

Chapitre 2. Quelques caractéristiques métrologiques

2.1 Les erreurs de mesure

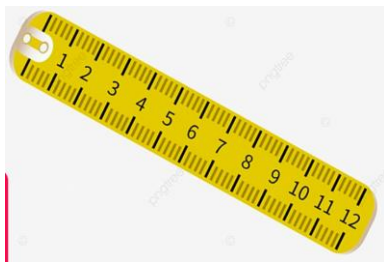
Les seuls mesurands dont la valeur est parfaitement connue sont les grandeurs étalons puisque leur valeur est fixée par convention. La valeur de tout autre mesurand ne peut être connue qu'après traitement par une chaîne de mesure. L'erreur de mesure ne peut être qu'estimée.

Etalon de poids



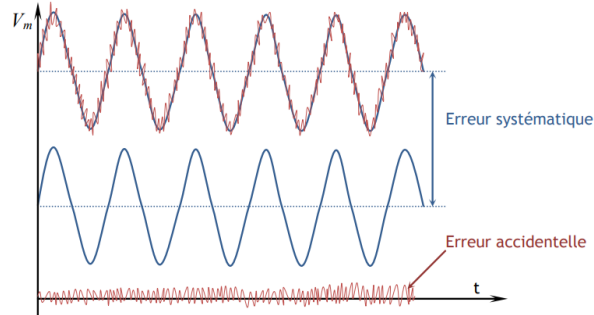
Poids-étalons en classe de précision E1

Etalon de longueur



2.1.1. Erreurs systématiques

Elle introduit donc un décalage constant entre valeur vraie et valeur mesurée.



- Erreurs sur la valeur d'une grandeur de référence (V_{CC} , T_{ref} , etc.).
- Erreurs sur les caractéristiques du capteur (sensibilité, rapidité, etc.).
- Ecart à la linéarité d'un capteur ou d'un conditionneur (pont de Wheatstone par exemple) supposé linéaire.
- Différence entre la température du capteur qui est mesurée, et celle du milieu que l'on souhaite connaître.

2.1.2. Erreurs accidentelles :

L'apparition de ces erreurs comme leur amplitude et leur signe sont considérés comme aléatoires.

- **L'erreur de mobilité** est spécifiée comme la variation maximale du mesurand qui n'entraîne pas de variation détectable de la grandeur de sortie du capteur.
- **Erreur de lecture** d'un appareil à déviation.
- La combinaison de l'erreur relative de mobilité et de l'erreur relative de lecture détermine **l'erreur relative de résolution**.
- Erreur d'hystérésis : lorsque l'un des éléments de la chaîne de mesure comporte un composant présentant de l'hystérésis (hystérésis mécanique d'un ressort, hystérésis magnétique d'un matériau ferromagnétique) sa réponse dépend, dans une certaine mesure, de ses conditions d'utilisation antérieures.
- **Bruit de fond** produit par l'agitation thermique des porteurs de charge dans les résistances ou les composants actifs.
- **Inductions parasites** dues aux rayonnements électromagnétiques, à fréquence industrielle en particulier.
- Erreurs dues à des **grandeurs d'influence**.

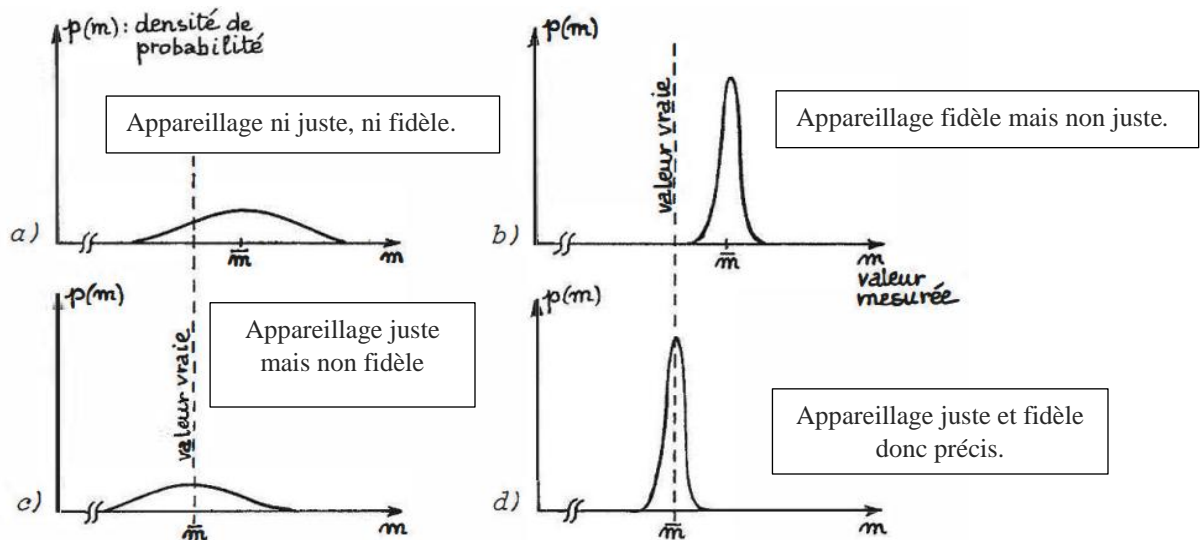
2.1.3. Fidélité - justesse – précision

Lorsque le mesurage d'une même valeur (inconnue) du mesurand a été répété n fois, donnant les résultats : $m_1, m_2 \dots m_n$. La valeur moyenne et l'écart type sont donnés par :

$$\bar{m} = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n}{n} \quad \text{et} \quad \sigma = \sqrt{\frac{(m_1 - \bar{m})^2 + (m_2 - \bar{m})^2 + \dots + (m_n - \bar{m})^2}{n-1}}$$

La densité de probabilité (dans le cas de la loi de Gauss) pour la valeur m du mesurande est donnée par :

$$p(m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(m-\bar{m})^2}{2\sigma^2}\right).$$



2.2. Étalonnage du capteur

L'étalonnage du capteur comprend l'ensemble des opérations qui permettent d'expliciter, sous forme graphique ou algébrique, la relation entre les valeurs du mesurande et celles de la grandeur électrique de sortie.

2.2.1. Étalonnage simple

L'étalonnage consiste à associer à des valeurs parfaitement déterminées du mesurande les valeurs correspondantes de la grandeur électrique de sortie.

- **Étalonnage direct ou absolu** : Les diverses valeurs du mesurande sont fournies soit par des étalons soit par des éléments de référence dont la valeur est connue avec une précision très supérieure.
- **Étalonnage indirect ou par comparaison** : On utilise un capteur de référence dont on possède la courbe d'étalonnage et dont on est assuré de la stabilité. Le capteur de référence et le capteur à étalonner sont soumis dans les mêmes conditions.

2.3. Limites d'utilisation du capteur

Les contraintes mécaniques, thermiques ou électriques auxquelles un capteur est soumis entraînent, lorsque leurs niveaux dépassent des seuils définis, une modification des caractéristiques du capteur.

- **Domaine nominal d'emploi** : Il correspond aux conditions normales d'utilisation du capteur ; ses limites sont les valeurs extrêmes que peuvent atteindre de façon permanente le mesurande, ou les grandeurs physiques qui lui sont associées ou les grandeurs d'influence, et ceci, sans que soient modifiées les diverses spécifications qui caractérisent le fonctionnement du capteur.
- **Domaine de non-détérioration** : Lorsque les valeurs du mesurande ou des grandeurs physiques associées ou des grandeurs d'influence dépassent les limites du domaine nominal d'emploi mais restent inférieures aux bornes du domaine de non-détérioration les caractéristiques métrologiques du capteur risquent d'être modifiées ; cette altération est cependant réversible, le capteur retrouvant ses caractéristiques spécifiées lorsque les conditions de fonctionnement redeviennent celles du domaine nominal d'emploi.
- **Étendue de mesure (E.M.)** : Elle est définie par la différence des valeurs extrêmes de la plage du mesurande dans laquelle le fonctionnement du capteur satisfait à des spécifications données.

2.4 Sensibilité

2.4.1 Définition

La sensibilité S est définie, autour d'une valeur m_i constante du mesurande, par le rapport de la variation Δs de la grandeur de sortie à la variation Δm du mesurande qui lui a donné naissance :

$$S = \left(\frac{\Delta s}{\Delta m} \right)_{m=m_i}$$

2.4.2 Sensibilité en régime statique

L'étalonnage statique consiste en le relevé, pour différentes valeurs constantes du mesurande m_i , des valeurs correspondantes de la grandeur électrique s_i , lorsque celle-ci a atteint son régime permanent.

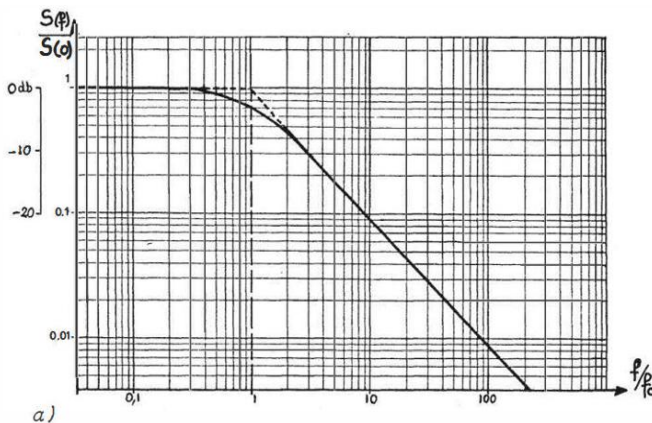
2.4.3 Sensibilité en régime dynamique et réponse en fréquence

La sensibilité en régime dynamique peut être définie lorsque le mesurande m est une fonction périodique du temps ; dans ces conditions la grandeur de sortie s a en régime permanent même périodicité que le mesurande.

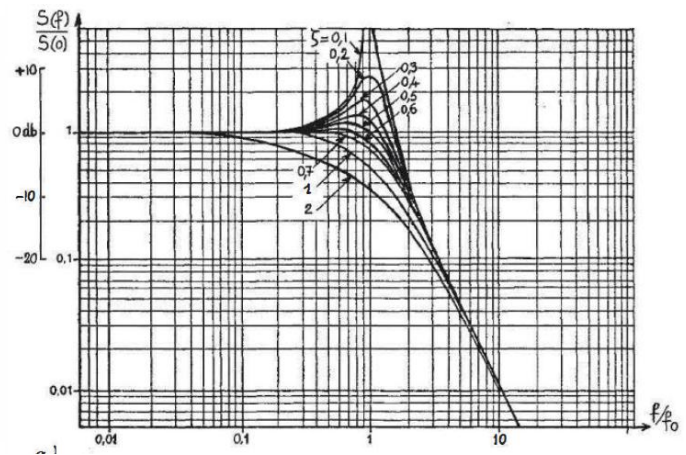
$$m(t) = m_0 + m_1 \cos \omega t \quad s(t) = s_0 + s_1 \cos (\omega t + \psi)$$

La sensibilité qui, de façon générale, est le rapport des variations associées de s et de m est définie dans ce cas par l'expression : $S = \left(\frac{s_1}{m_1} \right)_{m=m_0 \text{ et } s=s_0}$

L'évolution de la sensibilité en régime dynamique en fonction de la fréquence f du mesurande, soit $S(f)$, définie la **réponse en fréquence du capteur**.



Réponse en fréquence d'un système du premier ordre.



Réponse en fréquence d'un système du second ordre.

Définition 2 – Système du premier ordre : La forme générale de l'équation différentielle caractéristique d'un système du premier ordre est :

$$\tau \cdot \frac{ds(t)}{dt} + s(t) = K \cdot e(t)$$

Avec τ , la constante de temps du système (en seconde) et K le gain du système

Propriété 3 : La fonction de transfert d'un système à du premier ordre est :

$$H(p) = \frac{K}{1 + \tau \cdot p}$$

K , le gain statique caractérise le comportement statique tandis que τ , la constante de temps, caractérise le comportement dynamique.

2.4.4 Linéarité

Un capteur est dit linéaire dans une plage déterminée du mesurande si sa sensibilité y est indépendante de la valeur du mesurande.

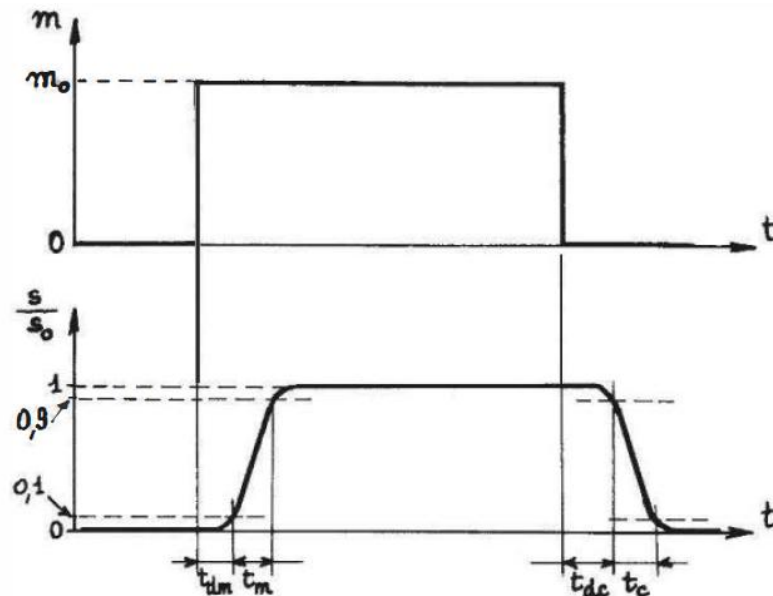
2.5 Rapidité et Temps de réponse

Dès l'instant où le mesurande se trouve appliqué au capteur ou bien subit une variation brusque, l'établissement du régime permanent subséquent est précédé d'un régime transitoire dont l'importance doit pouvoir être appréciée pour une réalisation correcte des mesures.

- **La rapidité** est la spécification d'un capteur qui permet d'apprécier de quelle façon la grandeur de sortie suit dans le temps les variations du mesurande. La rapidité est donc liée au temps nécessaire pour que la contribution du régime transitoire à la grandeur de sortie devienne négligeable dans des conditions de précision définies.

- La grandeur utilisée pour définir quantitativement la rapidité est le **temps de réponse** : c'est l'intervalle de temps qui s'écoule après une variation brusque (échelon) du mesurande jusqu'à ce que la variation de la sortie du capteur ne diffère plus de sa valeur finale d'un écart supérieur à une limite ϵ conventionnellement fixée.

Un temps de réponse doit donc toujours être spécifié avec l'écart ϵ auquel il correspond : $tr(\epsilon)$.



Dans le cas d'un échelon du mesurande entraînant la croissance de la grandeur de sortie :

- **le temps de retard à la montée ou délai à la montée**, t_{dm} , est le temps nécessaire pour que la grandeur de sortie s croisse, à partir de sa valeur initiale, de 10 % de sa variation totale ;
- **le temps de montée**, t_m , est l'intervalle de temps correspondant à la croissance de s de 10 % à 90 % de sa variation totale.

Dans le cas d'un échelon du mesurande entraînant la décroissance de la grandeur de sortie :

- **le temps de retard à la chute ou délai à la chute**, t_{dc} , est le temps qu'il faut pour que la grandeur de sortie s décroisse à partir de sa valeur initiale de 10 % de sa variation totale ;
- **le temps de chute**, t_c , est l'intervalle de temps correspondant à la décroissance de s de 10 % à 90 % de sa variation totale.