

Chapitre 1. Généralités :

Les capteurs (passifs, actifs), les circuits de conditionnement (diviseur, ponts, amplis et ampli d'instrumentation), Les éléments constitutifs d'une chaîne de mesure

Introduction

Dans les laboratoires de recherche scientifique comme dans les installations industrielles l'une des tâches principales du chercheur comme du technicien est d'effectuer les mesures des grandeurs physiques variées qui déterminent leurs expériences ou conditionnent le déroulement correct de leurs fabrications.

Afin d'être menée à bien, l'opération de mesure nécessite généralement que l'information qu'elle délivre soit transmise à distance du point où elle est saisie, protégée contre l'altération par des phénomènes parasites, amplifiée, avant d'être exploitée de diverses manières : affichée, enregistrée, traitée par ordinateur.

L'électronique offre à cet égard des moyens divers et puissants : pour en tirer le meilleur parti et qu'en bénéficient les mesures de tous types de grandeurs physiques, comme leur traitement et leur exploitation, il est très souhaitable de transposer immédiatement sous la forme d'un signal électrique chacune des grandeurs physiques intéressantes.

C'est le rôle du capteur que d'assurer cette duplication de l'information en la transférant, au point même où se fait la mesure, de la grandeur physique (non électrique) qui lui est propre, sur une grandeur électrique : courant, tension, charge ou impédance.

I.- Définitions

- **Mesurande** : La grandeur physique qui est l'objet de la mesure (déplacement, température, pression, etc...) et qui est représentée par le symbole "**m**"

Les domaines d'évolution sont:

- statique → peu ou pas de changement dans le temps
- dynamique → évolution continue dans le temps

- **Mesurage ou mesure** : Ensemble des opérations expérimentales qui concourent à la connaissance dans le temps de la valeur numérique du mesurande.

- **Capteur** Dispositif qui transforme la grandeur physique à mesurer en un signal de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) désignée par "**s**" :

s est donc 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 la connaissance aussi exacte que possible du mesurande "m".

La fonction f dépend de plusieurs facteurs:

- Lois physiques qui régissent le fonctionnement du capteur
- Construction, matériau, environnement, etc.

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 :

$$\Delta s = S. \Delta m$$

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 (**vieillessement**) ;
- 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**.

II. Classification des capteurs

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.

II.1 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 suivant

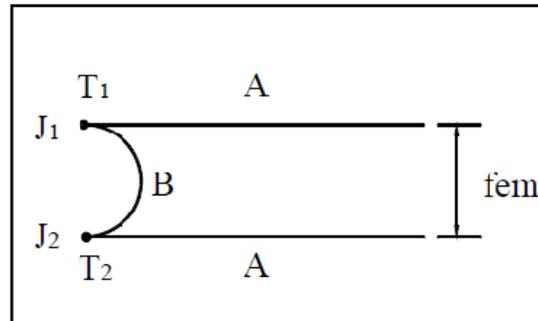
Tableau 1 – Capteurs actifs : principes physiques de base.

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 2 conducteurs chimiquement différents dont les jonctions J1 et J2 sont à des températures différentes (T_1 et T_2) induisent une force électromotrice (fém) proportionnelle à la différence de température.

Ex. : Thermocouple



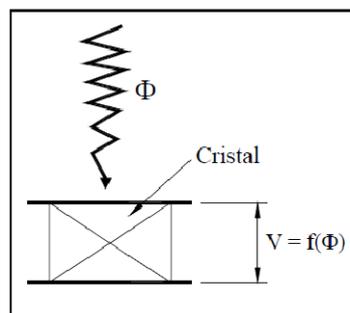
- Effets pyroélectrique :

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

Φ : flux de rayonnement lumineux

V : variation de tension aux bornes d'un condensateur associé



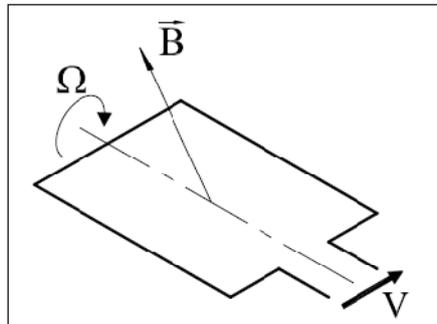
- Induction électromagnétique :

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ d'induction fixe, il se crée une fém proportionnelle au flux coupé par unité de temps, donc à sa vitesse de déplacement.

Ω : rotation du cadre

B : induction fixe

V : fém créé

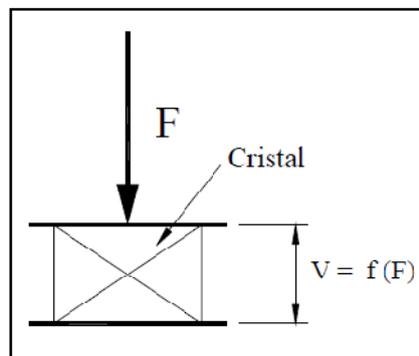


- Effets piezo-électrique :

L'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux (Ex. cristaux de quartz) entraîne une déformation qui crée des charges électriques égales et de signes opposés sur les faces sous charge.

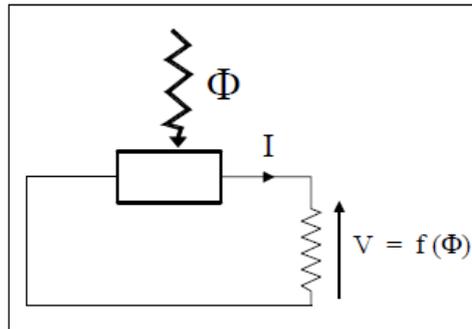
F : force de compression

V : variation de tension aux bornes d'un condensateur associé



Effets photoélectriques :

Libération de charges électriques dans la matière sous l'incidence d'un rayonnement électromagnétique lumineux dont la longueur d'onde est inférieure à une valeur seuil qui dépend du matériau. Ce phénomène peut prendre plusieurs formes : effet photoémissif, photovoltaïque, photoélectromagnétique.



- Effets Hall :

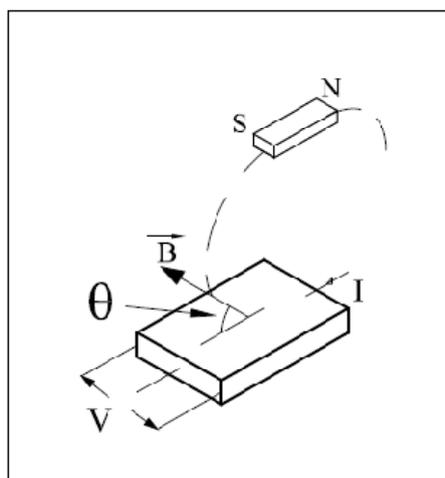
Un matériau, généralement semi-conducteur et sous forme de plaquette, est parcouru par un courant I et soumis à une induction B faisant un angle θ avec le courant. Il apparaît, dans une direction perpendiculaire à l'induction et au courant une tension vH qui a pour expression :

$$vH = KH I B \sin \theta$$

où KH 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 vH , qui par ce biais est fonction de la position de l'objet en assure donc une traduction électrique

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



II.2 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, éclairage, 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 suivant* 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 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, antimoine d'indium.
Humidité	Résistivité Constante diélectrique	Chlorure de lithium. Alumine; polymères.
Niveau	Constante diélectrique	Liquides isolants.

III. Circuits de conditionnement

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.

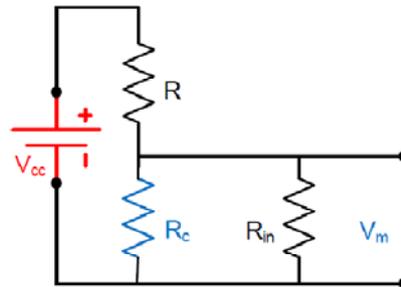
Le choix d'un conditionneur est une étape importante dans la réalisation d'un ensemble de mesure. C'est, en effet, l'association capteur-conditionneur qui détermine le signal électrique ; de la constitution du conditionneur dépendent un certain nombre de performances de l'ensemble de mesure : sensibilité,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

III.1 Montage potentiométrique

Dans un montage potentiométrique, la tension mesurée V_m est (si $R_{in} \gg R_c$):

$$V_m = V_{cc} \frac{R_c}{R + R_c}$$

Avec V_{cc} la tension appliquée au potentiomètre; R la résistance en série avec la résistance du capteur R_c pour obtenir un diviseur de tension et R_{in} l'impédance d'entrée du module électronique de conditionnement (généralement beaucoup plus grand que la résistance du capteur R_c).



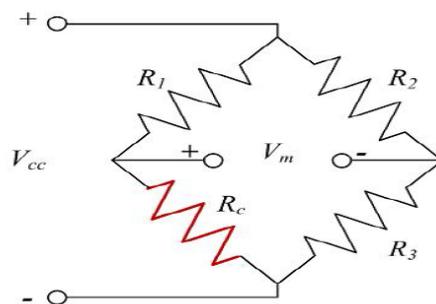
III.2 Montage dans un pont de Wheatstone

Dans un montage en pont, la tension mesurée V_m est

$$V_m = V_{cc} \left(\frac{R_c}{R_1 + R_c} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right)$$

Elle dépend de la tension d'alimentation du pont V_{cc} ; des résistances R_1 , R_2 et R_3 et de la résistance R_c de l'élément de transduction du capteur. Si les trois résistances R_1 , R_2 et R_3 sont posées égales à R , on peut écrire:

$$V_m = V_{cc} \left(\frac{R_c}{R + R_c} - \frac{R}{R + R} \right) = V_{cc} \left(\frac{R_c - R}{2(R + R_c)} \right)$$

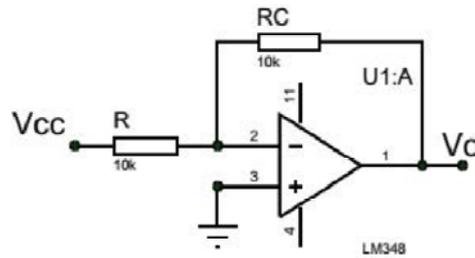


III.3 Montage dans un amplificateur

Dans le montage dans un amplificateur, la tension en sortie de l'amplificateur V_o est:

$$V_o = -V_{cc} \frac{R_c}{R}$$

Et dépend ainsi de la tension d'entrée V_{cc} ; de la résistance R et de la résistance R_c de l'élément de transduction du capteur



IV. 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, \dots 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 :

$$s = F(m, g_1, g_2, \dots)$$

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 hygrosocopie 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

V. 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 de l'aiguille d'un instrument analogique ;
- affichage sur un écran ;
- enregistrement sous forme de courbe.

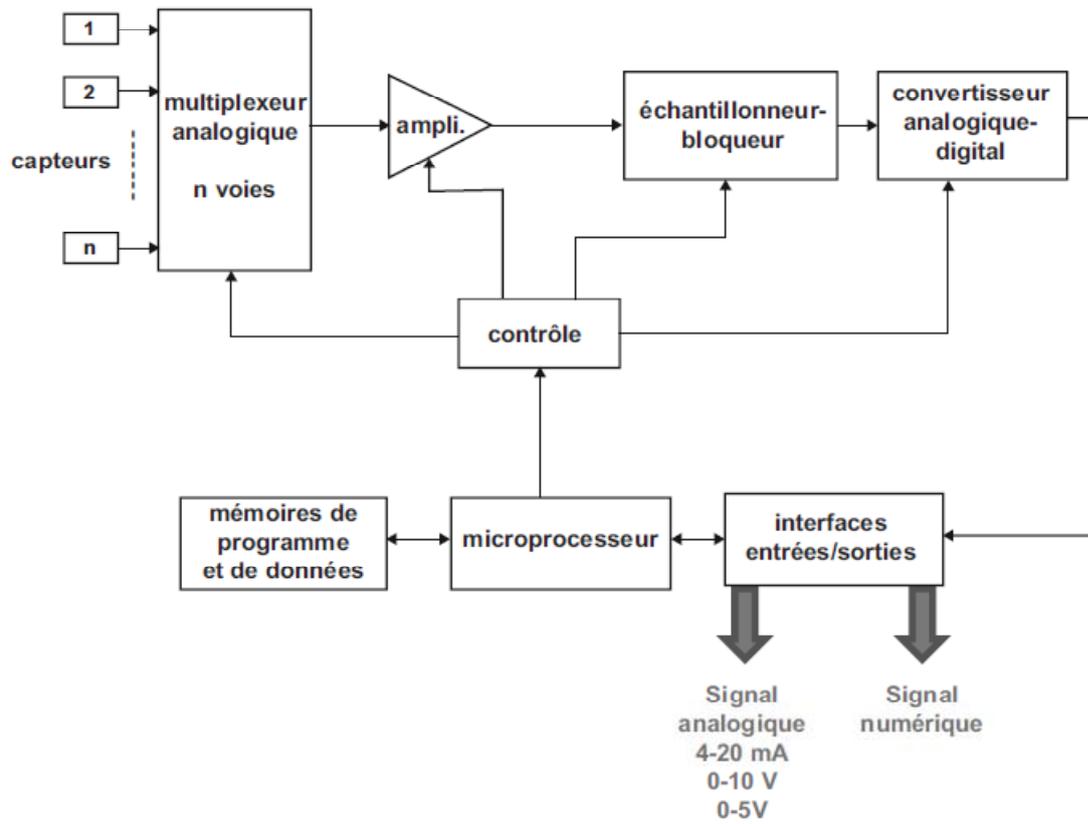
C'est l'étalonnage de la chaîne de mesure dans son ensemble qui permet d'attribuer à chaque indication en sortie la valeur correspondante du mesurande agissant à l'entrée.

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 afficheur numérique.

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 – pour que l'information soit traitée par un microprocesseur ou un microcontrôleur



Exemple de constitution de chaînes de mesure : chaîne contrôlée par microprocesseur