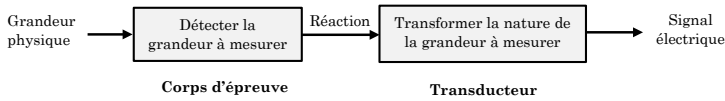


Les capteurs et détecteurs sont des dispositifs essentiels dans les systèmes modernes, permettant la mesure et la détection de diverses grandeurs physiques, chimiques ou biologiques, comme la température, la pression ou le mouvement. Ils convertissent ces grandeurs en signaux électriques ou numériques, utilisables pour le contrôle, la surveillance et l'automatisation dans des applications variées, allant de l'industrie à la domotique et aux dispositifs médicaux.

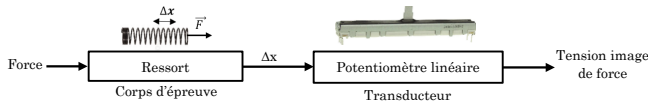
Structure et fonctions principales d'un capteur

Un capteur est un transducteur qui convertit une grandeur physique en un signal électrique. Cette conversion peut être directe ou passer par plusieurs étapes intermédiaires. La structure d'un capteur comporte généralement deux parties :



- **Corps d'épreuve** : Composant mécanique qui détecte et réagit à la grandeur physique en la transformant en une grandeur mesurable.
- **Transducteur** : Élément qui convertit cette réaction physique en un signal électrique exploitable.

Exemple : Mesure d'une force à l'aide d'un ressort



Grandeurs physiques dans la chaîne d'acquisition

La chaîne d'acquisition traite différentes grandeurs physiques, qu'il faut bien caractériser pour évaluer ses performances. On distingue trois types de grandeurs :

- 1- Grandeur à mesurer** : position, vitesse, force, pression, température...
- 2- Grandeur issue du corps d'épreuve** : variation de résistance, longueur ou tension.
- 3- Signal de sortie** :
 - Analogique (Signal continu),
 - Logique (tout ou rien c-à-dire 1 ou 0),
 - Numérique (mot binaire en n bits).

Caractéristiques d'un capteur

Le choix d'un système d'acquisition dépend du cahier des charges lié au phénomène à mesurer. Les caractéristiques métrologiques sont issues d'étalonnages en laboratoire, et doivent être interprétées à partir de la documentation technique du capteur.

Pour mieux les comprendre, on peut s'appuyer sur l'exemple du capteur de température LM35.

1 Features

- Calibrated Directly in Celsius (Centigrade)
- Linear + 10-mV/°C Scale Factor
- 0.5°C Ensured Accuracy (at 25°C)
- Rated for Full -55°C to 150°C Range
- Suitable for Remote Applications
- Low-Cost Due to Wafer-Level Trimming
- Operates From 4 V to 30 V

1- Temps de réponse (Tr) :

C'est la durée minimale pour que la sortie atteigne 95 % de sa valeur finale après un échelon. Pour LM35, le temps de réponse est **tr = 2.5 s**.

2- Étendue de mesure (EM) :

C'est l'intervalle de fonctionnement conforme, donné par : **EM = m_{max} - m_{min}**.
 Pour le capteur LM35, T_{max} = 150°C et T_{min} = -55 °C, donc : **EM = 205 °C**

3- Sensibilité

C'est la variation de la sortie par unité de grandeur d'entrée (Si un capteur est linéaire, la sensibilité est constante s = Cte) : pour LM35, la sensibilité **s = 10 mV/°C**.

4 - Précision de la mesure

La précision **δM** exprime la capacité du capteur à fournir une valeur proche de la réalité.

- L'incertitude est définie par : **m = M ± δM**
- L'erreur relative est : **er = δM / EM** (en %)

Où EM est l'étendue de mesure, m la valeur réelle de la grandeur et M est la valeur mesurée par le capteur. Pour le capteur LM35 : **δM = ± 0.5 °C**

5- Résolution (R)

La résolution est la plus petite variation de la grandeur mesurée que le système d'acquisition peut détecter. Elle ne s'applique que si le capteur est **numérique** ou s'il est associé à un convertisseur **analogique/numérique (CAN)**.

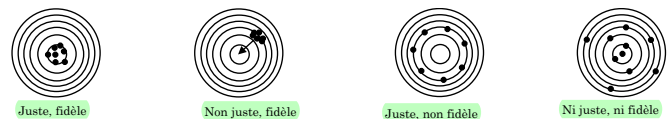
Elle se calcule par : **R = EM / Nombre de niveaux**

Si le capteur LM35 est connecté à une **carte Arduino** équipée d'un convertisseur analogique/numérique (CAN) de résolution **n = 10 bits** :

- ↳ Le nombre de niveaux de quantification est : **2¹⁰ = 1024**
- ↳ La résolution du système d'acquisition est alors : **R = 0.20 °C**

6- Justesse et fidélité de la mesure

- Un capteur est **juste** si ses mesures sont proches des valeurs de référence (valeurs étalon ou données par un capteur de référence).
- Il est **fidèle** si ses mesures sont **reproductibles dans le temps**, même en l'absence d'exactitude.

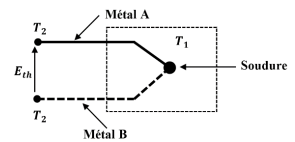


Technologie des capteurs : Capteurs actifs

Les capteurs actifs transforment directement une grandeur physique, comme la lumière ou la chaleur, en signal électrique sans alimentation externe, en utilisant l'énergie détectée.

1- Effet thermique

Un circuit formé de deux conducteurs différents, avec des jonctions à températures T1 et T2, génère une tension d'origine thermique appelée force électromotrice : **E_{th} = S_{AB} (T₁ - T₂)**

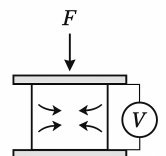


- S_{AB} : le coefficient de Seebeck (V/°C)
- La fém. E est de l'ordre de quelques dizaines de mV

2- Effet piézoélectrique

Une contrainte mécanique appliquée à un matériau piézoélectrique, comme le quartz, déforme son cristal et génère une tension électrique à ses bornes : **V = (d · F · t) / (ε · A)**

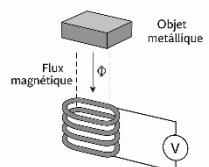
- V : tension générée (V)
- d : coefficient piézoélectrique (C/N ou m/V)
- F : force appliquée (N)
- t : épaisseur du matériau (m)
- ε : permittivité diélectrique (F/m)
- A : surface de la plaque (m²)



3- Effet d'induction électromagnétique

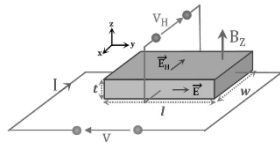
La variation du flux magnétique dans un circuit induit une tension, utilisée pour détecter un objet métallique ou mesurer la vitesse d'une génératrice, loi Lenz - Faraday : **e(t) = -N · dΦ(t) / dt**

- e(t) : tension induite (en volts)
- N : nombre de spires de la bobine
- Φ(t) : flux magnétique traversant la bobine (en Weber, Wb)
- dΦ(t) / dt : variation du flux au cours du temps



4- Effet Hall

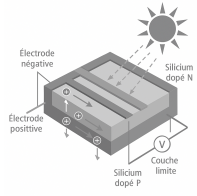
Lorsqu'un courant I_0 circule dans une plaque conductrice soumise à un champ magnétique B , une tension de Hall V_H apparaît perpendiculairement au courant et au champ, selon la relation : $V_h = k \cdot B \cdot I_0$



Avec : k est une constante de proportionnalité dépendant du matériau et de la géométrie de la plaque,

5- Effet photo-électrique

La libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique

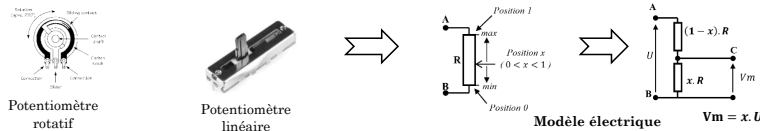


Technologie des capteurs : Capteurs passifs

Les capteurs passifs nécessitent une alimentation externe et modifient une propriété physique, comme la résistance ou la capacité, pour traduire la grandeur mesurée en signal.

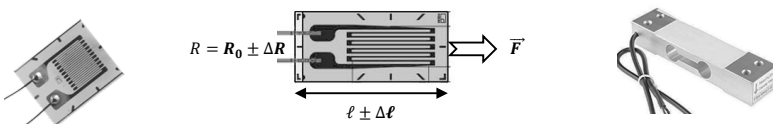
1- Variation de résistance (déplacement linéaire et rotatif)

Ce principe est utilisé dans de nombreux capteurs de position, comme les potentiomètres, les inductances à noyau mobile ou les condensateurs à armature mobile.



2- Déformation

Une déformation modifie la résistance d'un capteur, comme une jauge extensométrique, en raison de l'allongement du fil. Cette variation faible est proportionnelle à l'élongation et nécessite une amplification pour être exploitée.



L'allongement du fil $\frac{\Delta \ell}{\ell}$ réduit sa section, ce qui augmente légèrement sa résistance ; cette variation faible ($R = \rho \frac{\ell}{S}$) : $\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \frac{\Delta \ell}{\ell}$

- R_0 : la résistance de la jauge au repos
- K : le facteur de jauge

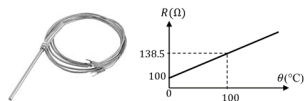
3- Effet thermique

La résistance d'un conducteur métallique varie selon la température. Les capteurs en cuivre, nickel ou platine offrent une grande précision, mais sur des plages de température limitées.

Capteur PT100

La sonde Pt100, utilisée en industrie, est un capteur de température à résistance en platine, suivant la loi : $R_\theta = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta)$

Avec : $\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ et $R_0 = 100 \text{ } \Omega$

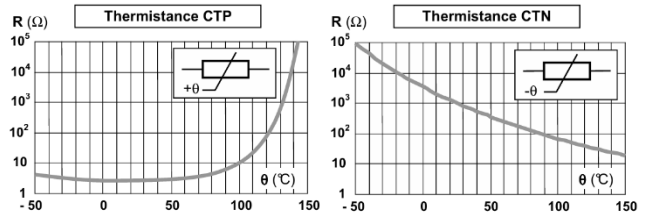


Thermistance CPT-CTN

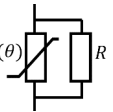
Les thermistances sont des capteurs à base de semi-conducteurs dont la résistance varie avec la température : elle augmente pour les CTP et diminue pour les CTN, sans courant appliqué.

Formule pour le CTN : $R = R_0 \cdot e^{\left(\frac{1}{T + 273.75} + \frac{1}{25 + 273.75}\right)}$

- R_0 : valeur de référence donnée par le constructeur (à 25°C)
- T : température en °C

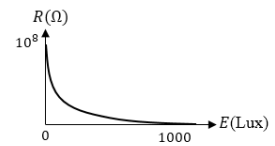


Remarque : Ces capteurs présentent une caractéristique non linéaire. Pour la linéariser sur une plage de température limitée, on les associe en parallèle avec une résistance R .



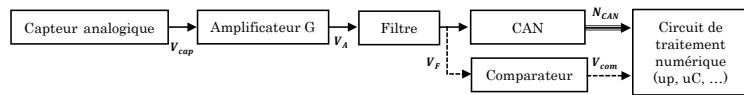
4- Effet photo-résistance

La photorésistance, ou LDR (Light Dependent Resistor), est un composant semi-conducteur dont la résistance diminue lorsque l'intensité lumineuse augmente. Sa réponse n'est pas linéaire par rapport à l'éclairement Φ .



Conditionnement du signal

Le conditionneur de signal est un circuit électronique chargé d'amplifier, filtrer, convertir ou comparer des signaux analogiques pour les adapter aux systèmes de traitement numérique.



1- Relations de base de la chaîne d'acquisition

- Le capteur est caractérisé par sa sensibilité s et par une relation linéaire de la forme : $V_{cap} = s \cdot G + V_0$,
Où G est la grandeur physique mesurée, et V_0 la tension de sortie lorsque $G = 0$.
- L'amplificateur est défini par son gain : $G_{AOP} = \frac{V_A}{V_{cap}}$, avec V_A la tension en sortie de l'amplificateur.
- Le filtre est défini par son gain dans la bande passante, noté A , qui représente l'atténuation ou l'amplification appliquée au signal utile.
- Le convertisseur analogique-numérique (CAN) est défini par sa résolution :

$$q = \frac{PE}{2^n}$$

Où PE est la tension de pleine échelle, et n le nombre de bits du convertisseur. La relation entrée-sortie du CAN s'écrit : $V_F = q \cdot N_{CAN}$

2- Incertitude totale δ_a de la chaîne d'acquisition

Le tableau ci-dessous récapitule les erreurs les plus couramment rencontrées.

Capteur	Amplificateur	Filtre	Convertisseur CAN
Précision	Tension d'offset	Erreur d'atténuation	Erreur de quantification du CAN
δ_{cap}	$\delta_{AOP} = \frac{V_{offset}}{s}$	$\delta_F = \frac{(1-A) \cdot V_{e_{max}}}{s}$	$\delta_{CAN} = \frac{q/2}{s}$

L'erreur globale par composition quadratique (ou erreur quadratique) d'une chaîne de mesure, on utilise la formule quadratique (ou méthode RSS : Root Sum Square) si les erreurs sont supposées indépendantes :

$$\delta = \sqrt{\delta_{cap}^2 + \delta_{AOP}^2 + \delta_F^2 + \delta_{CAN}^2}$$

Exemple LM35 : la température mesurée par le capteur $T = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$

- Si : $\delta_{cap} = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$, $V_{offset} = 2 \text{ mV}$, $A = 0.9995$, $q = 4.8 \text{ mV}$, $V_{e_{max}} = 3.3 \text{ V}$ et $s = 10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$
- Donc : $\delta_{cap} = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\delta_{AOP} = 0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\delta_F = 0.165 \text{ } ^\circ\text{C}$ et $\delta_{CAN} = 0.22 \text{ } ^\circ\text{C}$
- L'incertitude de la chaîne d'acquisition : $\delta = \pm 0.6 \text{ } ^\circ\text{C}$
- D'où la température réelle : $T_{réelle} = T + \delta \Rightarrow T_{réelle} = 25 \pm 0.6 \text{ } ^\circ\text{C}$