

Capteurs et Métrologie

Dr. Ahmed Chaouki LAHRECH

Université Ziane Achour de Djelfa

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Filière : Electromécanique

Email : ahmed.lahrech@univ-djelfa.dz

1.0 Mars 2024



Table des matières

Objectifs	3
I - Chapitre 1 : Généralités	4
1. Chaîne de mesure.....	4
1.1. Les éléments d'une chaîne de mesure.....	5
2. Capteurs.....	5
2.1. Généralités sur les capteurs.....	5
2.2. Constitution interne d'un capteur.....	6
2.3. Caractéristiques métrologiques d'un capteur.....	7
3. Classification des capteurs.....	9
3.1. Classification selon leur principe de base de fonctionnement	9
3.2. Classification selon le signal de sortie	13
4. Circuits de conditionnement.....	13
4.1. Conditionneurs des capteurs passifs.....	13
Bibliographie	17

Objectifs

A l'issue de ce cours, l'étudiant sera capable de :

- Enumérer, nommer les éléments constitutifs d'une chaîne de mesure, les capteurs (passifs, actifs) et les circuits de conditionnement.
- Expliquer, démontrer le principe de fonctionnement des capteurs et les caractéristiques métrologiques.
- Appliquer, employer les différents capteurs.
- Comparer les différents capteurs (passifs, actifs).
- Evaluer, argumenter en donnant son point de vue sur les avantages et les inconvénients des différents capteurs.

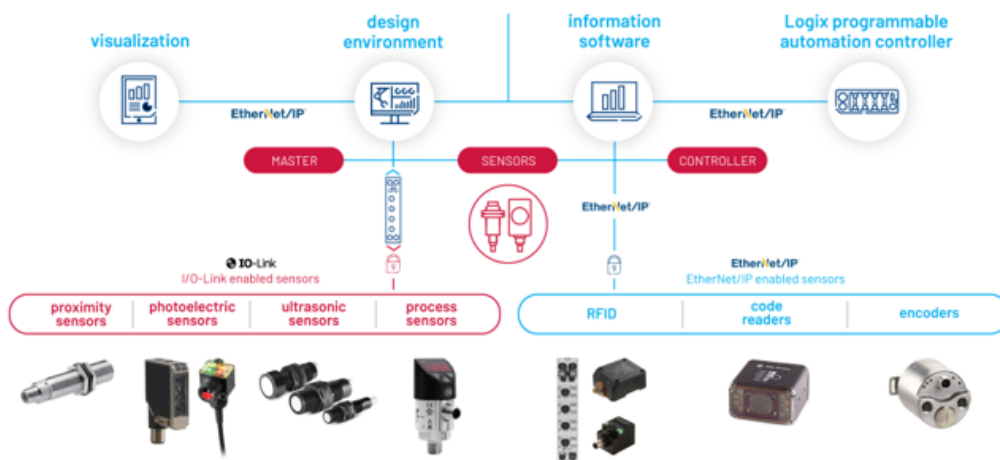
Chapitre 1 : Généralités

1. Introduction

A l'issue de ce chapitre, l'étudiant sera capable de :

- Décrire les différents éléments constitutifs d'une chaîne de mesure, les capteurs (passifs, actifs) et les conditionneurs des capteurs passifs.
- Illustrer la constitution interne d'un capteur.
- Expliquer les caractéristiques métrologiques d'un capteur.
- Comparer les différents capteurs (passifs, actifs) selon leur principe de base de fonctionnement et selon le signal de sortie.
- Justifier, recommander en donnant son point de vue sur les avantages et les inconvénients des différents capteurs.

Le domaine industriel a besoin de contrôler de très nombreux paramètres physiques (longueur, force, poids, pression, déplacement, position, vitesse, température, luminosité, ...). A chacune de ces grandeurs à mesurer peuvent correspondre un ou plusieurs types de capteurs fonctionnant selon un phénomène physique : variation de résistance, variation d'induction magnétique, variation capacitive, de fréquence, de flux lumineux...



2. Chaîne de mesure

Définition :

Une chaîne de mesure (ou une chaîne d'acquisition) représente tous les éléments servant à recueillir des grandeurs physiques ou chimiques correspondantes à un système, puis délivrer ces informations sous une forme appropriée à leur exploitation.

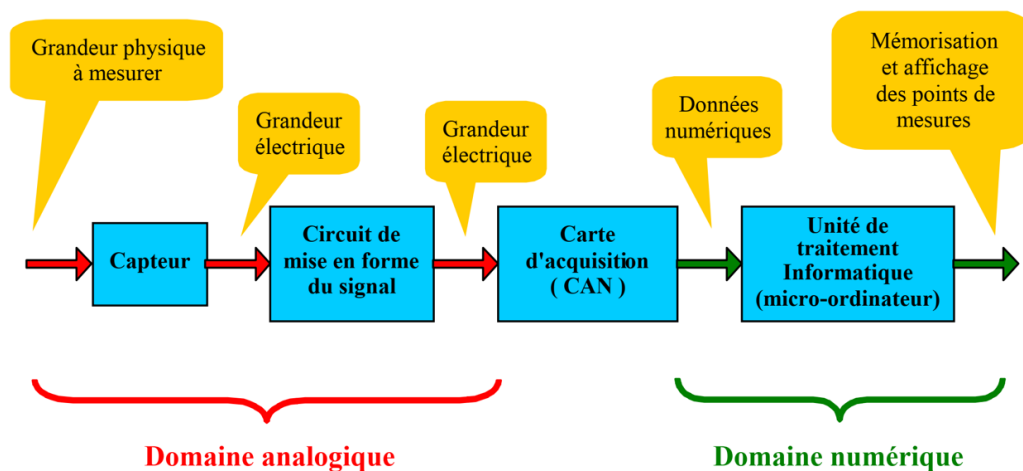
2.1. Les éléments d'une chaîne de mesure

Afin de mesurer une grandeur physique la chaîne de mesure doit être constituée des éléments suivants

- **Grandeur à mesurer** : appelée le mesurande (grandeurs physiques ou chimiques).
- **Capteur** : Un capteur est un dispositif qui transforme une grandeur physique d'entrée, appelée le **mesurande [m]**, en un **signal électrique** (en général) appelée la réponse [s].
- **Conditionneur** : Le signal de la réponse est généralement un signal électrique sous forme d'un signal basse tension qui peut se mettre sous différentes formes (tension, courant, etc.) et qui n'est pas directement exploitable. Le conditionnement du signal consiste à transformer et adapter le signal de départ afin de lui donner la forme la plus appropriée pour son traitement.

Plusieurs fonctions contribuent ce conditionnement tels que l'amplification, le filtrage, etc

- **Carte d'acquisition** : elle permet une mise en forme qui consiste la modification de la nature du signal électrique. Exemple, la mise en forme du signal électrique peut être une transformation :
 1. d'un courant en une tension et inversement ;
 2. d'un signal analogique en un signal logique ou numérique ;
- **Unité de traitement des données** : elle permet d'enregistrer, tracer, traiter mathématiquement et la transmission des données issues du capteur.



Structure de base d'une chaîne de mesure.

3. Capteurs

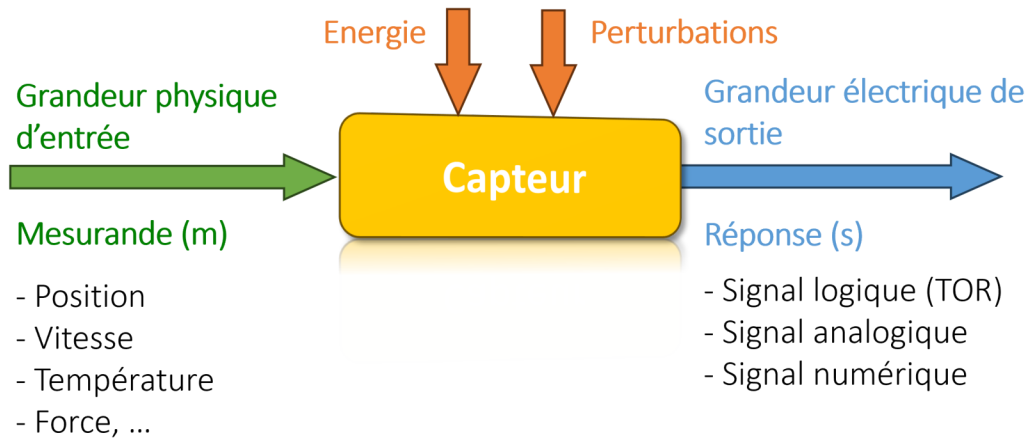
3.1. Généralités sur les capteurs

Définition :

Le **capteur** est un organe chargé de prélever une **grandeur physique** (ou **mesurande**) et de la transformer en **grandeur exploitable**.

La **grandeur physique** est le signal d'entrée du capteur.

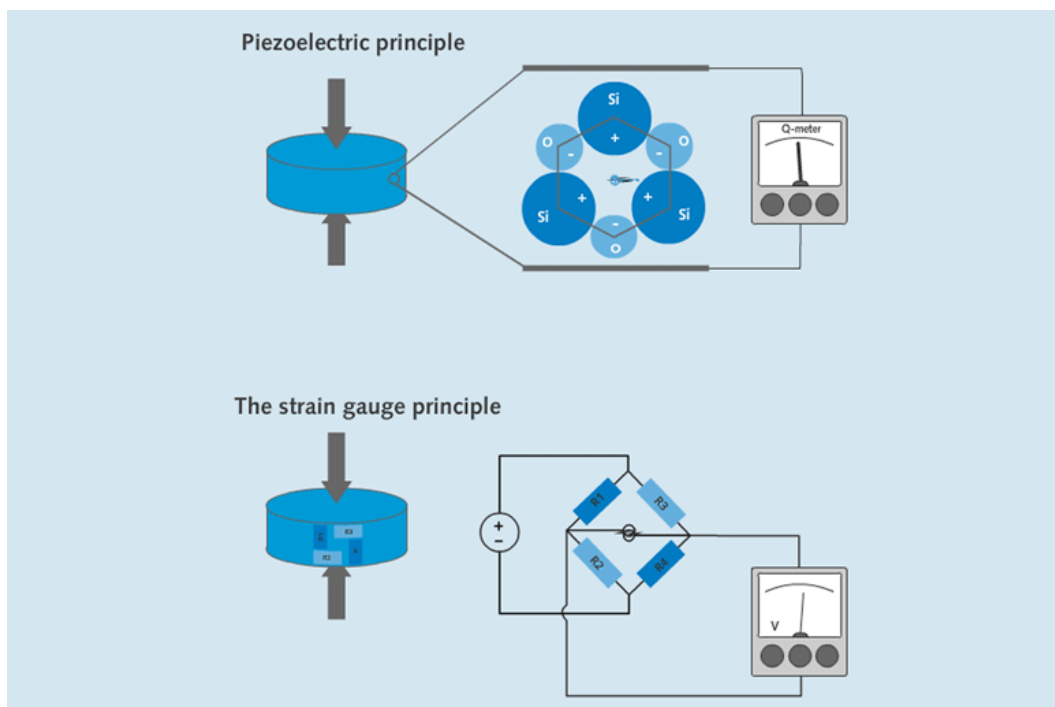
La grandeur exploitable est **généralement de nature électrique**. Elle constitue le signal de mesure (ou sortie ou réponse) du capteur. Elle est une image de la grandeur à mesurer et doit être indépendante des autres grandeurs perturbatrices.



- **Mesurande** : température, force, vitesse, déplacement, ... c'est tout simplement la grandeur qu'on cherche à mesurer.
- **Grandeur de sortie** : elle est généralement de type électrique. Elle peut être soit : une charge, une tension, un courant ou une impédance (R, L, C).
- **Grandeurs d'influence** : sont des grandeurs étrangères qui peuvent provoquer des perturbations sur le capteur. C'est donc une cause d'erreurs agissant sur le signal de sortie.

Exemple :

Capteur de pression à jauges de contraintes, **mesurande** : pression -> **réponse** : tension



3.2. Constitution interne d'un capteur

Les capteurs contiennent habituellement deux composantes de base connectées en série :

- **Corps d'épreuve** : élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer (appelée aussi mesurande).

But : transformer la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dite mesurable.

- **Élément de transduction** : élément sensible lié au corps d'épreuve. Il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie.
- **Boîtier** : élément mécanique de protection, de maintien et de fixation du capteur.
- **Module électronique de fonctionnement** : il a, selon les cas, les fonctions suivantes :
 1. alimentation électrique du capteur (si nécessaire) ;
 2. mise en forme et amplification du signal de sortie ;
 3. filtrage, amplification ;
 4. conversion du signal (CAN,...).

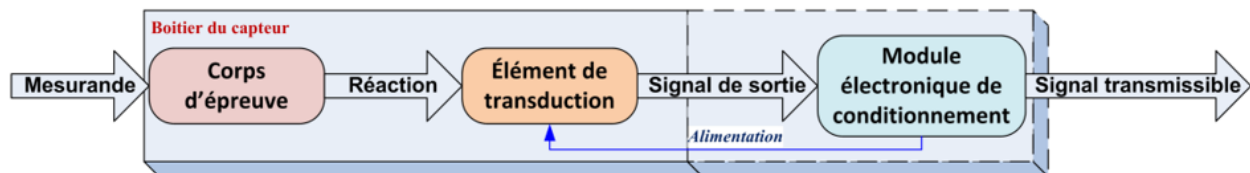
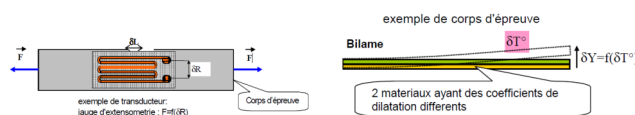


Schéma bloc d'un système de mesure numérique

Exemple :

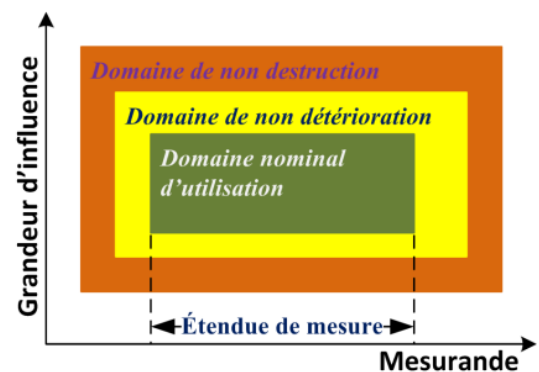


Exemple de corps d'épreuve

3.3. Caractéristiques métrologiques d'un capteur

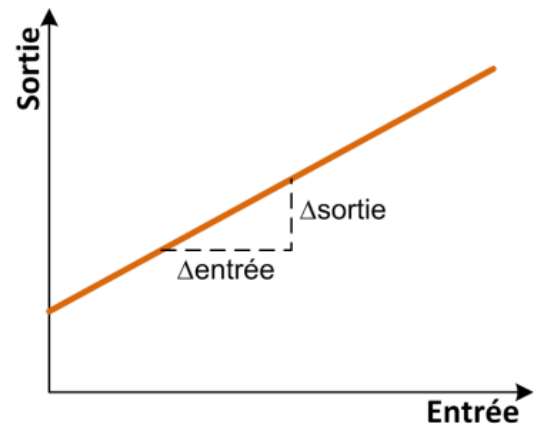
De manière à classer les capteurs en fonction de leurs performances, on est amené à définir des paramètres qui permettent de les sélectionner en fonction de l'application. Chaque capteur (ou élément de mesure) présente certaines caractéristiques métrologiques qui définissent ses limites d'utilisation et de précision. Ces limites dépendent non seulement du mesurande, mais aussi des grandeurs d'influence qui viennent perturber l'élément de mesure.

- **Etendue de mesure** : 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*.



Les trois domaines de fonctionnement d'un capteur

- **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, i.e. :



Caractéristique linéaire

$$S = \frac{\Delta_{sortie}}{\Delta_{entree}}$$

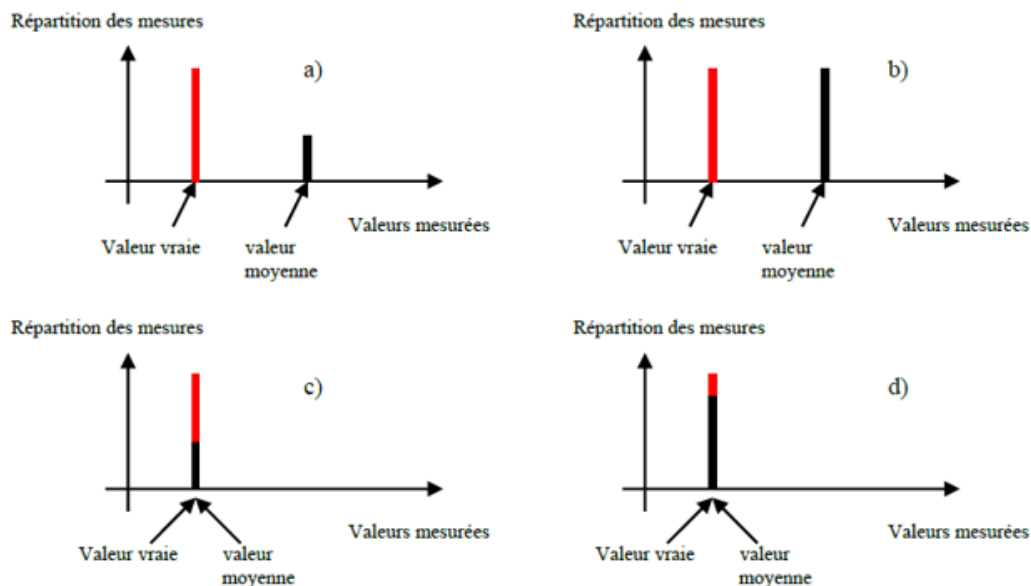
- **Précision** : C'est l'aptitude du capteur à donner des indications proche de la valeur vraie de la grandeur mesurée.
- **Fidélité et justesse** : La **justesse** est la qualité d'un capteur à fournir des indications précises. La **fidélité** est la qualité d'un capteur à fournir des indications identiques pour une même valeur de la grandeur à mesurer.

a : capteur ni fidèle, ni juste (erreurs et incertitudes de mesure importantes)

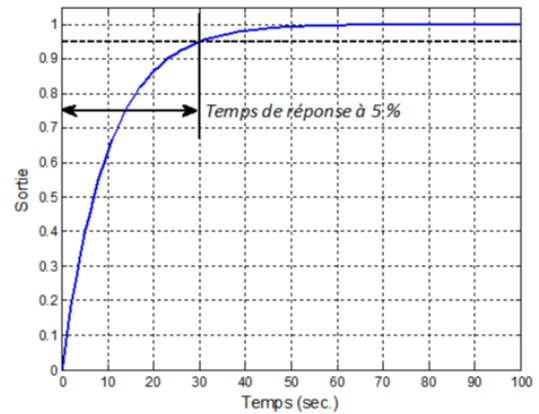
b : capteur fidèle mais non juste

c : capteur juste mais non fidèle

d : capteur juste et fidèle, donc précis (erreurs et incertitudes de mesure réduites)



- **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 à du signal à l'entrée soit perçu à la sortie.



Réponse d'un système de premier ordre.

4. Classification des capteurs

4.1. Classification selon leur principe de base de fonctionnement

a) Capteurs actifs

↳ Définition :

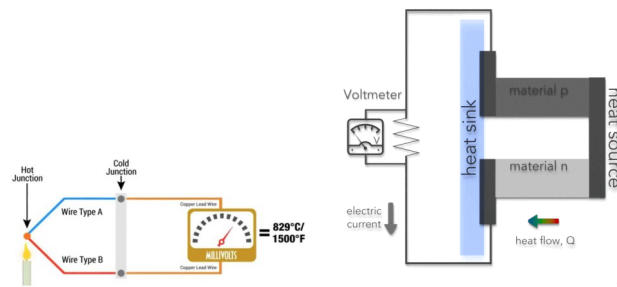
Les **capteurs actifs**¹ sont des capteurs qui fonctionnent en **générateur**. Le corps d'épreuve ou l'élément de transduction utilise un principe physique qui assure la conversion en énergie électrique l'énergie propre au mesurande : énergie thermique, mécanique ou de rayonnement. Le tableau suivant présente les principes physiques de base des capteurs actifs :

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

Capteurs actifs : principes physiques de base

i) Thermoélectricité

C'est le principe de tout **thermocouple**. C'est un circuit constitué de deux conducteurs de nature chimique différente et dont les jonctions sont à des températures différentes T_1 et T_2 . Il apparaît aux bornes de ce circuit une tension (force électromotrice) liée à la différence de température ($T_1 - T_2$).

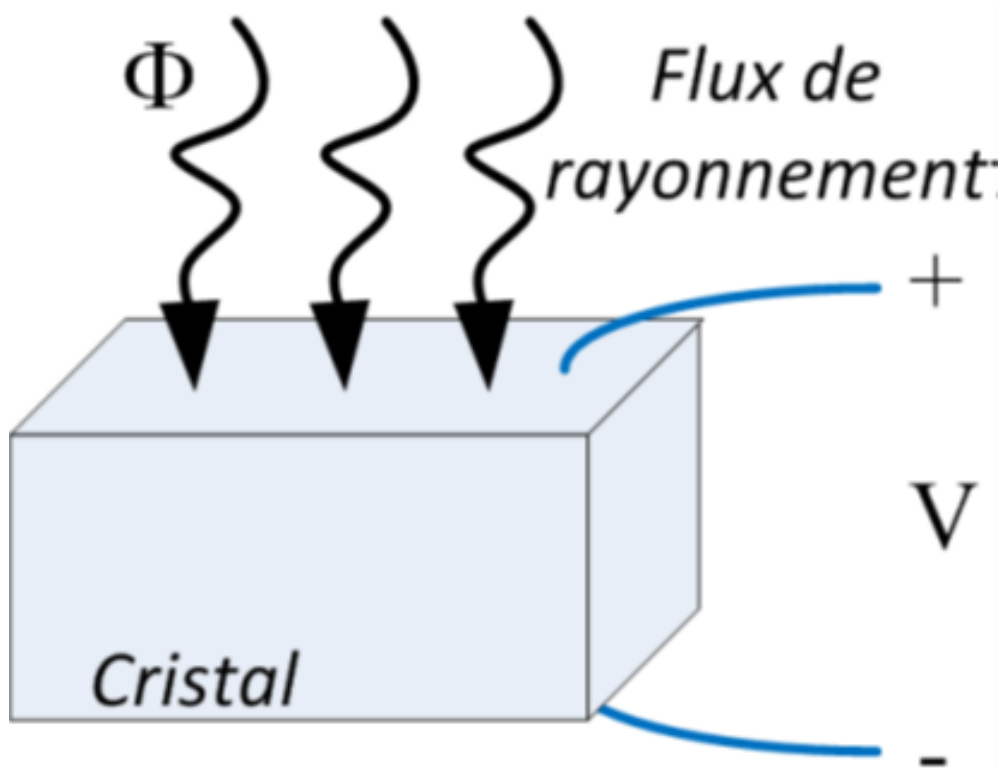


Effet thermoélectrique

ii) Pyroélectricité

Le phénomène de pyroélectricité se produit dans certains cristaux dit *pyroélectriques*. Le cristal pyroélectrique réagit au rayonnement thermique en changeant sa polarisation. La relation entre la tension V et le rayonnement Φ est exprimée par:

$$V \propto \Phi$$

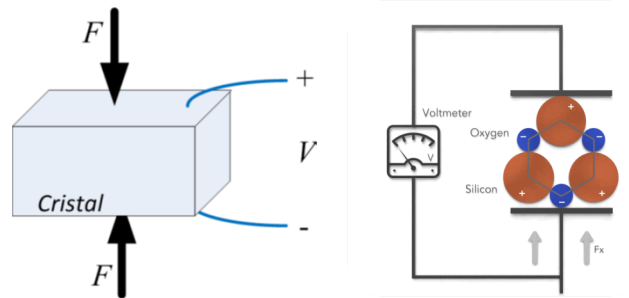


Effet pyroélectrique - pyromètre.

iii) Piézoélectricité

Le phénomène de piézoélectricité est très similaire à celui de pyroélectricité, sauf que cette fois, le cristal (dit *piézoélectrique*) réagit à des contraintes changeant sa polarisation. Le quartz est un de ces cristaux piézoélectriques. Pour faire apparaître une contrainte dans le cristal, il suffit de lui appliquer une force F . Une tension V est générée due aux contraintes générées par la force F . Si la force F est constante, la polarisation disparaît.

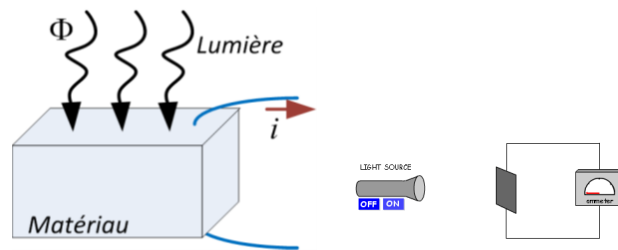
$$V \propto F$$



Effet Piézoélectrique

iv) Photoélectricité

La photoélectricité ou effet photoélectrique est un phénomène causé par les effets d'un rayonnement électromagnétique sur un matériau. Lorsqu'un métal est frappé par un rayonnement dont les photons ont un niveau d'énergie suffisamment élevé, cela entraîne l'émission d'électrons excités hors du métal. Il en résulte un déplacement d'électrons, donc un courant i dont l'intensité dépend du rayonnement Φ .

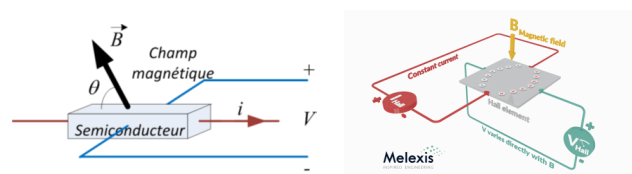


Effet photoélectrique

v) Effet Hall

L'effet Hall, découvert en 1879, est un phénomène se produisant lorsqu'un conducteur ou un semiconducteur traverse par un courant d'intensité i est soumis à un champ magnétique B . Dans cette situation, une différence de potentiel électrique V apparaît entre les deux faces perpendiculaires à la direction du courant et du champ magnétique. La tension V est d'ailleurs proportionnelle au produit vectoriel du courant et du champ magnétique B :

$$V = K_{mat} |\vec{i} \times \vec{B}| = K_{mat} i B \sin(\theta)$$

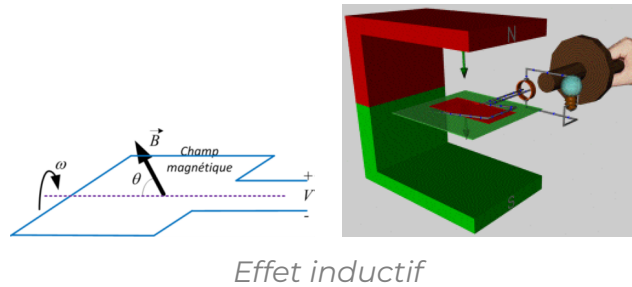


Effet Hall

vi) Effet inductif

L'effet inductif est utilisé dans la mesure de vitesse angulaire. Le principe est le même que celui utilisé pour les génératrices. On fait tourner un cadre métallique à une vitesse angulaire ω dans un champ magnétique fixe B . Une force électromotrice V est générée. En pratique la force électromotrice est sinusoïdale et la fréquence du sinusoïde est proportionnelle à la vitesse angulaire ω (rad/s).

$$V \propto B\omega$$



b) Capteurs passifs

🔗 Définition :

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.

Le tableau suivant donne un aperçu des divers mesurandes susceptibles de modifier les propriétés électriques de matériaux employés pour la réalisation de **capteurs passifs**^{1*} ; on y remarque, en particulier, la place importante des capteurs résistifs.

Mesurande	Caractéristique électrique sensible	Type de matériaux utilisé
Température	Résistivité	Platine, Nickel, cuivre, semiconducteurs.
Flux optique	Résistivité	semi-conducteurs
Déformation	Résistivité Perméabilité	Alliages nickel Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Magnétorésistances
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

Capteurs passifs : principes physiques et matériaux

4.2. Classification selon le signal de sortie

a) Classification des signaux

Un signal est dit analogique si l'amplitude de la grandeur physique le représentant peut prendre une infinité de valeurs dans un intervalle donné.

Signal continu : C'est un signal qui varie 'lentement' dans le temps : température, débit, niveau.

Forme : C'est la forme de ce signal qui est importante : pression cardiaque, chromatographie, impact.

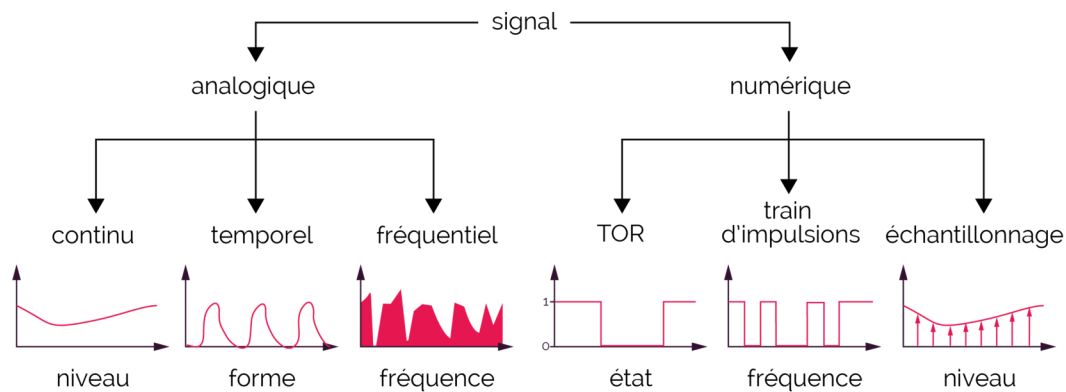
Fréquentiel : C'est le spectre fréquentiel qui transporte l'information désirée : analyse vocale, sonar, spectrographie.

Un signal est dit numérique si l'amplitude de la grandeur physique le représentant ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs. En général ce nombre fini de valeurs est une puissance de 2.

Tout ou rien (TOR) : Il informe sur l'état bivalent d'un système.

Train d'impulsion : Chaque impulsion est l'image d'un changement d'état.

Echantillonnage : C'est l'image numérique d'un signal analogique.



5. Circuits de conditionnement

5.1. Conditionneurs des capteurs passifs

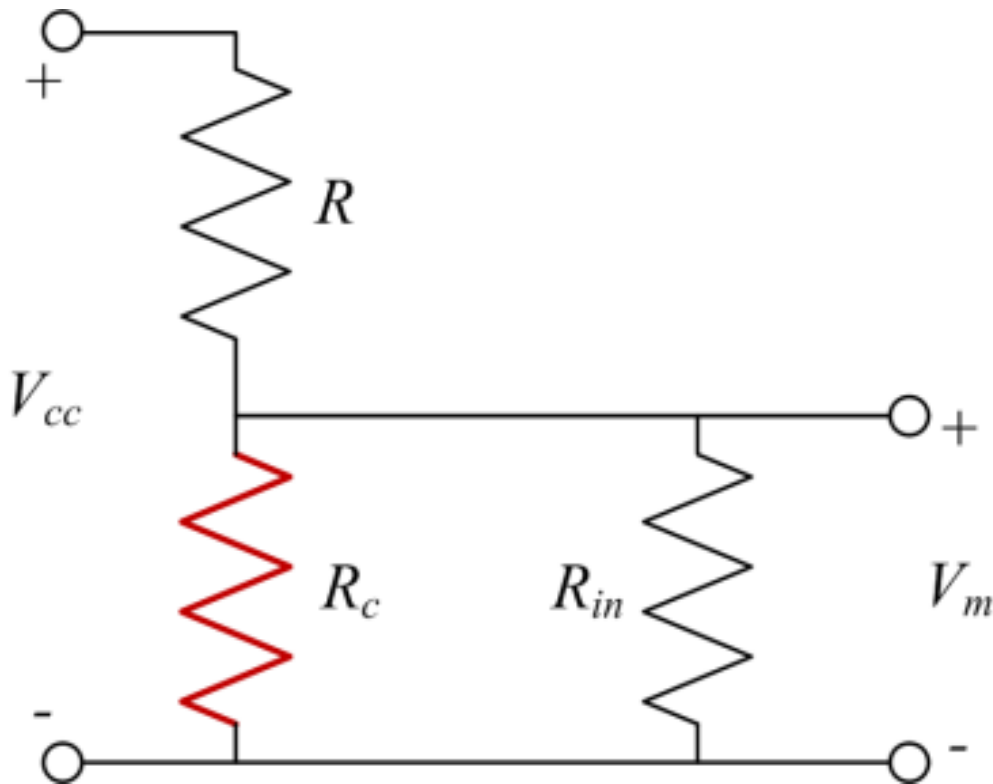
Il est nécessaire d'avoir un circuit électrique/électronique pour détecter **les variations d'impédance** d'un **capteur passif**. Lorsque l'impédance qui varie en fonction du **mesurande** est une résistance R_c , on doit insérer celle-ci dans un circuit qui peut être :

- Montage potentiométrique ;
- Montage dans un pont de Wheatstone ;
- Montage dans un amplificateur.

a) Montage potentiométrique

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

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



Montage potentiométrique

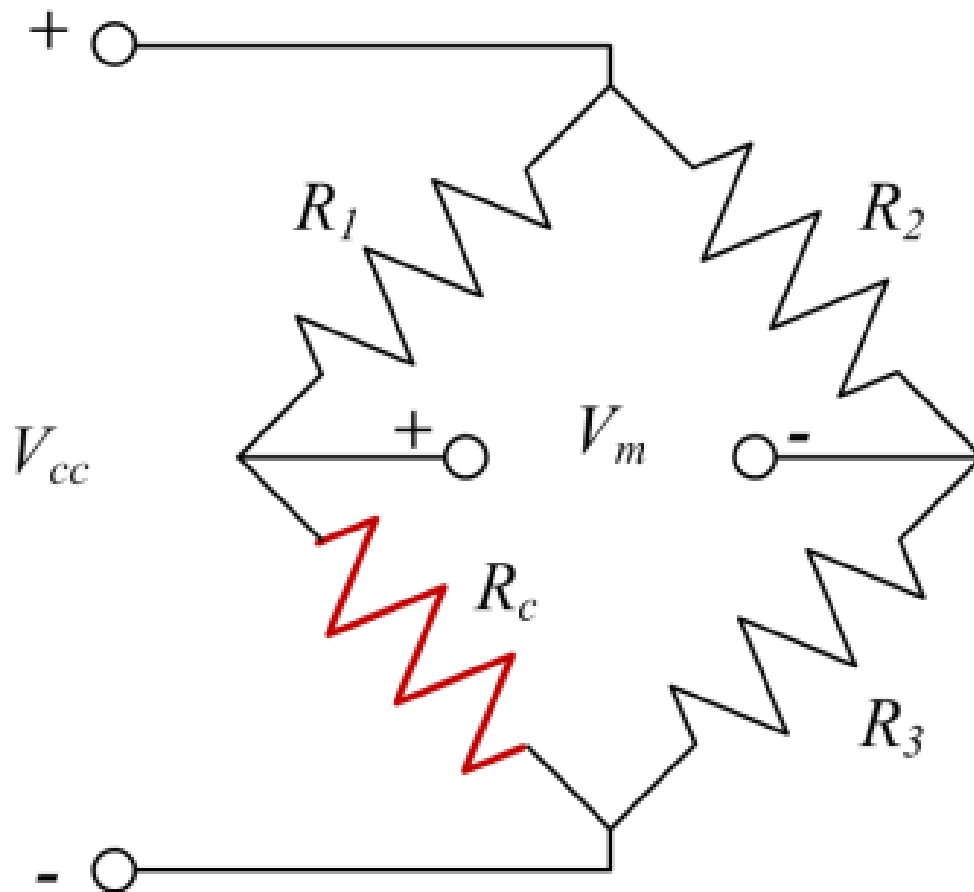
avec V_{cc} la tension appliquée au potentiomètre ; R la résistance en série avec la résistance du capteur R_c pour obtenir un diviseur de tension et R_{in} l'impédance d'entrée du module électronique de conditionnement (généralement beaucoup plus grand que la résistance du capteur R_c).

Lorsque le capteur est un potentiomètre, les résistances R et R_c sont tels que la somme $R_c + R = R_{pot}$ est la résistance totale du potentiomètre.

b) Montage dans un pont de Wheatstone

Dans un montage en pont comme le montre la figure suivante, la tension mesurée V_m est :

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



Montage en pont de Wheatstone

et 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 :

$$V_m = V_{cc} \left(\frac{R_c}{R+R_c} - \frac{R}{R+R} \right) = V_{cc} \left(\frac{R_c}{R+R_c} - \frac{1}{2} \right) = V_{cc} \left(\frac{R_c - R}{2(R_c + R)} \right)$$

De plus, si la résistance du capteur possède une relation du type $R_c = R(1+x)$, avec le mesurande x , alors :

$$V_m = V_{cc} \left(\frac{x}{2(2+x)} \right)$$

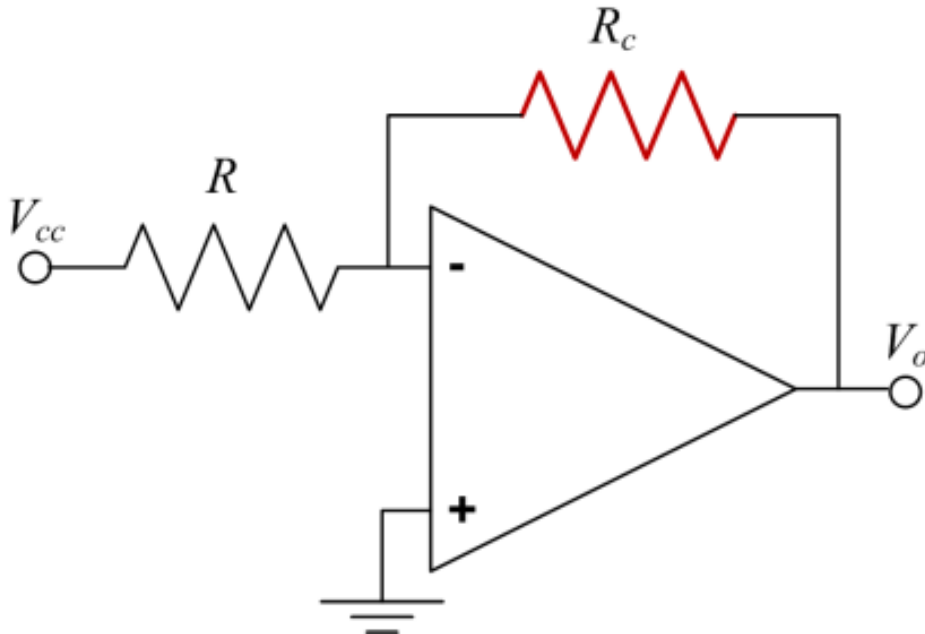
qui est une fonction non linéaire de x .

Ces équations peuvent être généralisées pour des impédances quelconques (capacitances et inductances).

c) Montage dans un amplificateur

Dans le montage dans un amplificateur, comme le montre la figure suivante (amplificateur inverseur), la tension en sortie de l'amplificateur V_o est :

$$V_0 = -V_{cc} \frac{R_c}{R}$$



Montage dans un amplificateur

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.

Bibliographie

Asch, G., & Poussery, B. (2017). Les capteurs en instrumentation industrielle-8e éd. Dunod.