

# Mesure des Grandeurs Physiques

## Introduction

Avec l'évolution des automatismes, la robotique et le contrôle de qualité, la métrologie est à la base du progrès scientifique et joue un rôle fondamental dans le développement des activités industrielles. En effet, dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs, etc.), on a toujours besoin de contrôler des grandeurs physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, déplacement, etc.). Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

**Objectif:** Mesurer & contrôler les grandeurs physiques (vitesse, température, force, luminosité, etc.).

## 5.1 Définitions

**5.1.1 Capteur (en anglais, *Sensor*) :** Organe (*transducteur*) qui transforme la grandeur physique à mesurer en une grandeur (souvent de nature électrique) utilisable ou bien exploitable à des fins de mesure ou de commande (Fig. 5.1).

Le capteur est caractérisé par une fonction  $s = f(m)$ .

**$m$  :** Signal d'entrée du capteur (la grandeur physique à mesurer 'mesurande'),

**$s$  :** Grandeur de sortie, grandeur de mesure ou réponse du capteur (très souvent électrique : charge, tension, courant ou impédance). La mesure de  **$s$**  doit permettre de connaître la valeur de  **$m$** .

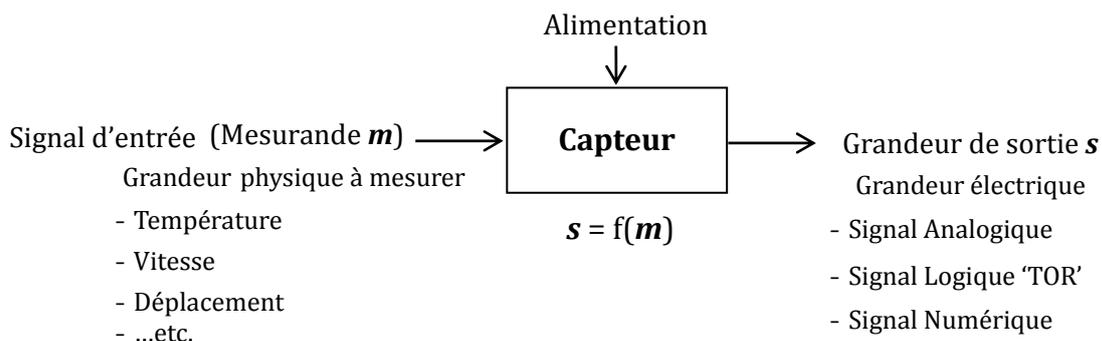


Fig. 5.1 Synoptique d'un capteur

Comme indiqué ci-dessus, le signal de sortie électrique, peut être de nature :

**Analogique :** Signal variant de façon continue dans le temps et peut prendre une infinité de valeurs.

**Logique :** Associé à une variable binaire, elle ne peut prendre que deux états de type Tout ou Rien 'TOR' : 0 ou 1, vrai ou faux, haut ou bas.

**Numérique :** Signal variant de façon discontinue dans le temps (valeur > à deux états).

### 5.1.2 La Chaîne de mesure

Le capteur est souvent impossible à utiliser directement. La chaîne de mesure ou d'acquisition (Figure 5.2) est l'ensemble des dispositifs, y compris le capteur, rendant possible, dans les meilleures conditions, la détermination précise de la valeur du mesurande.

On distingue deux types de chaînes de mesure :

1. La chaîne de mesure analogique,
2. La chaîne de mesure numérique.

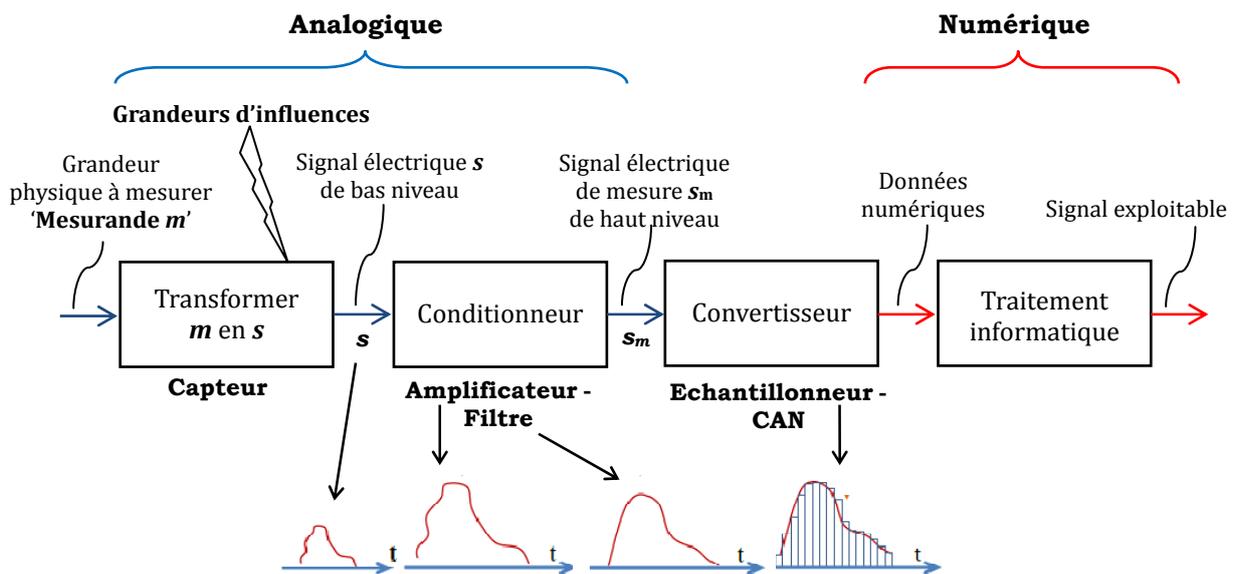
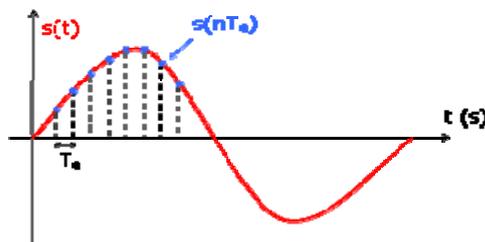


Fig. 5.2 Schéma bloc d'une chaîne de mesure

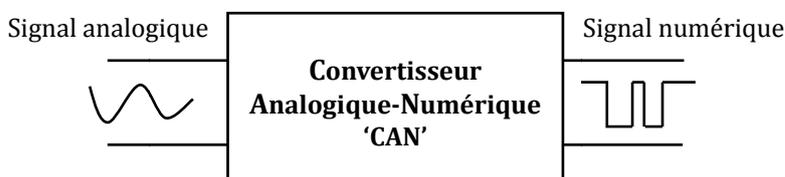
#### 5.1.2.1 Constitution

- **Capteur** : Premier élément de la chaîne de mesure, capable d'acquérir une grandeur physique à mesurer  $m$ , et de la transformer en une autre grandeur (signal électrique)  $s$ .
- **Conditionneur** : Ensemble de composants (circuit électronique) de mise en forme du signal mesuré pour le rendre utilisable. Il comprend :
  - **Amplificateur** : Adapter le niveau du signal issu du capteur.
  - **Filtre** : Réduit les perturbations (parasites) présentes sur le signal.
- **Grandeurs d'influences** : 'parasites' (champs magnétique, l'humidité, les vibrations, le vieillissement, etc.) viennent perturber le fonctionnement du capteur et entraînent souvent des erreurs de mesure. *Le capteur reste fragile et onéreux, plus il est technologiquement performant et plus il est coûteux.*
- **Convertisseur** : Unité de numérisation, qui comprend en particulier :

- **Echantillonneur** : Echantillonner un signal  $s(t)$  revient à prélever à intervalle de temps régulier  $T_e$  (période d'échantillonnage), les valeurs  $s(nt)$  du signal où  $n$  est un entier.



- **Convertisseur Analogique-Numérique 'CAN'** : (en anglais, ADC pour Analog to Digital Converter) un montage électronique dont la fonction est de traduire une grandeur analogique en une valeur numérique (codée sur plusieurs bits). Le signal converti est le plus souvent une tension électrique.



- **Traitement informatique** : Cette unité exploite les mesures (enregistrement, affichage de courbes, traitements Mathématiques, transmissions des données ...).

### 5.1.3 Classification des capteurs

En fonction de la caractéristique électrique de la grandeur de sortie, on peut classer d'une manière générale les capteurs en deux grandes familles : les *capteurs actifs* et les *capteurs passifs*.

**Actif & Passif ?** Sachant qu'un dipôle électrique est un composant électrique possédant deux bornes.

- Un dipôle **actif** est un dipôle **générateur** (fournit du courant électrique dans un circuit).
- Un dipôle **passif** est un dipôle **récepteur** (ne fournit pas de courant électrique dans un circuit).

#### 5.1.3.1 Capteurs Actifs

La sortie du capteur est équivalente à un **générateur électrique** ( $s$  étant un courant, une tension ou une charge). Il convertit selon un effet physique, la grandeur à mesurer.

Les capteurs actifs ont besoin d'un circuit d'adaptation (conditionneur) pour fournir un signal électrique de mesure utilisable.

**Exemples** (pour *quelques capteurs*) : en fonction du mesurande, on utilise plusieurs effets pour réaliser la mesure.

## 1. Capteur de température 'Thermocouple'

Capteur capable de transformer une valeur de température en une tension (différence de potentiel).



**Effet Thermoélectrique (ou Seebeck)** : un circuit formé de deux conducteurs A et B, en métaux de nature différente sont soudés entre eux (figure 5.3). La jonction réalisée s'appelle "jonction de mesure" (soudure chaude, de température  $T_c$  à mesurer). La différence de température entre cette jonction et une "jonction de référence" (soudure froide, de température ambiante  $T_a$  connue) provoque une d.d.p (ou f.e.m) :

$$e_{AB} = S_{AB} \times (T_c - T_a) = S_{AB} \times \Delta T$$

$S_{AB}$  : Coefficient de Seebeck dépendant de la nature des deux métaux ( $V/^\circ C$ ).

$e_{AB}$  : f.e.m de l'ordre de quelques dizaines de mV.

Le signal de sortie est analogique, proportionnel à la température.

L'application directe de l'effet, consiste à mesurer la température  $T_c$  lorsque  $T_a = 0^\circ C$ .

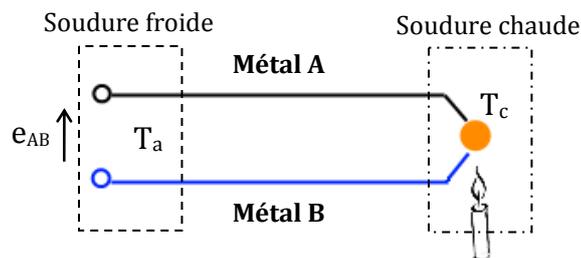
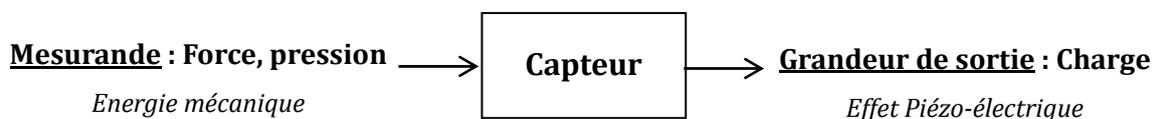


Fig. 5.3 Montage d'un thermocouple

## 2. Capteur de force/pression



**Effet piézo-électrique** : (du grec piézein, presser, appuyer) est la propriété que possèdent certains matériaux (le quartz par exemple) de générer une tension sous l'effet d'un déplacement de charges électriques lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique.

$$V = k (F + F) = 2k.F = k'.F$$

$k'$  : une constante du matériau piézoélectrique utilisé.

La tension  $V$  est proportionnelle à la force appliquée  $F$ .

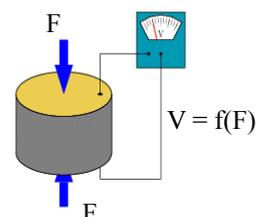
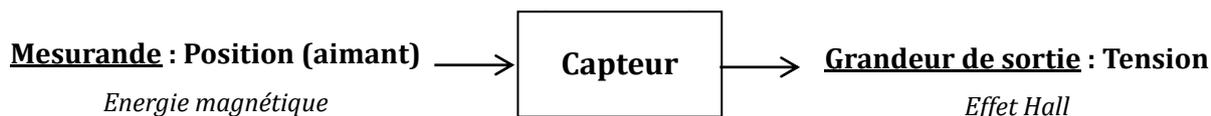


Fig. 5.4 Capteur à effet piézo-électrique

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

Comme exemple d'application l'allume-gaz. Dans lequel, la pression exercée produit une tension électrique qui se décharge brutalement sous forme d'étincelles.

### 3. Capteur de position à effet Hall



Son principe est basé sur une découverte déjà ancienne, en 1879, par le physicien américain Edwin Herbert Hall : Si un courant  $I$  traverse un matériau conducteur (sous forme de plaquette) et soumis à une induction  $B$ , faisant un angle  $\theta$  avec le courant. Il apparaît, une différence de potentiel appelée tension de Hall :

$$V_H = K_H \cdot I \cdot B \cdot \sin\theta.$$

Où :

$K_H$  dépend du matériau et des dimensions de la plaquette (y compris l'épaisseur  $e$ ).

$I$  : Intensité du courant (A),

$B$  : Intensité du champ magnétique (T).

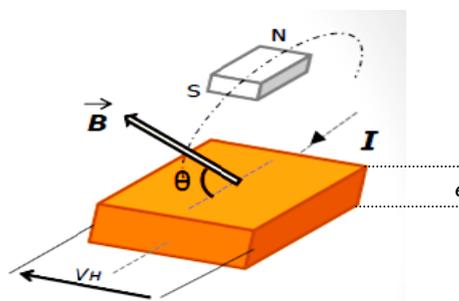
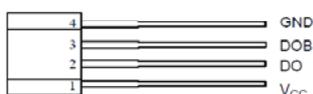


Fig. 5.5 Capteur de position à effet Hall

**Application :** détecter la position de l'aimant permanent (aimant lié à un objet dont on veut connaître la position), mesure de la vitesse, mesure de courant,...

En pratique, on utilise le composant AH276 est un capteur à effet Hall intégré.



AH276

Numéro de la broche	Nom de la broche	Fonction
1	VCC	Tension d'alimentation
2	DO	Sortie 1
3	DOB	Sortie 2
4	GND	Masse

### 5.1.3.2 Capteurs Passifs

La sortie du capteur est équivalente à **une impédance** ( $s$  et une résistance, inductance, capacité) dont l'un des paramètres varie en fonction du mesurande (variations des : caractéristiques dimensionnelles ou géométriques, propriétés électriques des matériaux). D'une manière générale, ils ont besoin d'être alimentés pour fonctionner.

En résumé : un capteur passif, variation d'un paramètre du capteur =  $f(\text{mesurande})$ .

Capteur résistif de température  $R = f(T)$ .

**Exemples** (pour quelques capteurs) :

#### 1. Capteur de déplacement résistif 'Potentiomètre'

Un potentiomètre est une résistance variable en fonction de la position constitué d'une résistance fixe  $R$  sur laquelle peut se déplacer un contact électrique, dit curseur. Celui-ci est solidaire mécaniquement de la pièce dont on veut connaître la position ou le déplacement (linéaire ou angulaire) mais en est isolé électriquement.

On sait que la résistance d'un conducteur s'exprime par la relation :  $R = \rho \frac{l}{s}$ .

Avec :  $\rho$  : Résistivité ( $\Omega.m$ ),  $l$  : Longueur du conducteur (m),  $s$  : Surface du conducteur ( $m^2$ ).

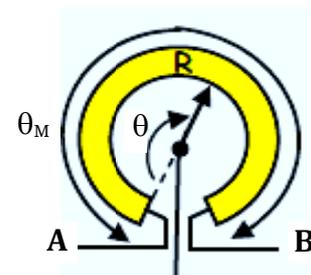
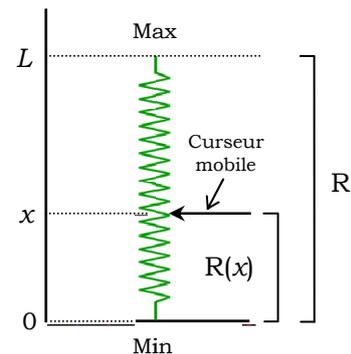
Par analogie, on exprime la résistance entre une extrémité fixe et un curseur mobile :

- Cas d'un déplacement linéaire :  $R(x) = R \frac{x}{L}$ .

$R$  : Résistance totale du potentiomètre,  
 $x$  : Déplacement relatif à la position du curseur,  
 $L$  : Course totale du potentiomètre.

- Cas d'un déplacement angulaire :  $R(\theta) = R \frac{\theta}{\theta_M}$ .

$R$  : Résistance totale du potentiomètre,  
 $\theta$  : Angle de rotation,  
 $\theta_M$  : Course totale.



Les potentiomètres permettent de réaliser des capteurs pour la mesure des déplacements (linéaire ou angulaire) d'un objet. Pour ce faire, il suffit d'appliquer une tension à ses extrémités **A** et **B**.

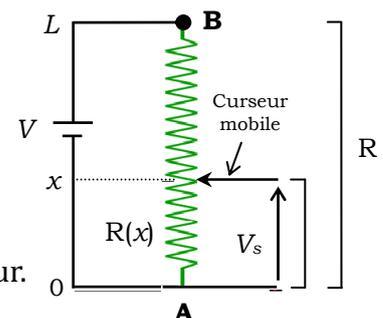
Pour le potentiel linéaire :  $V_s = R(x) \frac{V}{R} = R \frac{x}{L} \cdot \frac{V}{R} = x \frac{V}{L} = kx$ .

Avec  $k = \frac{V}{L}$  : sensibilité du capteur en Volt/A.

Pour le potentiel angulaire :  $V_s = V \frac{\theta}{\theta_M} = \frac{V}{\theta_M} \theta = k\theta$ .

Avec  $k = \frac{V}{\theta_M}$  : sensibilité du capteur en Volt/degré.

La grandeur d'entrée d'un potentiel linéaire est une longueur, celle de la sortie est une tension proportionnelle à cette longueur.



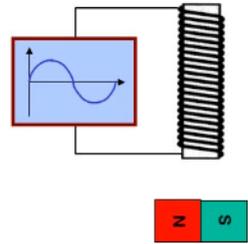
## 2. Capteur inductif

Basé sur le principe de la loi de Lenz. Lorsqu'une bobine est soumise à une variation de flux magnétique (déplacement d'un aimant, d'une cible ou de la bobine elle-même), il génère une tension électrique :

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

$e$  : fem en volt,  $\phi$  flux en Webers.

Le signe - est pour indiquer que la polarité de la tension est telle qu'elle s'oppose à la cause qui l'a produite.



Grace à ce champ magnétique développé à l'extrémité du capteur, cela permet de détecter un objet conducteur (objet métallique).

Ce type de capteur est utilisé dans de nombreux domaines, exemple des chaînes de montage (détection des pièces sans contact), automobile (ABS), ou encore dans l'aéronautique (fermeture des portes...).

## 3. Capteur de température 'Thermomètre à résistance'

La température est une grandeur non directement mesurable, mais repérable par la variation d'une grandeur associée (résistance, dilatation). Basé sur le phénomène de l'influence de la température sur la résistance d'un conducteur ( $R = f(T)$ ). La mesure de la température est ramenée à la mesure de la résistance.

Pour un conducteur la résistance (métallique) à une valeur croissante avec la température donnée par :

$$R(T) = R_T = R_0(1 + aT + bT^2 + cT^3) \quad (1)$$

$R_T, R_0$  : Résistance à la température  $T$  °C, résistance à 0 °C exprimées en ohm ( $\Omega$ ).

$a, b, c$  : coefficients positifs spécifiques au métal considéré exprimés en  $(^\circ\text{C})^{-1}$ . Le métal le plus utilisé est le platine dont la plage d'utilisation s'étend de  $-200^\circ\text{C}$  à  $1000^\circ\text{C}$ .

Pour de petites variations de la température la relation (1) peut être approximée comme suit :

$$R(T) = R_T = R_0(1 + aT) \quad (2)$$

$a$  coefficient positif :  $a = \frac{1}{R_0} \left( \frac{dR_T}{dT} \right)$  et s'exprime en  $(^\circ\text{C})^{-1}$  ;

Pour la mesure de la résistance, le circuit *conditionneur* souvent utilisé est appelé "pont de Wheatstone" (pour avoir une meilleure précision). Il est ici (Figure ci-dessous) constitué d'un générateur de tension associé à 4 résistances dont une est la résistance  $R_T$ .

$E$  : source de tension en V

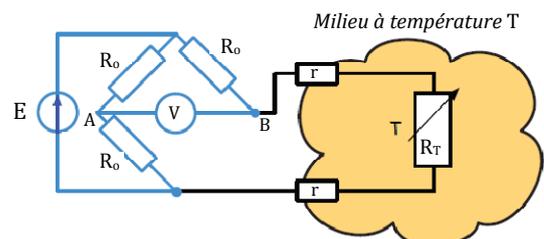
$V$  : tension image de la température

$T$  : température à mesurer en  $(^\circ\text{C})$

$r$  : résistance de ligne en  $\Omega$

$R_0$  : résistance à 0  $(^\circ\text{C})$  en  $\Omega$

$R_T$  : résistance à  $T$   $(^\circ\text{C})$  en  $\Omega$ .



En négligeant les résistances  $r$  des deux fils devant les résistances  $R_0$  et que l'on utilise la relation (2) :  $R_T = R_0(1 + \alpha T)$ .

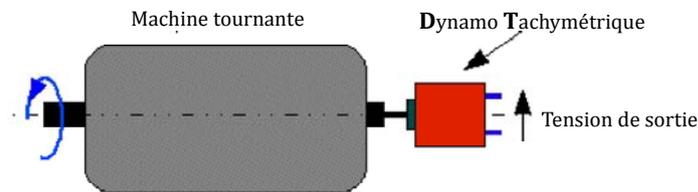
En utilisant le diviseur de tension, on peut écrire :

$$V = \frac{E}{2} \left( \frac{\alpha T}{2 + \alpha T} \right)$$

#### 4. Capteur de vitesse 'Tachymétrie'

Basé sur une conversion électromécanique, où la grandeur d'entrée est de type mécanique (vitesse) et celle de sortie est de type électrique. Un tachymètre permet d'indiquer la vitesse de rotation d'un mobile comme par exemple une poulie, axes, un moteur... Le capteur peut être mécanique, optique ou à courants de Foucault.

Pour le cas mécanique, appelée également dynamo tachymétrique 'DT', il délivre une tension proportionnelle à la vitesse de rotation :  $E = k\omega$ .



C'est une petite machine, à très faible inertie, accouplée de façon rigide à l'arbre de la machine entraînante.

$E$  : f.e.m en Volt,  $k$  : constante de f.e.m. en  $V/\text{rad/s}$  et  $\omega$  : pulsation en  $\text{rad/s}$ .

**N.B.** En ce qui concerne le tachymètre optique (sans contact), utilise le principe de réflexion de la lumière. Equipé d'une LED qui émet une lumière qui va se réfléchir sur une cible et revient vers l'appareil équipé d'un récepteur. La vitesse est mesurée en comptant la fréquence à laquelle le faisceau est réfléchi.

#### 5. Capteur de débit 'Débitmètre électromagnétique'

Basé sur la loi de Lenz-Faraday. Quand un liquide conducteur s'écoule perpendiculairement à travers un champ magnétique, généré à l'aide de deux bobines magnétiques situées des deux cotés du tube de mesure. Une différence de potentiel électrique est créée au sein du liquide. Cette d.d.p. captée à l'aide de deux électrodes montées perpendiculairement sur la paroi interne de la conduite (isolé électriquement), est proportionnelle à la vitesse moyenne du fluide, donc à son débit.

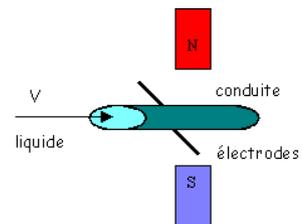
**Rappel** : - Le débit est la quantité d'une grandeur qui traverse une surface donnée par unité de temps.

- Débit volumique : quantifie le volume  $V$  qui traverse une surface  $S$  :

$$Q_v = v_{\text{moy}} \times S \quad (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}).$$

- Débit massique caractérise la masse qui traverse la surface par unité de temps :

$$Q_m = \rho \times v_{\text{moy}} \times S = \rho \times Q_v \quad (\text{Kg} \cdot \text{s}^{-1}).$$



## 5.2 Caractéristiques métrologiques des capteurs

Le capteur à pour principale fonction de transformer les grandeurs (mesurandes) d'un processus en signaux électriques. En pratique, cette transformation peut être affectée par des perturbations 'Grandeurs d'influence' (défauts produits, conditions d'utilisations, etc.). Le lien entre un capteur et la grandeur qu'il mesure est défini par des caractéristiques d'emploi fournies par le constructeur, décrivant au mieux son fonctionnement. Un capteur est généralement caractérisé par :

### 5.2.1 Etendue de mesure 'E.M.'

Plages de valeurs du mesurande pour lesquelles le capteur répond aux spécifications du constructeur :  $E.M. = m_{max} - m_{min}$ .

$m_{max}$ ,  $m_{min}$  : Mesures extrêmes (portées maximales et minimales).

**Exemple :** Soit un capteur susceptible de mesurer une température minimale de  $-20^{\circ}\text{C}$  et une température maximale de  $180^{\circ}\text{C}$ .  $E.M. = 200^{\circ}\text{C}$ .

### 5.2.2 Sensibilité

Rapport de la variation du signal de sortie à la variation du mesurande :  $S(m) = \frac{\Delta s}{\Delta m}$

Un capteur est dit linéaire si, dans l'étendue de mesure,  $S(m)$  est fonction linéaire de  $m$ , sa sensibilité est alors constante dans cette plage de fonctionnement.

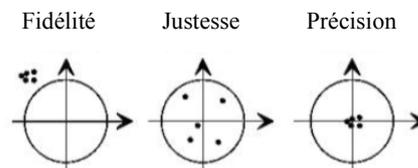
Exemple : Capteur de position  $S = 10 \text{ V/m}$  ; capteur de température  $S = 0.05 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ .  
Elle représente la pente de la caractéristique du capteur.

### 5.2.3 Temps de réponse

Temps de réaction du capteur (rapidité et aptitude du capteur à suivre dans le temps les variations de la grandeur à mesurer). Il faut donc tenir compte du temps de réponse, de la bande passante et la fréquence de coupure du capteur.

### 5.2.4 Précision

Capacité du capteur à donner les mêmes indications proches de la valeur vraie du mesurande. Un bon capteur présente à la fois une bonne fidélité et une bonne justesse (voir chapitre 1).



## 5.3 Choix d'un capteur

Le choix d'un capteur approprié s'effectue en vérifiant que ses caractéristiques métrologiques sont compatibles avec les conditions imposées par le cahier des charges. Ces conditions sont de deux types :

- Conditions sur la mesurande,
- Conditions sur l'environnement de mesure.

## **Bibliographie**

- [1] G. ASCH & COLL, 'Acquisition de données du capteur à l'ordinateur', 3<sup>ème</sup> édition Dunod 2003-2011.
- [2] G. ASCH & COLL, 'Les capteurs en Instrumentation Industrielle', 7<sup>ème</sup> édition Dunod 2006-2010.
- [3] R. KETATA, N. BELHADJ YOUSSEF, 'Notes de cours Capteurs', module capteurs et actionneurs IIA2, Institut National des Sciences Appliquées et de Technologies, Tunisie, version 2010-2011.