



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique
Université Labri Ben M'hindi, Oum El Zouaghi
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Année ; 3^{ème} /ELN
Matière ; Capteurs et Chaines de mesure

Chapitre 2: Caractéristiques métrologiques des capteurs

1. Sensibilité:

Un capteur est un dispositif qui permet la mesure d'un paramètre physique ou chimique. Il fournit une grandeur électrique qui en est la représentation aussi exacte que possible. En général cette grandeur électrique varie proportionnellement avec le paramètre mesuré. Ainsi, pour une variation Δm de la grandeur à mesurer, la grandeur de sortie varie de Δs de telle sorte que [5] :

$$S \Delta m = \Delta s \quad (1)$$

ou S est la sensibilité du capteur. Elle doit dépendre le moins possible de son vieillissement et de son environnement, (c. a. d. de la variation des autres grandeurs).

Afin qu'un capteur soit facilement exploité, on s'efforce, dans la mesure du possible, de le réaliser de façon à ce qu'il délivre une relation linéaire.

$$\Delta s / \Delta m = S = \text{constante} \quad (2)$$

2. Linéarité:

La linéarité d'un capteur caractérise son aptitude à délivrer une grandeur de sortie dont la valeur est proportionnelle à celle du mesurande.

Elle s'apprécie par le degré de concordance entre le diagramme d'étalonnage statique et une droite choisie comme référence (la droite des moindres carrés ou sinon la droite joignant les points extrêmes de l'étendue de mesure) [2,5].

L'écart de linéarité correspond alors à l'écart maximum entre la caractéristique réelle et la droite de référence.

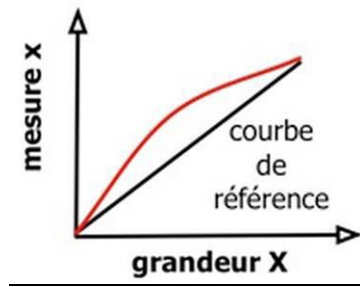


Figure1. Exemple d'écart de linéarité [6,7]

3. Courbe d'étalonnage:

Elle est propre à chaque capteur. Elle permet de transformer la mesure brute en mesure corrigée. Elle est obtenue en soumettant le capteur à une valeur vraie de la grandeur à mesurer ou mesurande fournie par un capteur étalon, et en lisant avec précision la mesure brute qu'il donne.

Exemple chaque capteur possède ses propres caractéristiques : la courbe d'étalonnage d'une thermistance résistance thermique sert à établir une relation mathématique entre une tension mesurée en sortie d'un montage électrique contenant la thermistance et la température du milieu [6].

Pour obtenir une telle courbe il faut faire varier la température du milieu, Θ (en°C) et mesurer la tension de sortie, V_{out} (en V).

Exemple de courbe d'étalonnage d'un capteur de température:

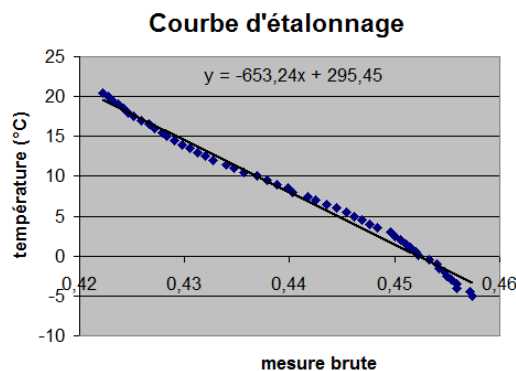


Figure2. Exemple d'étalonnage d'un capteur de température [7]

4. Résolution:

Plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible de l'indication correspondante.

Résolution = (Etendue de mesure du capteur)/(Nombre de points de mesure réalisés sur le capteur) (3)

5. Précision:

Cette caractéristique va souvent être exprimée à partir de multiples mesures, c'est-à dire qu'elle va faire appel à quelques notions statistiques pour quantifier les incertitudes. Ainsi si l'on considère n mesures effectuées sur un mesurande, on va définir à partir de ces n mesures deux notions fondamentales:

- La valeur moyenne:

$$\langle m \rangle = \sum m_i / n \quad (4)$$

- L'écart type (dispersion des résultats autour de la valeur moyenne):

$$\sigma = (\sum (m_i - \langle m \rangle)^2 / (n-1))^{1/2} \quad (5)$$

La Précision est la qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner **des indications proches de la valeur vraie de la grandeur mesurée**. La **fidélité** est l'aptitude à donner pour une même valeur de la grandeur mesurée, des indications concordant entre elles, tandis que la **justesse** est l'aptitude à donner des indications égales à la grandeur mesurée [6].

6. Rapidité, temps de réponse:

C'est le temps de réaction d'un capteur entre la variation de la grandeur physique qu'il mesure et l'instant où l'information prise en compte par la partie commande.

C'est aussi l'aptitude d'un capteur à suivre les variations de la grandeur à mesurer. Dans le cas d'un échelon de la grandeur entraînant la croissance de la mesure on définit le temps de réponse à plus ou moins 10%, c'est le temps nécessaire pour que la mesure croisse, à partir de sa valeur initiale jusqu'à rester entre 90% et 110% de sa variation totale.

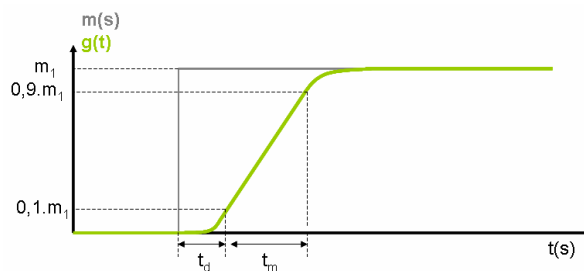


Figure3. Temps de réponse d'un capteur [8]

7. Bande passante:

La bande passante est la bande de fréquence pour laquelle le gain du capteur est compris entre deux valeurs. Le gain du capteur est le rapport x/X généralement exprimé en dB.

$$\text{Gain}_{dB} = 20 \log(x/X) \quad (6)$$

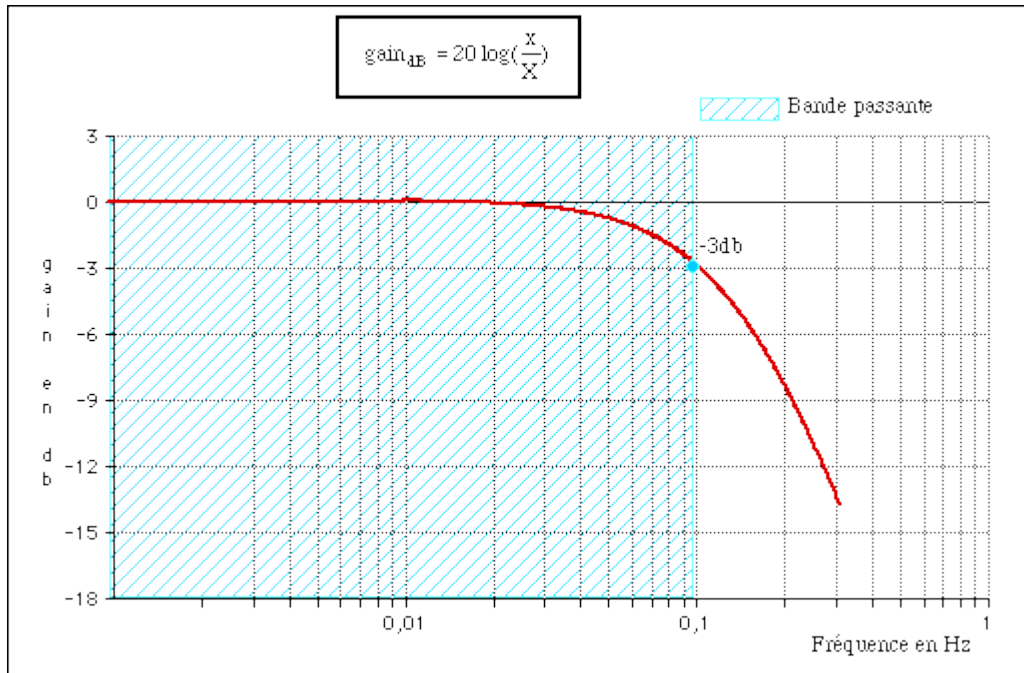


Figure4. Temps de réponse d'un capteur [4,5]

Par convention, le signal continu a une fréquence nulle.

Dans le cas ci-dessus on peut estimer le temps de réponse par la formule : $T = 0,16/F_{max}$ (7), avec $F_{max} = 0,1$ Hz [4,7].

8. Limites d'utilisation:

Il est à signaler que lorsque les valeurs des grandeurs à mesurer dépassent certains seuils, les capteurs risquent de perdre temporairement ou définitivement leurs caractéristiques métrologiques.

8.1. Domaine nominal d'emploi:

C'est le domaine d'utilisation prescrit par le constructeur, il correspond au fonctionnement normal du capteur.

8.2. Domaine de non détérioration:

Lorsque les conditions nominales sont dépassées, sans être supérieures à celles du domaine de non détérioration, les caractéristiques métrologiques du capteur risquent d'être modifiées, mais de façon réversible, dès que l'on retrouve les conditions nominales, le capteur retrouve ses caractéristiques normales [8].

8.3. Domaine de non destruction:

Lorsque les conditions du domaine de non détérioration sont dépassées tout en restant inférieures à celles du domaine de non destruction, les caractéristiques des capteurs sont modifiées de façon irréversible [7].

Pour une utilisation correcte du capteur, un nouvel étalonnage est nécessaire.

Les différents domaines d'utilisation d'un capteur en présence d'une grandeur d'influence parasite (Température) sont représentés sur la figure suivante :

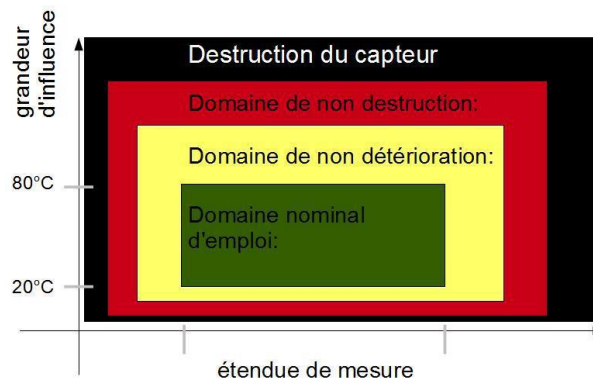


Figure5. Représentation des domaines limites d'utilisation d'un capteur [7]

9. Etalonnage-étendue de mesure:

L'étalonnage d'un capteur consiste à établir la relation qui existe entre la grandeur à mesurer et la grandeur électrique de sortie.

Cette relation peut être graphique : c'est la courbe d'étalonnage;

ou algébrique : c'est l'équation caractéristique du capteur.

L'étalonnage d'un capteur peut être :

- simple ou multiple;
- absolu ou relatif;

L'étalonnage simple consiste à fixer tous les paramètres d'influence et ne faire varier que la seule grandeur à mesurer;

L'étalonnage multiple tient compte de toutes les grandeurs d'influence, il s'agit d'un ensemble d'étalonnages successifs qui détermine la dépendance de la grandeur principale vis-à-vis des grandeurs d'influence.

L'étalonnage absolu ou direct consiste à fournir les valeurs de la grandeur à mesurer par des étalons ou par des éléments de référence de très grande précision.

L'étalonnage relatif ou indirect est l'utilisation d'un capteur dont on connaît la courbe d'étalonnage et dont la stabilité est assez grande.

Le capteur à étalonner et le capteur étalonné sont soumis tous les deux aux mêmes contraintes et dans les mêmes conditions [4,6,7].

C'est alors par comparaison qu'on établit la courbe d'étalonnage du capteur.

Un capteur de qualité présente une courbe d'étalonnage reproductible: c'est **la répétabilité**.

L'**interchangeabilité** est la qualité que présente une série de capteur de même type pour être interchangeés en fournissant des résultats identiques.

L'**étendue de mesure** correspond à la différence entre les valeurs extrêmes d'utilisation (Valeur supérieure – Valeur inférieure) (Figure6) .

Cette plage est souvent confondue avec le domaine nominal d'emploi, mais elle peut être réduite ou plus étendue selon les critères d'utilisation retenus.

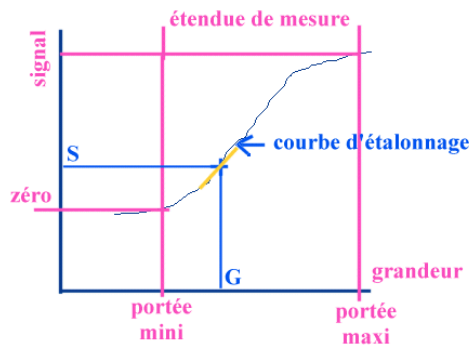


Figure6. courbe d'étalonnage d'un capteur [7]

10. Erreurs de mesure:

10.1. Erreurs aléatoires:

-Les **erreurs aléatoires** sont des erreurs dont on peut (ou non) connaître la cause mais sans que cela permette de prévoir leur effet sur la mesure. **Leur évaluation ne peut être que statistique** et éventuellement probabiliste. On ne peut pas les corriger [1,4].

10.2. Erreurs accidentelles:

- Les **erreurs accidentelles** sont aléatoires et leurs conséquences peuvent être inconnues, par contre leurs causes peuvent être connues.

Parmi ces causes, on trouve:

- les changements intrinsèques des instruments (échauffement, vibrations, bruits, hystérésis, etc)
- instabilité de la tension d'alimentation;
- les grandeurs d'influence;

Pour réduire ces erreurs, on doit prévoir:

- une protection de la chaîne de mesure vis-à-vis des parasites, tels que les rayonnements, les vibrations, l'instabilité de la tension d'alimentation, la dérive des amplificateurs, etc.
- un choix de méthodes judicieuses pour effectuer les mesures.

Un cas où ce type d'erreur peut se produire est le cas où la réponse du capteur dépend des conditions de fonctionnement antérieures dont un cas est une caractéristique possédant une hystérésis [1,3,7].

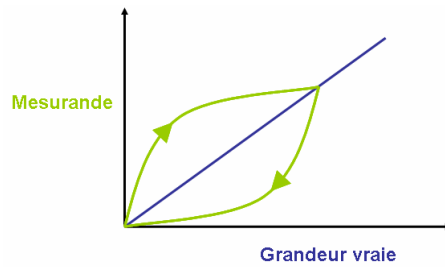


Figure7. Erreur accidentelle avec hystérésis [3]

Ce type de comportement est caractéristique de capteur magnétique par exemple. Un autre cas de d'erreur accidentelle est l'erreur dite de mobilité [3,4]. Elle se rencontre quand la réponse du capteur n'est pas continue.

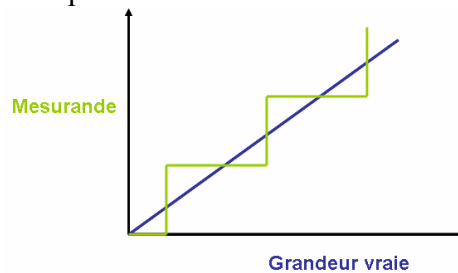


Figure8. Erreur accidentelle de mobilité [3]

Ce type de caractéristique peut être une caractéristique propre au capteur dans le cas d'un capteur de position réalisé par un potentiomètre bobiné soit une caractéristique d'un composant de la chaîne de mesure lorsque celle-ci comporte un convertisseur analogique numérique.

10.3. Erreurs systématiques:

Les **erreurs systématiques** sont dues à l'écart entre la valeur mesurée et la valeur la plus probable dans le cas de la même mesure effectuée par des méthodes et instruments différents.

Parmi les causes d'erreurs systématiques on trouve:

Le mauvais réglage de la valeur de référence (ou de zéro) d'un appareil de mesure;

Altération des caractéristiques du capteur,

Par vieillissement;

Par fatigue de ses éléments mécaniques;

Par altération chimique;

Etc,

ce qui entraîne une modification de sa courbe d'étalonnage initiale (cas des thermocouples et des thermistances).

Pour réduire ce type d'erreur, un étalonnage périodique s'impose.

Non respect du mode ou conditions d'utilisation.

Elles sont souvent dues à une mauvaise utilisation ou une mauvaise connaissance du fonctionnement du capteur (étalonnage incorrect ou périmé, non-attente du régime permanent, effet de charge trop important, non-linéarité ou saturation d'un conditionneur...).

La première source d'erreur systématique est l'erreur de zéro ou offset. Elle se manifeste par un décalage constant entre la grandeur vraie et le mesurande [6,7] .

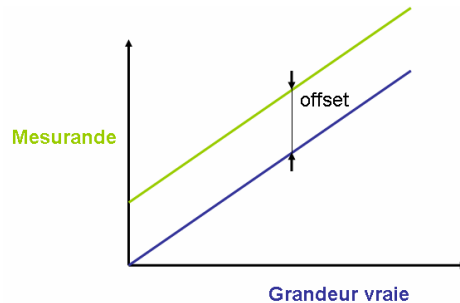


Figure9. Erreur systématique d'offset [6]

Comme la grandeur vraie n'est pas connue, l'erreur commise n'est pas connue. Néanmoins cette erreur d'offset peut être minimisée par un étalonnage précis.

Le second type d'erreur systématique est l'erreur d'échelle ou erreur de gain. Il existe dans ce cas un coefficient entre la grandeur vraie et le mesurande :

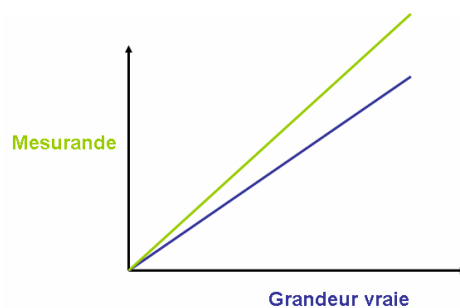


Figure10. Erreur systématique de gain [6]

Le troisième type d'erreur systématique est l'erreur de linéarité. Le capteur est polarisé autour d'un point de repos et la mesure s'effectue dans le domaine des petits signaux en assimilant sa caractéristique à la tangente en ce point.

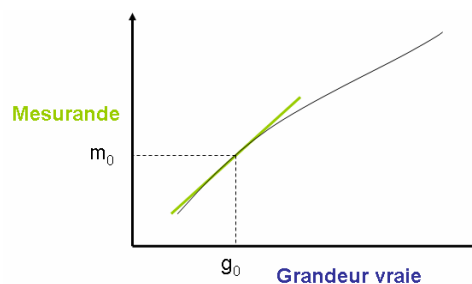
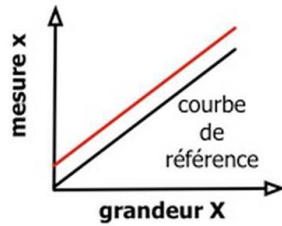


Figure11. Erreur systématique de linéarité [6]

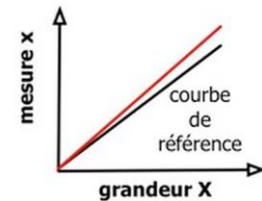
Certains capteurs intelligents intègrent une compensation des erreurs systématiques dues aux dérives thermiques par une fonction d'auto-zéro ou d'auto-gain (Figures12,13).



Erreur de zéro

$$E_{\text{zéro}} = M2 - M1$$

Figure12. Erreur de zéro [7]



Erreur de gain

$$E_{\text{gain}} = M2 - M1$$

Figure13. Erreur de gain[7]

11. Critères de choix d'un capteur:

Pour choisir correctement un capteur, il faudra définir tout d'abord:

- le type événement à détecter,
- la nature d'événement,
- La grandeur de l'événement,
- l'environnement de l'événement.

En fonction de ces paramètres on pourra effectuer un ou plusieurs choix pour un type de détection [1,6]. D'autres éléments peuvent permettre de cibler précisément le capteur à utiliser :

- ses performances,
- son encombrement,
- sa fiabilité (MTBF),
- la nature du signal délivré par le capteur (électrique, pneumatique),
- son prix.

Références bibliographiques:

1. G. Asch, « Les Capteurs en Instrumentation Industrielle », Dunod, 2010.
2. P. Dassonville, « Les Capteurs : Exercices et problèmes corrigés », Dunod, 2005.
3. G. Asch, « Acquisition de données : du capteur à l'ordinateur », Dunod, 2003.
4. M. Cerr, « Instrumentation industrielle », Tomes 1 et 2 ; Edition Tech et Doc.
5. G. Asch et al. « Acquisition de données », 3^e édition, Dunod, 2011.
6. P. Oguic, « Mesures et PC », Edition ETSF.
7. F. Boudoin, M. Lavabre, « Capteurs : principales utilisations », Edition Casteilla, 2007
8. J. G. Webster, "Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook", Taylor & Francis Ltd.
9. Capteurs et types de capteurs [archive], sur robotplatform.com
10. Philippe Meyne – philippe.meyne@univ-paris12.fr – 2008/09

