

Première partie :

Métrologie des capteurs

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION A LA METROLOGIE

1.1 NOTIONS DE BASE

1.1.1 Quelques définitions

La métrologie :

C'est la science de la mesure.

Le mesurage :

C'est l'ensemble des opérations expérimentales dont le but est de déterminer la valeur numérique d'une grandeur.

Le mesurande :

C'est la grandeur physique particulière qui fait l'objet du mesurage.

L'incertitude :

Le résultat de la mesure x d'une grandeur X ne peut pas être entièrement défini par un seul nombre. Il faut le caractériser par un couple (x, dx) où dx représente l'incertitude sur x due aux différentes erreurs liées au mesurage: $x - dx < X < x + dx$.

L'erreur absolue :

C'est la différence entre la vraie valeur du mesurande et sa valeur mesurée. *Elle s'exprime en unité de la mesure.*

L'erreur relative :

C'est le rapport de l'erreur absolue au résultat du mesurage. *Elle s'exprime en pourcentage de la grandeur mesurée.*

1.1.2 Le système d'unités internationales (SI) et ses symboles

Le système d'unités internationales comporte 7 unités de base indépendantes du point de vue dimensionnel, des unités dérivées et des unités complémentaires. Les grandeurs les plus fréquemment utilisées, ainsi que leurs unités sont présentées dans le tableau suivant.

Unités de base		
Grandeur	Unité (SI)	Symbole
Longueur (notée l)	mètre	m
Masse (notée m)	Kilogramme	kg
Temps (noté t)	seconde	s
Courant électrique (noté i)	Ampère (André Marie Ampère, 1775-1836)	A
Température (notée T)	Kelvin (Lord Kelvin, Angleterre, 1824-1907)	K
Quantité de matière	mole	mol
Intensité lumineuse (notée I)	la candela	cd
Unités dérivées		
Grandeur	Unité (SI)	Symbole
Aire (notée A ou S)	mètre carré	m ²
Volume (noté V)	mètre cube	m ³
Fréquence (notée f)	Hertz (Heinrich Hertz, Allemagne, 1857-1894)	Hz
Vitesse (notée v)	mètre par seconde	m/s
Force (notée F)	Newton (Issac Newton, Angleterre, 1642-1727)	N
Moment d'une force (noté \mathcal{M})	mètre - Newton	mN
Moment d'un couple (noté \mathcal{T})	mètre - Newton	mN
Viscosité dynamique (notée η)	poiseuille	Pi
Tension électrique (notée U)	Volt (Alexandro Volta, Italie, 1745-1827)	V
Force électromotrice (notée E)	Volt	V
Résistance électrique (notée R)	Ohm (Georges Ohm, Allemagne, 1789-1854)	Ω
Réactance (notée X)	Ohm	Ω

Impédance (notée Z)	Ohm	Ω
Résistivité (notée ρ)	Ohm-mètre	Ωm
Capacité électrique (notée C)	Farad (Michael Faraday, Angleterre, 1791-1867)	F
Perméabilité électrique (notée μ)	Henry par mètre	H/m
Flux lumineux	lumen	lm
Eclairement lumineux	lux	lx
Longueur d'onde (notée λ)	mètre	m
Vitesse angulaire (notée ω)	radian par seconde	rad/s
Accélération (notée g)	mètre par seconde ²	m/s ²
Accélération angulaire (notée α)	radian par seconde ²	rad/s ²
Energie, Travail (noté W)	Joule (James Joule, Angleterre, 1818-1889)	J
Puissance (notée P)	Watt (James watt, Ecosse, 1736-1819)	Watt
Puissance apparente (notée S)	Volt-Ampère	VA
Puissance réactive (notée q)	Volt-Ampère-Réactif	VAR
Pression (notée P)	Pascal (Blaise Pascal, France, 1623-1662)	Pa
Quantité d'électricité (notée Q)	Coulomb (Charles Coulomb, France, 1736-1806)	C
Inductance (notée L)	Henry (Joseph Henry, Etats-Unis, 1797-1878)	H
Champ magnétique (noté H)	Ampère par mètre	A/m
Induction magnétique (notée B)	Tesla (Nicolas Tesla, Yougoslavie, 1857-1943)	T
Flux d'induction magnétique (noté ϕ)	Weber (Wilhelm Weber, Allemagne, 1816-1892)	Wb
Unités complémentaires		
Grandeur	Unité (SI)	Symbole
Angle plan	radian	rad
Angle solide	stéradian	Sr

1.1.3 Les multiples et les sous-multiples des unités

Multiples		
Multiple	Préfixe	Symbole
10^{24}	yotta	Y
10^{21}	zetta	Z
10^{18}	exa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	téra	T
10^9	giga	G
10^6	méga	M
10^3	kilo	k
10^2	hecto	h
10	déca	da
Sous-multiples		
Multiple	Préfixe	Symbole
10^{-1}	déci	d
10^{-2}	centi	e
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a
10^{-21}	zepto	z
10^{-24}	yocto	y

1.1.4 Liens entre les unités SI et les unités anglo-saxonnes

Distance :

- pouce (inch) : 1 in = 2.54 cm
- pied (foot) : 1 ft = 12 in = 30.48 cm
- mile (miles) : 1 mile = 5280 ft = 1.609 km

Volume :

- pinte (pint) : 1 pint = 0.94 l
- gallon (US gallon) : 1 US gal = 4 pintes = 3.786 l
- baril (US brel): 1 bbi = 42 USgal = 159 l

Masse :

- once (ounce) : 1 oz = 28.35 g
- livre (pound) : 1 lb = 0.454 kg

Puissance :

- cheval vapeur (horsepower) : 1 hp = 0.736 kW

1.2. CLASSIFICATION DES CAPTEURS

Un capteur est un dispositif qui produit, à partir d'une grandeur physique, une grandeur électrique utilisable à des fins de mesure ou de commande. Cette grandeur électrique (tension ou courant) doit être une représentation aussi exacte que possible du mesurande considéré. On distingue les capteurs actifs et les capteurs passifs.

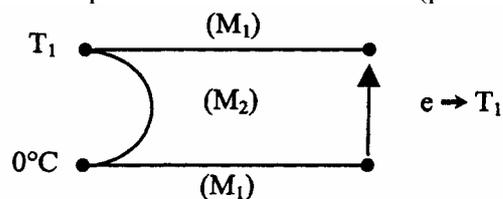
1.2.1 Les capteurs actifs

Ils se comportent comme des générateurs. Ils sont basés sur un effet physique qui permet de transformer l'énergie du mesurande (énergie mécanique, thermique ou de rayonnement), en énergie électrique. La réponse en sortie d'un capteur actif peut être un courant, une tension ou une charge. Parmi ces effets, les plus importants sont :

- **L'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 $e = f(T_1, T_2)$.

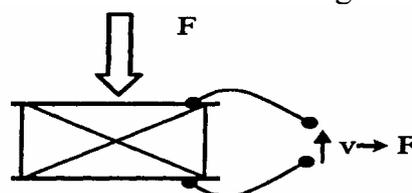
Exemple d'application : la mesure de e permet de déterminer une température inconnue T_1 , lorsque la température T_2 est connue (principe du thermocouple).



- **L'effet piezo-électrique :**

L'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézo-électriques (le quartz par exemple) entraîne une déformation qui provoque l'apparition de charges électriques égales et de signes contraires sur les faces opposées du matériau.

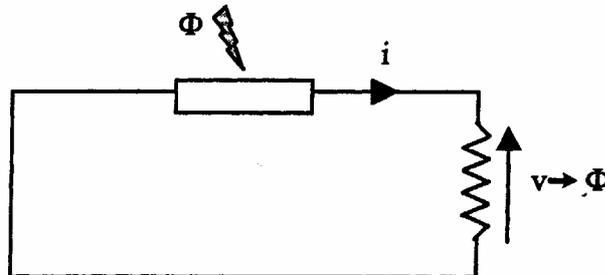
Exemple d'application : la mesure de force, de pression ou d'accélération à partir de la tension que provoquent aux bornes d'un condensateur associé à l'élément piézo-électrique les variations de sa charge.



- **L'effet photo-électrique :**

Un rayonnement lumineux ou plus généralement une onde électromagnétique dont la longueur d'onde est inférieure à une valeur seuil, caractéristique du matériau considéré, provoquent la libération de charges électriques dans la matière.

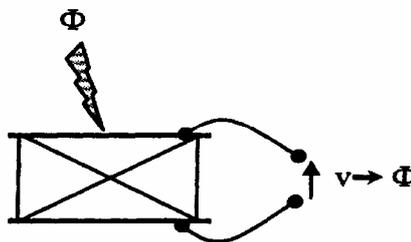
Exemple d'application : la mesure de la tension de sortie permet de déterminer le flux par rayonnement.



- **L'effet pyro-électrique :**

Les cristaux pyro-électriques (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 leurs faces opposées.

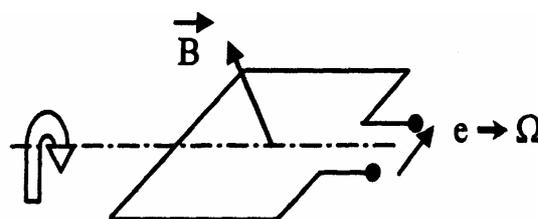
Exemple d'application : la mesure de la charge aux bornes d'un condensateur associé à un cristal pyro-électrique permet de déterminer le flux lumineux auquel il est soumis.



- **L'effet d'induction électromagnétique :**

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ d'induction fixe, il est le siège d'une force électro-motrice proportionnelle à sa vitesse de déplacement. Ainsi, lorsqu'un circuit électrique est soumis à un flux d'induction variable du à son déplacement ou à celui de la source de l'induction (par exemple, un aimant), la f.e.m dont il est le siège est de valeur égale et de signe opposé à la vitesse de variation du flux d'induction.

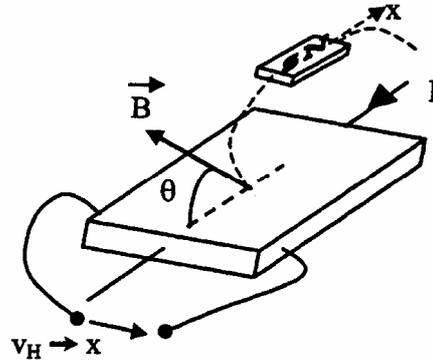
Exemple d'application : la mesure de la f.e.m d'induction permet de connaître la vitesse du déplacement qui en est l'origine.



▪ **L'effet Hall :**

Lorsqu'un matériau est parcouru par un courant I et soumis à un champ B formant un angle θ avec le courant, il apparaît une tension de Hall V_H dans une direction qui leur est perpendiculaire ($V_H = K_H \cdot I \cdot B \cdot \sin \theta$, où K_H est une constante qui dépend du matériau considéré).

Exemple d'application : la mesure de la tension V_H permet de déterminer la position d'un objet qui est lié à un aimant.



▪ **L'effet photovoltaïque :**

Un rayonnement lumineux sur l'assemblage de semi-conducteurs de types opposés P et N provoque la libération d'électrons (charges négatives) et de trous (charges positives) au voisinage de la jonction illuminée. Leur déplacement dans le champ électrique de la jonction modifie la tension à ses bornes.

Exemple d'application : la mesure de la tension de sortie permet de déterminer le flux par rayonnement.

Les principes physiques de base et les modes d'application de ces effets sont regroupés dans le tableau suivant :

Grandeur physique à mesurer	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermo-électrique	Tension
Flux par rayonnement	Photo-électrique	Tension
	Photovoltaïque	Tension
	Pyro-électrique	Charge
Force	Piézo-électrique	Charge
Pression	Piézo-électrique	Charge
Accélération	Piézo-électrique	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position	Hall	Tension

1.2.2 Les capteurs passifs

Les capteurs passifs sont des impédances intégrées dans un circuit électrique (conditionneur), dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande. La variation d'impédance résulte de l'effet de la grandeur à mesurer sur :

- Soit les caractéristiques géométriques ou dimensionnelles qui peuvent varier si le capteur comporte un élément mobile ou déformable. Dans le premier cas, à chaque position de l'élément mobile correspond une valeur de l'impédance dont la mesure permet de connaître la position (principe des capteurs de déplacement ou de position tel que le potentiomètre). Dans le second cas, la déformation appliquée au capteur entraîne une modification de l'impédance (principe des capteurs de déformation tels que les jauges de contraintes).
- Soit les propriétés électriques des matériaux (résistivité ρ , perméabilité magnétique μ , constante diélectrique ϵ), qui peuvent être sensibles à différentes grandeurs physiques (température, humidité, éclairage ...). Si on fait varier une de ces grandeurs en maintenant les autres constantes, il s'établit une relation entre la valeur de cette grandeur et celle de l'impédance du capteur. La courbe d'étalonnage traduit cette relation et permet, à partir de la mesure de l'impédance, de déduire la valeur de la grandeur physique variable, qui est en fait le mesurande. Le tableau présente un aperçu des principaux mesurandes permettant de modifier les propriétés électriques des matériaux utilisés pour la fabrication des capteurs passifs.

Mesurande	Type de matériaux utilisés	Caractéristique électrique sensible
Température	Métaux, Semi-conducteurs	Résistivité
Flux par rayonnement	Semi-conducteurs	Résistivité
Déformation	Alliages de nickel	Résistivité
	Alliages ferromagnétiques	Perméabilité magnétique
Position	Matériaux magnéto-résistants	Résistivité
Humidité	Chlorure de Lithium	Résistivité
	Polymères	Constante diélectrique
Niveau	Liquides isolants	Constante diélectrique