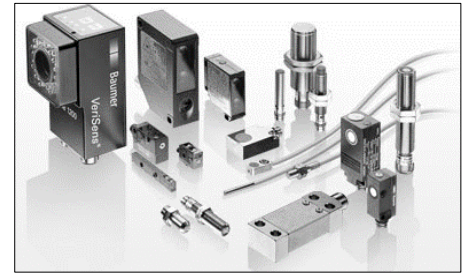


## Chapitre 17 : Capteurs et détecteurs

### I. Introduction

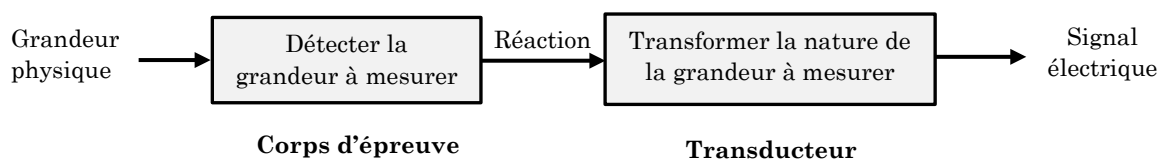
Les capteurs et détecteurs sont des dispositifs essentiels dans les systèmes modernes, permettant la mesure et la détection de diverses grandeurs physiques, chimiques ou biologiques, comme la température, la pression ou le mouvement. Ils convertissent ces grandeurs en signaux électriques ou numériques,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



### II. Structure et fonctions principales d'un capteur

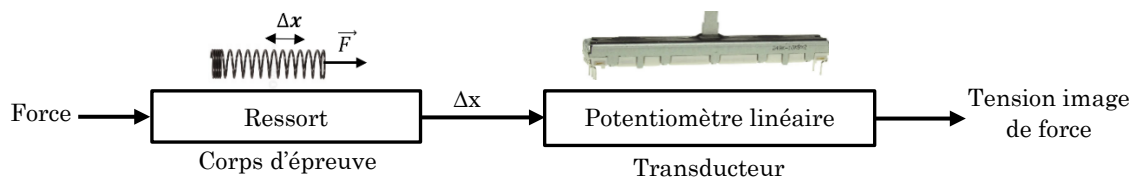
Un capteur est un transducteur qui convertit une grandeur physique en un signal électrique. Cette conversion peut être directe ou nécessiter plusieurs étapes de transformations physiques avant d'obtenir le signal de sortie.

La structure d'un capteur est généralement la suivante :



- **Corps d'épreuve** : Il s'agit d'un composant mécanique qui réagit à la grandeur physique à mesurer, en la transformant en une autre grandeur physique mesurable.
- **Transducteur** : Élément qui interagit avec le corps d'épreuve pour convertir ses réactions en un autre phénomène physique, généralement aboutissant à un signal électrique.

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



### III. Grandeurs physiques dans la chaîne d'acquisition

Différentes grandeurs physiques interviennent au sein des fonctions de la chaîne d'acquisition. Pour évaluer les performances des systèmes d'acquisition, il est essentiel de caractériser les signaux d'entrée et de sortie de chacune de ces parties

#### 1. Grandeur physique à mesurer

- **Cinématique** : position, vitesse, accélération, angle ...
- **Effort** : force, pression, couple ...
- **Fluide** : pression, débit...
- **Thermique** : température...

#### 2. Grandeur physique sortant du corps d'épreuve

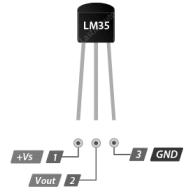
- Variation de résistance.
- Variation de longueur,
- Tension électrique.

#### 3. Grandeur physique du signal de sortie

- **Analogique** : le signal délivré varie de façon continue au cours du temps.
- **Logique (détecteur tout ou rien)** : le signal de sortie prend que le niveau haut ou le niveau bas.
- **Numérique** : Le signal de sortie est numérique et se présente généralement sous la forme d'un mot binaire de n bits.

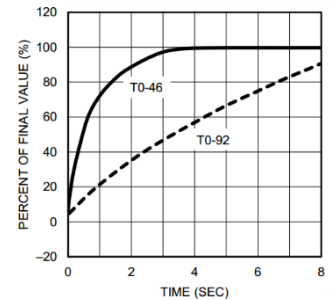
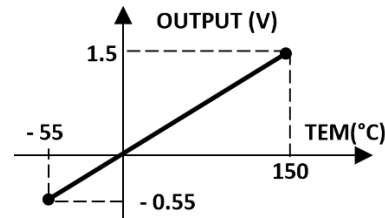
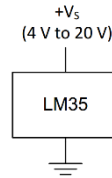
## IV. Caractéristiques d'un capteur

La sélection d'un système d'acquisition se fait en fonction d'un cahier des charges adapté au phénomène que l'on souhaite observer par la mesure de grandeurs physiques. Les caractéristiques métrologiques fournies par les fabricants sont généralement basées sur des étalonnages effectués en laboratoire. Pour bien comprendre ces caractéristiques, il est nécessaire de se référer à la documentation technique 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

Le temps de réponse  $t_r$  est défini comme la durée minimale nécessaire après l'application d'un échelon à l'entrée, pour que l'écart relatif de la sortie par rapport à sa valeur finale atteigne une tolérance spécifiée.

- **Question 1** : déterminer le temps de réponse à 5 % du capteur LM35 (T0-46) :  $t_{r5\%} = 3 \text{ s}$

### 2. Etendue de mesure EM

Il s'agit de la plage de valeurs de la grandeur physique mesurée pour lesquelles le capteur respecte les spécifications du fabricant. Elle est calculée par la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale mesurées :  $EM = m_{max} - m_{min}$

- **Question 2** : Calculer l'étendue de mesure du capteur LM35 :  $T_{MAX} = 150^\circ\text{C}$  et  $T_{MIN} = -55^\circ\text{C} \Rightarrow EM = 205^\circ\text{C}$

### 3. Sensibilité s

La sensibilité d'un capteur est la mesure de sa capacité à détecter de petites variations de la grandeur physique qu'il mesure, exprimée généralement en sortie électrique par unité de variation de l'entrée physique :  $S(m) = \frac{ds}{dm} = \left(\frac{\Delta s}{\Delta m}\right)_m$

**Remarque** : la sensibilité d'un capteur linéaire est constante.

- **Question 3** : Calculer la sensibilité du capteur LM35 et en déduire la valeur de la tension fournie par le capteur à la température 25°C : La caractéristique est linéaire, donc  $S = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta T} = \frac{1.5 - 0}{150 - 0} \Rightarrow S = 10 \text{ mV/}^\circ\text{C}$

### 4. Résolution R

La résolution est la plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible de l'indication délivrée par le système d'acquisition :  $R = \frac{EM}{\text{Nombre de point}}$

- **Question 4** : la tension fournie par le capteur LM35 est convertie par convertisseur A/N, la valeur convertie est présentée sur  $n = 10 \text{ bits}$ . Calculer la résolution de la chaîne d'acquisition (capteur + CAN) : nombre de niveaux de conversion du CAN (points)  $2^n = 1024$ , donc la résolution devient :  $R = \frac{205}{1024} \Rightarrow R = 0.2^\circ\text{C}$

### 5. Précision de la mesure

Elle caractérise l'aptitude d'un capteur à donner une mesure  $M$  proche de la valeur vraie  $m$  de la grandeur mesurée.

- L'incertitude de mesure.  $\delta M$  est telle que :  $m = M \pm \delta M$
- L'erreur relative de précision est :  $\epsilon_r = \frac{\delta M}{EM}$
- **Question 5** : Nous avons installé le capteur LM35 à Oujda. Pour une température ambiante de 28 °C, le capteur indique une température de 27,75 °C. Calculez l'incertitude de mesure  $\delta T$  et déduisez l'erreur relative de précision  $\epsilon_r$ .

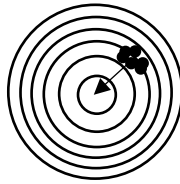
On a : erreur absolue :  $\delta M = m - M = 28 - 27.75 = \pm 0.25^\circ\text{C} \Rightarrow$  erreur relative  $\varepsilon_r = \frac{\delta M}{EM} = 0.12\%$

## 6. Justesse de la mesure et fidélité

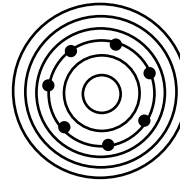
- Un capteur est juste si ses valeurs ne changent pas quand on les compare à des valeurs étalon, ou à des valeurs données par d'autres capteurs normalisés.
- Un capteur est fidèle si ses valeurs ne changent pas au cours du temps (mesures reproductibles)



Juste, fidèle



Non juste, fidèle



Juste, non fidèle



Ni juste, ni fidèle

## V. Technologie des capteurs

### 1. Les capteurs actifs

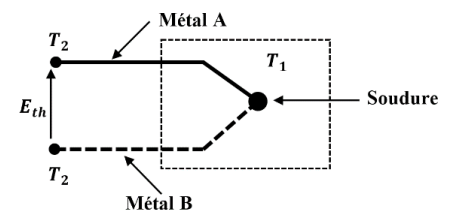
Les capteurs actifs génèrent eux-mêmes un signal électrique en réponse à une grandeur physique sans nécessiter de source d'alimentation externe. Ils convertissent directement l'énergie détectée, comme la lumière ou la chaleur, en un signal utilisable.

#### 1.1. Effet thermique

Lorsqu'un circuit est constitué de deux conducteurs de natures chimiques différentes, avec des jonctions maintenues à des températures  $T_1$  et  $T_2$ , une force électromotrice (tension) d'origine thermique se crée au sein de ce circuit.

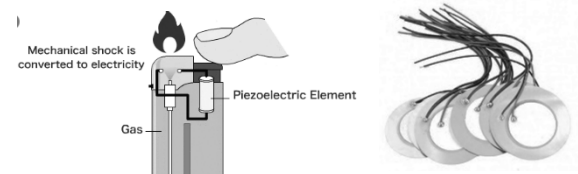
$$E_{th} = S_{AB} (T_1 - T_2)$$

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



#### 1.2. Effet piézoélectrique

L'application d'une contrainte mécanique sur certains matériaux dits piézoélectriques, comme le quartz, provoque une déformation du cristal, générant ainsi une tension électrique aux bornes du matériau.



#### 1.3. Effet d'induction électromagnétique

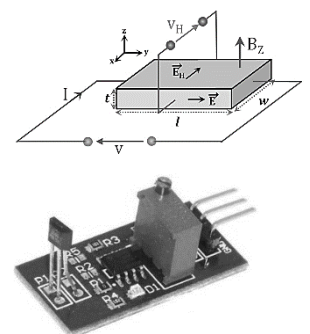
La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique, permettant ainsi de détecter le passage d'un objet métallique ou de mesurer la vitesse d'une génératrice à courant continu, comme dans un tachymètre.



#### 1.4. Effet Hall

Lorsqu'un courant électrique  $I_0$  traverse une plaque métallique placée dans un champ magnétique  $B$ , une tension  $V_H$ , perpendiculaire au champ magnétique, est générée selon la relation :  $V_H = k \cdot B \cdot I$

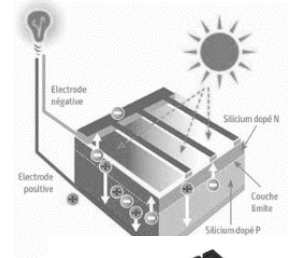
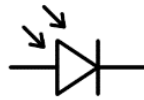
Ce principe est notamment utilisé pour la mesure du courant électrique dans un circuit à partir du flux magnétique qu'il génère dans une boucle conductrice.



**Exemple :** module Arduino « Capteur à effet hall CH3144 »

### 1.5. Effet photo-électrique

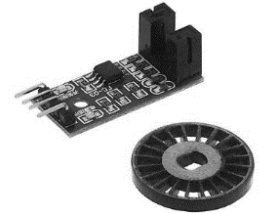
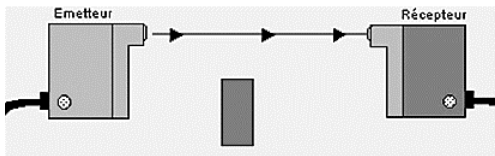
La libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique



#### Exemple 1 : Capteur de vitesse Arduino (coupleur)

Module capteur de vitesse basé sur un LM393, un capteur optique à fourche et un disque perforé.

#### Exemple 2 : Détecteur photoélectrique

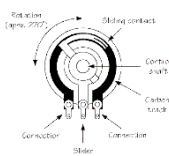


## 2. Les capteurs passifs

Les capteurs passifs ne génèrent pas de signal électrique par eux-mêmes ; ils nécessitent une source externe d'alimentation. Ils modifient une propriété physique, comme la résistance ou la capacitance, en réponse à une grandeur mesurée, traduisant ainsi l'information.

### 2.1. Variation de résistance (déplacement linéaire et rotatif)

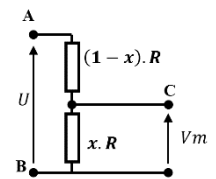
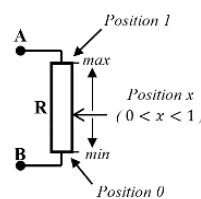
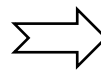
C'est le principe de fonctionnement de nombreux capteurs de position, tels que les potentiomètres, les inductances à noyau mobile et les condensateurs à armature mobile.



Potentiomètre rotatif



Potentiomètre linéaire

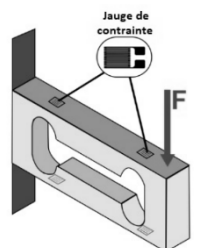
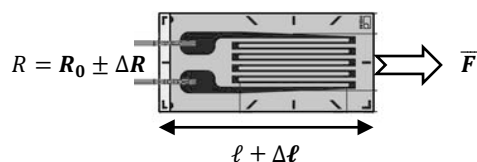
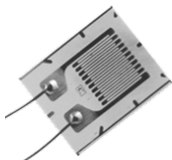


Modèle électrique

La relation entre  $V_m$  et le déplacement  $x$  est : **(loi de diviseur de tension)  $V_m = U \cdot \frac{xR}{R} \Rightarrow V_m = x \cdot U$**

### 2.2. Déformation

Résultant d'une force ou d'une grandeur associée (comme la pression ou l'accélération) : une armature de condensateur soumise à une différence de pression, ou une jauge extensométrique fixée à une structure déformable.



Lors de l'allongement des longueurs  $\ell$  du fil, la section des conducteurs diminue ce qui augmente la résistance du fil ( $R = \rho \frac{\ell}{s}$ ). Cette variation est très faible et sera amplifiée :  $\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \frac{\Delta \ell}{\ell}$

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

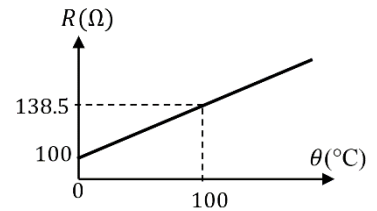
### 2.3. Effet thermique

La température et ses dérives font varier la valeur de la résistance fabriquée par certains matériaux semi-conducteurs sensibles à l'effet thermique.

### a. Capteur Pt100

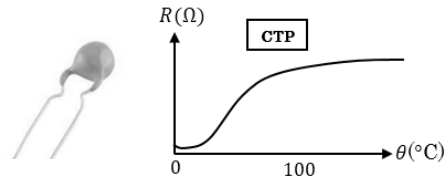
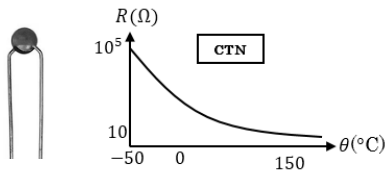
La sonde Pt 100 est un capteur de température qui est utilisé dans le domaine industriel est constitué d'une résistance en Platine :  $R\theta = R_0 \cdot (1 + \alpha\theta)$  avec  $\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

À  $T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$   $R\theta = R_0 = 100\Omega$  d'où le nom PT100 (il existe des PT25, PT1000...)



### b. Thermistance CPT-CTN

Elles utilisent des matériaux semi-conducteurs dont le coefficient de température est positif (CTP) ou négatif (CTN), c'est à dire que leur résistance augmente ou diminue lorsque la température augmente.

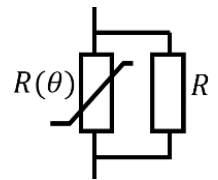


**Formule CTN :**

$$R = R_0 \cdot e^{B \left( \frac{1}{T+273.75} + \frac{1}{25+273.75} \right)}$$

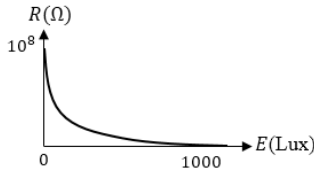
- $R_0$  : valeur de référence donnée par le constructeur (à  $25^\circ\text{C}$ )
- $T$  : température en  $^\circ\text{C}$
- Rappelons que :  $T(^\circ\text{C}) = t(^{\circ}\text{K}) - 273,15$ .

**Remarque :** La caractéristique de ces capteurs n'est pas linéaire, donc on le monte en parallèle avec une résistance  $R$  pour rendre la caractéristique linéaire dans une plage réduite de température.



## 2.4. Photorésistance

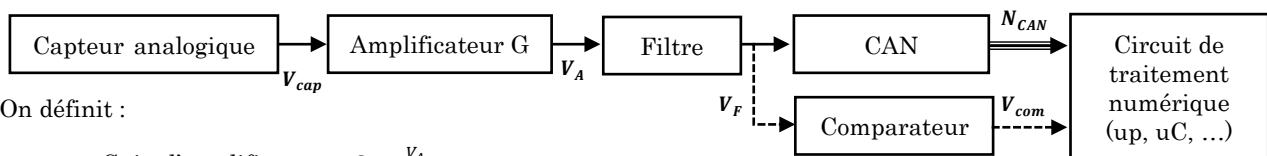
Une photorésistance est une résistance  $R$  dont la valeur varie en fonction du flux lumineux  $E$  reçu.



On utilisera de préférence une partie sensiblement linéaire de la caractéristique.

## 3. Conditionnement du signal

Le conditionneur de signal est un circuit électrique qui amplifie, filtre, compare ou convertit les signaux analogiques en numériques, afin de les adapter aux processeurs de traitement numérique.



○ Gain d'amplificateur :  $G = \frac{V_A}{V_{cap}}$

○ Gain du filtre dans la bande passante :  $G = \frac{V_F}{V_A}$

Le cahier des charges demande parfois de vérifier l'erreur de mesure commise par le convertisseur analogique numérique CAN, cette erreur peut être calculée par la relation suivante :  $\epsilon_m = \frac{\epsilon_{CAN}}{s \cdot G \cdot A}$  avec  $s$  est la sensibilité du capteur analogique.

**Exemple :** calculer l'erreur de mesure en  $^\circ\text{C}$  du capteur LM35. On donne :  $\epsilon_{CAN} = \pm \frac{V_{ref}}{2^{n+1}}$ ,  $V_{ref} = 5\text{V}$ ,  $n = 10$  bits,  $A = 1$ ,  $G = 10$ .

Le cahier de charges impose une erreur sur la mesure de température à ne pas dépasser  $\pm 0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

On a :  $\epsilon_m = \frac{V_{ref}}{2^{n+1} \cdot s \cdot G \cdot A}$ , donc  $\epsilon_m = 0.024 \text{ } ^\circ\text{C} < 0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$ , alors cela respecte le cahier des charges