta m$$

S est la **sensibilité du capteur**.

Un des problèmes importants dans la conception et l'utilisation d'un capteur est la constance de sa sensibilité S qui doit dépendre aussi peu que possible :

- de la valeur de m (**linéarité**) et de sa fréquence de variation (**bande passante**) ;
- du temps (**vieillesse**) ;
- de l'action d'autres grandeurs physiques de son environnement qui ne sont pas l'objet de la mesure et que l'on désigne comme **grandeurs d'influence**.

En tant qu'élément de circuit électrique, le capteur se présente, vu de sa sortie :

- soit comme un générateur, s étant une charge, une tension ou un courant et il s'agit alors d'un **capteur actif** ;
- soit comme une impédance, s étant alors une résistance, une inductance ou une capacité : le **capteur est alors dit passif**.

Cette distinction entre capteurs actifs et passifs basée sur leur schéma électrique équivalent traduit en réalité une différence fondamentale dans la nature même des phénomènes physiques mis en jeu.

Le signal électrique est la partie variable du courant ou de la tension qui porte l'information liée au mesurande : amplitude et fréquence du signal doivent être liées sans ambiguïté à l'amplitude et à la fréquence du mesurande. Un capteur actif qui est une source, délivre immédiatement un signal électrique ; il n'en est pas de même d'un **capteur passif** dont les variations d'impédance ne sont mesurables que par les modifications du courant ou de la tension qu'elles entraînent dans un circuit par ailleurs alimenté par une source extérieure.

Le circuit électrique nécessairement associé à un capteur passif constitue son **conditionneur** et c'est l'ensemble du capteur et du conditionneur qui est la source du signal électrique.

1.2 Capteurs actifs

Fonctionnant en générateur, un **capteur actif** est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre au **mesurande** : énergie thermique, mécanique ou de rayonnement.

Les plus importants parmi ces effets sont regroupés dans le *tableau 1.1*; dans la suite du paragraphe, on en donne une description sommaire destinée à éclairer leur mode d'application.

Tableau 1.1 – Capteurs actifs : principes physiques de base.

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

- *Effet thermoélectrique*

Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 est le siège d'une force électromotrice e (T_1, T_2).

Application : détermination à partir de la mesure de e d'une température inconnue T_1 lorsque T_2 (0 °C par exemple) est connue (Figure 1.3a).

- *Effet pyroélectrique*

Certains cristaux dits pyroélectriques, le sulfate de triglycine par exemple, ont une polarisation électrique spontanée qui dépend de leur température ; ils portent en surface des charges électriques proportionnelles à cette polarisation et de signes contraires sur les faces opposées.

Application : un flux de rayonnement lumineux absorbé par un cristal pyroélectrique élève sa température ce qui entraîne une modification de sa polarisation qui est mesurable par la variation de tension aux bornes d'un condensateur associé (Figure 1.3b).

- *Effet piézoélectrique*

L'application d'une force et plus généralement d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézoélectriques, le quartz par exemple, entraîne une déformation qui suscite l'apparition de charges électriques égales et de signes contraires sur les faces opposées.

Application : mesure de forces ou de grandeurs s'y ramenant (pression, accélération) à partir de la tension que provoquent aux bornes d'un condensateur associé à l'élément piézoélectrique les variations de sa charge (figure 1.3c).

- *Effet d'induction électromagnétique*

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ d'induction fixe, il est le siège d'une f.é.m. proportionnelle au flux coupé par unité de temps, donc à sa vitesse de déplacement.

De même, lorsqu'un circuit fermé est soumis à un flux d'induction variable du fait de son déplacement ou de celui de la source de l'induction (aimant par exemple), la f.é.m. dont il est le siège est égale (et de signe contraire) à la vitesse de variation du flux d'induction.

Application : la mesure de la f.é.m. d'induction permet de connaître la vitesse du déplacement qui est à son origine (*figure 1.3d*).

- ***Effets photoélectriques***

On en distingue plusieurs, qui diffèrent par leurs manifestations mais qui ont pour origine commune la libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement électromagnétique, dont la longueur d'onde est inférieure à une valeur seuil, caractéristique du matériau.

- ***Effet photoémissif***

Les électrons libérés sont émis hors de la cible éclairée et forment un courant collecté par application d'un champ électrique.

- ***Effet photovoltaïque***

Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction de semi-conducteurs P et N illuminée ; leur déplacement dans le champ électrique de la jonction modifie la tension à ses bornes.

- ***Effet photo-électromagnétique***

L'application d'un champ magnétique perpendiculaire au rayonnement provoque dans le matériau éclairé l'apparition d'une tension électrique dans la direction normale au champ et au rayonnement.

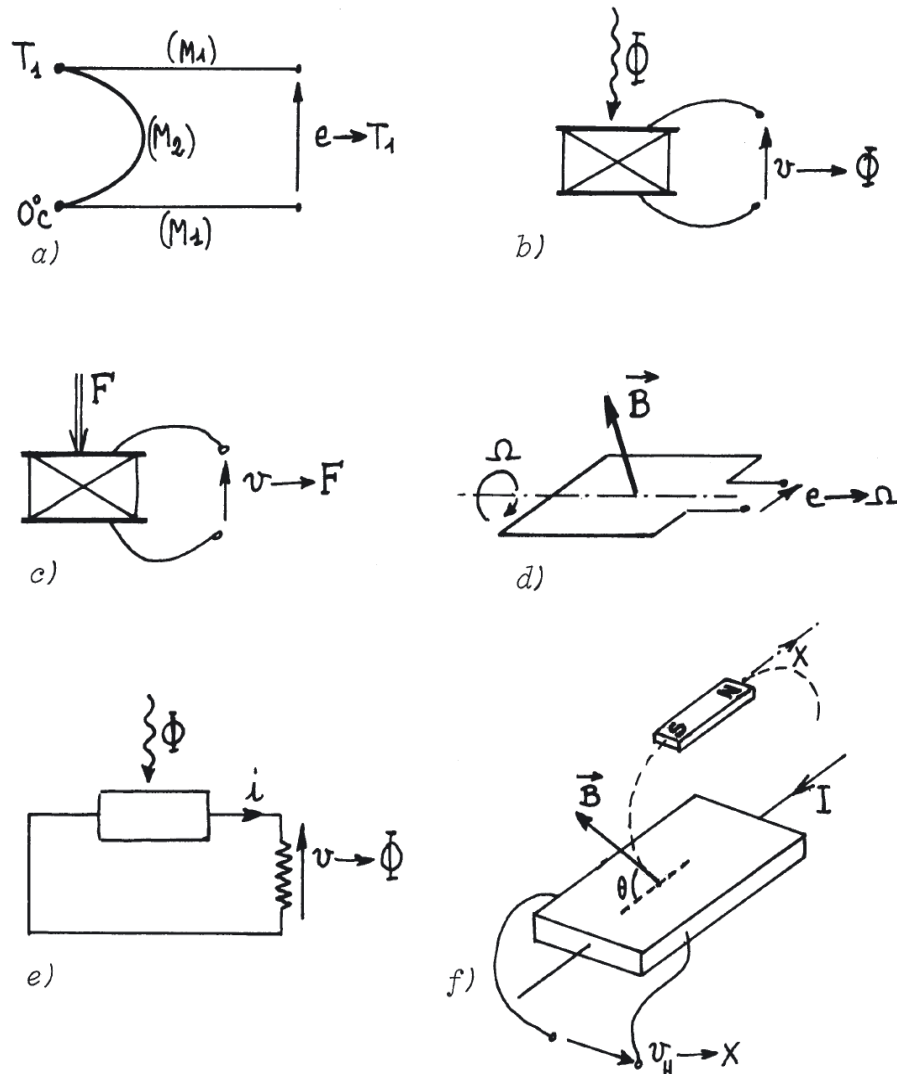


Figure 1.3 – Exemples d'application d'effets physiques à la réalisation de capteurs actifs : (a) thermoélectricité, (b) pyroélectricité, (c) piézoélectricité, (d) induction électromagnétique, (e) photoélectricité, (f) effet Hall.

Applications : Les effets photoélectriques qui permettent d'obtenir courant ou tension fonction de l'éclairement d'une cible sont à la base de méthodes de mesure des grandeurs photométriques d'une part, et ils assurent d'autre part, la transposition en signal électrique des informations dont la lumière peut être le véhicule (figure 1.3e).

- *Effet Hall*

Un matériau, généralement semi-conducteur et sous forme de plaquette, est parcouru par un courant I et soumis à une induction B faisant un angle θ avec le courant. Il apparaît, dans une direction perpendiculaire à l'induction et au courant une tension v_H qui a pour expression :

$$v_H = K_H \cdot I \cdot B \cdot \sin \theta$$

Où K_H dépend du matériau et des dimensions de la plaquette.

Application : un aimant lié à l'objet dont on veut connaître la position détermine les valeurs de B et θ au niveau de la plaquette : la tension v_H , qui par ce biais est fonction de la position de l'objet en assure donc une traduction électrique (figure 1.3f).

Remarque : les capteurs basés sur l'effet Hall peuvent être classés parmi les capteurs actifs puisque l'information est liée à une f.é.m. ; ce ne sont cependant pas des convertisseurs d'énergie car c'est la source du courant I et non le mesurande qui délivre l'énergie liée au signal.

1.3 Capteurs passifs

Il s'agit d'impédances dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande.

Dans l'expression littérale d'une impédance sont présents des termes liés :

- d'une part à sa géométrie et à ses dimensions ;
- d'autre part aux propriétés électriques des matériaux : résistivité ρ , perméabilité magnétique μ , constante diélectrique ϵ .

La variation d'impédance peut donc être due à l'action du mesurande :

- soit sur les caractéristiques géométriques ou dimensionnelles ;
- soit sur les propriétés électriques des matériaux ;
- soit plus rarement sur les deux simultanément.

Les paramètres géométriques ou dimensionnels de l'impédance peuvent varier si le capteur comporte soit un élément mobile, soit un élément déformable.

Dans le premier cas, à chaque position de l'élément mobile correspond une valeur de l'impédance et la mesure de celle-ci permet de connaître la position ; c'est le principe d'un grand nombre de capteurs de position ou de déplacement : potentiomètre, inductance à noyau mobile, condensateur à armature mobile.

Dans le second cas, la déformation résulte de forces – ou de grandeurs s’y ramenant (pression, accélération) – appliquées soit directement soit indirectement au capteur : armature d’un condensateur soumise à une pression différentielle, jauge d’extensométrie liée rigidement à une structure soumise à contrainte. La modification d’impédance qu’entraîne la déformation du capteur est liée aux efforts auxquels celui-ci ou la structure intermédiaire se trouve soumis et elle en assure une traduction électrique.

Les propriétés électriques des matériaux, selon la nature de ces derniers, peuvent être sensibles à des grandeurs physiques variées : température, éclairement, pression, humidité... Si l’une seule de ces grandeurs est susceptible d’évolution, toutes les autres étant maintenues constantes il s’établit une correspondance univoque entre la valeur de cette grandeur et celle de l’impédance du capteur. La courbe d’étalonnage traduit cette correspondance et permet, à partir de la mesure de l’impédance de déduire la valeur de la grandeur physique agissante qui est le mesurande.

Le *tableau 1.2* donne un aperçu des divers mesurandes susceptibles de modifier les propriétés électriques de matériaux employés pour la réalisation de capteurs passifs ; on y remarque, en particulier, la place importante des capteurs résistifs.

Tableau 1.2 – Capteurs passifs : principes physiques et matériaux.

Mesurande	Caractéristique électrique sensible	Types de matériaux utilisés
Température	Résistivité	Métaux : platine, nickel, cuivre. Semi-conducteurs.
Très basse température	Constante diélectrique	Verres.
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteurs.
Déformation	Résistivité Perméabilité magnétique	Alliages de nickel, silicium dopé. Alliages ferromagnétiques.
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnéto-résistants : bismuth, antimoniure d’indium.
Humidité	Résistivité Constante diélectrique	Chlorure de lithium. Alumine ; polymères.
Niveau	Constante diélectrique	Liquides isolants.

L'impédance d'un capteur passif et ses variations ne sont mesurables qu'en intégrant le capteur dans un circuit électrique, par ailleurs alimenté et qui est son conditionneur.

Les types de conditionneurs le plus généralement utilisés sont :

- le montage potentiométrique : association en série d'une source, du capteur et d'une impédance qui peut être ou non de même type ;
- le pont d'impédances dont l'équilibre permet la détermination de l'impédance du capteur ou dont le déséquilibre est une mesure de la variation de cette impédance ;
- le circuit oscillant qui contient l'impédance du capteur et qui est partie d'un oscillateur dont il fixe la fréquence ;
- l'amplificateur opérationnel dont l'impédance du capteur est l'un des éléments déterminants de son gain.

Le choix d'un conditionneur est une étape importante dans la réalisation d'un ensemble de mesure. C'est, en effet, l'association capteur-conditionneur qui détermine le signal électrique ; de la constitution du conditionneur dépendent un certain nombre de performances de l'ensemble de mesure : sensibilité, linéarité, insensibilité à certaines grandeurs d'influence. L'étude approfondie des conditionneurs est l'objet du chapitre 3.

1.4 Corps d'épreuve. Capteurs composites

Pour des raisons de coût ou de facilité d'exploitation, on peut être amené à utiliser un capteur, non pas sensible au mesurande mais à l'un de ses effets. Le **corps d'épreuve** est le dispositif qui, soumis au mesurande étudié en assure une première traduction en une autre grandeur physique non-électrique, le **mesurande secondaire**, qu'un capteur adéquat traduit alors en grandeur électrique (figure 1.4). L'ensemble formé par le corps d'épreuve et un capteur actif ou passif constitue un **capteur composite**.

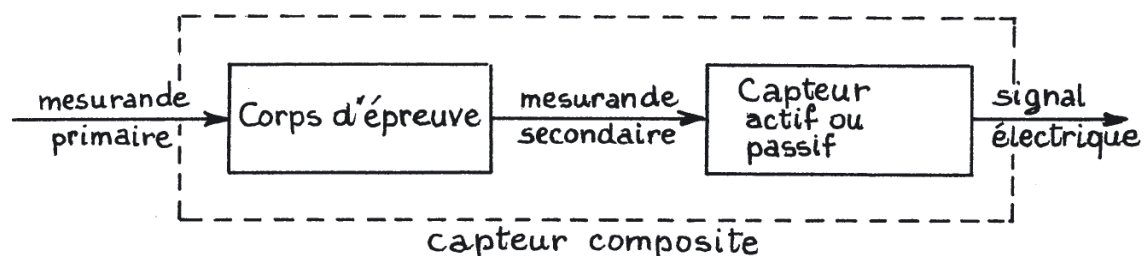


Figure 1.4 – Structure d'un capteur composite.

Les corps d'épreuve sont très utilisés pour la mesure de grandeurs mécaniques : celles-ci imposent au corps d'épreuve des déformations ou des déplacements auxquels un capteur approprié est sensible.

Ainsi, par exemple, une traction F exercée sur une barre (longueur L , section A , module d'Young Y) entraîne une déformation $\Delta L/L$ qui est mesurable par la variation $\Delta R/R$ de la résistance d'une jauge collée sur la barre ; connaissant :

- d'une part, l'équation du corps d'épreuve qui lie la traction, mesurande primaire,

à la déformation, mesurande secondaire :

$$\Delta L/L = (1/Y) \cdot (F/A)$$

- et d'autre part l'équation du capteur liant sa grandeur d'entrée, ici la déformation,

à sa réponse électrique $\Delta R/R$ soit :

$$\Delta R/R = K \cdot \Delta L/L$$

K étant le facteur de jauge,

On en déduit la relation entre traction et variation de résistance :

$$\Delta R/R = K/Y \cdot F/A$$

De même, une pression est mesurable au moyen d'une membrane, corps d'épreuve, dont la déformation est traduite électriquement par une jauge de contrainte. La membrane d'un microphone électrodynamique est un corps d'épreuve car c'est de son mouvement, conséquence de la pression acoustique à laquelle elle est soumise, que résulte le signal électrique.

Dans un accéléromètre, la masse sismique est le corps d'épreuve qui convertit l'accélération, mesurande primaire, en une force d'inertie, mesurande secondaire auquel est sensible un capteur piézoélectrique.

La relation qu'établit le corps d'épreuve entre les mesurandes primaire et secondaire est très souvent linéaire : c'est le cas en particulier pour les déplacements et déformations résultant de contraintes mécaniques, à condition que ne soit pas dépassée la limite d'élasticité du corps d'épreuve. Les performances de l'association corps d'épreuve-capteur doivent être déterminées par un étalonnage global de l'ensemble qu'ils constituent afin qu'il soit tenu compte des modifications éventuelles que leur montage et leur liaison apportent à leurs caractéristiques individuelles « à vide ».

1.5 Grandeurs d'influence

Le capteur, de par ses conditions d'emploi, peut se trouver soumis non seulement au mesurande mais à d'autres grandeurs physiques dont les variations sont susceptibles d'entraîner un changement de la grandeur électrique de sortie qu'il n'est pas possible de distinguer de l'action du mesurande. Ces grandeurs physiques « parasites » auxquelles la réponse du capteur peut être sensible sont les grandeurs d'influence.

Ainsi, par exemple :

- la température est grandeur d'influence pour un capteur optique comme la résistance photoconductrice ;
- il en est de même pour le champ magnétique vis-à-vis d'un capteur thermométrique comme la résistance de germanium.

Les principales grandeurs d'influence sont :

- la température, qui modifie les caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur ;
- la pression, l'accélération et les vibrations susceptibles de créer dans certains éléments constitutifs du capteur des déformations et des contraintes qui altèrent la réponse ;
- l'humidité à laquelle certaines propriétés électriques comme la constante diélectrique ou la résistivité peuvent être sensibles et qui risque de dégrader l'isolation électrique entre composants du capteur ou entre le capteur et son environnement;
- les champs magnétiques variables ou statiques ; les premiers créent des f.é.m. d'induction qui se superposent au signal utile, les seconds peuvent modifier une propriété électrique, comme la résistivité lorsque le capteur utilise un matériau magnétorésistant ;
- la tension d'alimentation – amplitude et fréquence – lorsque, comme pour le transformateur différentiel, la grandeur électrique de sortie en dépend de par le principe même du capteur.

Si l'on désigne par $g_1, g_2...$ les grandeurs d'influence, la relation entre grandeur électrique de sortie s et mesurande m , qui dans le cas idéal serait :

$$s = F(m)$$

devient :

$$s = F(m, g_1, g_2...)$$

Afin de pouvoir déduire de la mesure de s la valeur de m , il est donc nécessaire :

- soit de réduire l'importance des grandeurs d'influence au niveau du capteur en le protégeant par un isolement adéquat : supports antivibratoires, blindages magnétiques;
- soit de stabiliser les grandeurs d'influence à des valeurs parfaitement connues et d'étalonner le capteur dans ces conditions de fonctionnement : enceinte thermostatée ou à hygroscopie contrôlée, sources d'alimentation régulées ;
- soit enfin d'utiliser des montages qui permettent de compenser l'influence des grandeurs parasites : pont de Wheatstone avec un capteur identique placé dans une branche adjacente au capteur de mesure (§ 3.3.1.3).

1.6 Capteur intégré

Un capteur intégré est un composant réalisé par les techniques de la Microélectronique et qui regroupe sur un substrat de silicium commun le capteur proprement dit, le corps d'épreuve éventuel, des circuits électroniques de conditionnement du signal (*figure*). L'intégration apporte de multiples avantages : miniaturisation, diminution des coûts par la fabrication en grande série, accroissement de la fiabilité par suppression de nombreuses connexions soudées, interchangeabilité améliorée, meilleure protection vis-à-vis des parasites, le signal étant conditionné à sa source.

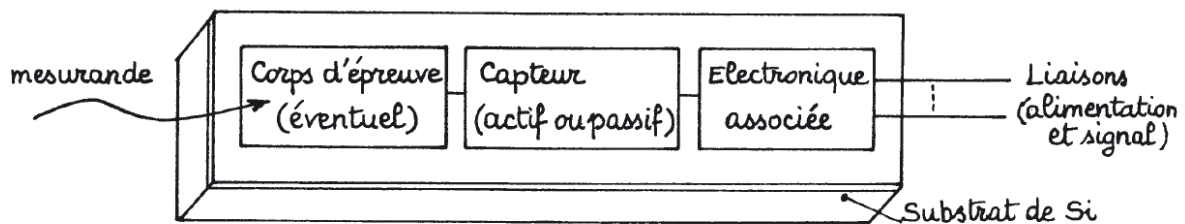


Figure 1.5 : Structure générale d'un capteur intégré

Les circuits électroniques associés au capteur sont réalisés selon les techniques classiques de fabrication des circuits intégrés : ils comportent selon les cas : des circuits de compensation thermique, de linéarisation, d'amplification, de transmission par conversion tension-fréquence, ou tension-courant.

L'intégration apporte de multiples avantages : miniaturisation, diminution des coûts par la fabrication en grande série, accroissement de la fiabilité par suppression de nombreuses connexions soudées, interchangeabilité améliorée, meilleure protection vis-à-vis des parasites, le signal étant conditionné à sa source.

L'utilisation du silicium impose cependant une limitation de la plage d'emploi de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ environ.

Le capteur proprement dit met généralement à profit la sensibilité du silicium à diverses grandeurs physiques ; cette sensibilité, par ailleurs déjà souvent exploitée

pour la réalisation de capteurs isolés, peut être mise en œuvre sous forme de capteurs résistifs, capacitifs ou au moyen de diodes et de transistors.

Exemples de capteurs à base de silicium :

- résistances thermométriques ; jauges extensométriques; photocapacités ; plaquettes à effet Hall; photodiodes et phototransistors; diodes de détection nucléaire; transistors thermométriques.

Le capteur peut aussi être réalisé en déposant sur le substrat de silicium un film mince d'un matériau plus approprié que le silicium au mesurande considéré mais compatible avec le processus technologique de fabrication des circuits intégrés : ZnO piézoélectrique, $InSb$ magnétorésistant, polymères hygrosopiques, couple thermoélectrique Bi/Sb.

Lorsque le capteur doit être un capteur composite, le corps d'épreuve est réalisé à partir du substrat de silicium support de l'ensemble du capteur intégré.

L'emploi de corps d'épreuve en silicium est justifié par les propriétés mécaniques excellentes du cristal : domaine élastique étendu, module d'Young comparable à celui de l'acier et limite de fatigue très élevée. La fabrication des corps d'épreuve est rendue possible grâce aux techniques de micro-usinage chimique.

Le silicium est attaquant par divers produits chimiques, en particulier :

- le mélange éthylène diamine, pyrocatechol et eau (EDP) ;
- la solution potasse (KOH) - eau.

La zone à attaquer est délimitée par une ouverture faite dans une couche superficielle de SiO_2 qui n'est pas attaquée. La vitesse d'attaque dépend des directions cristallographiques: pour EDP et KOH, elle est respectivement 35 et 400 fois supérieure dans la direction 100 que dans la direction 111. La vitesse d'attaque dépend aussi du dopage : elle est considérablement réduite par un fort dopage de bore ce qui permet d'arrêter l'attaque au niveau voulu.

1.6 Capteur intelligents

On désigne par capteur intelligent l'ensemble de mesure d'une grandeur physique constitué de deux parties (*figure a*) :

- une chaîne de mesure pilotée par microprocesseur ;
- une interface de communication bidirectionnelle.

La chaîne de mesure comporte :

- le capteur principal spécifique du mesurande étudié, et identifiable par un code stocké en PROM (*Programmable Read Only Memory* : mémoire programmable à lecture seule) ;

- les capteurs secondaires propres aux grandeurs d'influence susceptibles d'affecter la réponse du capteur principal ;
- les dispositifs classiques permettant l'obtention sous forme numérique de la grandeur de sortie de chaque capteur : conditionneur, multiplexeur, amplificateur, échantillonneur-bloqueur, convertisseur analogique-numérique ;
- un microprocesseur affecté aux tâches suivantes : gestion de l'acquisition, correction de l'effet des grandeurs d'influence au moyen des paramètres stockés en PROM et des données fournies par les capteurs secondaires, linéarisation, diagnostic des capteurs.

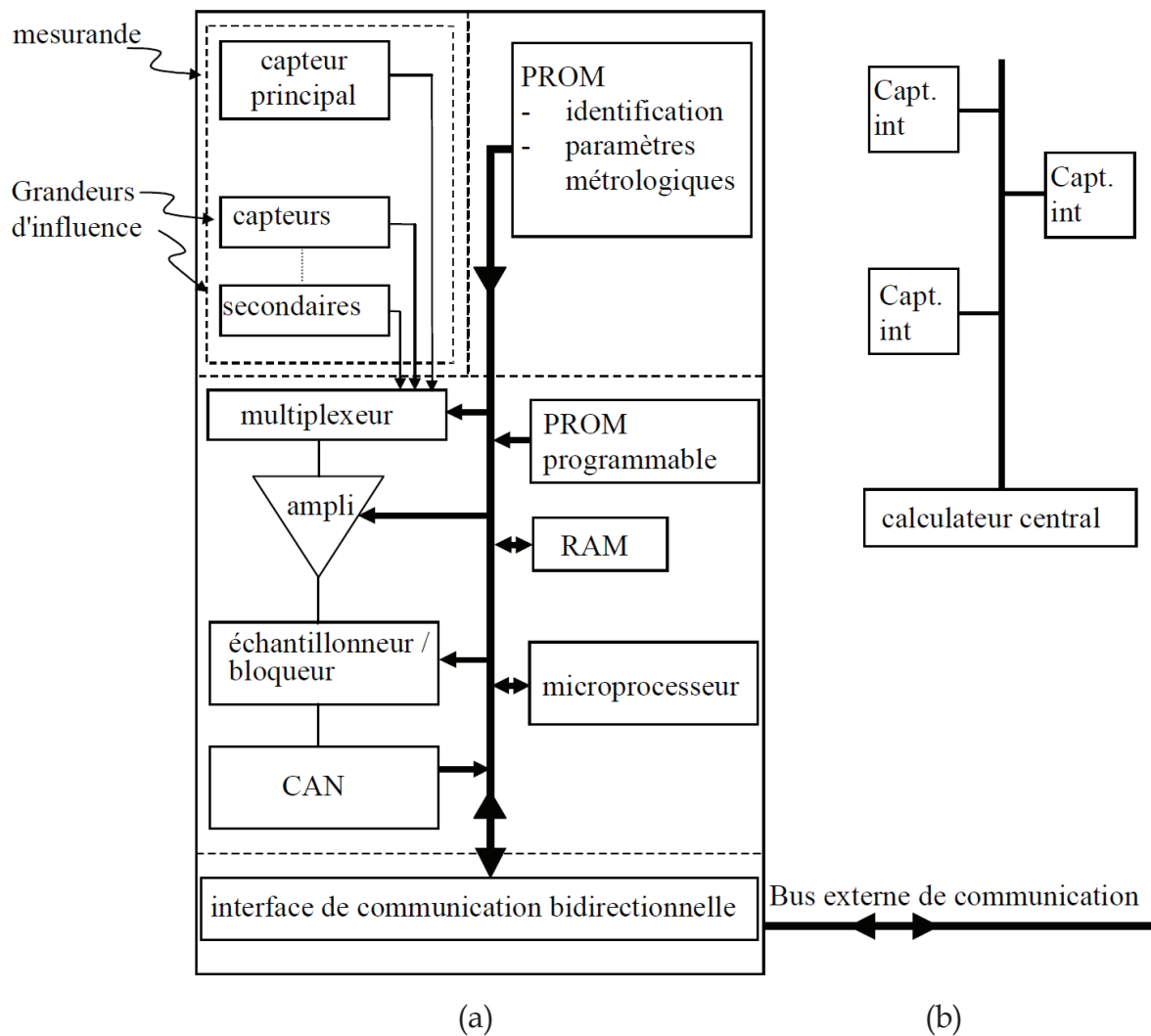


Figure 1.6 Capteur intelligent : a) structure générale ; b) liaison par bus d'un ensemble de capteurs intelligents à un calculateur central.

L'interface de communication bidirectionnelle assure la liaison du capteur à un calculateur central via un bus partagé entre plusieurs capteurs intelligents (figure b).

Les messages porteurs du code du capteur concerné transitent par l'interface :

- soit dans le sens calculateur vers capteur : configuration, auto-étalonnage...
- soit dans le sens capteur vers calculateur : résultats de mesure, état de la chaîne (étendue de mesure, dépassements de gamme du mesurande ou d'une grandeur d'influence...).

Le capteur intelligent offre des avantages spécifiques : configurabilité à distance ; crédibilité accrue des mesures et aide à la maintenance grâce aux informations d'état fournies ; répartition des tâches, déchargeant le calculateur central.

1.7 La chaîne de mesure

La chaîne de mesure est constituée de l'ensemble des dispositifs, y compris le capteur, rendant possible, dans les meilleures conditions, la détermination précise de la valeur du mesurande.

À l'entrée de la chaîne, le capteur soumis à l'action du mesurande permet, directement s'il est actif ou par le moyen de son conditionneur s'il est passif, d'injecter dans la chaîne le signal électrique, support de l'information liée au mesurande.

À la sortie de la chaîne, le signal électrique qu'elle a traité est converti sous une forme qui rend possible la lecture directe de la valeur cherchée du mesurande :

- déviation d'un appareil à cadre mobile ;
- enregistrement analogique graphique ou oscillographique ;
- affichage ou impression d'un nombre.

C'est l'étalonnage de la chaîne de mesure dans son ensemble qui permet d'attribuer à chaque indication en sortie la valeur correspondante du mesurande agissant à l'entrée.

Sous sa forme la plus simple la chaîne de mesure peut se réduire au capteur, et à son conditionneur éventuel, associé à un appareil de lecture :

- thermocouple et voltmètre ;
- jauge de contrainte placée dans un pont de Wheatstone, avec pour instrument de lecture un galvanomètre ou un voltmètre.

Cependant les conditions pratiques de mesure telles qu'elles sont imposées par l'environnement d'une part et par les performances exigées pour une exploitation satisfaisante du signal d'autre part amènent à introduire dans la chaîne des blocs fonctionnels destinés à optimiser l'acquisition et le traitement du signal :

- circuit de linéarisation du signal délivré par le capteur ;
- amplificateur d'instrumentation ou d'isolement destiné à réduire les tensions parasites de mode commun;

- multiplexeur, amplificateur d'instrumentation programmable, échantillonneur bloqueur, convertisseur analogique - numérique lorsque l'information doit être traitée par ordinateur (figure 1.5a) ;
- convertisseur tension-courant ou tension-fréquence lorsque le signal doit être transmis à distance par câble (figure 1.5b) ;
- modulateur de fréquence dans le cas de télémesure par voie hertzienne.

Il y a lieu d'insister ici sur les fonctions multiples et importantes qui sont dévolues au ordinateur associé à la chaîne de mesure et qui peuvent être regroupées sous deux rubriques :

- gestion de l'acquisition d'une part ;
- traitements du signal requis par la précision et par la nature de l'information cherchée d'autre part.

Le ordinateur est le chef d'orchestre de la chaîne d'acquisition ; il délivre les séquences de signaux de commande activant de façon ordonnée les divers dispositifs concourant à l'obtention de la valeur du mesurande particulier dont la connaissance à un instant donné est nécessaire au déroulement de l'application :

- sélection d'une voie d'entrée par envoi d'adresse au multiplexeur ;
- fixation du gain de l'amplificateur programmable ;
- échantillonnage puis blocage du signal ;
- déclenchement de la conversion analogique-numérique ;
- lecture de la donnée numérique à réception du signal de fin de conversion délivré par le convertisseur analogique-numérique.

En aval de la chaîne d'acquisition, le ordinateur gère les périphériques classiques d'entrée-sortie :

- clavier qui permet l'introduction, pour prise en compte par la chaîne, d'ordres et de modifications de paramètres de mesure ;
- mémoire de masse pour l'archivage des mesures ;
- affichage du résultat de la mesure en cours.

La possibilité offerte par les ordinateurs d'effectuer des opérations mathématiques sur le signal numérisé est exploitée à deux fins : corriger le signal reçu d'une part, analyser le signal corrigé d'autre part.

Les traitements numériques correctifs sont destinés à compenser certaines imperfections de la chaîne de mesure :

- correction des dérives de zéro et de sensibilité, causées par les grandeurs d'influence, température en particulier ;
- correction de la non-linéarité des capteurs afin d'obtenir une donnée proportionnelle au mesurande.

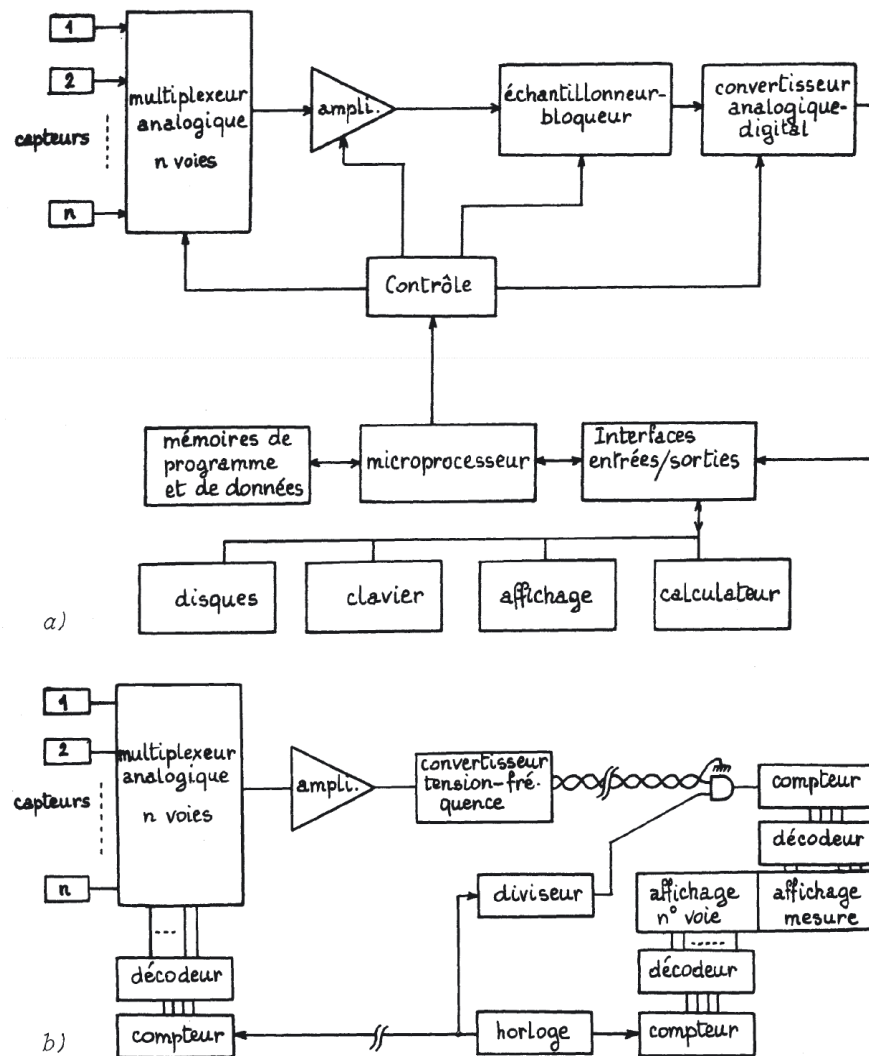


Figure 1.7 Exemples de constitution de chaînes de mesures : a) chaîne contrôlée par microprocesseur, b) chaîne avec conversion tension-fréquence des signaux permettant leur transmission bifilaire.

Il y a lieu de noter que ces corrections peuvent aussi être effectuées par voie analogique mais au prix, souvent, d'un matériel spécifique supplémentaire. Les traitements numériques analytiques permettent d'extraire, à partir des données, les informations particulières dont la connaissance est nécessaire pour l'exploitation qui doit être faite :

- traitement statistique ;
- filtrage numérique ;
- analyse spectrale...

1.8 Caractéristiques métrologiques d'un capteur

a. Domaines de fonctionnement

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

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

On peut définir trois domaines de fonctionnement

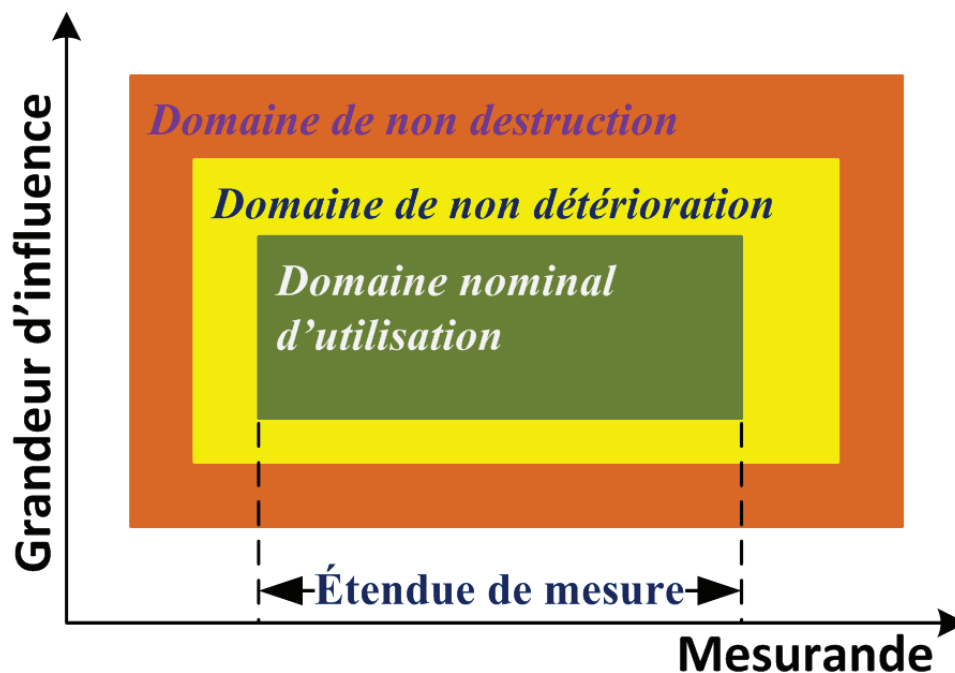


Figure 1.8 Domaines de fonctionnement

Le domaine nominal d'utilisation représente la zone de travail normale du capteur. Il est défini pour la grandeur physique à mesurer (ou mesurande) par son étendue de mesure et pour les grandeurs d'influence par la plage de travail.

L'étendue de mesure d'un capteur correspond à l'intervalle entre la valeur minimale et la valeur maximale du mesurande. Ces deux valeurs sont respectivement appelées *portée minimale* et *portée maximale*. Elles sont exprimées dans l'unité de mesure du mesurande. De l'étendue de mesure, on peut obtenir l'étendue d'échelle qui représente l'écart entre la portée minimale et maximale de l'étendue de mesure.

Le domaine de non-détérioration : Valeurs limites des grandeurs influençant le capteur (mesurande, température environnante, etc.) sans que les caractéristiques du capteur ne soient modifiées après annulation de surcharges éventuelles.

Le domaine de non-destruction définit les limites garantissant la non-destruction du capteur mais dans lequel il peut y avoir des modifications permanentes des caractéristiques du capteur.

b. La sensibilité

La sensibilité d'un capteur représente le rapport de la variation du signal de sortie à la variation du signal d'entrée, pour une mesure donnée. C'est donc la pente de la

courbe de réponse de ce capteur : $S = \frac{\Delta \text{sortie}}{\Delta \text{entrée}}$

Si le capteur est linéaire, une seule valeur de sensibilité est nécessaire, car la pente de la courbe de la caractéristique entrée/sortie du capteur est constante (Figure 1.9). La caractéristique est alors une droite.

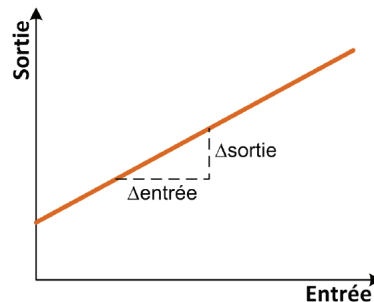


Figure 1.9 Caractéristique linéaire d'un capteur

Si le capteur est non linéaire, on spécifie alors la sensibilité pour différentes mesures.

La sensibilité est une indication de la pente locale de la caractéristique pour une mesure donnée (exemple : pente locale à la mesure e_1 sur la Figure 1.10).

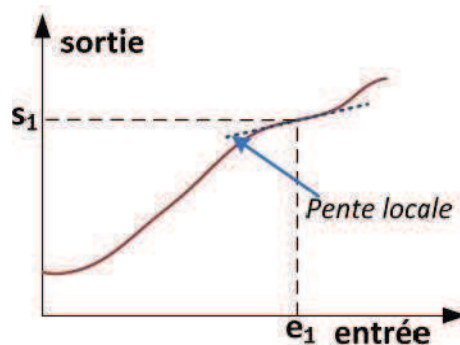


Figure 1.10 Caractéristique non linéaire d'un capteur

Certains capteurs ont une sortie dont l'amplitude dépend non seulement du mesurande, mais aussi de leur tension d'alimentation. Cela implique que la sensibilité du capteur doit prendre en compte la tension d'alimentation.

Pour simplifier le calcul de la sensibilité, les fabricants ont définis la spécification de sensibilité réduite. Cette spécification est utilisée entre autres avec les capteurs de force (cellules de charge).

La sensibilité réduite s'exprime comme étant le rapport de la plage de variation totale de la sortie à la tension d'alimentation (appelée aussi tension d'excitation).

Ainsi, un capteur, ayant une sensibilité réduite de 2 mV/V et alimenté avec une tension d'excitation d'1 Volt, voit sa sortie évoluer sur une plage de 2 mV pendant que l'entrée évolue d'un bout à l'autre de l'étendue de mesure. Le même capteur alimenté avec une tension d'excitation de 12 Volts, verra sa sortie évoluer de 24 mV (soit $12 \text{ V} \times 2 \text{ mV/V}$) dans les mêmes conditions.

c. La finesse

C'est la qualité d'un capteur à ne pas venir modifier par sa présence la grandeur physique à mesurer. Cela permet d'évaluer l'influence du capteur sur la mesure. On la définit non seulement vis à vis du capteur mais aussi vis à vis de l'environnement d'utilisation du capteur.

Par exemple, dans le cas d'une mesure thermique, on cherchera un capteur à faible capacité calorifique vis à vis des grandeurs l'entourant.

Finesse et sensibilité sont en général antagonistes. Il peut y avoir un compromis à faire.

Pour un capteur d'induction B, un capteur à forte perméabilité sera très sensible, par contre sa présence aura tendance à perturber les lignes de champ et la mesure de l'induction ne sera pas celle sans capteur, d'où une mauvaise finesse. Mais cette erreur peut être évaluée en vue d'une correction post-mesure et ainsi faire abstraction de la présence du capteur.

d. La linéarité

La linéarité est une caractéristique qui définit la constance de la sensibilité sur toute la plage de mesure.

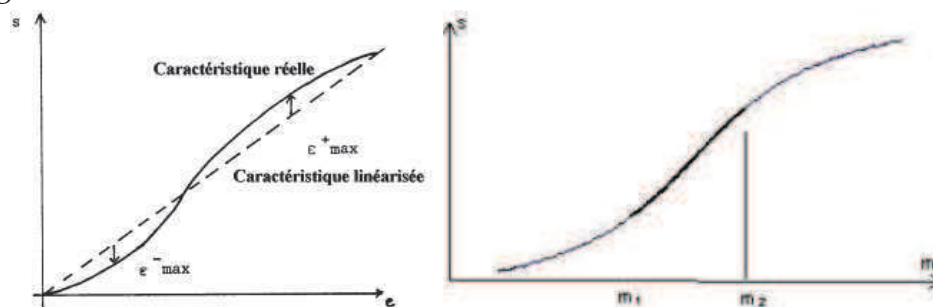


Figure 1.11 Linéarisation de la caractéristique et domaine de linéarité

L'équation décrivant la relation entre le signal d'entrée x et le signal de sortie y doit être de premier ordre ($y = a.x+b$) pour que le capteur soit linéaire. Si le capteur n'est pas linéaire, la relation entrée/sortie peut être approximée par une équation du premier ordre, mais il faut accepter l'imprécision causée par cette approximation. L'écart de linéarité est exprimé par un pourcentage de l'étendue de mesure.

On parle aussi de domaine linéaire, la caractéristique est une portion de droite.

Dans ce domaine, la variation de la grandeur de sortie est proportionnelle à la variation du mesurande.

Prenons par exemple le cas d'un capteur de déplacement dont on mesure pour différentes positions la tension de sortie (tableau ci-dessous).

Position (mm)	Tension mesurée (V)
0	0.002
10	0.570
20	1.115
30	1.677
40	2.210
50	2.701
60	3.123
70	3.889
80	4.545
90	5.050

Selon le fabricant le capteur à une étendue de mesure de 0 à 90 mm et génère une sortie de 0 à 5 Volts.

Pour calculer la linéarité, il faut évaluer dans un premier temps, la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite approximant le mieux les mesures faites. Pour la méthode de régression linéaire, les équations à appliquer sont :

- Pour trouver la pente :

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

- Puis l'ordonnée à l'origine :

$$b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \frac{M}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Dans ces deux équations, les x_i représentent les valeurs en entrée (mesurande) et les y_i sont les valeurs en sortie du capteur. Le nombre de points considéré dans ce calcul est n .

En appliquant ces équations sur les valeurs du Tableau précédent, on trouve que la pente de la caractéristique du capteur est 0.0577 V/mm et son ordonnée à l'origine est de -0.019 Volts. À partir de ces valeurs la caractéristique est :

$$y = 0.0577x - 0.019$$

A partir de cette équation, on peut calculer les valeurs théoriques de tension de sortie en assurant que le capteur ait cette relation linéaire. La dernière colonne du tableau ci-dessous est la tension théorique calculée avec l'équation précédente.

Position (mm)	Tension mesurée (V)	Tension théorique (V)
0	0.002	-0.019
10	0.570	0.538
20	1.115	1.095
30	1.677	1.653
40	2.210	2.210
50	2.701	2.767
60	3.123	3.324
70	3.889	3.881
80	4.545	4.439
90	5.050	4.996

Les deux dernières colonnes montrent qu'il existe un écart entre les valeurs mesurées et les valeurs théoriques. Il est possible, pour chaque mesure, de calculer l'erreur de la façon suivante :

$$e_i = |y_{i,mesuré} - y_{i,théorique}|$$

Puis, on peut calculer l'erreur de linéarité en pourcentage de l'étendue de mesure en divisant l'erreur par l'étendue de mesure et en multipliant le résultat par 100 % :

$$E_i = \frac{e_i}{E.M.} \times 100\%$$

Ce qui donne les deux dernières colonnes du Tableau ci-dessous.

Position (mm)	Tension mesurée (V)	Tension théorique (V)	Erreur (V)	Erreur (% E.M.)
0	0.002	-0.019	0.021	0.42
10	0.570	0.538	0.034	0.68
20	1.115	1.095	0.020	0.39
30	1.677	1.653	0.024	0.49
40	2.210	2.210	0.000	0.00
50	2.701	2.767	0.066	1.32
60	3.123	3.324	0.201	4.02
70	3.889	3.881	0.008	0.15
80	4.545	4.439	0.106	2.13
90	5.050	4.996	0.054	1.08

En consultant la dernière colonne de ce dernier tableau, on constate que l'erreur maximale est de $\pm 4.02\%$ E.M. Donc, l'erreur de linéarité de ce capteur sera spécifiée comme étant $\pm 4.02\%$ E.M.

e. La rapidité

La rapidité indique l'aptitude d'un capteur à suivre dans le temps les variations de la grandeur physique à mesurer. En effet, il faut toujours un certain temps pour qu'un changement du signal à l'entrée soit perçu à la sortie. On l'exprime de l'une des trois façons suivantes :

- ✓ Le temps de réponse (ou constante de temps);
- ✓ La bande passante du capteur;
- ✓ La fréquence de coupure (ou fréquence propre).

Le *temps de réponse* représente le temps qu'il faut au capteur pour que sa sortie soit à moins d'un certain écart en pourcentage de la valeur finale, lorsque le mesurande (l'entrée) est soumis à une variation brusque de type échelon. Comme le temps de réponse dépend du pourcentage d'écart, il est obligatoire de spécifier le pourcentage d'écart (généralement 5 %) considéré pour évaluer le temps de réponse de l'élément de mesure. Plus le capteur est rapide, plus le temps de réponse est court.

Si le capteur est un système de premier ordre (Figure 1.12 a), la réponse à un échelon possède un temps de réponse qui dépend de la constante de temps τ du système. La constante de temps correspond au temps de réponse à 37 %. Le temps de réponse à 5% d'un capteur de premier ordre est égal à environ 3τ .

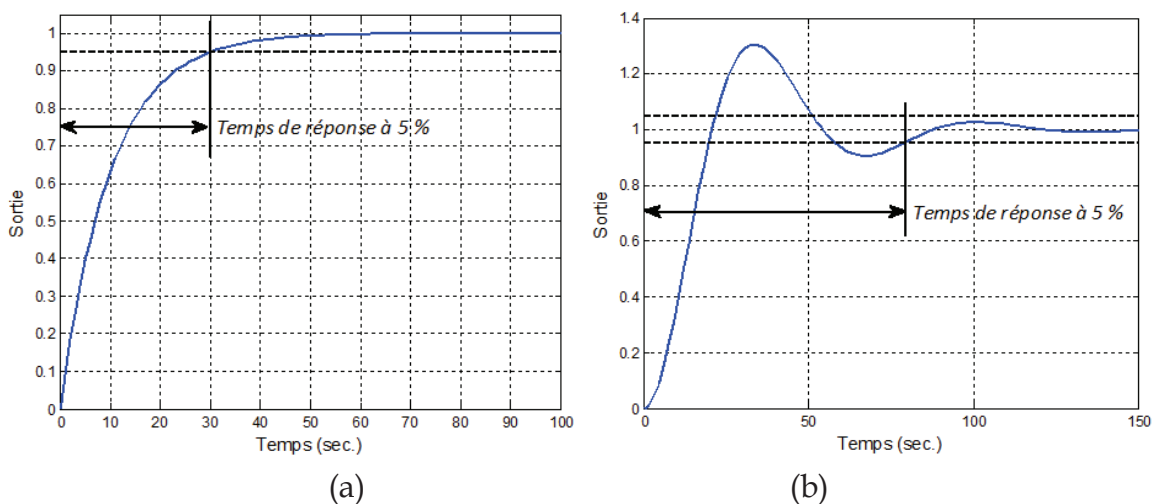


Figure 1.12 Réponses des systèmes du premier et du deuxième ordre

La **bande passante** d'un capteur du premier ordre sera la plage de fréquence entre **0 Hertz** et la **fréquence de coupure** f_c qui est égale à $1/2\pi\tau$. Pour qu'un capteur du premier ordre soit rapide, il faut donc que la constante de temps soit courte, que sa fréquence de coupure soit élevée et que la bande passante soit étendue. Ce constat est évident, puisque tous ces paramètres sont liés entre eux.

Si le capteur est un système du deuxième ordre (Figure 1.12 b), la réponse à un échelon à un temps de réponse qui dépend de sa fréquence propre ω_0 et du coefficient d'amortissement ξ .

L'équation pour trouver le temps de réponse à 5% est (avec $0 < \xi < 1$) :

$$T_{R5\%} = \frac{3}{\xi\omega_0}$$

Pour qu'un capteur du second ordre soit rapide, il faut que la fréquence propre soit élevée pour que le temps de réponse soit court. Par contre, il faut se méfier du facteur d'amortissement qui devrait être idéalement pas trop loin de 1. Si la valeur du facteur d'amortissement est trop petite, le système tend à avoir quelques oscillations avant de se stabiliser, la première oscillation générant un dépassement important.

À la limite, si le facteur d'amortissement est nul, le système est oscillant. Si le facteur d'amortissement est grand, le système tend à être très sous amorti, et l'équation ci-dessus devient invalide si $\xi \geq 1$.

f. L'hystérésis :

Un système présente une hystérésis (Figure 1.12) lorsque la grandeur de sortie ne dépend pas uniquement de la valeur du mesurande, mais aussi de la façon dont elle a été atteinte.

L'hystérésis est définie par l'amplitude de l'écart maximum exprimé en pourcentage de l'étendue de mesure.

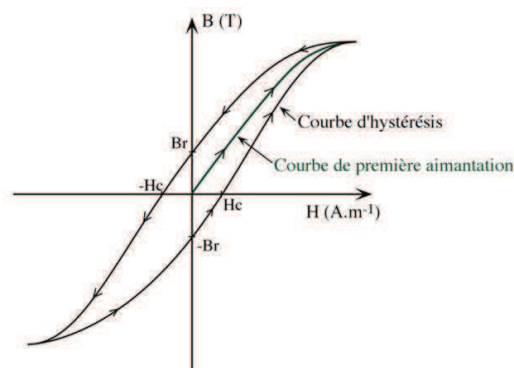


Figure 1.13 Courbe d'hystérésis

L'hystérésis peut être de nature mécanique ou électrique. En mécanique, l'hystérésis est associée aux phénomènes de frottement sec et de jeu dans un mécanisme. En

électrique, l'hystérésis est associée à des phénomènes de polarisation mécanique ou électrique.

g. La résolution

La résolution correspond à la granularité de la mesure, i.e., à la plus petite variation discernable par le capteur. Elle peut ne pas être constante sur toute l'étendue de la mesure. La résolution s'applique aussi aux convertisseurs analogiques/numériques (A/N). Le seuil est la résolution à l'origine, au voisinage de la valeur 0 du mesurande.

h. La précision

La précision est un des paramètres les plus importants d'un système de mesure. Elle permet d'évaluer la qualité de mesure en donnant l'idée de l'ampleur de l'erreur affectant la mesure. La précision fait appel à la notion de fidélité et de justesse, puisqu'un capteur précis est **juste** et **fidèle**.

La *fidélité* d'un capteur (Figure 1.14) correspond à l'écart type d'un ensemble de mesures faites pour un mesurande donné. Plus l'écart type est élevé, moins le capteur est fidèle. La fidélité représente donc les incertitudes de mesures d'un capteur. Elle dépend des erreurs aléatoires (exemple: bruit électromagnétique).

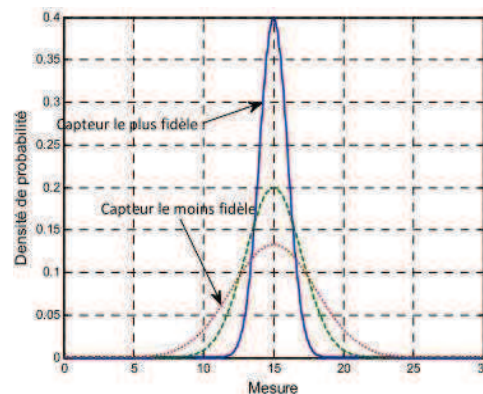


Figure 1.14 Fidélité d'un capteur

La *justesse* d'un capteur (Figure 1.15) correspond à la différence entre la valeur moyenne d'un ensemble de mesures faites pour un mesurande donné et celui-ci. La justesse représente les erreurs systématiques du système de mesure. Ces erreurs peuvent être réduites par de la calibration du capteur.

La précision est spécifiée par l'erreur de précision qui délimite un intervalle autour de la valeur mesurée, à l'intérieur duquel on est assuré de trouver la valeur vraie du mesurande.

Cette erreur de précision peut être représentée de trois façons :

- Par l'erreur absolue e_a qui exprime l'erreur de précision dans l'unité de mesure du mesurande;
- Par l'erreur relative e_r qui exprime l'erreur de précision en pourcentage par rapport à la valeur mesurée M :

$$e_r = \left(\frac{e_a}{M} \right) \cdot 100\%$$

- Par la classe de précision CP , qui exprime l'erreur de précision en pourcentage par rapport à l'étendue de mesure $E.M$:

$$CP = \left(\frac{e_a}{EM} \right) \times 100\%$$

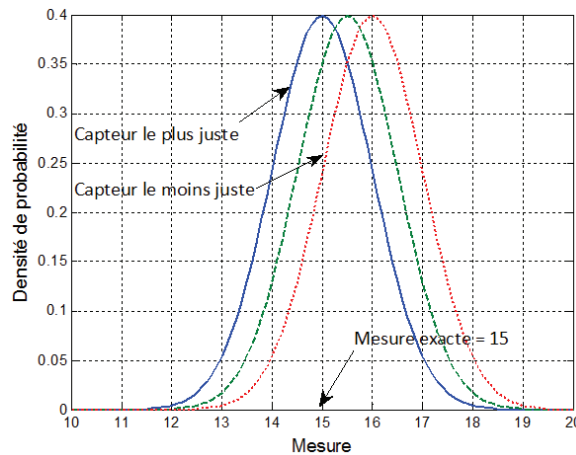


Figure 1.15 Justesse d'un capteur

1.9 Erreurs de mesure

Les erreurs de mesure ont des causes systématiques que l'opérateur peut corriger ou non. Ces erreurs ont des causes clairement identifiées et prévisibles. Parmi ces erreurs, il faut considérer aussi l'erreur de linéarité déjà abordée.

a. Erreur sur le zéro (Offset)

L'erreur sur le zéro appelée aussi "dérive" est généralement due au vieillissement des composantes d'un capteur et aux variations de température.

Elle se traduit par un décalage de la grandeur de sortie indépendante du mesurande (Figure 1.16a).

Dans le cas de la température, la dérive se produit lors de la période d'échauffement du capteur, ce qui implique qu'il est préférable d'étalonner un

capteur une fois cette période écoulée. Dans le cas du vieillissement, la dérive est facilement corrigeable par un étalonnage du capteur à intervalle régulier.

b. L'erreur liée à l'étalonnage

L'erreur liée à l'étalonnage du capteur est due à la qualité de l'opération d'étalonnage (Figure 1.16b).

Si cette opération n'est pas effectuée correctement, cela se traduit par une erreur dans la pente de la caractéristique du capteur. Il est recommandé de toujours étalonner un capteur avec un étalon de référence au moins plus de trois fois.

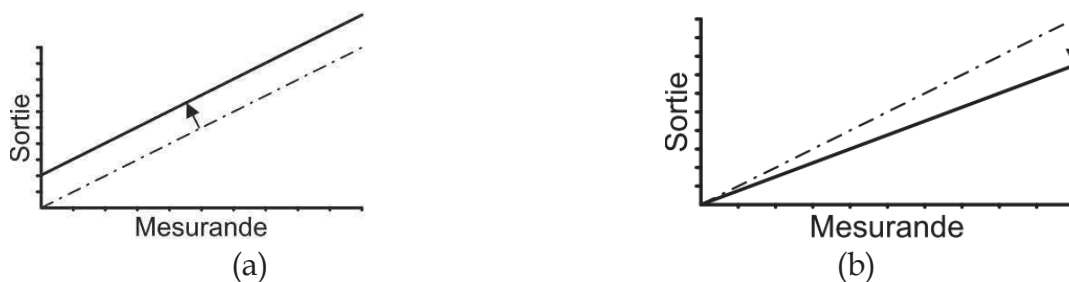


Figure 1.16: (a) Erreur de zéro, (b) Erreur d'étalonnage

Même dans le cas où l'étalon est précis, il est bon de faire plusieurs mesures lors de la calibration du capteur, car l'erreur de répétabilité est présente, même avec l'étalon.

c. Erreurs dues aux grandeurs d'influence

Les grandeurs d'influence provoquent sur le capteur des variations de ses caractéristiques métrologiques. L'erreur sur le zéro mentionnée précédemment est un très bon exemple de ces variations.

L'erreur sur la sensibilité est aussi une erreur due aux grandeurs d'influence. Cette erreur se traduit par une variation de la sensibilité et est représentée par l'écart maximal entre la sensibilité mesurée et la sensibilité nominale.

Toutes les grandeurs physiques connues peuvent agir comme grandeur d'influence. Pour minimiser l'effet de ces grandeurs d'influence, il faut utiliser soit la compensation ou la stabilisation.

Par exemple, si l'on a un capteur sensible à la température on peut y ajouter un circuit électronique de compensation pour le rendre indépendant des variations de température. Ce genre de circuit est généralement déjà inclus dans certains capteurs pour diverses grandeurs physiques.

On peut aussi minimiser les erreurs dues aux grandeurs d'influence en faisant en sorte que l'environnement du capteur reste constant. La stabilisation consiste donc à avoir un environnement contrôlé. Si un capteur est dans une pièce qui reste toujours

à 22 °C, alors il n'est pas nécessaire d'avoir des circuits de compensation puisque la température est constante.

d. Les erreurs dues aux conditions d'alimentation et de traitement de signal :

La grandeur de sortie peut être fortement dépendante des conditions d'alimentation du capteur.

L'alimentation du capteur est dans certains cas une grandeur modifiante qui peut affecter la précision d'une mesure.

L'exemple suivant illustre bien ce qui peut se passer dans un système de mesure.

Supposons une jauge de contrainte montée dans un pont de résistance. Si cette jauge, ayant une résistance de valeur R_j , est montée avec trois autres résistances de valeur R , la tension de sortie du pont est alors égale à :

$$V_s = V_{ex} \left(\frac{1}{2} - \frac{R}{R + R_j} \right)$$

Où, V_{ex} est la tension de l'alimentation et V_s est la tension de sortie.

La tension d'excitation représente la sensibilité du capteur. Si elle varie, par exemple de 1%, cela fait varier la tension de sortie, ce qui entraîne une erreur de mesure.

Le traitement de signal peut aussi contribuer à générer des erreurs, ce qui peut se produire si le gain d'un amplificateur de sortie n'est pas constant ou linéaire.

e. Les erreurs dues au mode d'utilisation :

Certaines erreurs sont simplement dues à une utilisation incorrecte d'un capteur. Par exemple, si on utilise un capteur pas assez rapide dans un cas où le mesurande évolue de façon rapide.

Il est très important de suivre les directives du fabricant pour le montage et l'installation d'un capteur pour s'assurer que ce dernier mesure correctement.

Chapitre 2

Capteurs de proximité, de position et de déplacement

Introduction

Un détecteur de proximité est un élément de mesure détectant si un objet est présent à proximité sans avoir de contact avec l'objet. La détection s'opère par des effets physiques que l'objet peut produire sur le détecteur, sans contact. Il existe 4 technologies :

1. Détecteur de proximité *inductif* : l'objet est détecté par ses effets sur un champ magnétique émis par le détecteur.
2. Détecteur de proximité *capacitif* : l'objet est détecté par ses effets sur un champ électrique émis par le détecteur.
3. Détecteur de proximité photoélectrique : l'objet est détecté par ses effets sur un faisceau de rayonnement optique.
4. Détecteur de proximité ultrasonique : l'objet est détecté par ses effets sur une onde ultrasonique émise par le détecteur.

I- Détecteurs de proximité

a. Détecteur de proximité inductif



Figure 2.1 : Détecteur de proximité inductif

Un détecteur de proximité inductif (Figure 2.6) détecte tout objet qui a un effet sur un champ magnétique. Donc, le détecteur de proximité inductif détectera uniquement des objets métalliques. Tout objet non-métallique ne sera pas détecté.

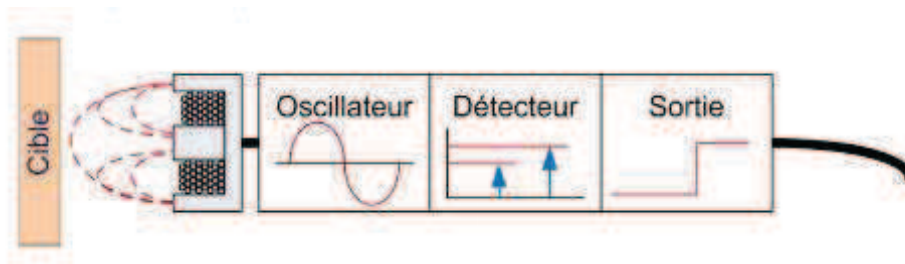


Figure 2.2 : Schéma de principe du détecteur de proximité inductif

Ce détecteur comporte un circuit oscillateur qui envoie une tension alternative dans une bobine localisée au bout du capteur (Figure 2). Un champ magnétique alternatif est émis au bout du capteur. Si un objet métallique se présente dans ce champ magnétique, il y aura apparition d'un courant induit, dit courant de Foucault (les anglophones le désignent sous le nom de courant d'Eddy). Le courant de Foucault qui apparaît dans l'objet métallique prélève de l'énergie au circuit oscillateur. L'amplitude et la fréquence de l'oscillateur change lorsqu'un objet est présent. Plus l'objet est près, plus l'amplitude diminue (Figure 3).

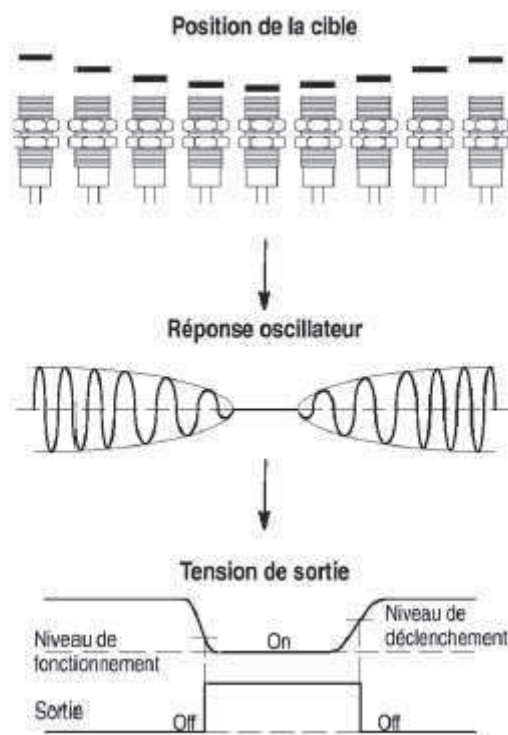


Figure 2.3 : Fonctionnement d'un capteur de proximité inductif

A partir de la réponse de l'oscillateur, une tension de sortie est obtenue via l'électronique de détection (Figure 3). La distance à laquelle la présence d'un objet provoque la commutation est nommée portée nominale. Mais, la portée dépend de la taille de l'objet métallique. Un objet plus volumineux sera le siège d'un courant de Foucault dont l'intensité totale sera plus grande que dans un objet moins volumineux.

Donc, plus d'énergie sera prélevée de l'oscillateur et il sera détectée plus loin qu'un objet plus petit.

Pour que le manufacturier puisse donner des spécifications standards, il utilise une cible standard (un objet métallique) dont l'épaisseur est égale à un millimètre. Les autres dimensions de la cible (longueur et largeur) sont définies, par exemple, en prenant la plus grande des deux valeurs suivantes : le diamètre du détecteur et le triple de la portée nominale ($3x$). Cette méthode, utilisée pour déterminer la dimension de la cible standard, peut varier d'un manufacturier à l'autre. Il faut donc vérifier l'approche utilisée par le manufacturier pour établir la taille de la cible qui a servi à déterminer la portée du capteur.

Il faut être conscient que si la dimension de l'objet diffère de celui de la cible standard, cela peut avoir un effet sur la portée. Pour assurer de faire une détection à la portée nominale, il est recommandée que la cible à détecter soit plus grande ou égale à la cible standard.

Dans l'exemple donné dans la Figure 4, il faut choisir la plus grande valeur entre : 18 mm et $3 \times 5 \text{ mm} = 15 \text{ mm}$. Ainsi la cible devra avoir comme dimension minimale 18 mm x 18 mm x 1 mm.

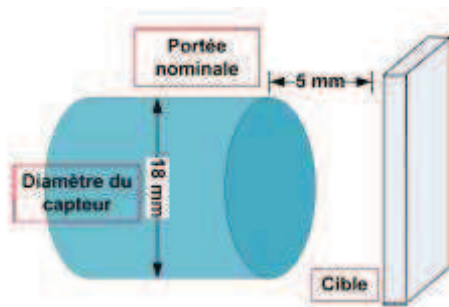


Figure 2.4 : Portée nominale d'un capteur

La portée nominale d'un détecteur de proximité inductif est généralement entachée d'une tolérance de $\pm 10\%$ en raison des composantes électroniques utilisées (Figure 4). Pour un détecteur ayant une portée nominale de 5 millimètres, cela implique que certains capteurs ne détecteront la cible qu'à 4.5 millimètres alors que d'autres la détecteront à 5.5 millimètres. Le cas le plus pessimiste pour la portée c'est la distance de 4.5 millimètres. A cette distance, les détecteurs fonctionnent à coup sûr.

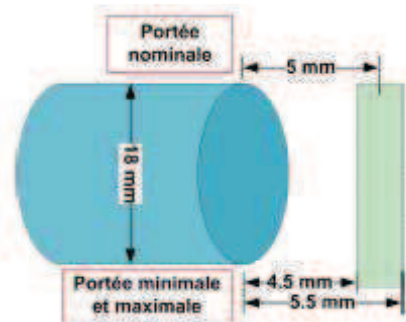


Figure 2.5 : Effet des tolérances de fabrication

Mais, il faut aussi prendre en compte l'effet de la température sur la portée du détecteur (Figure 5). Cet effet provoque un 10 % supplémentaire de variation sur la portée du détecteur et il se cumule avec le 10 % de tolérance.

Cela donne donc au total une portée résultante pouvant varier de 0.81 à 1.21 fois la portée nominale. Donc, dans notre exemple, cela donne une plage de 4.05 à 6.05 millimètres de portée. Le pire cas, c'est la portée minimale de 4.05 millimètres.

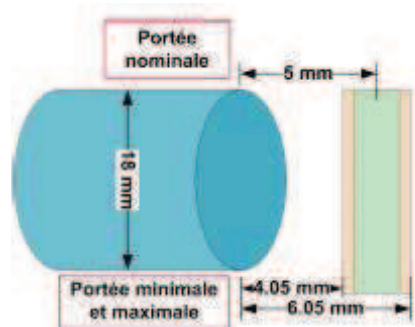


Figure 5 : Effet des tolérances de fabrication

On ne peut pas garantir la détection de la cible si elle est à plus de 4.05 millimètres de distance. Donc, la portée nominale donnée par le fabricant ne doit être considérée qu'à titre indicatif, car la portée réelle peut être inférieure.

Un autre effet à prendre en compte, c'est le type de métal de la cible qui a un impact sur la portée du détecteur de proximité inductif (voir la Table 1). Ceci est causé par le fait que les métaux ne sont pas tous égaux dans leur réaction à un champ magnétique variable. Ainsi, le courant de Foucault génère dans une cible en acier doux (Mild Steel) sera plus grand que dans une cible en cuivre, ce qui fait que l'acier doux sera plus facile à détecter que le cuivre.

Pour établir la portée nominale, les fabricants utilisent habituellement une cible en fonte (cast iron). Si la cible est d'un autre métal, il faut corriger la portée pour en tenir compte. Ainsi, une cible en cuivre exige de multiplier la portée par 0.3 (Tableau 1), ce qui mènerait la portée de détection garantie de notre exemple de 4.05 millimètres à 1.215 millimètres.

Métal de la cible	Facteur de correction de la portée
Acier inoxydable série 400	1.15
Fonte	1.10
Acier doux (DIN 1623)	1.00
Feuille d'aluminium (0.05 mm)	0.90
Acier inoxydable série 300	0.70
Laiton MS63F38	0.40
Aluminium ALMG3F23	0.35
Cuivre CUF30	0.30

Tableau 1 : Facteur de correction de la portée en fonction du métal de la cible

Il faut faire attention à la façon dont la cible s'approche du détecteur de proximité inductif (Figure 6). Dans le cas où la cible s'approche du détecteur de façon latérale, elle devrait passer à une distance de 0.5 fois (à 0.75 fois - selon les divers

manufacturiers) la portée nominale, ceci pour assurer que la détection se produise à un endroit donné avec un maximum de répétabilité. Ce qui peut être important dans certaines applications où le détecteur est utilisé pour vérifier que la cible a atteint une certaine position.

La Figure 2.6 met aussi en évidence une hystérésis entre le point de détection et le point de non détection. Cet hystérésis représente généralement moins de 15 % de la portée et permet d'éviter la commutation intempestive lorsque la cible est à une distance de l'ordre de la distance de détection/non détection.

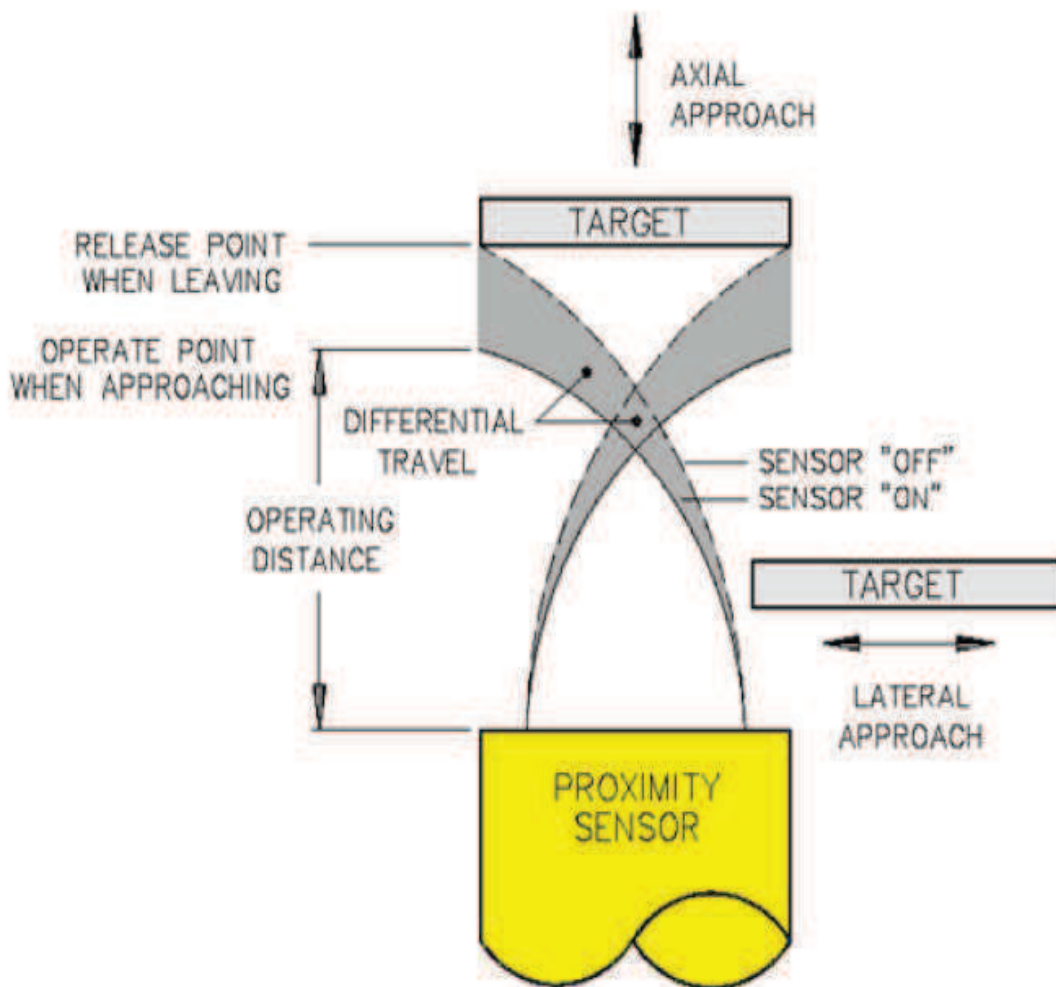


Figure 2.6 : Les diverses approches de la cible par rapport au détecteur.

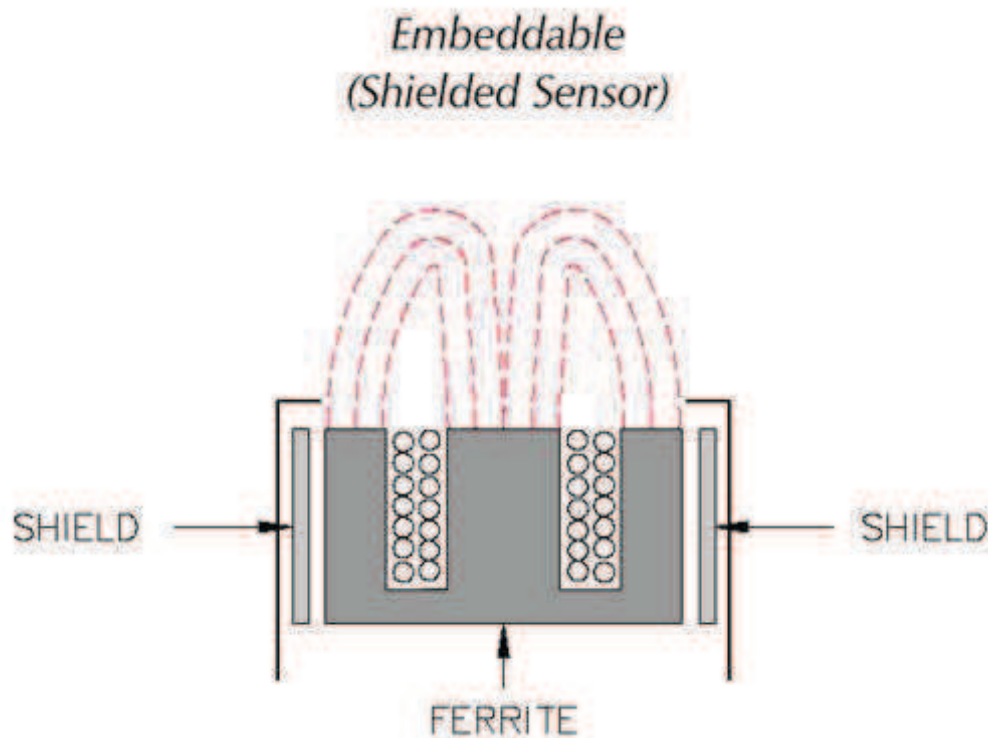


Figure 2.7 : Détecteur de proximité inductive blindé

b. Détecteur de proximité capacitif

Un détecteur de proximité capacitif (Figure 8) détecte tout objet qui a un effet sur un champ électrique. Donc, le détecteur de proximité capacitif détectera les objets dont la constante diélectrique relative est sensiblement différente de celle de l'air et les objets métalliques qui viennent modifier la géométrie du champ électrique.



Figure 8 : Détecteur de proximité capacitif

Tout comme les détecteurs de proximité inductifs, les détecteurs de proximité capacitifs ont aussi un circuit oscillateur. Mais, cette fois-ci, c'est un champ électrique qui est émis par la face sensible du capteur. Lorsqu'une cible s'approche de la face sensible, sa présence affecte l'intensité du champ électrique et la capacitance du condensateur formée par les plaques du détecteur (Figure 9).

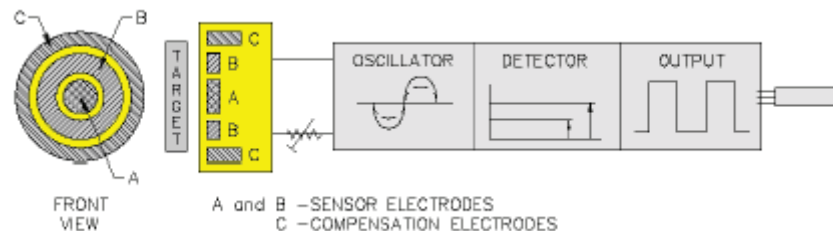


Figure 2.9 : Schéma de principe d'un détecteur de proximité capacitif

L'oscillation générée par l'oscillateur s'atténue lorsque la cible est présente, et l'amplitude de l'oscillation est utilisée pour générer un signal logique en sortie, selon quelle soit inférieure ou supérieure à certains seuils, ce qui indique qu'il y a détection ou non-détection d'un objet. Dans le cas d'un objet non-métallique, la principale voie de détection est via le changement de la constante diélectrique du milieu présent dans le champ électrique du condensateur. Par exemple, pour un condensateur constitué de deux plaques conductrices, la capacitance est :

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

Avec :

- A : la surface des plaques ;
- d : la distance entre les plaques,
- $\epsilon_r = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m la constante diélectrique du vide,
- et ϵ_0 la constante diélectrique relative du matériau entre les deux plaques.

En variant la constante diélectrique relative ϵ_r , cela change la capacitance (voir Tableau 2). Dans le cas d'un objet métallique, c'est le changement de géométrie de la capacitance qui est détectée. La portée nominale d'un détecteur de proximité

capacitif dépend de la taille de la cible à détecter. L'épaisseur de la cible est de un millimètre au minimum.

Matériau	Constante diélectrique relative
Air	1.000264
Acétone	19.5
Farine	De 2.5 à 3.0
Verre	De 3.7 à 10.0
Marbre	8.5
Glycérine	47
Polypropylène	De 2.0 à 2.2
Sel	6
Eau	80
Bois sec	De 2 à 6
Bois humide	De 10 à 30

Tableau 2 : Constantes diélectriques relatives de divers matériaux

En résumé, un détecteur de proximité capacitif détecte tous les matériaux. Ces capteurs peuvent être très sensibles pour détecter une cible. Toutefois, ils sont aussi sensibles aux variations de l'environnement, i.e., les variations de température et d'humidité. Ces deux paramètres changent sensiblement la constante diélectrique.

c. Détecteur de proximité photo-électrique :

Les détecteurs de proximité photo-électriques (Figure 2.10) permettent la détection d'une cible qui affecte la trajectoire d'un faisceau lumineux.

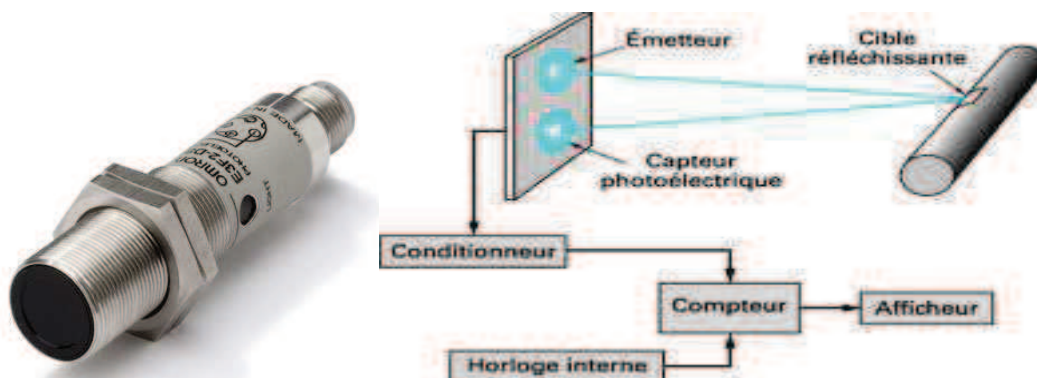


Figure 2.10 : Détecteur de proximité photoélectrique

Un détecteur de proximité photo-électrique exige un émetteur et un récepteur à rayonnement lumineux.

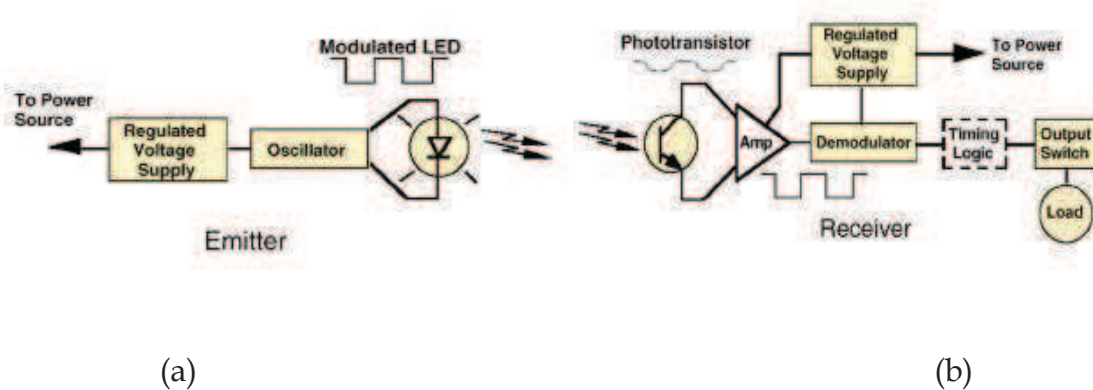


Figure 2.11 : Circuit de l'émetteur (a) et du récepteur (b) du faisceau lumineux

L'émetteur (Figure 2.11 - a) comprend un oscillateur dont le but est d'envoyer *un train d'impulsion* portée à la diode électroluminescente (DEL ou LED en anglais). La LED émet un signal lumineux oscillant dont la fréquence est de quelques kilohertz. C'est grâce à cette fréquence particulière que le récepteur (Figure 2.11 - b) sera en mesure de distinguer ce signal lumineux parmi l'ensemble du rayonnement lumineux reçu par ce récepteur.

Le phototransistor du récepteur capte le signal lumineux qui sera par la suite amplifié pour qu'il puisse être détecté plus facilement. Le démodulateur extrait à partir du signal amplifié l'information nécessaire.

Il existe plusieurs configurations (ou méthodes) possibles pour les détecteurs de proximité photo-électriques :

i. La méthode de la barrière :

La méthode de la barrière consiste à mettre l'émetteur et le récepteur face à face. En l'absence d'objet, le faisceau envoyé par l'émetteur est reçu par le récepteur. Lorsqu'un objet se présente, il coupe le faisceau et le récepteur ne reçoit plus de lumière. La coupure du faisceau lumineux par l'objet provoque donc sa détection.

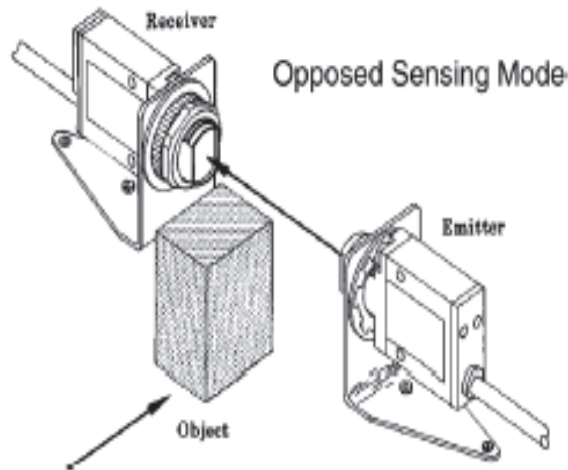


Figure 2.12 La méthode de la barrière

ii. La méthode retro-réfléctive :

Dans cette méthode, l'émetteur et le récepteur sont montés dans le même boîtier et un réflecteur est utilisé pour retourner le faisceau vers le récepteur. Comme la méthode de la barrière, si le faisceau n'est pas coupé par un objet alors le faisceau lumineux réfléchi est détecté par le récepteur.

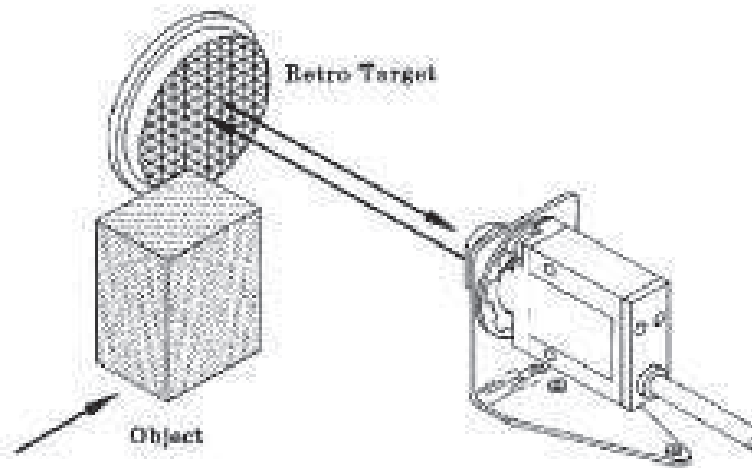


Figure 2.13 La méthode retro-réfléctive

Lorsque l'objet coupe le faisceau le récepteur ne le reçoit plus et l'objet est ainsi détecté.

iii. La méthode diffusée :

Lorsque l'objet est très réfléchissant, cela provoque des problèmes avec la méthode retro-réfléctive. Toutefois, si l'objet est réfléchissant, on peut l'utiliser comme "miroir" pour réfléchir le faisceau lumineux de l'émetteur vers le récepteur. Cela correspond à une méthode dite méthode diffusée.

La portée est beaucoup plus faible qu'avec les deux méthodes précédentes, elle est d'environ 1.8 mètre au maximum.

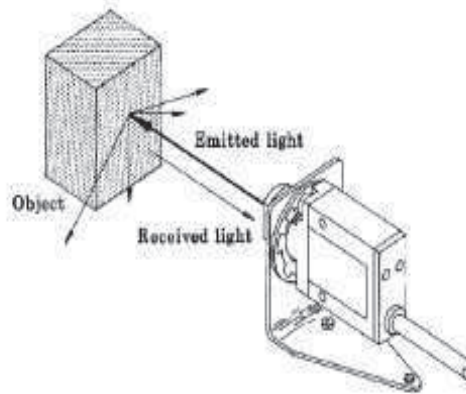


Figure 2.14 Méthode diffusée

iv. La méthode convergente :

La méthode convergente s'applique bien aux objets translucides.

Le capteur détecte l'objet lorsqu'il est aux environs du point focal, i.e., dans la zone de détection correspondant à la profondeur de champ du capteur. La portée de ce type de détecteur est de 150 millimètres (6 pouces) maximum.

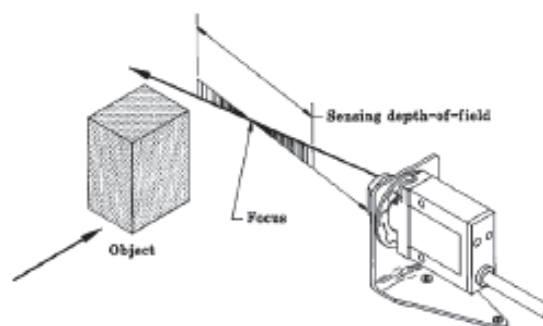


Figure 2.15 Méthode convergente

d. Détecteur de proximité ultrasonique

Les détecteurs de proximité ultrasoniques permettent la détection d'un objet, indépendamment de la matière qui le compose, sa couleur, et sa transparence. Ce détecteur est relativement robuste et fiable dans un environnement industriel.

Le principe de fonctionnement est semblable aux détecteurs de proximité photo-électrique. Un signal ultrasonique est émis par un émetteur et détecté par un récepteur.

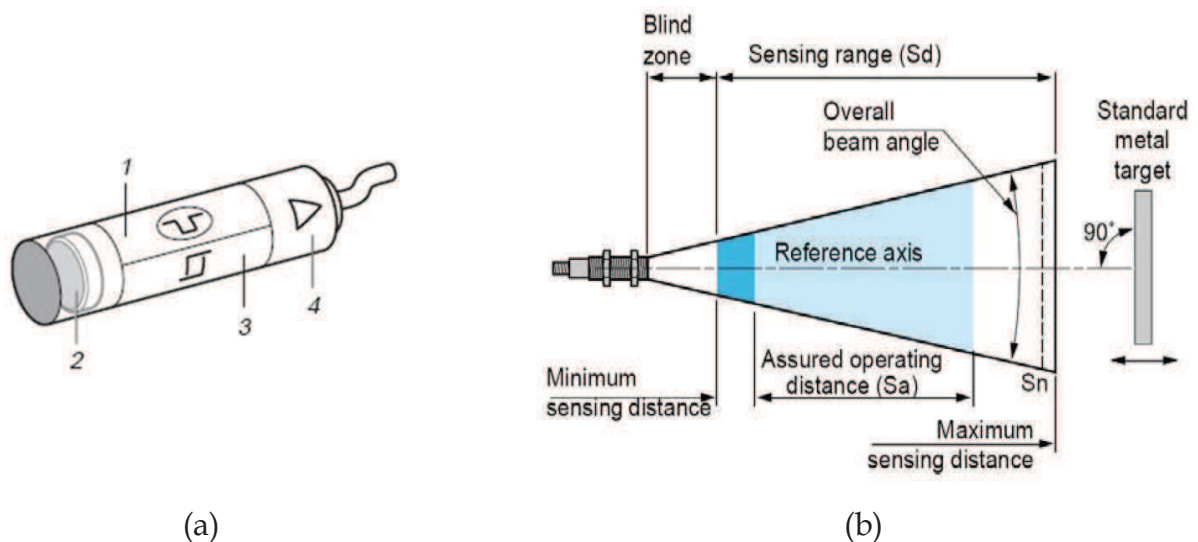


Figure 2.16 Capteur de proximité ultrasonique : (a) Schéma de principe (b) Modèle d'émission.

Un oscillateur (1) envoie un signal à un transducteur piézo-électrique (2). Ce signal (de 200 à 500 kHz) est envoyé pendant quelques millisecondes et fait vibrer le transducteur qui émet alors un ultrason qui propage dans l'air et ira frapper un objet si celui-ci est présent dans le champ d'émission du détecteur. L'écho revient alors vers le détecteur. Cet écho fait vibrer le transducteur et le signal piézo-électrique généré par ces vibrations passe par une unité de traitement de signal (3) qui s'assure que la fréquence de l'ultrason reçu en écho est bel et bien la même que celle de l'ultrason émis. La Figure 2.16-b montre un modèle de détection où sont tracées les limites de détection pour 3 cibles de forme et de tailles différentes (2 tiges et une plaque rectangulaire).

5- Capteurs de position (fin de course) :

Un capteur de position est un détecteur connu sous le nom d'interrupteur de fin de course. Puisque c'est un détecteur, par définition il fournit en sortie un signal logique évoluant entre deux états (tout ou rien).



(a)



(b)

Figure 2.17 : (a) Détecteur fin de course (b) Organes de commande

L'interrupteur de fin de course exige un contact avec l'objet à détecter. Ce contact a lieu au niveau de l'organe de commande.

Divers organes de commande sont disponibles sur le marché, pour s'adapter aux divers objets que le capteur doit pouvoir détecter. Ce choix est important, car un mauvais choix d'organe de commande peut entraîner des dommages sur l'objet à détecter et/ou l'interrupteur de fin de course.

Dans l'organe de commande, un mécanisme mécanique transmet les déplacements de l'organe de commande vers l'élément de contact. Cet élément de contact est un contact sec (relais) commandé mécaniquement. Ce contact a une durée de vie limitée, car les cycles d'ouverture et fermeture du contact provoquent à long terme une fatigue mécanique. Selon les modèles, la durée de vie est variable, mais généralement c'est autour de 30 millions d'opérations (de cycles).

Le type de contact peut prendre diverses formes au niveau électrique. Le contact peut être à simple action ou à double action. Un contact à simple action ne fait qu'ouvrir ou fermer un circuit électrique alors qu'un contact à double action fait une sélection entre deux circuits différents, ouvrant un circuit en fermant l'autre et vice versa.

Le contact peut être à simple ou à double rupture. Un contact à simple rupture ne comprend qu'un seul point du circuit qui s'ouvre. Un contact à double rupture comprend deux points du circuit qui s'ouvre, permettant un plus grand pouvoir de coupure.

Le contact peut être unipolaire, bipolaire et même quadripolaire. Cela correspond simplement au nombre de contacts qui sont actionnés lors de la commutation de l'interrupteur de fin de course.

Une caractéristique importante des interrupteurs de fin de course, c'est le pouvoir de coupure des contacts. Elle s'exprime de deux façons. C'est la tension continue ou alternative maximale qui peut être coupé sans risque de claquage (varie de 1 à 380 volts, selon le relais utilisé). C'est aussi le courant maximal qui peut être coupé (variant de 1 milliampère à plusieurs ampères).

L'interrupteur de fin de course est utilisé pour détecter qu'un objet est à la fin de course d'un actionneur.

On l'utilise comme sécurité pour s'assurer que certaines composantes de machines restent à l'intérieur de zones bien précises.

6- Capteurs de déplacement

Le déplacement est une grandeur physique importante, puisque plusieurs grandeurs physiques entraînent la déformation de corps d'épreuve. Une déformation de grande amplitude peut être mesurée avec un capteur de déplacement.

Il existe deux grandes familles de capteurs de déplacement : les capteurs résistifs et les capteurs inductifs.

a. Capteurs de déplacement résistifs : (Par potentiomètre)

Les capteurs de déplacement à potentiomètre permettent d'obtenir une mesure analogique de la distance. La distance est proportionnelle à la valeur de la résistance du potentiomètre. Les potentiomètres permettent des mesures de distances angulaires ou linéaires. Dans ce dernier cas, la mesure est faite par un potentiomètre de précision monté sur un système de poulies et un ressort de rappel, ce qui donne

accès à une étendue de mesure pouvant aller jusqu'à 20 pieds (environ 6 mètres). Ce peut être aussi un potentiomètre linéaire, mais dans ce cas, les portées sont beaucoup plus limitées.

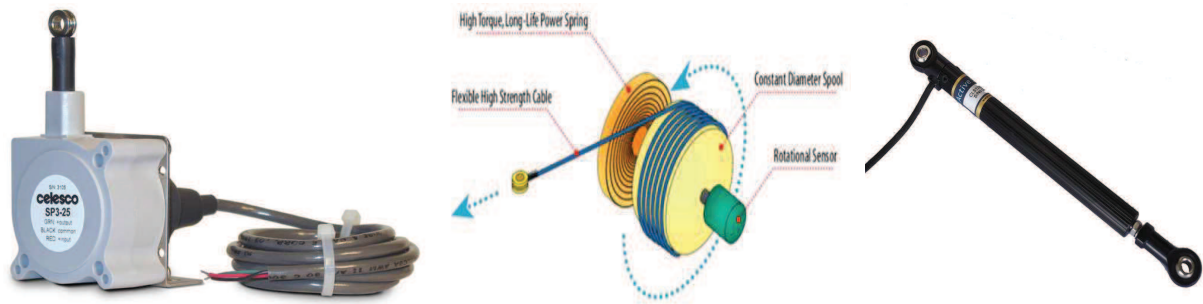


Figure 2.18 Capteur de déplacement à potentiomètre

Pour mesurer l'impédance du potentiomètre, il faut appliquer une tension d'excitation, au capteur. Dans le cas du montage le plus simple, constitué seulement d'un potentiomètre. La tension d'excitation V_{CC} est appliquée entre les entrées +In et Com. La distance mesurée x est déduite par la mesure de la tension de sortie V_s entre les sorties +Out et Com.

Le potentiomètre agit comme un diviseur de tension et la tension de sortie V_s sera :

$$V_s = V_{CC} \frac{R_x}{R_{Pot}}$$

Avec R_{Pot} la résistance totale du potentiomètre et la résistance correspondant à la distance x :

$$R_x = R_{Pot} (x/E.M.)$$

E.M. étant l'étendue de mesure du capteur.

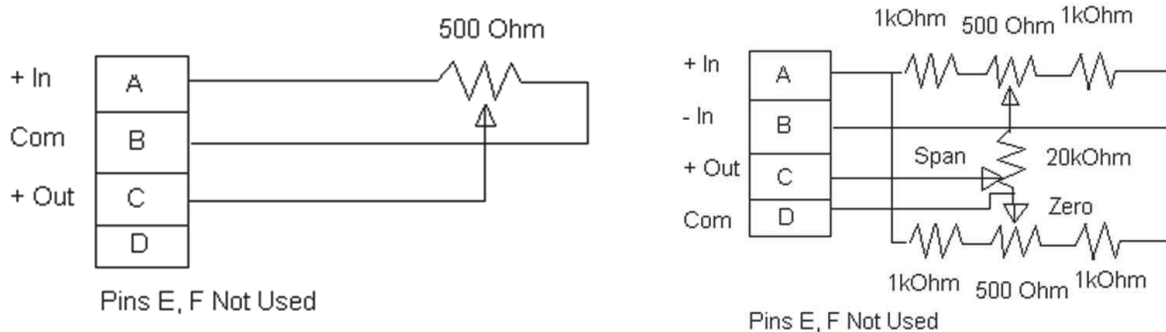


Figure 2.19 Circuits internes d'un capteur de déplacement à potentiomètre

Le module électronique de conditionnement (MEC), qui interprétera, mesurera cette tension V_s , doit être de bonne qualité. Sinon, une non-linéarité peut être engendrée si le MEC n'a pas une impédance d'entrée suffisamment grande. Pour montrer cet effet, supposons que l'impédance d'entrée du MEC est représentée par la variable R_L . La connexion du MEC au capteur modifie le circuit diviseur de tension et on obtient alors :

$$V_s = V_{CC} \frac{\left(\frac{R_x R_L}{R_x + R_L} \right)}{\left(R_{Pot} - R_x + \frac{R_x R_L}{R_x + R_L} \right)} = V_{CC} \frac{R_x R_L}{\left(R_{Pot} R_x + R_{Pot} R_L - R_x^2 \right)}$$

Si $R_L \gg R_x$, alors, on retrouve la relation qui est linéaire avec R_x et aussi avec x . Sinon, la caractéristique entre la tension V_s et la position x devient non-linéaire.

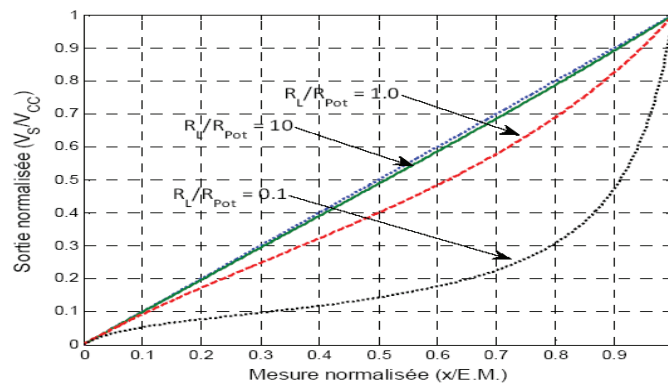


Figure 2.20 Relation position/tension de sortie pour diverses valeurs de R_L vs R_{Pot}

b. Capteurs de déplacement inductifs

➤ LVDT

Le capteur de déplacement à LVDT (LVDT = Linear Variable Displacement Transformer) utilise le principe du transformateur pour faire la mesure. Dans un transformateur, il y a un couplage magnétique entre deux bobines, la bobine primaire et la bobine secondaire. Une tension alternative V_1 appliquée au primaire du transformateur est transformée en une tension alternative V_2 au secondaire. Le rapport entre les amplitudes de ces deux tensions dépend du rapport entre le nombre de tours de fils au primaire N_1 et le nombre de tours de fils au secondaire N_2 . Pour un montage donné dans la figure ci-dessous, ce rapport dépend aussi du couplage magnétique entre le primaire et le secondaire ainsi que de la

distance entre les deux bobines. Dans un transformateur, pour permettre un bon couplage magnétique (pour que le transformateur ait un bon rendement), un entrefer métallique est utilisé.

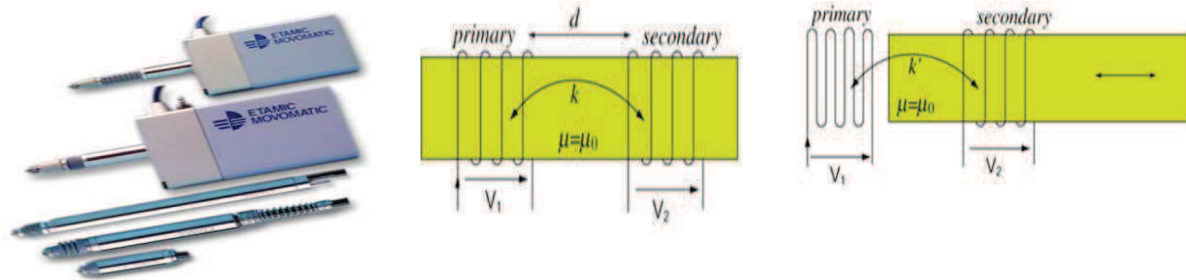


Figure 2.21 Capteurs de déplacement à LVDT et ses principes de couplage

Dans le cas où la tige métallique peut être déplacée, le couplage entre les deux circuits magnétiques sera modifié et cela modifiera la tension au secondaire. Cette tension sera maximale lorsque la tige métallique est présente sur toute la longueur des enroulements du primaire et du secondaire. Elle diminuera au fur et à mesure que la tige est retirée de la zone où sont localisés les enroulements. Elle sera minimale en l'absence de tige.

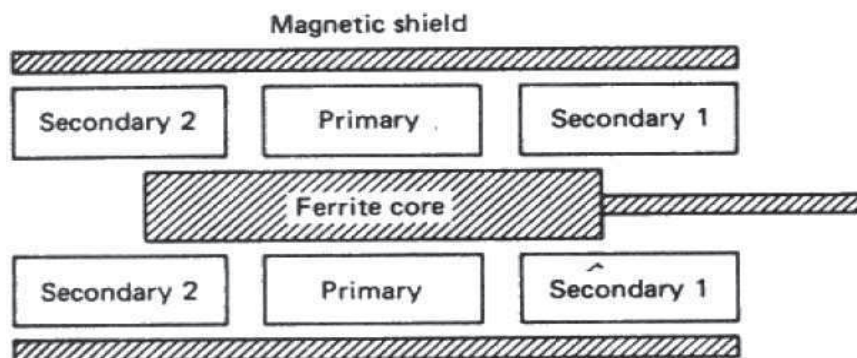


Figure 2.21 Principes de fonctionnement d'un capteur de déplacement à LVDT

Le LVDT est basé sur ce principe, toutefois, il est nécessaire de pouvoir déterminer dans quelle direction la tige est déplacée. Pour ce faire, le LVDT est constitué d'un transformateur comportant un primaire et deux secondaires. Et, les deux bobinages secondaires sont placés de chaque côté du bobinage primaire. Une tige métallique se déplace au centre de ces bobinages pour permettre de modifier les couplages magnétiques entre le primaire et les deux secondaires.

Chapitre 3

Capteurs de température

1-Généralités

La température est une grandeur intensive du point de vue thermodynamique, ce qui rend sa mesure difficile et incite à recourir à une échelle pratique, reposant sur des phénomènes physiques répétables et aisément identifiables, permettant de la repérer. Elle peut être mesurée de deux façons différentes :

✓ **A l'échelle atomique**, elle est liée à l'énergie cinétique moyenne des constituants de la matière ;

L'énergie cinétique, par exemple, d'une molécule de gaz monoatomique est :

$$E_c = \frac{1}{2} MV^2 = \frac{3}{2} kT$$

Avec : T températures absolue en Kelvin.

✓ **Au niveau macroscopique**, certaines propriétés des corps dépendant de la température (volume massique, résistivité électrique, etc.) peuvent être choisies pour construire des échelles de température.

C'est l'une des grandeurs les plus significative dans les milieux industriels (génie chimique, industrie agro-alimentaire, analyse de fonctionnement : moteurs, navettes spatiales, gestion de bains de peinture, ...). Elle est mesurée d'une façon indirecte, par le biais d'un autre principe physique. Il est donc impératif de bien connaître les principales techniques de mesure ainsi que les principes physiques qui les permettent.

Les capteurs de température peuvent être classés selon l'existence ou non de *contact* avec le corps dont veut mesurer la température.

▪ **Avec contact:**

✓ **Analogique:** Thermocouples, thermomètres à résistance métallique; thermomètres à semi-conducteur, thermomètres à quartz, thermomètres à dilatation de fluide,...

✓ **Logique:** Thermostats à dilatation thermique.

▪ **Sans contact:**

- ✓ **Analogique:** Pyromètres optiques, pyromètres optiques à dilatation de solide,...
- ✓ **Logique:** pyromètre à dilatation de solide.

2 - Les échelles de température

Une échelle de température a été mise au point au niveau international : c'est *L'Echelle Internationale de Température* de 1990 (EIT 90) qui a été défini sur des points de référence fixe de température basés sur des phénomènes physiques de changement d'état d'un corps. Ces points sont plus particulièrement des points triples, des points d'ébullition d'un corps et des points de congélation.

Si le degré Kelvin (K) est l'unité officielle de la température utilisé dans le milieu scientifique, le degré Celsius (°C) et le degré Fahrenheit (°F) sont plus largement utilisée pour exprimer la température.

- **Degré Celsius (°C) : Centésimale : (1742)**

0 °C glace fondante ; 100°C eau bouillante ; unité le (°C), degré Celsius.

- **Fahrenheit (pays anglo-saxons). (1707)**

32 ° F (glace fondante); 212 ° F (eau bouillante) ; unité le (°F).

$$T(^{\circ}\text{F}) = 9/5 T(^{\circ}\text{C}) + 32$$

- **Réaumur (pays de l'Europe de l'Est).**

0°R (glace fondante); 80° R (eau bouillante) ; unité le (°R).

- **Kelvin (K) : Absolue.**

$$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273.15 \text{ ou bien } ^{\circ}\text{C} = T + 273,15 \text{ unité le Kelvin (K)}$$

3-Principales caractéristiques d'un capteur de température.

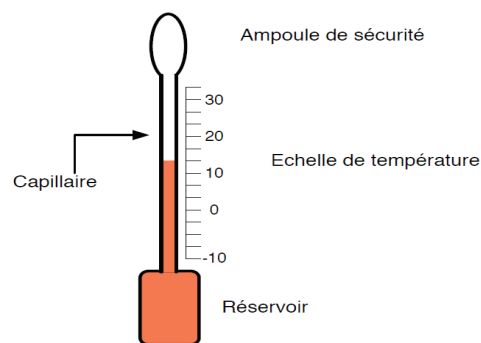
- ✓ **Sensibilité :** $S = dG/dT$

On appelle aussi parfois "sensibilité" la plus petite variation de température décelable dT ; il s'agit en fait de la "mobilité" (appelée aussi "limite de résolution", "limite de mobilité", "résolution",...)

- ✓ **Fidélité.** Les indications fournies concordent pour la mesure d'une "même" température.
- ✓ **Justesse.** L'indication correspond à la vraie valeur (déterminée par d'autres moyens).
- ✓ **Précision.** Température juste et meilleure incertitude relative.
- ✓ **Temps de réponse.** Temps mis pour donner "l'indication définitive"; généralement qq s, max 2 à 10 min.

4- Différents types de thermomètres à dilatation

a. Thermomètres à dilatation de liquide

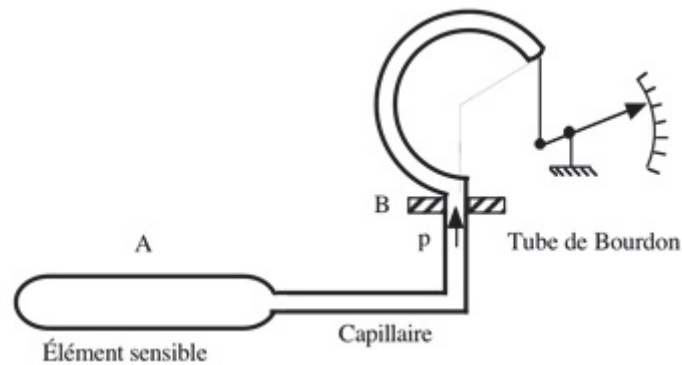


Il est constitué d'un réservoir surmonté d'un capillaire de section faible et régulière (ordre de grandeur : $\varnothing = 0,2 \text{ mm}$) se terminant par une ampoule de sécurité (utile lors d'un dépassement de la température admissible). Il est réalisé en verre. Sous l'effet des variations de température, le liquide se dilate plus ou moins. Son niveau est repéré à l'aide d'une échelle thermométrique gravée sur l'enveloppe.

b. Thermomètres à dilatation de gaz :

Un thermomètre à gaz est composé d'une sonde (A), formant une enveloppe dans laquelle est enfermé le gaz thermométrique. Cette sonde est reliée par un tube capillaire de raccordement à l'extrémité (B) d'un tube de Bourdon, appelée spirale de mesure. Cette extrémité est fixe. La longueur du tube de raccordement ne doit pas excéder 100 mètres. Sous l'effet de la température du milieu dans lequel la sonde est

placée, la pression du gaz va varier, ce qui modifiera l'équilibre de l'extrémité libre du tube de Bourdon. Cette variation de pression se traduira par un mouvement de rotation de l'index indicateur qui se déplacera devant un cadran portant des graduations thermométriques.



c. Thermomètres à dilatation de solide:

Un bilame thermique est un cas parmi d'autres des thermomètres à dilatation de solides. Elle est constituée de deux bandes d'alliage dont les coefficients de dilatation sont très différents, soudées à plat sur toute leur surface. Lorsqu'une telle bande est soumise à une variation de température, les dilatations différentes des deux faces provoquent des tensions, il en résulte une incurvation de l'ensemble.

La soudure des deux constituants doit être suffisamment intime pour que la zone de jonction soit mécaniquement aussi résistante que chacune des deux lames.



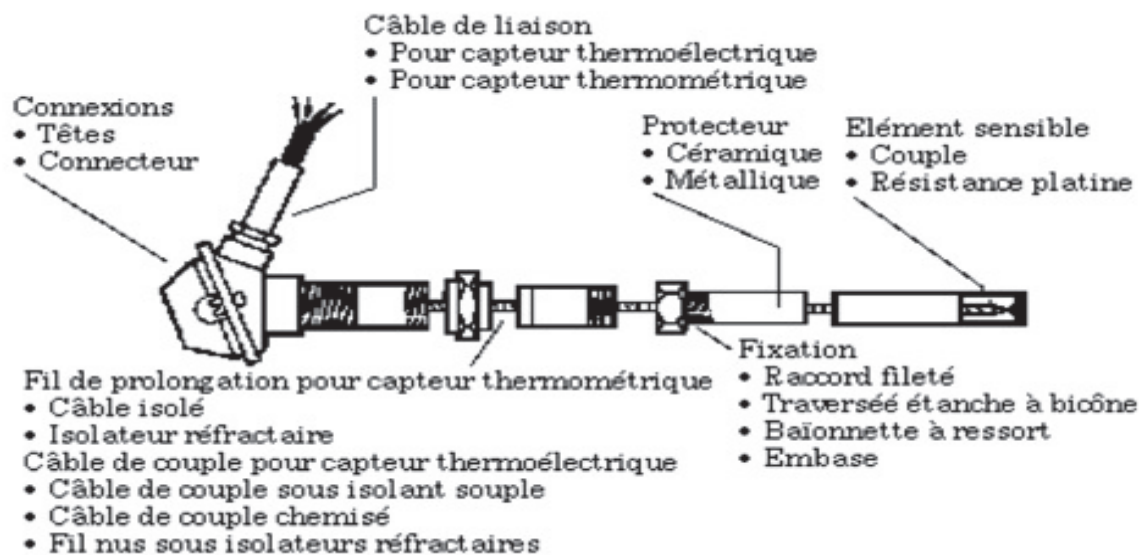
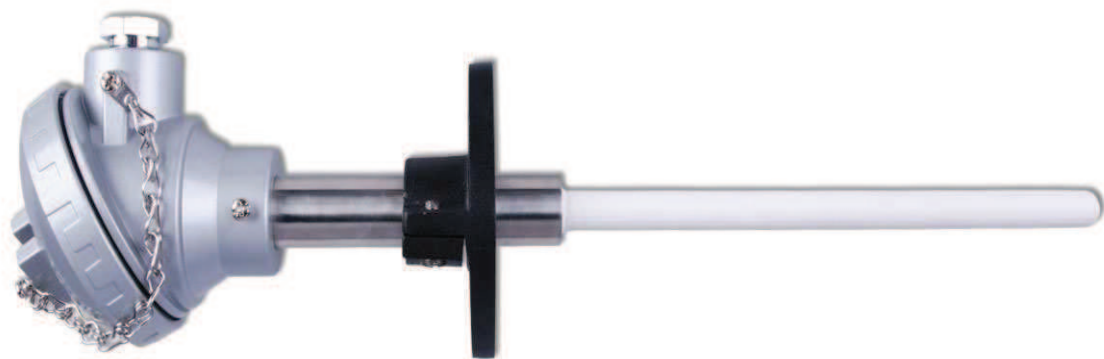
Exemple de constitution :

- Métal très dilatable : Alliage de fer ;
- Métal peu dilatable : Invar

5- Thermomètres électriques

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

On les rencontrera dans le milieu industriel avec une structure proche de la figure suivante



On décompose les capteurs de température en deux sous catégorie :

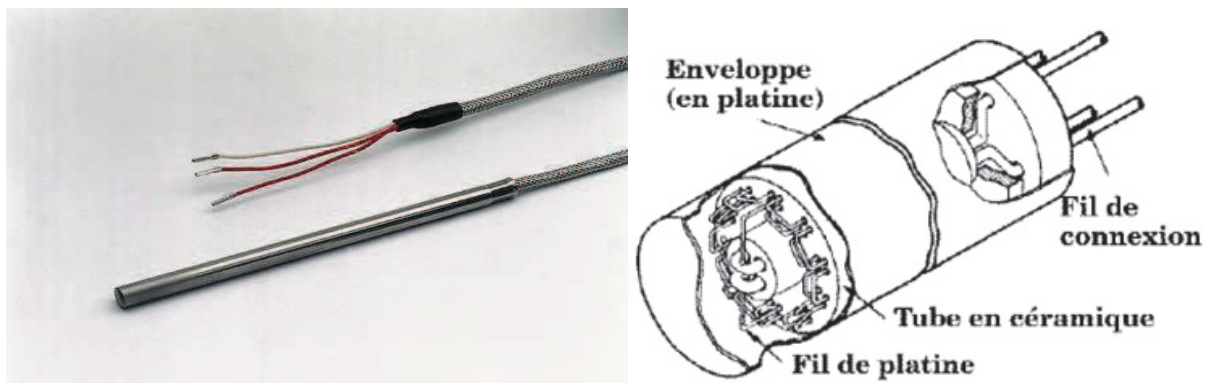
- Les capteurs passifs, à résistance ou thermistance ;
- Les capteurs actifs, à couple thermoélectrique.

5.1 Thermomètres à résistance et à thermistance

Le fonctionnement des thermomètres à résistance et thermistances est basé sur le même phénomène physique ; l'influence de la température sur la résistance électrique d'un conducteur. La mesure d'une température est donc ramenée à la mesure d'une résistance. Comme la caractéristique résistance/température est de nature différente pour un métal et un agglomérat d'oxydes métalliques, deux cas sont distingués. On parlera de thermomètre à résistance d'une part et de thermistance d'autre part.

5.1.1 Thermomètres à résistance

Le platine qui est le matériau le plus utilisé dans ce type de capteurs de température. Un exemple d'élément sensible est donné pour une sonde de platine, sur la figure



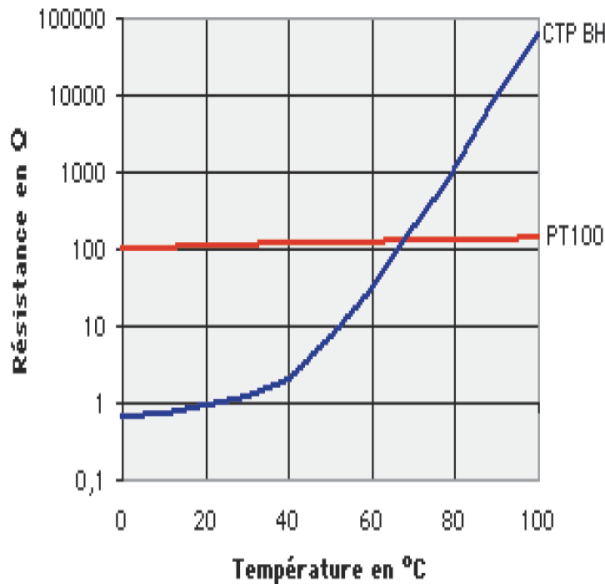
La sonde Pt100 est une sonde platine qui a une résistance de 100Ω pour une température de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. ($138,5\ \Omega$ pour $100\text{ }^{\circ}\text{C}$)

5.1.1 Thermomètres à thermistance

Une thermistance est un agglomérat d'oxydes métalliques frittés, c'est-à-dire rendus compacts par haute pression exercée à température élevée, de l'ordre de 150 bars et $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. La composition d'une thermistance peut-être, par exemple :

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

La résistance électrique d'une thermistance est très sensible à l'action de la température. Il existe deux types de thermistance, les CTN à coefficient de température négatif, et les CTP à coefficient de température positif. La loi de variation est de la forme : $R = a.e^{\frac{b}{\theta}}$



5.3 Montages de mesure

La mesure de la température se ramène donc à une mesure de résistance. La méthode la plus simple (Figure1) consiste à alimenter la résistance avec un courant I et de mesurer la tension aux bornes de la résistance (on rappelle : $U = R \cdot I$).

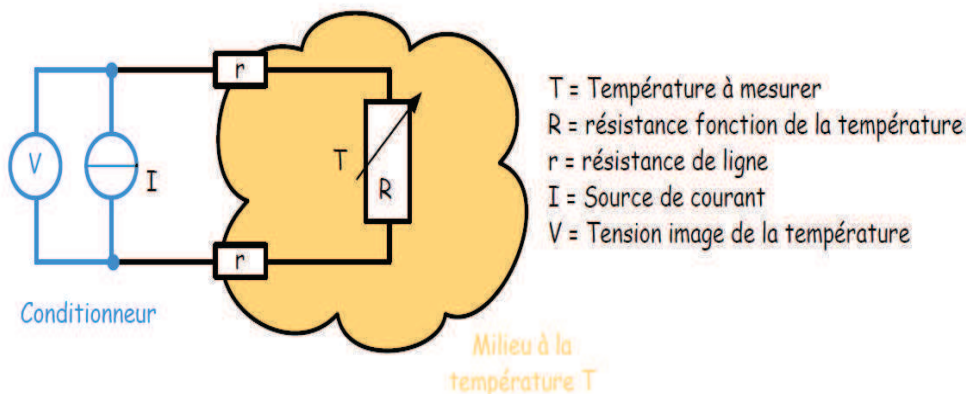


Figure 3.1 : Montage deux fils avec source de courant

Mais, dans ce montage, la tension V dépend aussi des résistances de ligne r . Pour éviter cela, on ajoute deux fils aux bornes de la résistance, on utilise alors une résistance avec quatre fils (Figure 3.2).

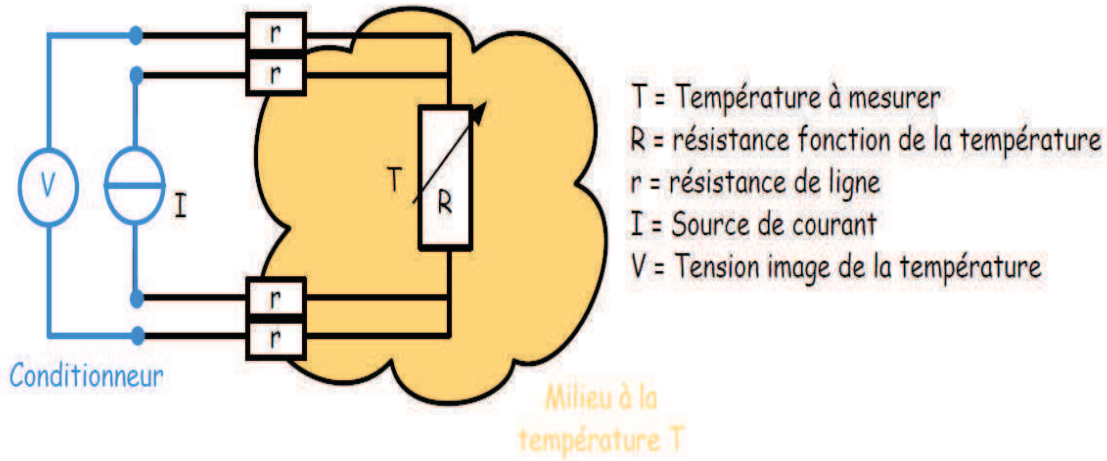
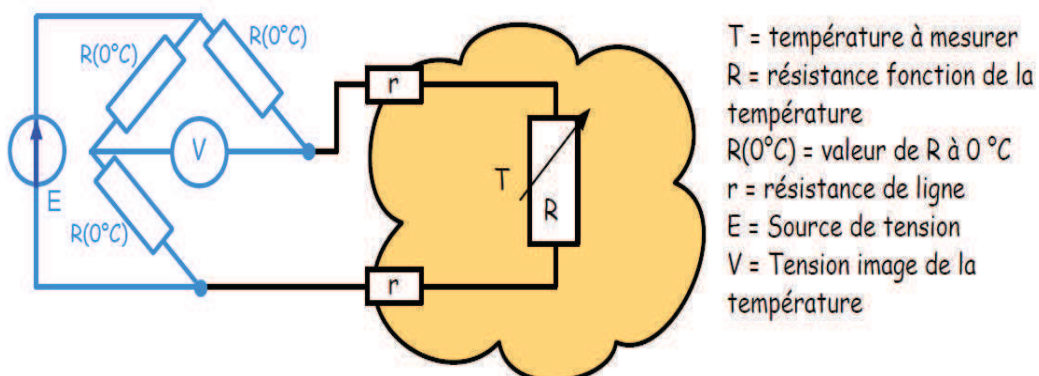


Figure 3.2 : Montage quatre fils avec source de courant

Ces deux montages ne permettent pas de supprimer la composante continue R_0 (0°C) de la résistance de mesure R . On préfère généralement utiliser un montage utilisant un pont de Wheatstone (Figure 3.3).

Si on néglige les résistances r et si on note $R(T) = R_0(0^\circ\text{C}) + \alpha T$ on démontre que

$$V = \frac{\alpha T}{2R_0 + \alpha T} \cdot \frac{E}{2}$$



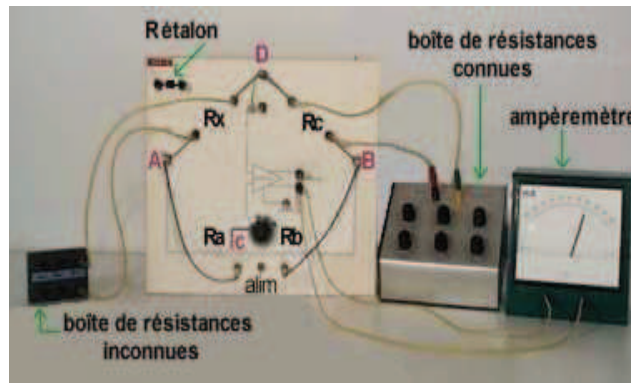


Figure 3.3 Montage avec Pont de wheatstone

Pour diminuer l'influence des résistances de ligne, on utilise un montage trois fils (figure 4), ou mieux un montage quatre fils (Figure 5).

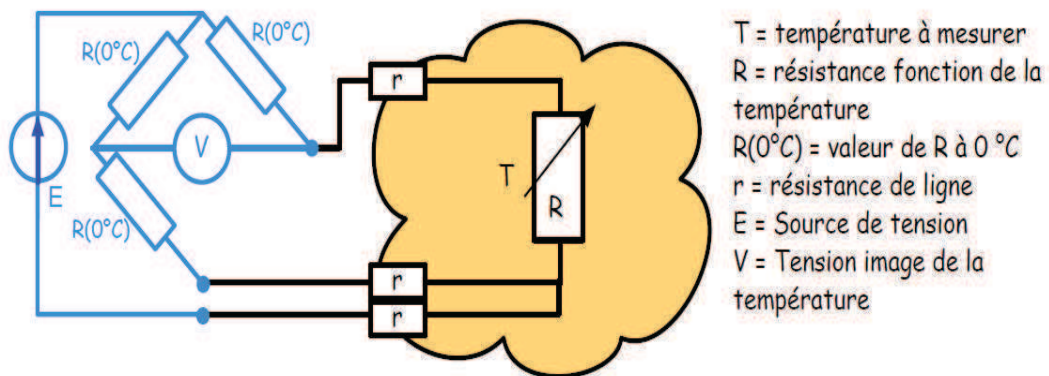


Figure 3.4 Montage 3 fils avec Pont de Wheatstone

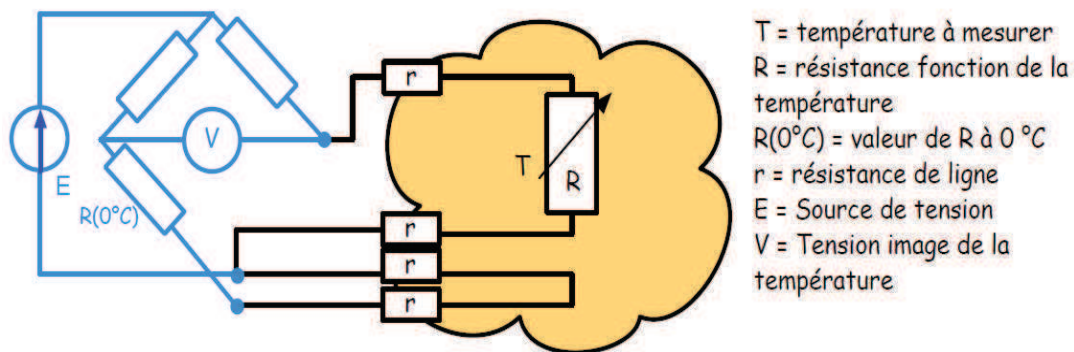


Figure 3.5 Montage 4 fils avec Pont de wheatstone

La recherche d'une bonne sensibilité de mesure conduit à faire traverser la résistance par un courant relativement important. Cependant, celui-ci risque alors de provoquer par effet Joule un échauffement du capteur qui peut cesser d'être négligeable et qui en tous cas doit pouvoir être estimé et minimisé : c'est pourquoi les courants de mesure sont généralement de l'ordre du mA et rarement supérieurs à 10 mA.

La mesure des très basses températures ne se fera pas à l'aide d'un thermomètre à résistance ou thermistance.

6- Thermocouples (ou couples thermoélectriques)

Les phénomènes thermoélectriques dans les chaînes de conducteurs métalliques ou semi-conducteurs décrivent les conversions entre énergie d'agitation thermique et énergie électrique des charges en mouvement qui s'opèrent à leur niveau.



6.1 - Les effets thermoélectriques

a. Effet Peltier

A la jonction de deux conducteurs A et B différents mais à la même température, s'établit une différence de potentiel (ou f.é.m.) qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température Θ effet Peltier).

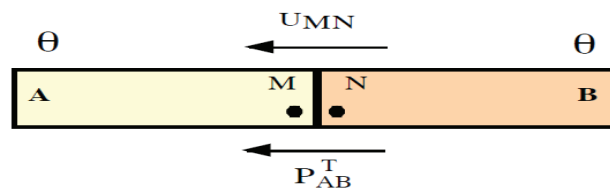


Figure 3.6 Effet Peltier

$$V_M - V_N = P_{AB}^\theta$$

C'est la f.é.m. de Peltier.

La loi de Volta nous dit que dans un circuit isotherme, constitué de conducteurs différents, la somme des f.é.m. de Peltier est nulle. On a donc :

$$P_{AB}^\theta + P_{BC}^\theta = P_{AC}^\theta$$

b. Effet Thomson

Entre deux points M et N à température différente, à l'intérieur d'un conducteur homogène A (Figure 7) s'établit une force électromotrice (f.é.m.) qui ne dépend que de la nature du conducteur et des températures aux points M et N (Effet Thomson) :

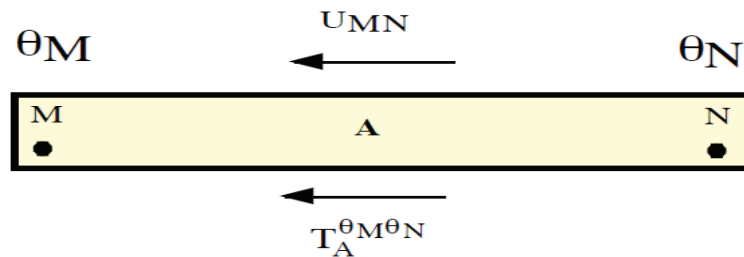


Figure 3.7 Effet Thomson

$$T_A^{\theta_M \theta_N} = \int_{\theta_N}^{\theta_M} h_A \cdot d\theta$$

C'est la f.é.m. de Thomson ; où h_A est le coefficient de Thomson et qui est fonction de la température.

c. Effet Seebeck

Soit un circuit fermé, constitué de deux conducteurs A et B dont les jonctions sont à des températures θ_1 et θ_2 . Ce circuit constitue un couple thermoélectrique ou un thermocouple. Ce couple est le siège d'une force électromotrice dite de **Seebeck** qui résulte des effets de Peltier et de Thomson qui s'y produisent.

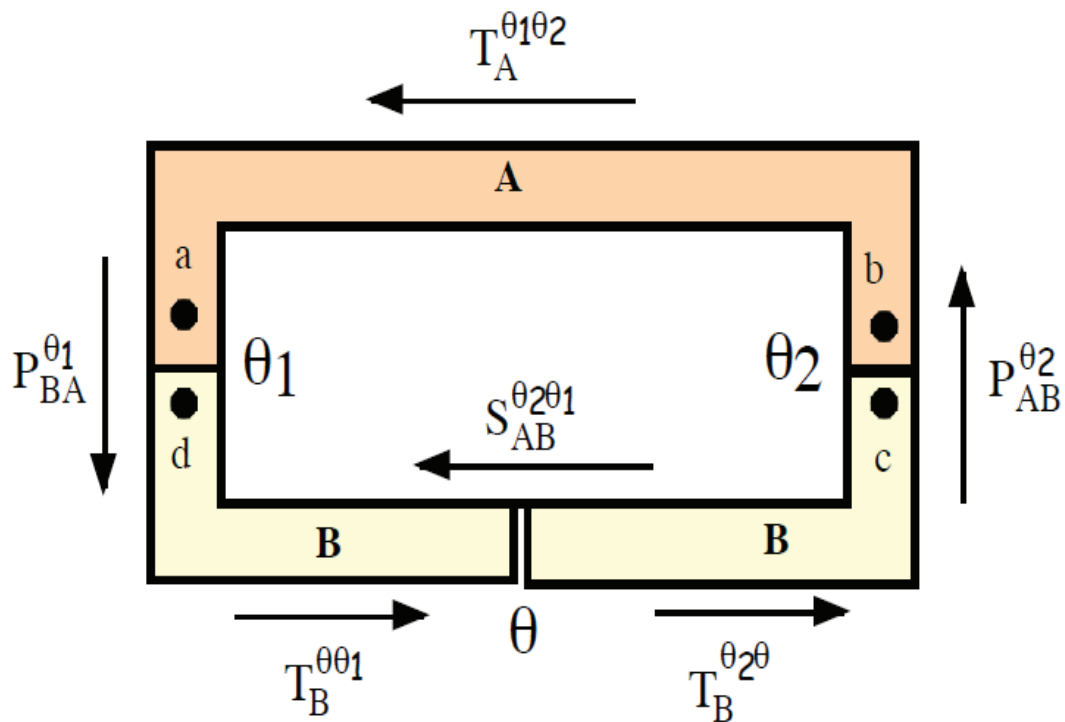


Figure 3.8 : Effet Seebeck

$$S_{AB}^{\theta_2 \theta_1} = T_B^{\theta_2 \theta_1} + P_{AB}^{\theta_2} + T_A^{\theta_1 \theta_2} + P_{BA}^{\theta_1} + T_B^{\theta_1 \theta_2}$$

Donc

$$S_{AB}^{\theta_2 \theta_1} = T_B^{\theta_2 \theta_1} - T_A^{\theta_2 \theta_1} + P_{AB}^{\theta_2} - P_{AB}^{\theta_1}$$

On peut démontrer en utilisant la loi de composition que :

$$S_{AC}^{\theta_2\theta_1} = S_{AB}^{\theta_2\theta_1} + S_{BC}^{\theta_2\theta_1}$$

$$S_{AB}^{\theta_3\theta_1} = S_{AB}^{\theta_3\theta_2} + S_{AB}^{\theta_2\theta_1}$$

Exemple d'application

Un thermocouple fournit une tension qui est fonction de **deux températures** et de sa nature. Pour les thermocouples normalisés, on dispose de tables de références qui fournissent la f.é.m. en fonction d'une température, l'autre, dite de référence, est fixée à 0°C. Pour déterminer la f.é.m. fournie par un thermocouple, on utilisera donc la table correspondante et la formule de compositions des températures.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	50	101	151	202	253	303	354	405	456
10	507	558	609	660	711	762	814	865	916	968
20	1019	1071	1122	1174	1226	1277	1329	1381	1433	1485

Tableau 1 : Thermocouple Fer/Cuivre-Nickel – Tension en μV

Exemple : On cherche la f.é.m. fournie par le thermocouple pour le couple de température : (4°C;27°C).

On peut représenter les données comme sur la figure [relation](#) (Attention : relation de type complexe, représentée ici par un tableau).

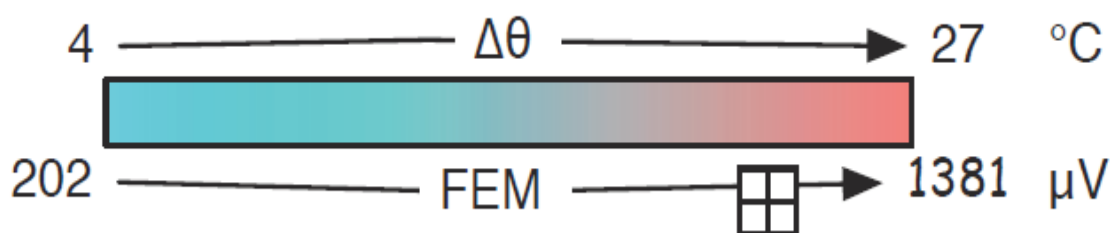


Figure3. 9 : Relation température / f.é.m. pour le thermocouple considéré

Donc la f.é.m. est égale à (1381 μV - 202 μV) soit 1179 μV .

6.2 Les principaux types de thermocouples

Pour la réalisation d'un couple thermoélectrique on choisit des fils utilisables dans la zone de température attendue pour la mesure et présentant des caractéristiques de précision et de sensibilité convenables. On tient compte également de l'action corrosive du milieu ambiant (atmosphère oxydante, réductrice, sulfureuse, etc.) sur les constituants du couple pour arrêter son choix. Le tableau 2 donne les caractéristiques simplifiées des thermocouples les plus courants définies par *la norme CEI 584.1*.

Code littéral	Couple	Usage continue Usage intermittent	Précision en %	Remarques
K	Nickel - Chrome Nickel - Aluminium	0°C à 1100°C -180°C à 1300°C	1,5	Bien adapté aux milieux oxydants
T	Cuivre Cuivre - Nickel	-185°C à 300°C -250°C à 400°C	0,5	
J	Fer Cuivre - Nickel	20°C à 700°C -180°C à 750°C	1,5	Pour milieu réducteur
E	Nickel - Chrome Cuivre - Nickel	0°C à 800°C -40°C à 900°C	1,5	Utilisation sous vide ou milieu légèrement oxydant
R	Platine - 13% Rhodium Platine	0°C à 1600°C 0°C à 1700°C	1	
S	Platine - 10% Rhodium Platine	0°C à 1550°C 0°C à 1700°C	1	Résistance à l'oxydation à la corrosion

Tableau 2 : Caractéristiques simplifiées des différents types de thermocouples

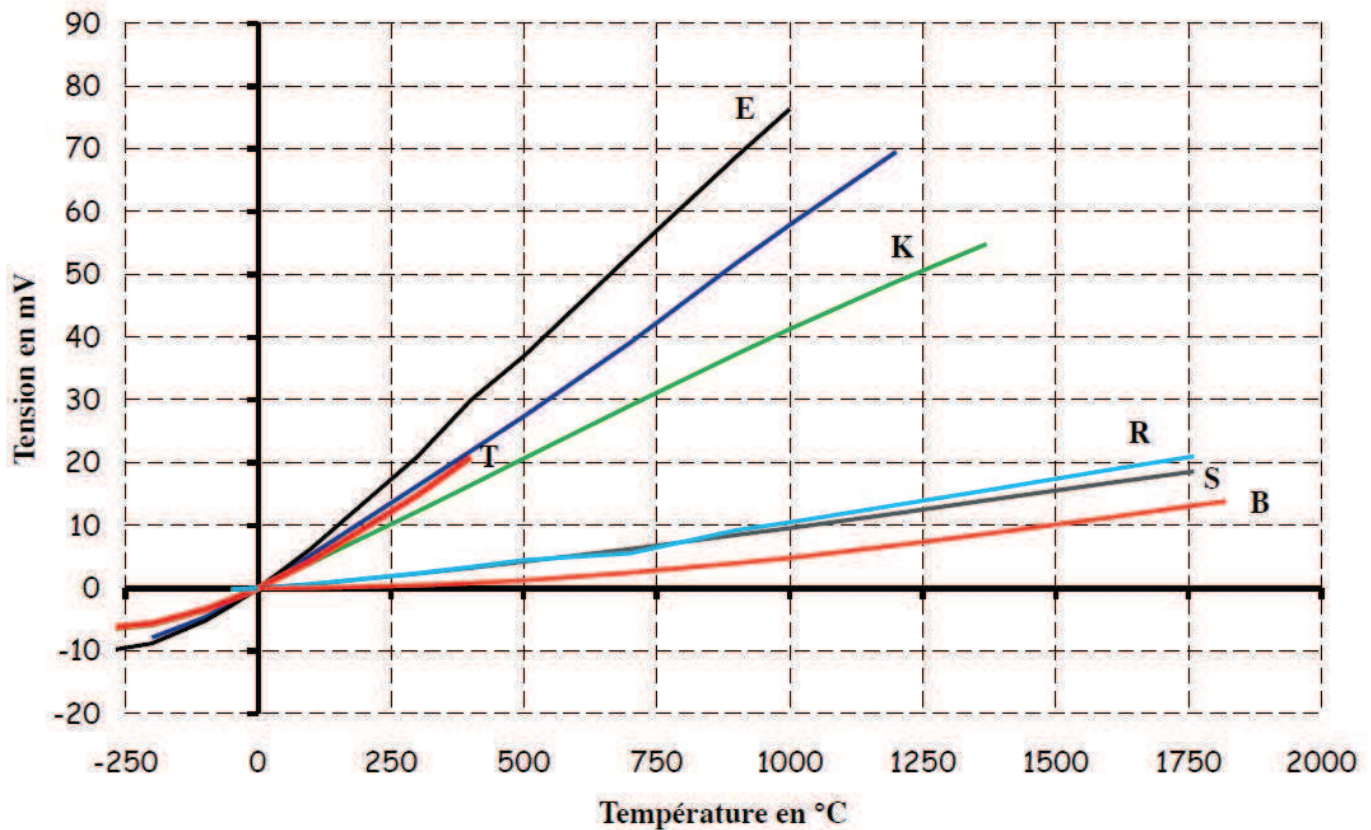


Figure 3.10 f.é.m. en fonction de la température pour différents types de thermocouples

6.3 Câbles de compensation

On utilise les câbles de compensation dans deux cas :

- Lorsque les métaux formant le couple sont d'un prix très élevé (métaux précieux notamment) ;
- Lorsque la distance entre la prise de température et la jonction de référence est grande ;

Il convient alors de réduire la résistance du circuit lorsque la résistance interne de l'appareil de lecture est plus élevée (galvanomètre). Le schéma de câblage de principe est représenté sur la figure 11

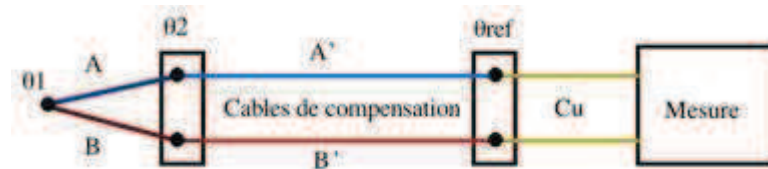


Figure 3.11 Câbles de compensation

On limite au minimum la longueur des fils A et B du thermocouple. La liaison entre la jonction intermédiaire à température Θ_2 et la jonction de référence à température Θ_{ref} est assurée par les câbles de compensation A' et B' associés aux métaux A et B respectivement. La condition à respecter est que la force électromotrice aux bornes des conducteurs A' et B' réunis en couple soit la même que celle du couple (A, B). Cette condition s'exprime par l'équation :

$$S_{AB}^{\theta_2 \theta_{ref}} = S_{A'B'}^{\theta_2 \theta_{ref}}$$

En conclusion, les câbles de compensation A' et B' ne modifient pas la tension délivrée par le couple AB à condition que :

- Les jonctions AA' et BB' soient à même température Θ_2 ;
- Les couples A'B' et AB aient la même force électromotrice de Seebeck entre Θ_2 et 0 °C.

Au-delà de la jonction de référence et jusqu'à l'appareil de mesure, la liaison peut être assurée par des fils de cuivre moins résistants et beaucoup moins chers que les fils du thermocouple et les câbles de compensation eux-mêmes.

Il est important évidemment d'associer convenablement les câbles de compensation et les thermocouples correspondants. Une erreur sur les polarités introduirait une erreur systématique considérable puisque la compensation ne jouerait pas. La nature des câbles de compensation les plus utilisés est indiquée au tableau 3.3 en regard des thermocouples correspondants. Pour le couple [Fer/Constantan], on utilise des câbles de compensation en [Fer/Constantan] qui sont moins onéreux que les

thermocouples car l'objet d'une sélection moins sévère. Il suffit en effet que les câbles de compensation aient la FEM convenable dans la plage limitée où se situera Θ_2 .

Positif	Négatif	Positif	Négatif
Cuivre	Constantan T	Cuivre	Constantan
Fer	Constantan J	Fer	Constantan
Cuivre	Constantan V	Chromel	Alumel
Cuivre	Cupronickel S	Platine Rhodié 10 %	Platine

Tableau 3.3 : Fils de compensation

6.3 Méthodes de mesure

C'est la FEM de Seebeck dont le thermocouple est le siège qui fournit l'information de température cherchée. Elle ne peut être connue avec précision que si l'on minimise la chute ohmique de tension due à la circulation d'un courant dans les éléments du thermocouple et les fils de liaison : leur résistance est en effet généralement mal connue car fonction de la température ambiante d'une part et de la température à mesurer d'autre part.

Deux méthodes sont généralement employées :

- La mesure à l'aide d'un millivoltmètre qui permet de minimiser la chute ohmique si sa résistance interne est élevée.
- La méthode d'opposition qui autorise une mesure rigoureuse puisque dans ce cas le courant traversant le thermocouple est annulé.

Méthode d'opposition :

On place une source de tension variable face à la FEM à mesurer. Quand le courant est nul, la source variable a la même tension que la FEM à mesurer (Figure 3.12).

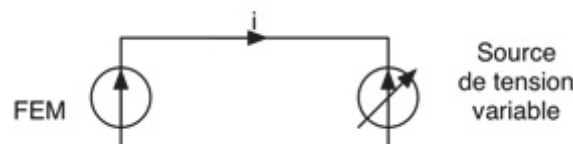


Figure 3.12 : Mesure en opposition

Chapitre 4

Capteurs de pression

1-Introduction

La mesure de pression est une mesure fondamentale, car plusieurs grandeurs physiques sont mesurées par la variation de pression qu'elles entraînent. Par exemple, le niveau dans un réservoir peut être mesuré par un capteur au bas du réservoir mesurant la pression hydrostatique. De même, le débit peut être mesuré par la chute de pression que cause un obstacle dans une conduite. Autre exemple, la température peut être mesurée en observant la pression d'un gaz soumis à cette température.

Au début nous rappelons quelques notions de base. En premier lieu, la pression P d'un fluide est la force F exercée par ce fluide, par unité de surface A , perpendiculairement à cette surface : $P = F/A$.

Si le fluide est immobile, ou si la normale de la surface est perpendiculaire au déplacement du fluide (Figure 4.1), cette pression est dite pression statique.

Si le fluide est en mouvement, il y a apparition de la pression dynamique. La somme de la pression statique et dynamique est appelée pression totale. La pression totale est appliquée sur une surface dont la normale est parallèle au mouvement du fluide (Figure 4.2).

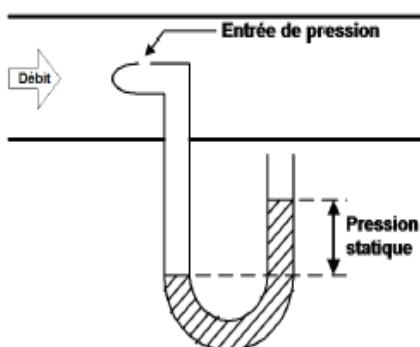


Figure 4.1 Pression statique

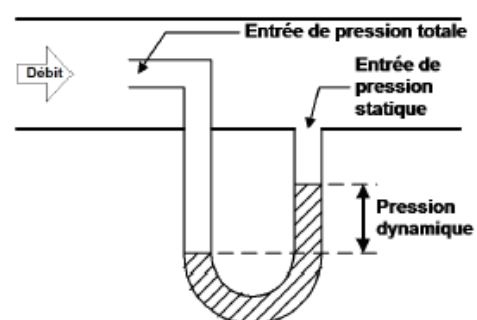


Figure 4.2 Pression totale et dynamique

2-Principe de Pascal

Le principe de Pascal est un autre élément à connaître lorsque l'on aborde le sujet de la mesure de pression. Ce principe se base sur le fait que la pression exercée sur un fluide est transmise dans tous les sens et est appliquée perpendiculairement à la surface du fluide. Ainsi, supposons qu'une force de 125 livres est appliquée à un piston ayant une section de 2 pouces carrées (Figure 5.3).

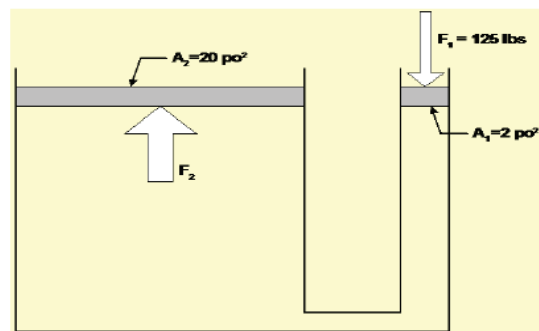


Figure 5.3 Le principe de Pascal

L'ensemble du volume de fluide est donc soumis à une pression de 62.5 livres par pouce carrée ($P = F/A = 125 \text{ lbs}/2 \text{ po}^2$). Si ce fluide est en contact avec un autre piston de 20 pouces carrées, alors la pression appliquée sur ce piston sera de 1250 livres ($F = P A = 62.5 \text{ lbs}/\text{po}^2 \times 20 \text{ po}^2$).

En termes mathématiques, puisque la pression est partout égale et qu'une pression est le rapport d'une force sur une surface, alors on peut écrire :

$$P_1 = P_2$$

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

Ainsi, on peut déduire la force au point 2 à partir de la force au point 1 et du rapport des surfaces

$$F_2 = \frac{A_2}{A_1} \cdot F_1$$

Ce principe est utilisé pour amplifier une force, car si la surface A_2 est égale à kA_1 , alors la force F_2 résultante sera k fois la force F_1 . Un vérin hydraulique (Figure ci-contre) utilise ce principe pour permettre à une personne de soulever des charges élevées.



Unités de mesure

Tout d'abord, il est nécessaire de distinguer entre : la pression absolue, la pression relative et la pression différentielle.

L'unité la plus couramment utilisée est la *livre par pouce carrée* : psi (pound per square inch).

Dans le système métrique, la pression est mesurée en Pascal. Toutefois, le Pascal est une très petite unité, car elle correspond à une force de 1 Newton appliquée sur une surface de 1 mètre carré. Ainsi, les pressions du système métrique sont souvent exprimées en kilo-pascal ou en méga-pascal. La pression atmosphérique est de 101325 Pa ou 101.325 kPa. Un psi équivaut à 6894.7 Pa.

D'autres unités de mesure sont aussi utilisées :

- La pression en millimètre de mercure (Hg) ou en torr : $1 \text{ mm Hg} = 1 \text{ torr} = 133 \text{ Pa}$;
- La pression en pouce de mercure : $1 \text{ po Hg} = 0.49 \text{ psi} = 3386.39 \text{ Pa}$;
- La pression en pouce d'eau : $1 \text{ psi} = 2.77 \text{ po. H}_2\text{O}$;
- La pression en bar : $1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$;
- La pression en atmosphère.

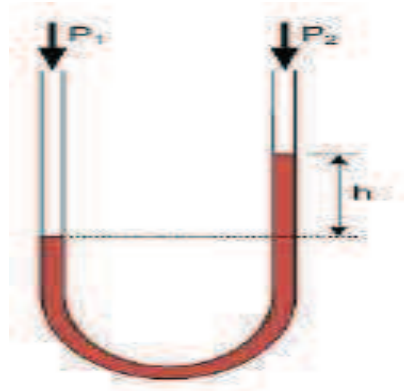
Le fonctionnement des capteurs de pression est basé principalement sur la mesure de la déformation de corps d'épreuve.

Les différents types de capteurs pression sont :

- Manomètre à section uniforme ;
- Manomètre à réservoir ;
- Tube de Bourdon ;
- Capsule anéroïde ;
- Membranes.

3-Manomètre à section uniforme

Le manomètre à section uniforme (Figure ci-dessous) est représenté par un tube en U, de section constante A , dont chaque branche reçoit une pression : P_1 d'un coté et P_2 de l'autre coté.



On suppose que $P_1 \geq P_2$. Le tube est rempli d'un liquide uniforme de masse volumique ρ . La pression P_1 appliquée sur la surface A donne une force $F_1 = P_1.A$. De même, la pression P_2 appliquée sur la surface A donne une force $F_2 = P_2.A$. Si les pressions sont d'amplitudes différentes, il en sera de même pour les forces et cela entrainera un mouvement du liquide. Un point d'équilibre sera atteint et la colonne de liquide du coté subissant la haute pression (P_1) sera à un niveau inférieur celle du coté basse pression (P_2). La différence de niveau h entre les deux cotés du tube en U fera en sorte qu'une masse de liquide $\rho.A.h$ supplémentaire sera présente du coté basse pression. Ainsi, la force F_1 sera contrebalancée par la force F_2 et la force de la gravité associée à la masse de liquide supplémentaire.

Cette force est :

$$F_m = \rho \cdot g \cdot A \cdot h$$

Donc

$$F_1 = F_2 + F_m = F_2 + \rho \cdot g \cdot A \cdot h$$

Ou encore, en divisant les deux cotés par la section A :

$$P_1 = P_2 + \rho \cdot g \cdot h \Rightarrow \Delta P = P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot h$$

$$\text{D'où } h = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g}$$

La hauteur h est donc proportionnelle à la différence de pression ΔP

4- Manomètres à réservoir

Le manomètre à réservoir est une variante du manomètre à section uniforme. Une pression P_1 est appliquée au réservoir de section A_1 et une pression $P_2 \leq P_1$ est appliquée au tube de section A_2 (inférieure à A_1). Comme pour le manomètre à section uniforme, le liquide se déplace à un nouveau *point d'équilibre* lorsque les pressions P_1 et P_2 sont différentes.

Du côté du réservoir, la pression totale est la somme de la pression P_1 et la pression hydrostatique du réservoir $\rho \cdot g \cdot (L - h)$.

Du côté du tube, la pression totale est la somme de la pression P_2 plus la pression hydrostatique de la colonne $\rho \cdot g \cdot (L + H)$.

Ces deux pressions étant égales, on peut écrire :

$$P_1 + \rho \cdot g \cdot (L - h) = P_2 + \rho \cdot g \cdot (L + H)$$

Ce qui peut être simplifié à :

$$\Delta P = P_1 - P_2 = +\rho \cdot g \cdot (h + H)$$

Le volume de liquide déplacé dans le manomètre est représenté par une diminution de hA_1 dans le réservoir ou un gain de HA_2 dans la colonne.

Ces deux quantités sont par conséquent égales, ce qui fait que h et H sont proportionnels :

$$h = H \cdot \frac{A_2}{A_1}$$

Si la section A_1 du réservoir est beaucoup plus grande que la section A_2 du tube ($A_1 \gg A_2$), alors on peut négliger la hauteur h dans l'équation précédente.

$$\Delta P \approx \rho \cdot g \cdot H$$

5-Tube de Bourdon

Le tube de Bourdon est un corps d'épreuve souvent utilisé dans les manomètres de pression (Figure 5.4). Il consiste en un tube plié en forme de "C" (Figure 5.5). Lorsque l'intérieur du tube subit une pression, celle-ci est appliquée sur toutes les parois du tube.



Figure 5.4 Tube de Bourdon

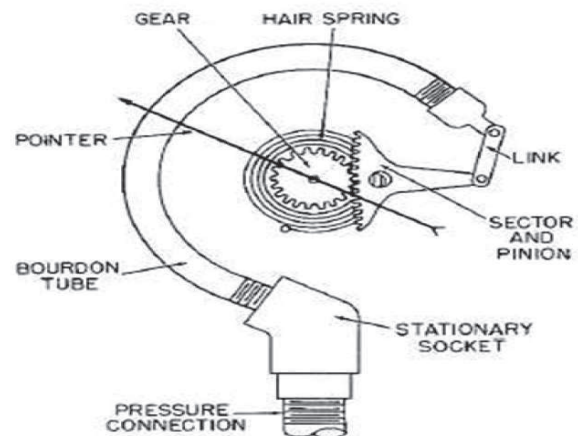
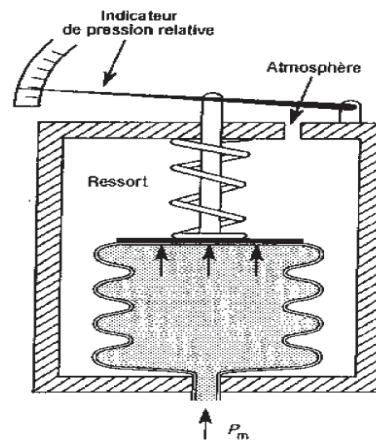


Figure 5.5 Schéma de principe du tube de Bourdon

En raison de la forme du tube, la surface à l'intérieur du "C" est supérieure à celle à l'extérieur du "C". Cette différence de surface entraîne l'apparition d'une force de torsion lorsqu'une pression est appliquée sur le tube. La déformation du tube est amplifiée par un mécanisme à pignons et engrenages.

6-Capsule anéroïde

Une capsule anéroïde peut être une capsule étanche en forme de disque dont le vide a été fait à l'intérieur. Les variations de la pression à l'extérieur de la capsule causent sa déformation que l'on mesure pour déduire la pression. La capsule anéroïde peut aussi recevoir la pression à mesurer de l'intérieur



7-Manomètre à membrane

La membrane est l'un des corps d'épreuve les plus utilisés pour la mesure de pression. La différence de pression entre les deux cotés d'une membrane entraîne sa déformation. Un système mécanique peut faire déplacer une aiguille en fonction de la déformation. La déformation centrale de la membrane est calculée par :

$$\Delta P = P_1 - P_2 = +\rho \cdot g(h + H)$$

$$\Delta P = P - P_{ref}$$

$$= \frac{16Ee^4}{3R^4(1-\nu^2)} \left(\frac{z}{e} + 0.488 \left(\frac{z}{e} \right)^3 \right)$$

La différence de pression $\Delta P = P_1 - P_{ref}$ cause un déplacement du centre de la membrane d'une amplitude z . Les paramètres utilisés dans l'équation ci-dessus sont : le module de Young E qui dépend du matériau de la membrane;

le coefficient de Poisson ν ; le rayon R de la membrane ; et l'épaisseur e de la membrane.

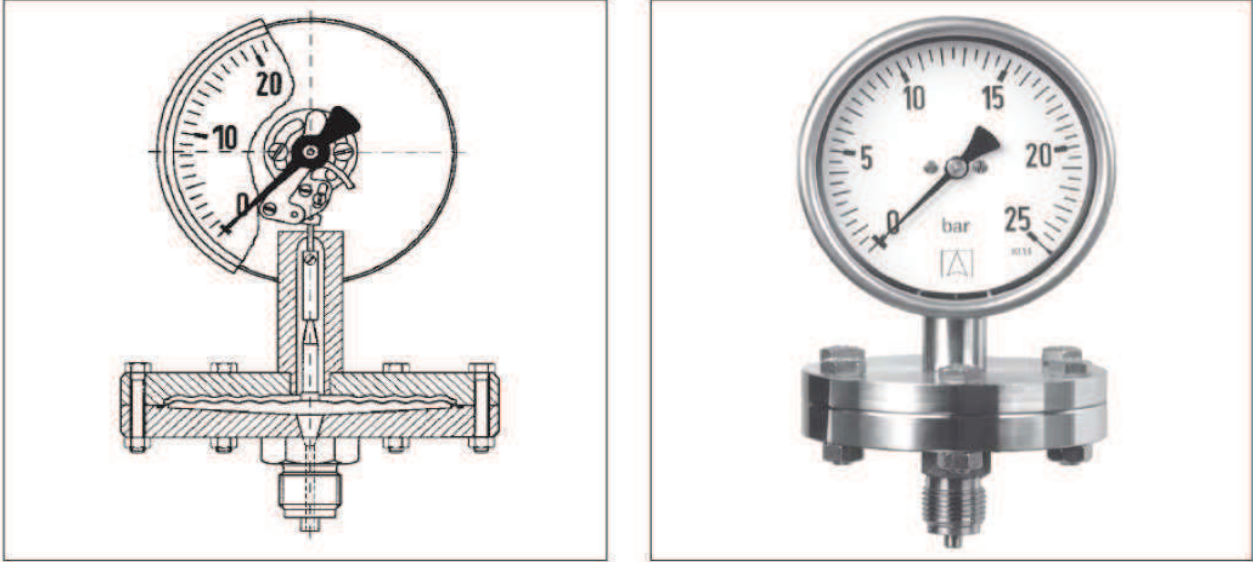


Figure 5.6- Manomètre à membrane

Chapitre 5

ACTIONNEURS

1-Généralités

Selon une Directive sur les Machines émanant de l'Union Européenne, une machine est un ensemble de pièces ou d'organes liés entre eux, dont au moins un est mobile, réunis de façon solidaire en vue d'une application définie, notamment pour la transformation, le traitement, le déplacement et le conditionnement d'un matériau. Une machine comprend également tous les composants d'alimentation en énergie et d'automatisation nécessaires à son fonctionnement. Un ensemble de machines est également considéré comme une machine.

Au sens plus large du terme, les centrales de production d'électricité à partir d'énergie mécanique sont aussi des machines.

A titre d'exemple, une turbine entraînée par une chute d'eau fait tourner un alternateur qui délivre de l'électricité.

Dans une machine ou un système de commande à distance, semi automatique ou automatique, un *actionneur* est l'organe de la partie opérative qui, recevant un ordre de la partie commande via un éventuel pré-actionneur, convertit l'énergie qui lui est fournie en un travail utile à l'exécution de tâches, éventuellement programmées, d'un système automatisé.

En d'autres termes, un actionneur est l'organe fournissant la force nécessaire à l'exécution d'un travail ordonné par une unité de commande distante.

Les mouvements des machines remplissent une ou plusieurs des fonctions suivantes :

- Entraîner une pompe ou un ventilateur, pour déplacer ou comprimer des liquides, des gaz ou de l'air ;
- Entraîner une broche, c'est-à-dire un outil de coupe, de perçage ou d'usinage comme une scie, un taraud, un disque de polissage, etc. ;
- Saisir un objet et le maintenir pendant son usinage ou son déplacement ;

- Déplacer un objet d'un endroit à un autre, pour le stocker ou le remettre dans le circuit de production, pour le placer en vue d'un usinage ou d'un traitement, pour l'emballer et le préparer à la livraison, etc. ;

- Déplacer un objet en suivant une trajectoire déterminée, afin de le présenter sous un outil d'usinage, de découpe, de traitement thermique, etc. ;

- Former ou déformer un objet, par exemple pour le plier et pour le mouler.

L'objet saisi et déplacé est généralement le produit en cours d'élaboration par la machine, mais ce peut être également un outil, voire une machine complète, parfois même avec son conducteur et des passagers, comme dans le cas d'un ascenseur ou d'un véhicule.

Chaque déplacement peut être :

- Une suite de mouvements en va et vient limités entre deux positions, comme les extrémités gauche et droite d'une table X-Y de machine-outil ;

- Une suite de mouvements monodirectionnels, souvent périodiques, comme dans un convoyeur de chantier ou le bobinage de fils.

2- Les types d'actionneurs

Les composants permettant de mettre en mouvement les organes de machines sont appelés actionneurs. Ce sont essentiellement des moteurs et des vérins.

Ils produisent de l'énergie mécanique à partir d'énergie électrique, hydraulique ou pneumatique, mais sont presque toujours contrôlés par des signaux de commande électriques. Les actionneurs sont souvent complétés par des accouplements mécaniques et/ou des réducteurs.

- un vérin pneumatique ou hydraulique génère un mouvement à partir d'une énergie mécanique transmise par un fluide gazeux ou liquide.

- à partir de l'énergie électrique, il est possible d'avoir :

- un mouvement grâce à un moteur électrique,
- de la chaleur grâce à une résistance chauffante,
- de la lumière grâce à une lampe,
- un champ magnétique grâce un électroaimant,
- un son grâce à une enceinte acoustique.

Dans le domaine des micro-technologies, on peut citer les céramiques piézoélectriques, les actionneurs électrostatiques ou magnétostrictifs.

Les actionneurs peuvent être linéaires, c'est-à-dire que le mouvement produit est proportionnel à la commande.

Le développement de l'automatisation spécifique dans l'industrie a provoqué une croissance exceptionnelle de l'utilisation des actionneurs et composants d'automatisation, et notamment dans le domaine :

✓ Automobile : concevoir des produits conformes à toutes les normes s'appliquant au secteur automobile. Cela s'applique à une vaste gamme de composants d'automatisme couvrant des normes telles que CNOMO, DIN, ISO, VDMA, NAAMS, etc.

✓ Électronique : répondre à certaines applications parmi les plus exigeantes (ex : contrôle des mouvements, températures et fluides). Cela avec une vaste gamme de produits standard et spécifiques à l'industrie, ex. : composants à vide poussé & à nettoyage par voie humide, thermo-refroidisseurs, ioniseurs, préparation d'air propre & transfert de salle blanche, et bien d'autres produits spécialisés.

✓ Médical : des fabricants de médicaments aux fabricants d'instrumentation avec toujours plus d'intérêt pour les solutions miniaturisées et économes en énergie.

✓ Alimentaire : avec l'application de solutions innovantes dans le respect de la stricte réglementation des productions alimentaires et de leur conditionnement.

A. Actionneurs pneumatiques

Les actionneurs pneumatiques sont utilisés principalement pour des mouvements séquentiels simples.

Ils utilisent de l'air comprimé au environ de 6 bar et permettent de réaliser des vérins dont la force peut atteindre 50.000 N.

L'air est fourni par un compresseur, complété de filtres, d'un séparateur d'eau et d'un déshuileur. Il est souvent produit pour tout un atelier, et distribué à toutes les machines.

Les actionneurs sont généralement des vérins linéaires, mais aussi des moteurs rotatifs. On utilise également des aspirateurs suceurs à vide pour saisir des objets. Ils sont commandés en tout ou rien par des distributeurs, actionnés mécaniquement ou électriquement.

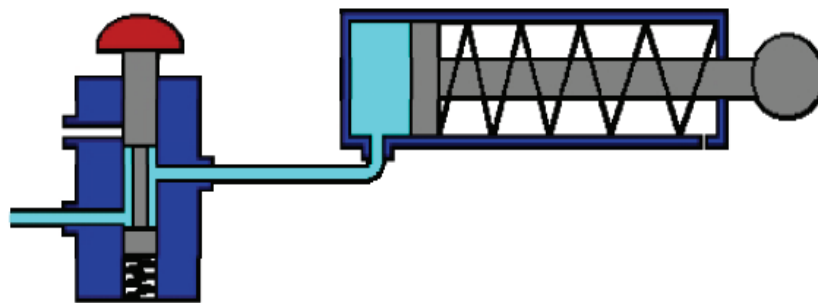


Figure 5.1 Principe de fonctionnement d'un actionneur pneumatique

Dans certains cas, l'actionneur pneumatique réagit en continu en fonction du débit ou de la pression pneumatique. On utilise alors un **distributeur proportionnel**. La pression à sa sortie peut être modulée entre 0 et 10 bars en fonction de la tension électrique appliquée. Il est ainsi possible de contrôler par exemple la vitesse d'un mouvement ou la force d'un serrage.

Avantages : Les actionneurs pneumatiques se distinguent par des faibles coûts d'entretien et des besoins minimaux en qualification du personnel. Ils conviennent particulièrement bien aux milieux hostiles : hautes température et humidité

ambiantes, atmosphère explosive. Ils permettent de produire des vitesses élevées, comme dans certaines fraises de dentiste (quelques 200.000 tr/min).

Inconvénients : L'air comprimé est très élastique, ce qui ne permet pas d'obtenir des temps de réaction inférieurs à quelques 20 ms. Parfois, les bruits dus à des fuites ou à l'échappement sont considérés comme gênants.

Coûts : Les actionneurs pneumatiques représentent souvent la solution d'automatisation la moins chère.

Si leurs performances répondent aux besoins, il ne faut pas hésiter à les utiliser.

Les entraînements pneumatiques sont traditionnellement présents dans les chaînes d'assemblage, par exemple pour les composants nécessaires à l'industrie automobile. Ils sont utilisés pour actionner certaines machines outils, comme des petites presses, des machines de transfert, etc.

B. Actionneurs hydrauliques

Les actionneurs hydrauliques sont utilisés pour des mouvements requérant des forces très élevées à faible vitesse. Utilisant de l'huile sous des pressions atteignant 400 bar, ils permettent de réaliser des vérins de force prodigieuse (jusqu'à 3.000.000 N, soit 300 tonnes force). Leurs temps de réponse sont plus rapides que pour l'air (quelques millisecondes), car l'huile est presque incompressible.

L'huile est fournie par une **pompe hydraulique** qui fait généralement partie de la machine. Elle est distribuée par des tuyaux vers les organes récepteurs. L'huile qui s'échappe lors du fonctionnement des actionneurs est intégralement récupérée, et ramenée à la pompe après filtrage et refroidissement éventuel.

Les actionneurs sont des **vérins linéaires** ou des **moteurs rotatifs**. Leur action est contrôlée par des **distributeurs**. Ils peuvent être de type tout ou rien, agissant comme des aiguillages, ou de type proportionnel, permettant de moduler la pression ou le débit d'huile.

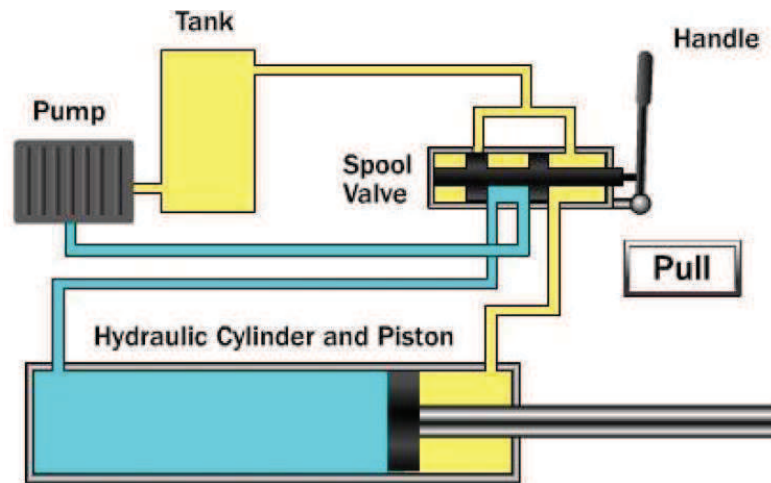


Figure 5-2 Principes d'un vérin linéaire et de son actionneur

Avantages : Les actionneurs hydrauliques sont des composants très performants. Ils sont appréciés pour leur prodigieuse **densité d'énergie** pouvant atteindre 40 MJ/m³ (très forte énergie pour un faible encombrement des actionneurs).

Inconvénients : Par contre, on évite de les utiliser en construction de machines, à cause des dangers et désagréments liés aux inévitables fuites d'huile.

Pour ces raisons, ils dominent le marché des véhicules de chantiers, des grandes presses et des plieuses de l'industrie lourde en général. Ils étaient également utilisés dans l'aéronautique pour la commande de gouverne d'avions, mais même dans ces applications où le rapport poids / énergie est très important, des alternatives électriques sont maintenant préférées (*drive by wire*).

C. Moteurs électriques

Les moteurs électriques sont disponibles dans une très large gamme de puissance (de <10 mW à >100 MW).

Faciles à mettre en œuvre, ne présentant que peu de problèmes d'usure, ils sont utilisés pour pratiquement tous les mouvements rotatifs et une très grande partie des mouvements linéaires des machines et installations. Leur temps de réponse pouvant être de l'ordre de 0,1 milliseconde, ils sont également appréciés pour toutes les applications à forte dynamique et grande précision.

Le grand nombre de fournisseurs et la diversité des technologies sont également des avantages significatifs. De plus, l'énergie électrique est plus souple d'emploi et se prête facilement aux commandes et réglages automatiques.

Le choix de la technique d'entraînement peu se résumer comme suit :

- i. pour les mouvements linéaires simples, relativement lents et de faible puissance, les entraînements pneumatiques sont préférés, surtout à cause de leur faible prix ;
- ii. pour les mouvements linéaires nécessitant des forces très élevées, les entraînements hydrauliques l'emportent, grâce à leur densité d'énergie qui peut atteindre 40 MJ/m^3 ;
- iii. pour tous les autres mouvements, les entraînements électriques sont préférés ; ils n'offrent qu'une densité d'énergie de $0,4 \text{ MJ/m}^3$, mais sont capables de réagir 1'000 fois plus rapidement qu'un système hydraulique, ce qui leur donne l'avantage sur le plan de la puissance volumique.

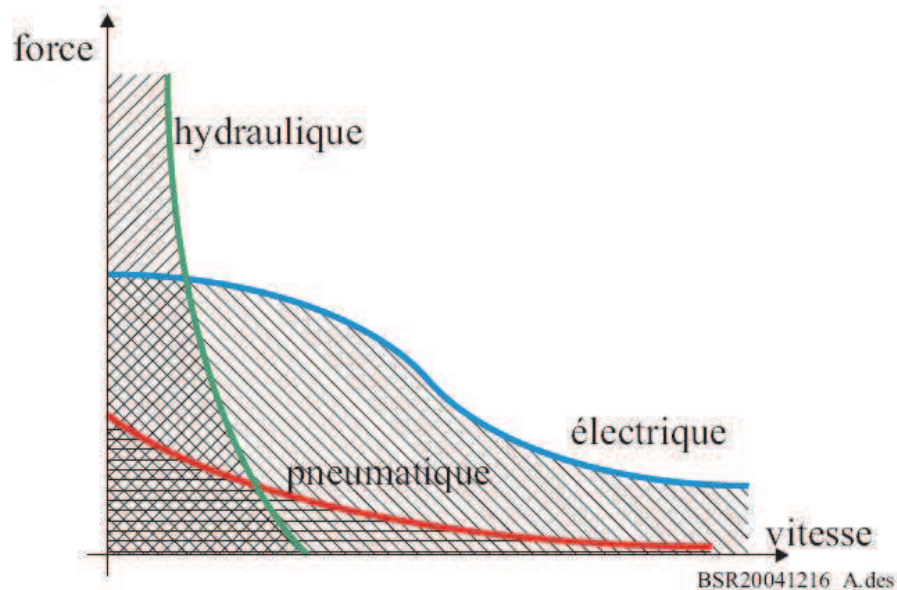


Figure 5.3 Comparaison de performances des moteurs et actionneurs électriques, pneumatiques et hydrauliques

Un **vérin** pneumatique ou hydraulique sert à créer un mouvement mécanique, et consiste en un tube cylindrique (le cylindre) dans lequel une pièce mobile (le piston)

sépare le volume du cylindre en deux chambres isolées l'une de l'autre. Un ou plusieurs orifices permettent d'introduire ou d'évacuer un fluide dans l'une ou l'autre des chambres et ainsi déplacer le piston. Une tige rigide est attachée au piston et permet de transmettre effort et déplacement.

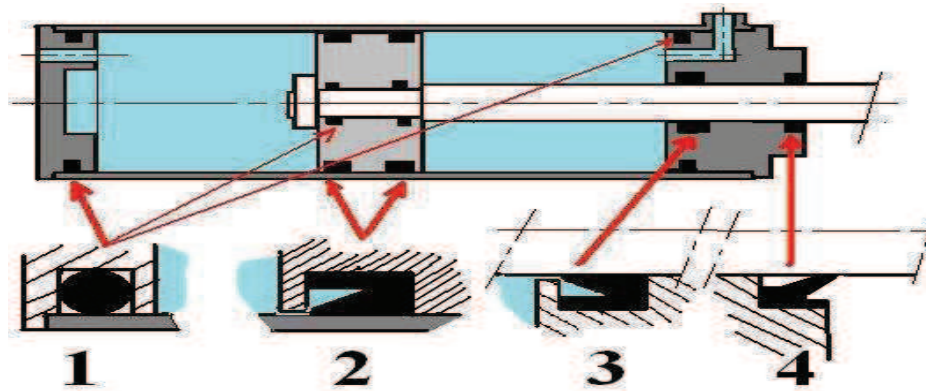


Figure 5.4 Principe de fonctionnement d'un vérin pneumatique

Généralement la tige est protégée contre les agressions extérieures par un traitement augmentant la dureté superficielle. Selon les conditions d'exploitation, des revêtements appropriés à base de chrome, de nickel et chrome ou de céramique sont réalisés. L'étanchéité entre les chambres du vérin ou entre corps et tige est réalisée par des joints. Cette fonction est primordiale, car elle caractérisera le rendement et la durée de vie du vérin. On protégera particulièrement le vérin des risques d'introduction de pollution par la tige grâce à l'installation d'un joint racleur. Le guidage est assuré par des porteurs en matériaux à faible friction (bronze, matériaux composites, ...). Leur choix dépendra du fluide et des caractéristiques de charge et de vitesse du vérin. Un **vérin** manuel vis-écrou ou électrique consiste en un mécanisme vis-écrou.

D. Différents types de vérins :

Il existe de plusieurs types de vérins. On les distingue par :

- le fluide de travail (vérins hydrauliques, vérins pneumatiques),
- leur action (simple action ou simple effet, double action ou double effet, rotatif),

- d'autres caractéristiques (vérins à chambre ovale, vérins à double tige, vérins à câble, vérins télescopiques, etc.)

Vérin à vis de Léonard de Vinci

✓ **Le vérin pneumatique** : Il est utilisé avec de l'air comprimé entre 2 et 10 bars dans un usage courant.

Simple à mettre en œuvre, il est très fréquent dans les systèmes automatisés industriels.

Les vérins standards varient suivant leurs alésages et leur compacité auxquels on peut adjoindre différentes options : fixation universelle, tige anti-rotation, salle blanche).

Les vérins se définissent aussi suivant leur fonction : bloqueur, avec table, guidé, à tige anti-rotation et sans tige.

Pour des applications spécifiques, les vérins spéciaux offrent différentes adaptations : bride rotative, stoppeur, sinusoïde, faible vitesse, faible frottement, haute précision, en acier inox, 3 positions, séparateurs.

- Le **vérin hydraulique** transforme l'énergie hydraulique (pression, débit) en énergie mécanique (effort, vitesse). Il est utilisé avec de l'huile sous pression, jusqu'à 350 bars dans un usage courant. Plus coûteux, il est utilisé pour les efforts plus importants et les vitesses plus précises (et plus facilement réglables) qu'il peut développer.

- Le **vérin manuel vis-écrou** : La tige du vérin est une vis hélicoïdale (guidée en rotation) entraînée par un écrou (fixe en translation). L'écrou est actionné par un levier ou par un système de vis sans fin qui, en tournant, fait monter ou descendre la tige.

- les **vérins électriques** qui produisent un mouvement comparable mais avec l'aide d'un système vis-écrou (liaison glissière hélicoïdale), dont l'écrou est entraîné par un moteur électrique.

E- Caractéristiques d'un vérin

Un vérin se caractérise par sa course, par le diamètre de son piston et par la pression qu'il peut admettre :

- La course correspond à la longueur du déplacement à assurer,
- L'effort développé dépend de la pression du fluide et du diamètre du piston.

La force développée par un vérin est : $F=P \times S$

- F est la force développée exprimée en newtons.
- P est la pression exprimée en pascals
- S est la surface d'application de la pression exprimée en mètres carrés.

En automatismes, on emploie également les **unités pratiques** :

F en **daN**, P en **bar** et S en **cm²**.

On emploie aussi couramment F en **N**, P en **MPa** et S en **mm²**.

La vitesse de sortie du piston est fonction de la surface du piston et du débit de fluide qui rentre dans la chambre motrice: $v = \frac{Q}{S}$

V la vitesse en **m/s**.

Q le débit volumique en **m³/s**.

S la surface d'application (surface du piston) en **m²**.

Le produit de la surface du piston par la course donne la cylindrée du vérin; elle correspond au volume de fluide nécessaire pour sortir toute la tige du piston.

On vérifiera l'élançement de la tige pour éviter son flambement en poussant. Pour les grands vérins à grande course on utilise des tiges creuses alimentées en huile pour réduire le risque de flambement.

- **Vérin simple effet (VSE).**

Un vérin *simple effet* ne travaille que dans un seul sens (souvent, le sens de sortie de la tige). L'arrivée de la pression ne se fait que sur un seul orifice d'alimentation ce qui entraîne le piston dans un seul sens, son retour s'effectuant sous l'action d'un ressort ou d'une force extérieure (fréquent en hydraulique).

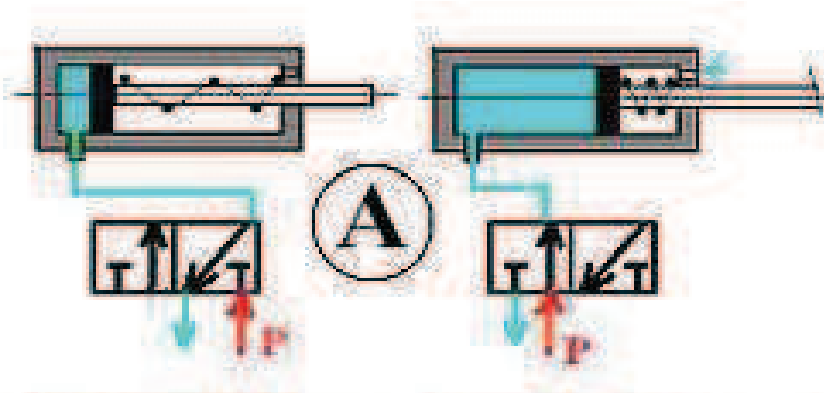


Figure 5.5 Vérin simple Effet.

L'utilisation d'un distributeur à une seule sortie est donc suffisante (distributeur 3/2) ou d'un clapet logique pour les débits plus importants. L'emploi de ces vérins reste limité aux faibles courses. L'usage des vérins simple effet est également très courant dans les presses hydrauliques. Ils permettent de développer des efforts très importants. Ils sont alors associés à des vérins de plus faibles sections permettant de réaliser les vitesses rapides d'approche ou de rappel. Des clapets de grosse section permettent le remplissage ou la vidange rapide des vérins et sont directement raccordés au réservoir souvent situé en charge.

Bibliographie

- 1- Les capteurs en instrumentation industrielle, Georges Asch et Collaborateurs, Edition Dunod 1999.
- 2- Instrumentation industrielle - Spécification et installation des capteurs et des vannes de régulation, Michel GROUT, Edition Dunod 2002.
- 3- Sensors and transducers, Ian R. Sintclair NEWNES 2001.
- 4- Sensor Technology Handbook, J.S. Wilson.
- 5- Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook, J. G. Webster, Taylor & Francis Ltd.
- 6- <https://cours.etsmtl.ca/sys823/matiere.htm>, Pr. Guy Gautier.
- 7- <http://michel.hubin.pagesperso-orange.fr/capteurs/instrum.htm>, Pr.M Hubin
- 8- Capteurs et actionneurs, Dr S. BENSALID.
- 9- Les actionneurs électriques pour la robotique et les asservissements, Gérard Lacroux, Lavoisier 1994.
- 10- [www.iai.heig-vd.ch/.../Motorisation et commande des machines](http://www.iai.heig-vd.ch/.../Motorisation%20et%20commande%20des%20machines).
- 11- Guide des solutions d'automatisme, Schneider Electric, 2008
- 12- Wireless Sensor and Actuator Networks: Technologies, Analysis and Design Roberto Verdone, Davide Dardari, and Gianluca Mazzini. 2007.
- 13- Introduction to Sensors and Actuators (Circuits and Devices), Nathan Ida 2013
- 14- Control Sensors and Actuators Clarence. W. De Silva. 1989.
- 15- Mechatronic Systems, Sensors, and Actuators: Fundamentals and Modeling (The Mechatronics Handbook), Robert H. Bishop. 2007.
- 16- Sensors and Actuators: Control System Instrumentation., Clarence W. de Silva. 2000.

- 17-Analog Circuit Design: RF Analog-To-Digital Converters; Sensor and Actuator Interfaces; Low-Noise Oscillators, PLLs and Synthesizers, Rudy J. Van De Plassche. 2010.
- 18-Fault-Diagnosis Applications: Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-Tolerant Systems, Rolf Isermann. 2011.
- 19-Sensor-Actuator Supported Implicit Interaction in Driver Assistance Systems, Andreas Riener. 2010.
- 20- Automated Manufacturing Systems: Actuators, Controls, Sensors and Robotics (Mechanical technology series), S.Brian Morriss. 1994.
- 21- Sensors and Actuators, D.A. Hall and C.E. Millar. 1999.
- 22-Piezoelectric Multilayer Beam Bending Actuators: Static and Dynamic Behavior and Aspects of Sensor Integration, Rüdiger G. Ballas. 2007
- 23-Chemical Sensors and Biosensors: Fundamentals and Applications, Florinel-Gabriel Banica. 2012.
- 24-Numerical Simulation of Mechatronic Sensors and Actuators, Manfred Kaltenbacher. 2004
- 25-Electromechanical Sensors and Actuators (Mechanical Engineering Series), Ilene J. Busch-Vishniac. 2012.
- 26-Precision Sensors, Actuators and Systems: 17 (Solid Mechanics and Its Applications), Hornsen Tzou and Toshio Fukuda. 2012.
- 27-Hall-Effect Sensors Theory and Application, Edward Ramsden. 2006.