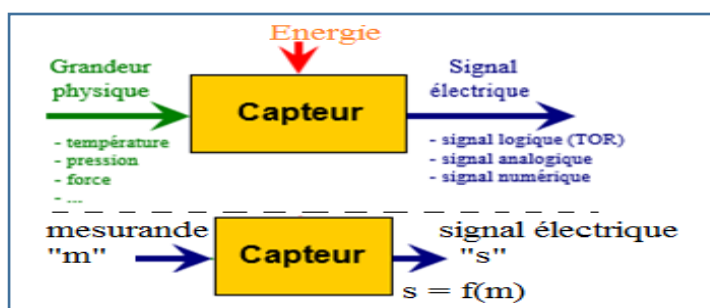


Chapitre 2. Caractéristiques métrologiques des capteurs :

2-1- Définition

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.

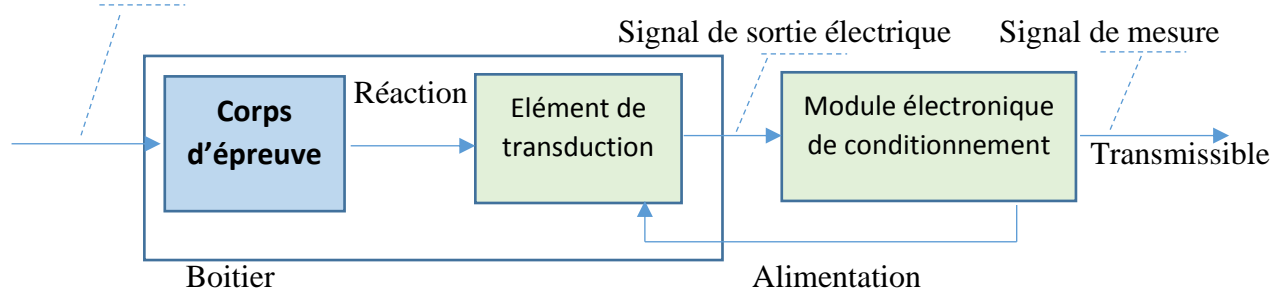
Un capteur est le premier maillon de toute une chaîne de mesure, acquisition de données, de tout système d'asservissement, régulation, de tout dispositif de contrôle.



Nb : la mesure de « s » doit permettre la connaissance aussi exacte que possible du mesurande « m »

2-1-1 Constitution d'un capteur

Grandeur physique à mesurer



- **Corps d'épreuve** : élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer (appelée aussi mesurande). Il a pour but de transformer la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dit 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 :
 - *Alimentation électrique du capteur (si nécessaire)*
 - *Mise en forme et amplification du signal de sortie*
 - *Filtrage, amplification*
 - *Conversion du signal (CAN,...)*

2-1-2 Grandeurs d'influence

Les grandeurs d'influence sont des grandeurs étrangères qui, selon leur nature et leur importance, peuvent provoquer des perturbations sur les capteurs. C'est une cause d'erreurs agissant sur le signal de sortie. Parmi les grandeurs d'influence, nous distinguons : la température, la pression environnante, les vibrations mécaniques ou acoustiques, la position du capteur, l'humidité, les ambiances corrosives, les perturbations électromagnétiques, les rayonnements nucléaires, alimentation électrique du capteur, les accélérations et la pesanteur.

De façon générale, on peut écrire : $s = f(m, g_1, g_2, \dots)$

Remarque : on cherche à réduire l'importance des grandeurs d'influence, en les stabilisant à des valeurs connues, en compensant, en isolant. De façon que $s = f(m, g_1, g_2, \dots)$ soit très proche de $s = f(m)$, (cas idéal).

2-1-3 Mode de fonctionnement des capteurs

Les capteurs fonctionnent selon deux principes de base suivant l'origine du signal électrique de sortie. On distingue :

Dans les capteurs actifs ; une partie de l'énergie physique prélevée sur la mesurande est transformée directement en une énergie électrique constitue le signal de sortie. Ce signal est un courant, une tension. Les signaux de sortie délivrés par les capteurs actifs sont de faible puissance. Ils sont dits de bas niveau et doivent être amplifiés pour pouvoir être ensuite transmis à distance.

Dans les capteurs passifs, c'est l'impédance du capteur qui est sensible aux variations du mesurande. Ces variations d'impédance ne sont mesurables que par l'intermédiaire d'un circuit électronique de pré-conditionnement. Les capteurs passifs doivent être alimentés par une source d'énergie extérieure. Cette source peut être une tension continue ou modulée en fréquence.

Nb : ces modes de fonctionnement correspondent à des principes de base et s'adapte essentiellement aux capteurs a sortie analogique. Pour les capteurs a sortie numérique et logique sont des cas particuliers.

2-2 Etalonnage des capteurs

L'étalonnage est l'opération qui établit la relation entre le mesurande et la grandeur électrique de sortie. Cette relation peut dépendre non seulement du mesurande mais aussi des grandeurs d'influence. L'étalonnage comprend l'ensemble des opérations nécessaires pour expliciter graphiquement ou algébriquement la relation :

$$s = f(m, g_1, g_2, \dots, g_n)$$

S'il n'y a pas de grandeurs d'influence, l'étalonnage est simple, dans le cas contraire il est multiple.

2-2-1 Etalonnage simple

On distingue deux méthodes possibles :

- l'étalonnage direct dans lequel les valeurs du mesurande sont issues d'étalons ou d'objets de référence pour lesquels le mesurande est connu avec une incertitude donnée.
- l'étalonnage par comparaison dans lequel on compare les mesures du capteur à étalonner avec celles provenant d'un autre capteur lui-même préalablement étalonné et considéré comme étant la référence, ce qui signifie que son étalonnage est raccordé à des étalons et que l'incertitude correspondante est connue.

2-2-2 Etalonnage multiple

L'existence de grandeurs d'influence susceptibles de varier au cours des mesures oblige à paramétrer l'étalonnage pour différentes valeurs de ces grandeurs : c'est l'étalonnage multiple. Quelques cas particuliers d'étalonnages multiples méritent d'être mentionnés :

- Pour les capteurs présentant une hystérésis, il est nécessaire de procéder à l'étalonnage par une succession ordonnée et spécifiée des valeurs du mesurande.
- Pour les capteurs de grandeurs dynamiques, il faut relever la réponse en fréquence pour un mesurande d'amplitude fixée et la réponse en amplitude pour une fréquence fixée.
- Dans certains cas, notamment pour beaucoup de capteurs mécaniques et thermiques, lorsque le constructeur ne donne pas d'indication relative à l'usage du capteur, il est souvent souhaitable d'effectuer l'étalonnage après son installation sur le site. Ainsi, l'étalonnage d'un accéléromètre peut être effectué après sa fixation à la structure dont on veut mesurer l'accélération, en particulier si, dans le certificat d'étalonnage, le constructeur a spécifié une procédure différente.

2-2-3 Raccordement

Les pays industriels sont dotés de chaînes d'étalonnage, c'est-à-dire d'une organisation hiérarchisée de laboratoires établissant par opérations successives le raccordement des mesures à des étalons primaires. La traçabilité, c'est à dire les étalonnages successifs lorsque l'on passe du laboratoire primaire à l'utilisateur industriel, est assurée par des étalons ou des instruments de transfert. Au cours du raccordement les opérations successives effectuées dans le cadre d'une chaîne d'étalonnage vise non seulement à établir la relation liant la mesure au mesurande mais aussi à déterminer l'incertitude avec laquelle tout capteur effectue une mesure. A côté de l'aspect légal de certaines de ces opérations, il faut rappeler que les processus certifiés par les normes ISO 9000 exigent également la traçabilité (connaissance et maintien des étalonnages) des capteurs qui sont utilisés pour leurs mises en œuvre.

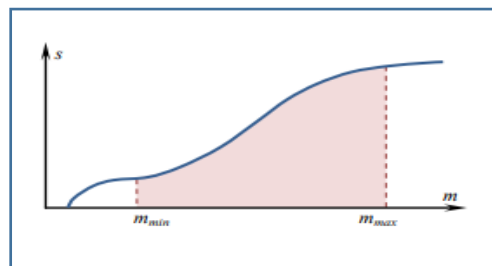
2-3 Caractéristiques métrologiques des capteurs

Les liens entre un capteur et la grandeur qu'il mesure sont définis par ses caractéristiques d'emploi.

2-3-1 Etendue de mesure (E.M) :

Valeurs extrêmes pouvant être mesurée par le capteur « Portée minimale » et « Portée maximale ».

$$E.M = m_{\max} - m_{\min}$$

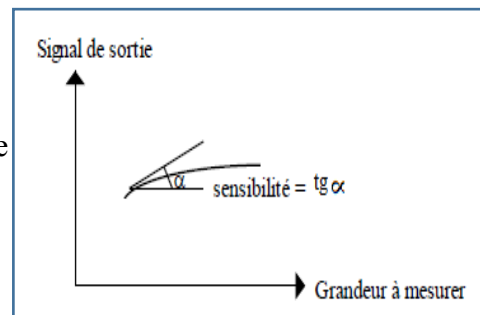


2-3-2 Sensibilité

C'est le rapport de la variation du signal de sortie à la variation correspondante de la grandeur à mesurer. C'est-à-dire la pente de la courbe de réponse du capteur pour une valeur donnée :

$$S = ds/dm$$

avec ds : Variation de sortie
 dm : Variation de l'entrée
(Grandeur à mesurer)



Remarque : Sensibilité permet aussi le choix de façon à ce que la chaîne de mesure dans son ensemble satisfasse aux conditions de mesure imposées :

$$S = (ds/dm) \Big|_{m = m_i}$$

2-3-3 Linéarité

Comme nous venons de le dire, il est recherché une sensibilité relativement constante sur toute l'étendue de mesure. Les différences entre la grandeur électrique de sortie et la droite idéale

$$s = S.M \quad \text{sont appelés « écarts de linéarité ».}$$

2-3-5 Précision

Aptitude du capteur à donner des indications proche de la valeur de la grandeur mesurée (vraie).

L'incertitude sur chaque résultat de mesure M doit être quantifiée par une estimation de l'erreur possible exprimé par $\pm \delta M$. On sait alors que $m = M \pm \delta M$. L'erreur de précision est une erreur relative ϵ_p (ramenée à l'étendue de mesure), donné par :

$$\varepsilon_p = \delta M / E.M$$

La sortie du capteur se présente :

- Soit comme un générateur fournissant un courant ou une tension, le capteur est alors actif,
- Soit comme une impédance, le capteur est alors passif.

2-3-6 Rapidité

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.

Bande passante : Gamme de fréquence pour laquelle le capteur fonctionne.

2-3-7 Répétabilité (fidélité) :

Assure à l'utilisateur que le capteur produira la même grandeur de sortie, dans des limites spécifiées, chaque fois que ce capteur est utilisé dans des conditions identiques.

2-3-8 Reproductibilité :

Est l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesures successifs d'une même grandeur dans le cas sont effectuées dans les conditions différentes que pour la répétabilité.

2-3-9 Sensibilité dynamique

La réponse d'un capteur à un mesurande variant sinusoïdalement dans le temps revêt d'une importance particulière car elle permet d'en déduire la réponse à tout mesurande variable dans le temps (c.-à-d. réponse transitoire). Si on appelle $S(\omega)$ la sensibilité du capteur soumis à un mesurande sinusoïdal de pulsation ω , la réponse à une impulsion temporelle est donnée par sa transformée de Fourier.

Variation sinusoïdale : $m = m_0 + m_1 \cos(\omega t)$

Série de Fourier : $m(t) = m_0 \sum_0^{\infty} m_n \cos(n\omega t + \varphi_n)$

La sensibilité au point de fonctionnement Q_0 avec un mesurande de fréquence f sera donc :

$$S = (s1/m1)|_{Q_0}$$

$$S = S(f)$$

La variation de la sensibilité en régime dynamique a généralement pour origine : les inerties mécaniques, thermiques ou électriques de la tête de mesure du capteur et des dispositifs directement associé.

Nb : L'inertie est essentielle au principe physique du capteur.

Exemple N°1 : Considérons un système d'ordre 1, régit par l'équation différentielle suivante :

$$A (ds(t)/dt) + B s(t) \quad \dots \quad (1) \quad \text{avec } A, B \text{ sont des constantes}$$

Mesurande $m(t) = m_1 \cos(\omega t)$ qui peut être aussi sous forme exponentielle :

$$m(t) = m_1 e^{j\omega t} \quad \dots \quad (2)$$

Réponse du système est de la forme :

$$s(t) = s_1 \cos(\omega t + \varphi) \text{ sous forme exponentielle : } s(t) = s_1 e^{(j\omega t + \varphi)} \quad \dots \quad (3)$$

(3), (2) dans (1) : il vient :

$$j\omega A (s_1 e^{j\varphi}) + B (s_1 e^{j\varphi}) = m_1$$

Posons $f_c = B/2\pi A \longrightarrow$ fréquence de coupure

$$\text{Alors } s_1 = \frac{m_1}{B} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}} \right) \longrightarrow \frac{s_1}{m_1} = \frac{1}{B} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}} \right)$$

$$\varphi = -\tan^{-1}(f/f_c) \longrightarrow \text{Le déphasage } \varphi$$

La sensibilité du système est :

- En régime statique ($f=0$) : $S(0) = 1/B$
- En régime dynamique ($f > 0$) : $S(f) = s(0) \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}} \right)$

Exemple du système d'ordre 1 : Thermomètre, à l'alcool, thermocouple

2-4 Les erreurs de mesure

Les seuls mesurande dont les valeurs sont parfaitement comme les grandeurs étalons dont les valeurs sont fixées par la convention. La valeur de tout autre mesurande ne peut être connue qu'après le traitement par une chaîne de mesure. L'écart entre la valeur mesurée et la valeur vraie est l'erreur de mesure qui est due essentiellement aux imperfections de la chaîne de mesure qui dégradent l'information du signal au cours de son traitement. Une conception rigoureuse de la chaîne de mesure permet de réduire l'erreur de mesure et donc l'incertitude sur la valeur vraie.

Il existe différents types d'erreurs de mesure, dont nous présentons deux types ;

2-4-1 Erreur Aléatoire ou accidentelles

Ce sont des erreurs non reproductibles, leur apparition et leurs valeurs sont considérées comme aléatoires. Certaines de leurs causes peuvent être connues, mais les valeurs des erreurs qu'elles entraînent au moment de la mesure sont inconnues. Elles sont déterminées à partir de lois statistiques.

Elle inclut les causes d'erreur dues aux :

- seuil de mesure (plus petite valeur mesurable),
- résolution (plus petite variation mesurable),
- hystérésis,
- parasites,
- influences du milieu sur le capteur : les variations de température sur un capteur de pression.

Lors de mesures répétées nous obtenons généralement une dispersion des résultats ; si les erreurs de mesure sont aléatoires un traitement statistique permet de connaître la valeur la plus probable de la grandeur mesurée et de fixer les limites de l'incertitude.

Lorsque la mesure d'une même valeur a été répétée n fois en donnant les résultats : m_1, m_2, \dots, m_n , la valeur moyenne \bar{m} est par définition :

$$\bar{m} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{n}$$

L'erreur aléatoire Ea est la différence entre le résultat d'un mesurage m_i et cette moyenne lorsque n tend vers l'infini et que les mesures sont obtenues dans des conditions de répétabilité :

$$Ea = m_i - \bar{m}$$

Lorsque les erreurs accidentelles sur les différentes mesures sont indépendantes, la probabilité d'apparition de différents résultats satisfait habituellement la loi de Gauss.

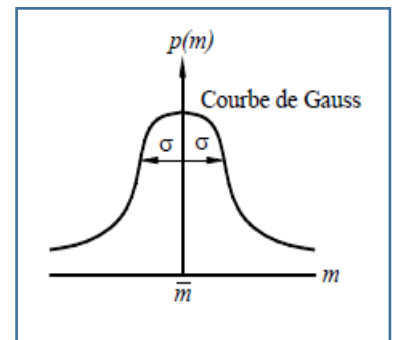
Lorsque cette loi est satisfaite, la probabilité $P(m_1, m_2)$ d'obtenir comme résultat d'une mesure une valeur comprise entre deux valeurs m_1 et m_2 peut s'écrire :

$$P(m_1, m_2) = \int_{m_2}^{m_1} p(m) dm$$

Où $p(m)$ est la densité de probabilité d'obtenir la valeur m .

Dans le cas de la loi de Gauss cela donne :

$$p(m) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(m-\bar{m})^2}{2\sigma^2}}$$



Une indication de la dispersion de ces résultats est donnée par l'écart type :

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (m - \bar{m})^2 p(m) dm$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}{n - 1}}$$

La probabilité d'apparition d'un résultat de la mesure dans les limites indiquées est :

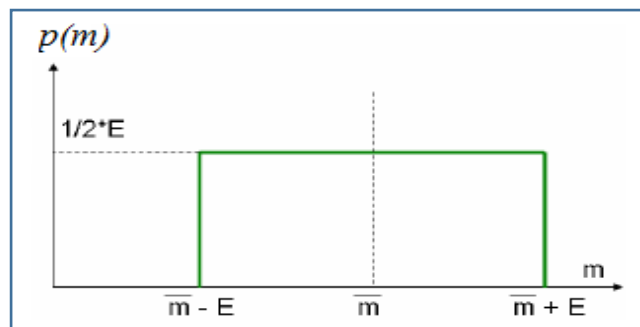
$$p(\bar{m} \pm \sigma) = 68,28\%$$

$$p(\bar{m} \pm 2\sigma) = 95,45\%$$

$$p(\bar{m} \pm 3\sigma) = 99,73\%$$

Il est fréquent que le fabricant d'un capteur donne sa précision sans donner la loi de distribution des erreurs.

Par exemple il indique que son capteur fourni la valeur à mesurer (le mesurande m) à $\pm E$. Dans ce cas, il faut se placer dans le cas le plus défavorable et considérer que la densité de probabilité est uniforme dans l'intervalle $[-E ; +E]$ comme représenté ci-dessous.



L'aire du rectangle, donc la probabilité d'obtenir une valeur m dans l'intervalle $2E$ est de 1.

2-4-1 Erreur systématique :

L'erreur systématique se superpose aux erreurs aléatoires. Elle est provoquée par un mauvais réglage ou un mauvais étalonnage. Elle peut être également induite par la présence du capteur qui modifie la valeur du mesurande. Elle devient importante dans le cas où les instruments sont mal utilisés.

L'erreur systématique Es est la différence entre la moyenne lorsque n tend vers l'infini et que les mesures sont obtenues dans des conditions de répétabilité et une valeur vraie du mesurande m_0 :

$$Es = \bar{m} - m_0$$

Cette définition utilise sciemment l'expression « une valeur vraie du mesurande » et non « une vraie valeur du mesurande » puisque la valeur vraie du mesurande n'est pas connue (sauf si l'on considère que le mesurande est un étalon primaire du système SI).