

1 Principes fondamentaux

1.1 Caractéristiques générales

La terminologie est issue du livre de référence [Asch2010], elle permet d'établir des bases solides à la suite de ce cours

Définition 1.1 (Mesurande m) *Grandeur physique de l'objet de la mesure (déplacement, température, pression...) à acquérir.*

Définition 1.2 (Mesurage) *Ensemble des opérations expérimentales qui concourent à l'acquisition de la valeur numérique du mesurande.*

Définition 1.3 (Capteur) *Dispositif qui, soumis à l'action d'un mesurande non électrique, présente une caractéristique de nature électrique s qui est fonction du mesurande.*

Formule 1.1 (Grandeur de sortie s)

$$s = F(m)$$

Avec :

| Grandeur dans l'ISQ | Unité SI de mesure | Description |
|---------------------------|--------------------|---|
| s : grandeur électrique | (/) | Grandeur (réponse) de sortie de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) fonction du mesurande |
| m : grandeur physique | (/) | Grandeur physique d'entrée d'excitation autre qu'électrique |

La relation $s = F(m)$ est le résultat de :

forme théorique : lois physiques régissant le fonctionnement du capteur ;

expression numérique : la construction du capteur (géométrie, dimension), les matériaux le constituant, de son environnement et éventuellement de son mode d'emploi (température, alimentation).

L'expression numérique de tout capteur est exploitée par l'étalonnage.

Définition 1.4 (Étalonnage) *Ensemble de valeurs du mesurande m connus avec précision, auxquels sont mis en relation les valeurs correspondantes s , permettant ainsi d'associer à toute valeur de s la valeur de m la déterminant.*

Par souci de facilité d'exploitation et de lecture, on privilégiera une conception et une utilisation du capteur de sorte à ce qu'il établisse une relation linéaire entre les variations du mesurande Δm et de sa grandeur de sortie Δs . Ceci introduit la notion de *sensibilité* du capteur.

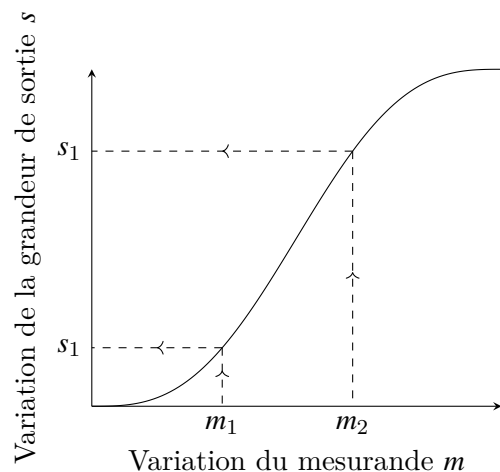
Formule 1.2 (Sensibilité du capteur S)

$$\Delta s = S \times \Delta m$$

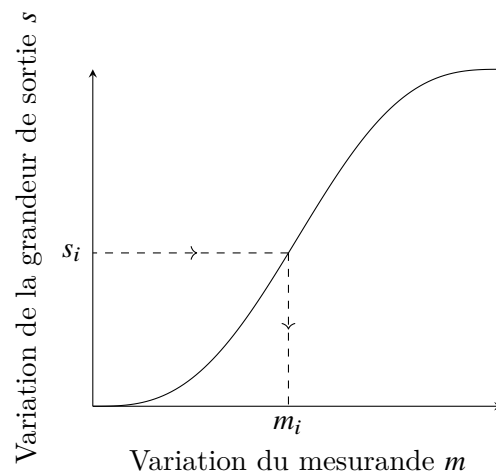


Avec :

| Grandeur dans l'ISQ | Unité SI de mesure | Description |
|----------------------------------|--------------------|---|
| Δs : grandeur électrique | (/) | Variation de la grandeur du mesurande |
| Δm : grandeur physique | (/) | Variation de la grandeur physique d'entrée d'excitation |



(a) établissement à partir des valeurs connues du mesurande m_1 et m_2



(b) exploitation du capteur à partir de la valeur mesurée de la réponse s

FIG. 1.1: Courbe d'étalonnage d'un capteur

Une grande difficulté dans conception et l'utilisation des capteurs consiste à conserver une sensibilité S aussi constante que possible. Pour cela, elle doit dépendre aussi peu que possible :

linéarité : valeur de m ;

bande passante : fréquence de variation ;

temps : vieillissement ;

grandeurs d'influence : action d'autres grandeurs physiques issues de l'environnement du capteur et non de l'objet de la mesure.

1.2 Type de capteurs

Le capteur est un élément du circuit électrique, il peut dès lors présente un signal *passif* ou *actif*. Cela conduit à deux grandes catégories de capteurs dans leur conception physique.

Définition 1.5 (Capteur actif) Capteur dont le signal de sortie s est un générateur (charge Q , tension U ou encore intensité d'un courant I).

Définition 1.6 (Capteur passif) Capteur dont le signal de sortie s est un récepteur (résistance R , inductance L ou encore capacité C).

Cette distinction se base donc sur le caractère passif ou actif des schémas électriques équivalents des capteurs, et implique une différence fondamentale sur les lois physiques qui les régissent :

- le capteur actif est une *générateur* qui délivre directement un signal électrique ;
- le capteur passif est un *récepteur* qui verra ses paramètres électriques mesurés qu'au travers les modifications qu'il entrainera dans un circuit alimenté par une source extérieure. Ce circuit électrique associé au capteur est prénommé *conditionneur* et c'est l'ensemble conditionneur et capteur passif qui formera la source du signal électrique s .



1.2.1 Capteurs actifs

Les capteurs actifs étant des *générateurs*, leur technologie est principalement basée sur un principe physique de conversion de l'énergie propre au mesurande (thermique, mécanique...) en énergie électrique. Le tableau suivant détaille les effets physiques généralement utilisés dans les technologies des capteurs actifs.

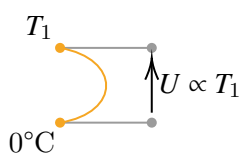
TAB. 1.1: Capteurs actifs principaux selon les effets physiques

| Mesurande | Effet utilisé | Grandeur de sortie |
|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------|
| Température | Effet thermoélectrique | Tension |
| Flux de rayonnement optique | Effet pyroélectrique | Charge |
| | Effet photoémissif | Courant |
| | Effet photovoltaïque | Tension |
| | Effet photoélectromagnétique | Tension |
| Force | Effet piézoélectrique | Charge |
| Pression | | |
| Accélération | | |
| Vitesse | Effet d'induction électromagnétique | Tension |
| Position (aimant) | Effet Hall | Tension |

1.2.1.1 Effet thermoélectrique

Un circuit électrique composé de deux conducteurs de composition chimique différente et dont les jonctions sont à des températures différentes T_1 et T_2 verra apparaître une *tension* U à ses bornes.

Exemple 1.1 (application de l'effet thermoélectrique)

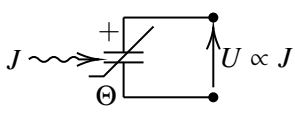


On peut déterminer U à partir d'une température lorsqu'on connaît précisément la mesure de U à la valeur $T_2 = 0^\circ\text{C}$.

1.2.1.2 Effet pyroélectrique

Certains cristaux sont dits *pyroélectriques* (le sulfate de triglycine par exemple) et présentent donc la propriété de présenter une polarisation électrique spontanée dépendant de la température du cristal. Ils comportent à leur surface des charges électriques Q sur leurs surfaces et $-Q$ sur les surfaces opposées, proportionnelles à cette polarisation.

Exemple 1.2 (application de l'effet pyroélectrique)



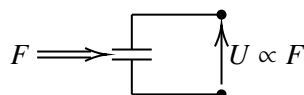
On peut déterminer U à partir d'un flux lumineux J absorbé par un cristal pyroélectrique. Cela va élever sa température, ce qui entraîne une modification de sa polarisation qui est mesurable par la variation de tension U aux bornes d'un condensateur associé.



1.2.1.3 Effet piézoélectrique

L'application d'une force ou d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézoélectriques (le quartz par exemple) va entraîner une déformation provoquant l'apparition de charges électriques Q sur leurs surfaces et $-Q$ sur leurs surfaces opposées.

Exemple 1.3 (application de l'effet piézoélectrique)



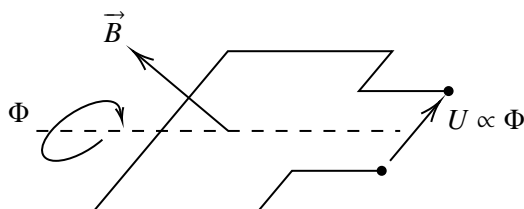
On peut déterminer U à partir d'une force F (ou toutes grandeurs physiques dérivées) subie par l'élément piézoélectrique. Cela va provoquer une déformation de l'élément, ce qui entraîne une modification de sa polarisation qui est mesurable par la variation de tension U aux bornes d'un condensateur associé.

1.2.1.4 Effet d'induction électromagnétique

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ magnétique fixe \vec{B} , une tension U proportionnelle au flux d'induction magnétique Φ par unité de temps T , et donc proportionnelle à sa vitesse de déplacement dans le champ d'induction magnétique \vec{B} .

Aussi, lorsqu'un circuit fermé est soumis à un flux d'induction magnétique Φ variable de par de son déplacement ou de celui de la source de l'induction (aimant par exemple), la tension U dont il est le siège est égale au contraire de vitesse de variation du flux d'induction magnétique Φ .

Exemple 1.4 (application de l'effet d'induction électromagnétique)

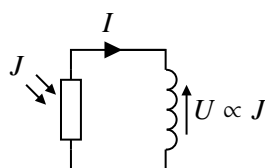


La mesure de tension U aux bornes du conducteur permet de déduire la vitesse de déplacement qui l'a induite.

1.2.1.5 Effets photoélectriques

Il existe plusieurs effets photoélectriques se distinguant par leurs manifestations mais ils ont tous comme point commun l'excitation de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux, dont la longueur d'onde est inférieure à une valeur seuil qui caractérise le matériau.

Exemple 1.5 (application de l'effet photoélectrique)



Les effets photoélectriques permettent d'obtenir une tension U ou un courant I en fonction du rayonnement lumineux J du matériau. D'une part, ils constituent la base des méthodes de mesure



des grandeurs photométriques, d'autre part, ils permettent la traduction en signal électriques des informations véhiculées par un rayonnement lumineux.

1.2.1.6 Effets photoémissif

Les électrons libérés sont émis hors d'une zone éclairée et, lors de l'application d'un champ électrique, forment un courant électrique.

1.2.1.7 Effets photovoltaïque

Des électrons et des trous pouvant recevoir des électrons sont libérés au voisinage de la jonction Positive Négative (PN) d'un semi-conducteur éclairée. Leur déplacement dans le champ électrique de la jonction PN module la tension aux bornes de cette jonction.

1.2.1.8 Effet photoélectromagnétique

L'application d'un champ magnétique perpendiculaire à un rayonnement lumineux va provoquer dans le matériaux éclairé l'apparition d'une tension électrique dans la direction *normale* au champ magnétique et au rayonnement.

1.2.1.9 Effet Hall

Un matériau, de préférence semi-conducteur et sous forme de plaquette, fait apparaître une tension v_H lorsqu'il est parcouru par un courant I et soumis à un champ magnétique \vec{B} d'un angle θ avec le courant I .

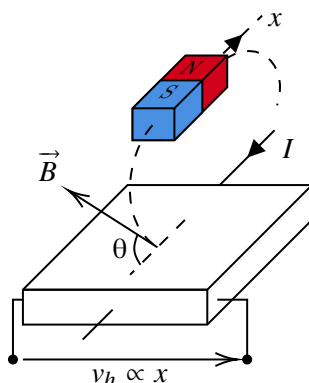
Formule 1.3 (Effet Hall)

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

Avec :

| Grandeur dans l'ISQ | Unité SI de mesure | Description |
|------------------------------|--------------------|--|
| K_H : coefficient | (/) | Facteur dépendant du matériau et de la dimension de la plaquette |
| I : intensité | ampère (A) | Source de courant fournissant l'énergie liée au signal de sortie |
| \vec{B} : champ magnétique | Tesla (T) | Champ magnétique soumis au matériau |
| $\sin \theta$: angle | radian (rad) | Angle formé par l'intensité I et le champ magnétique \vec{B} |

Exemple 1.6 (application de l'effet Hall)



Pour connaître la position de l'objet, on lui accouple un aimant qui va lui déterminer les valeurs de \vec{B} et θ au niveau de la plaquette. La tension v_h aux bornes de la plaquette est donc fonction de cet aimant et permet une conversion électrique d'une position x .

Il convient de classer les capteurs basés sur l'effet Hall parmi les capteurs actifs puisque l'information sortie est liée à une tension v_H , quand bien même il ne s'agit pas de *convertisseurs d'énergie* car c'est une source de courant I et non le mesurande qui va délivrer l'énergie liée au signal de sortie.

1.2.2 Capteurs passifs

Les capteurs passifs sont donc des *récepteurs* qui vont voir leurs grandeurs physiques être modulées par le mesurande sans pour autant convertir une énergie. On distingue dans les récepteurs plusieurs grandeurs physiques liées à :

- leur géométrie et leurs dimensions ;
- leurs propriétés électriques :
 - résistivité ρ ;
 - perméabilité magnétique μ ;
 - constante diélectrique ϵ .

Un mesurande module donc sur la variation du signal de sortie électrique du capteur passif :

- soit sur les caractéristiques géométriques ou des dimensions ;
- soit sur les propriétés électriques des matériaux ;
- soit plus rarement sur les deux à la fois.

TAB. 1.2: Capteurs passifs principaux selon les effets physiques

| Mesurande | Caractéristique électrique sensible | Matériau utilisé |
|-----------------------------|-------------------------------------|---|
| Température | Résistivité | – métaux (platine, cuivre, nickel) ; – semi-conducteurs. |
| Très basse température | Constante diélectrique | Verre |
| Flux de rayonnement optique | Résistivité | Semi-conducteurs |
| Déformation | Résistivité | – alliages de nickel ; – silicium dopé. |
| | Perméabilité magnétique | Alliages ferromagnétiques |
| Position (aimant) | Résistivité | Matériaux magnéto-résistant (bismuth, antimoniure d'indium) |
| Humidité | Résistivité | Chlorure de lithium |
| | Constante diélectrique | Alumine, polymères |
| Niveau | Constante diélectrique | Liquides isolants |

