

## Chapitre 2. Quelques caractéristiques métrologiques

### 1. Introduction

Les caractéristiques métrologiques des capteurs sont des paramètres importants qui permettent de définir les performances de ces dispositifs de mesure. Ces caractéristiques métrologiques sont essentielles pour choisir le capteur le plus approprié pour une application donnée. Il est important de bien comprendre ces paramètres afin de spécifier correctement le capteur et de garantir des mesures précises et fiables. Dans ce chapitre, nous présentons quelques caractéristiques métrologiques courantes des capteurs.

### 2. Caractéristiques d'un capteur

#### 2.1. Étendue de mesure

Elle est la plage de valeurs du mesurande dans lequel le capteur est capable de fournir une mesure précise et fiable et répond aux spécifications du constructeur. La plage de mesure dépend du type de capteur et de sa conception. C'est la différence algébrique entre les valeurs extrêmes pouvant être prises par la grandeur à mesurer, pour laquelle les indications d'un capteur, obtenues à l'intérieur du domaine d'emploi en une seule mesure, ne doivent pas être entachées d'une erreur supérieure à celle maximale tolérée (Figure 2.1).

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

L'unité de l'E.M. est généralement l'unité du mesurande.

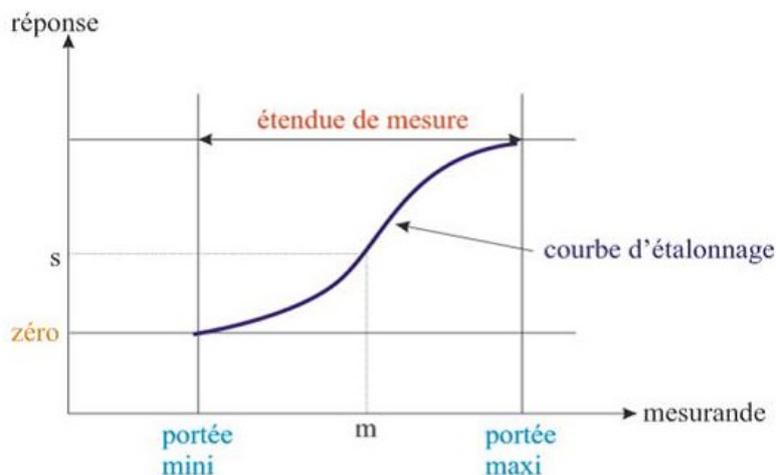


Figure 2.1: Etendue de mesure et courbe d'étalonnage

Un capteur peut généralement être exploité en dehors de « l'étendue de mesure », mais dans ce cas il ne bénéficie plus de la garantie du constructeur quant à ses performances métrologiques.

Exemple : Capteur de force à jauges piezorésistives N556-1

Domaine	Mesurande	Température
Nominal	0-10 N (E.M)	0°C à 60°C

## 2.2. Fonction de transfert

C'est la relation fonctionnelle qui relie le mesurande en entrée et la grandeur électrique en sortie du capteur. Elle est définie soit par un graphe, soit par une relation formelle (linéaire, exponentielle, logarithmique...).

## 2.3. Sensibilité

Pour une valeur donnée de la grandeur à mesurer  $m$ , la sensibilité s'exprime par le quotient de la variation de la grandeur de sortie  $S$  par la variation correspondante de la grandeur mesurée autour de la valeur  $m$ .

$$S = \frac{\Delta s}{\Delta m} \quad \text{unité de } S = \frac{\text{unité grandeur électrique}}{\text{unité mesurande}}$$

Remarque : La sensibilité d'un capteur linéaire est constante. Dans le cas le plus général (la courbe d'étalonnage n'est pas linéaire), la sensibilité représente la pente de la tangente en un point à la courbe d'étalonnage.

## 2.4. Etalonnage

L'étalonnage du capteur comprend l'ensemble des opérations qui permettent d'explicitier, sous forme graphique ou algébrique, la relation entre les valeurs du mesurande et celles de la grandeur électrique de sortie et ceci, compte tenu de tous les paramètres additionnels susceptible de modifier la réponse du capteur.

Ces paramètres additionnels peuvent être :

- Soit des grandeurs physiques liées au mesurande et auxquelles le capteur est sensible : sens et vitesse de variation du mesurande, propriétés physiques du support matériel du mesurande ;
- Soit des grandeurs physiques, indépendantes du mesurande, auxquelles le capteur est soumis pendant son utilisation et qui peuvent modifier sa réponse : grandeurs d'influence d'ambiance : température, humidité ou grandeurs d'influence d'alimentation : amplitude, fréquence des tensions nécessaires au fonctionnement du capteur.

La courbe d'étalonnage peut être définie une relation fonctionnelle  $S = f(m)$ .

Exemple : Sonde de température type thermistance :

$$R(T) = R_0 \cdot \exp B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

La courbe d'étalonnage permet de déterminer la précision du capteur en évaluant son écart par rapport aux valeurs réelles. Elle permet également de déterminer les limites de fonctionnement du capteur et d'ajuster les paramètres de mesure pour obtenir des résultats précis et fiables (Figure 2.2).

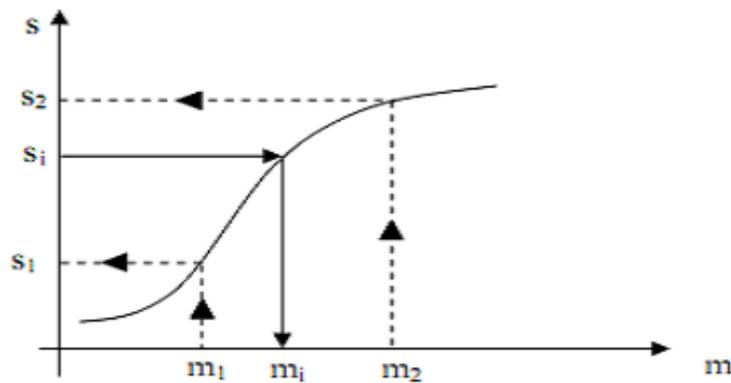


Figure 2.2 : Courbe d'étalonnage d'un capteur.

La courbe d'étalonnage peut être linéaire ou non linéaire en fonction de la relation entre les valeurs mesurées et les valeurs réelles. Si la courbe est linéaire, cela signifie que le capteur est linéaire et peut être étalonné avec une seule mesure de référence. Si la courbe est non linéaire, il peut être nécessaire de procéder à plusieurs étalonnages à différentes valeurs de la grandeur physique pour obtenir une courbe d'étalonnage précise.

#### 2.4.1. Etalonnage simple

Il s'applique à un mesurande défini par une grandeur physique unique et à un capteur non sensible ou non soumis à des grandeurs d'influence.

- **Etalonnage direct ou absolu** : Les diverses valeurs du mesurande sont fournies soit par des étalons soit par des éléments de référence.
- **Etalonnage 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.

#### 2.4.2. Etalonnage multiple

Lorsque le mesurande à lui seul ne permet pas de définir la réponse du capteur, il faut que soit précisée, par une série d'étalonnages successifs l'influence de chacun des paramètres actifs additionnels.

Dans le cas où le capteur est constitué de composants susceptibles de présenter de l'hystérésis, mécanique ou magnétique, la valeur de la grandeur de sortie dépend non seulement de la valeur actuelle du mesurande mais aussi de la suite de ses valeurs antérieures. L'obtention d'une courbe d'étalonnage parfaitement définie exige alors une procédure d'étalonnage dans laquelle le capteur se trouve soumis à une succession ordonnée et spécifiée de valeurs du mesurande.

Exemple : 1-un capteur de température à thermistance peut être étalonné en plongeant la sonde dans différents bains à température connue et en mesurant la résistance de la thermistance à chaque température.

2-Un capteur de pression piézorésistif peut présenter une réponse non linéaire en raison de l'effet de surcharge. Pour étalonner un tel capteur, on peut l'exposer à différentes pressions dans une plage de mesure donnée et noter les lectures de tension correspondantes.

## 2.5. Fidélité

Elle caractérise l'aptitude d'un capteur à donner, pour une même valeur de la grandeur mesurée, des mesures concordant entre elles. Les résultats de mesures répétées d'une même valeur de mesurande restent groupés autour d'une valeur moyenne. La fidélité est souvent caractérisée par l'écart type.

## 2.6. Justesse

Elle caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des mesures proches de la valeur vraie de la grandeur mesurée, les erreurs de fidélité n'étant pas prise en compte. La valeur la plus probable du mesurande est très proche de la valeur vraie (Figure 2.3 ).

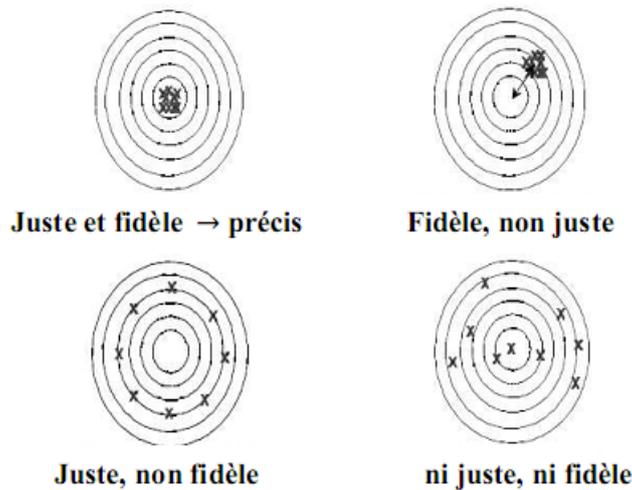


Figure 2.3 : Illustrations de la fidélité et de la justesse

## 2.7. Précision

La précision d'un capteur est sa capacité à fournir des mesures répétables et fiables (proches de la valeur vraie de la grandeur mesurée). Elle est souvent exprimée en pourcentage de la pleine échelle ou en unité de mesure. Par exemple, la précision d'un capteur de pression peut être de  $\pm 0,1\%$  de la pleine échelle.

L'incertitude de mesure  $\delta M$  est telle que :

$$m = M \pm \delta M$$

$$L'erreur\ relative\ de\ précision = \frac{\delta M}{M_{max} - M_{min}}$$

Erreur de précision = erreur de justesse + erreur de fidélité

## 2.8. Non-linéarité

La non-linéarité est la déviation maximale de la réponse du capteur sur l'étendue de mesure, par rapport à la fonction de transfert linéaire. Elle est souvent exprimée en pourcentage de la pleine échelle (% de l'E.M).

$$Erreur\ relative\ de\ linéarité = \frac{\Delta y_{max}}{y_{max} - y_0}$$

La notion de linéarité caractérise la proximité entre la caractéristique réelle d'un capteur et une droite fictive qui serait celle approchant le mieux la relation réelle entre le signal de sortie et grandeur mesurée sur l'ensemble de l'étendue de mesure (Figure 2.4 ).

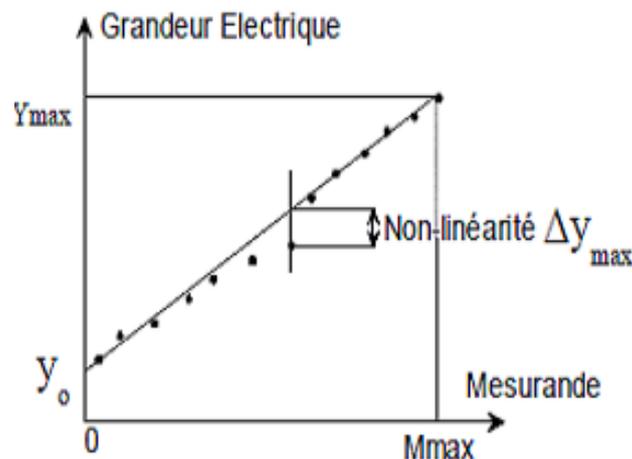


Figure 2.4 : La non-linéarité par rapport à la fonction de transfert linéaire

### 2.9. La stabilité

La stabilité d'un capteur est sa capacité à maintenir sa précision et sa linéarité dans le temps. Elle est souvent exprimée en pourcentage de la pleine échelle par année. Par exemple, la stabilité d'un capteur de température peut être de  $\pm 0,1$  % de la pleine échelle par an.

### 2.10. Hystérésis

L'hystérésis ou la réversibilité caractérise l'aptitude d'un capteur à fournir la même indication lorsqu'on atteint une même valeur de la grandeur mesurée par variation croissante continue ou par variation décroissante continue de la grandeur. En cas d'indications différentes on parle d'erreur d'hystérésis, qu'on exprime aussi en pourcentage de l'étendue de mesure. L'hystérésis est la différence maximale entre ces deux valeurs de sortie (Unité : Unité du mesurande ou % de l'E.M) (Figure 2.5 ).

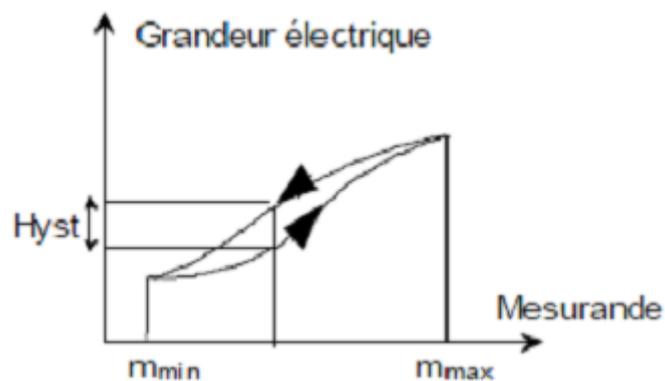


Figure 2.5 : L'hystérésis d'un capteur

### 2.11. Bruit

Les capteurs délivrant une tension électrique génèrent, en plus de l'information sur le mesurande, du bruit. Si ce bruit n'est pas négligeable, alors il limite les performances du capteur.

Dans ce cas, le constructeur spécifiera la densité spectrale du bruit, en supposant que le bruit est blanc.

### 2.12. Résolution

La résolution d'un capteur est la plus petite variation du mesurande que le capteur est capable de détecter. Elle est souvent exprimée en unité de mesure ou en pourcentage de la pleine échelle. Le calcul de la résolution dépend de la précision de la mesure et l'étendue de mesure du capteur. En général, la résolution est égale à l'étendue de mesure divisée par la quantité de valeurs que peut prendre la sortie du capteur.

$$\text{Résolution} = \frac{\text{Etendue de mesure}}{\text{Etendue du signal de sortie}}$$

Exemple : si un capteur de température a une plage de mesure de -50 à 50 °C et une précision de 0,1 °C, sa résolution est calculée comme suit :

La quantité de valeurs que peut prendre la sortie numérique du capteur est donnée par la formule  $2^N$ , où N est le nombre de bits de résolution du convertisseur analogique-numérique (CAN) du capteur. Si le capteur a un CAN de 12 bits, alors  $N = 12$  et le nombre de valeurs possibles est de  $2^{12} = 4096$ .

La plage de mesure du capteur est de 100 °C (50 °C - (-50 °C)).

La résolution est donc égale à  $100 \text{ °C} / 4096 = 0,0244 \text{ °C}$ .

Il est important de noter que la résolution est différente de la précision. La précision se réfère à l'exactitude de la mesure, tandis que la résolution se réfère à la plus petite variation détectable par le capteur.

### 2.13. Rapidité

Elle caractérise l'aptitude d'un dispositif à répondre aux variations temporelles du mesurande. Elle est spécifiée soit par la bande passante, soit par le temps de réponse. Les dispositifs de la chaîne doivent avoir des bandes passantes compatibles avec le signal de mesure.

### 2.14. Bande passante

Elle est définie comme étant la plage de fréquence de variation du mesurande où les caractéristiques du capteur spécifiées par le constructeur sont respectées. Si la fréquence du mesurande est comprise entre  $f_{\text{basse}}$  et  $f_{\text{haute}}$ , l'amplitude du signal de sortie sera conforme aux spécifications du constructeur.

$$\text{B.P.} = [f_{\text{basse}}, f_{\text{haute}}]$$

Elle dépend de la réponse en fréquence du capteur. Une bande passante large est souhaitable pour les applications nécessitant des mesures précises à des fréquences élevées.

### 2.15. Temps de réponse

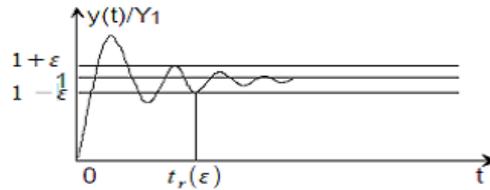
Le temps de réponse  $t_r(\epsilon)$  ou d'établissement est défini comme la durée minimale d'attente après l'application d'un échelon à l'entrée, pour que l'écart relatif de la sortie par rapport à sa valeur finale demeure toujours inférieur à  $\epsilon$  (Figure 2.6).

- La grandeur d'entrée :  $x(t)=X_1 U(t)$  avec  $U(t)=0$  pour  $t<0$  et  $U(t)=1$  pour  $t\geq 0$
- La grandeur de sortie  $y(t)$  tend vers  $Y_1$  quand  $t \rightarrow \infty$   $\frac{Y_1-y(t)}{Y_1} < \epsilon$  pour  $t \geq t_r(\epsilon)$

Exemples de temps de réponse :



Signal d'entrée  $x(t)$  (a) Temps de réponse d'un dispositif du 1<sup>er</sup> ordre



(b) Temps de réponse d'un dispositif du 2<sup>nd</sup> ordre

Figure 2.6 : Réponse dans le temps : a) d'un système du premier ordre b) d'un système du second ordre à un échelon du mesurande.

Plus le temps de réponse est court, plus le capteur est rapide et peut détecter rapidement les changements dans la grandeur physique. Cela est particulièrement important pour les applications en temps réel qui nécessitent des mesures rapides.

**2.16. Finesse**

C'est la propriété qui caractérise le degré d'influence du capteur sur le mesurande. Plus un capteur est fin, moins il perturbe le mesurande.

CAPTEUR	GRANDEUR DÉFINISSANT LA FINESSE ET À MINIMISER SI POSSIBLE	
Capteur de déplacement linéaire LVDT (transfo. différentiel)	masse de la partie mobile (g) et effort de déplacement (N)	faibles par rapport à l'objet en déplacement
Capteur de déplacement angulaire (potentiomètre circulaire)	moment d'inertie (m <sup>4</sup> ) et couple résistant (N.m)	faibles p/r à l'objet en déplacement
Cellule de force (dynamomètre)	raideur (N/m)	
Capteur de pression (manomètre)	volume mort (cm <sup>3</sup> ) et volume de respiration (cm <sup>3</sup> )	petits par rapport au volume de l'enceinte où on mesure la pression
Capteur température (résistance thermométrique, thermocouple)	capacité calorifique (J/°C) et conductance thermique des fils de liaison vers l'extérieur (W/°C)	faible par rapport à celle du milieu où on mesure la température

Tableau 1 : la finesse de quelques types de capteurs

## 2.17. Meilleure droite - Écart de linéarité

L'étalonnage du capteur fournit à l'expérimentateur un certain nombre de points associés ( $s_i$  et  $m_i$ ) qui, même pour un capteur théoriquement linéaire, ne sont pas forcément tous alignés du fait de l'imprécision des mesures ou des imperfections dans la réalisation du capteur. Il est possible cependant, à partir des points expérimentaux de calculer l'équation de la droite qui en est la représentation la plus probable. Cette droite, dite meilleure droite, est telle que la somme des carrés des écarts des divers points expérimentaux à cette droite soit minimale.

On établit que l'équation de la meilleure droite étant :  $s = a m + b$

On a :

$$a = \frac{N \cdot \sum s_i \cdot m_i - (\sum s_i) \cdot (\sum m_i)}{N \cdot \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2}$$

$$b = \frac{(\sum s_i) \cdot (\sum m_i^2) - (\sum s_i \cdot m_i) \cdot (\sum m_i)}{N \cdot \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2}$$

N étant le nombre de points d'étalonnage.

L'écart de linéarité est la spécification qui permet d'apprécier la plus ou moins bonne linéarité d'une courbe d'étalonnage : il est défini à partir de l'écart maximum entre la courbe d'étalonnage et la meilleure droite, cet écart étant exprimé en % de la valeur maximale de la grandeur de sortie dans la plage considérée

## 3. Conditions de fonctionnement

### 3.1. 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, telles qu'elles étaient connues par étalonnage préalable ou spécifications du constructeur. Il est donc indispensable que l'utilisateur soit averti des diverses limites d'utilisation d'un capteur et des risques qu'il encourt à les dépasser.

Les limites d'utilisation d'un capteur peuvent être liées à plusieurs facteurs, notamment :  
**Plage de mesure** : chaque capteur a une plage de mesure spécifique au-delà de laquelle les mesures ne sont pas fiables. Il est important de respecter cette plage pour éviter des erreurs de mesure importantes.

**Précision** : chaque capteur a une précision spécifique, qui peut être affectée par des facteurs tels que la température, l'humidité, la pression, etc. Il est important de comprendre les limites de précision du capteur et d'effectuer un étalonnage régulier pour garantir des mesures précises.

**Sensibilité** : la sensibilité d'un capteur peut être affectée par des interférences électromagnétiques, des vibrations, des chocs, etc. Il est important de protéger le capteur contre ces interférences pour éviter des mesures erronées.

**Vitesse de réponse** : chaque capteur a une vitesse de réponse spécifique, qui peut être limitée par des facteurs tels que la fréquence d'échantillonnage, la latence du système, etc. Il est important de comprendre les limites de vitesse de réponse du capteur pour s'assurer qu'il convient à l'application.

**Environnement** : certains capteurs peuvent ne pas fonctionner correctement dans des environnements extrêmes, tels que des températures élevées ou basses, des conditions de vide, des environnements corrosifs, etc. Il est important de choisir un capteur approprié pour l'environnement spécifique dans lequel il sera utilisé.

**Durée de vie** : la durée de vie d'un capteur peut être limitée par des facteurs tels que la fatigue des matériaux, l'usure mécanique, l'exposition à des conditions extrêmes, etc. Il est important de comprendre la durée de vie du capteur et de le remplacer régulièrement pour éviter des défaillances.

### 3.2. L'environnement de mesure

L'environnement de mesure fait référence aux conditions environnementales dans lesquelles les mesures sont effectuées, et qui peuvent affecter la précision des résultats de mesure. Les paramètres environnementaux tels que la température, l'humidité, la pression, les vibrations et les champs électromagnétiques peuvent avoir une incidence sur les mesures effectuées. Par exemple, la température peut affecter la précision d'un capteur de température, car la sensibilité du capteur peut varier avec la température. De même, la présence de champs électromagnétiques peut affecter les mesures effectuées par des capteurs électroniques, tels que les capteurs de pression et de débit. Il est donc important de prendre en compte l'environnement de mesure et d'effectuer des corrections si nécessaires pour minimiser l'impact des paramètres environnementaux sur les mesures effectuées. Cela peut impliquer l'utilisation de boîtiers de protection pour les capteurs ou la mise en place de systèmes de régulation de la température et de l'humidité dans l'environnement de mesure.

### 3.3. Grandeur d'influence

Une grandeur d'influence est une grandeur physique externe qui peut affecter la mesure ou le fonctionnement d'un capteur ou d'un instrument de mesure. Les grandeurs d'influence peuvent inclure des conditions environnementales telles que la température, l'humidité, la pression atmosphérique, les vibrations, etc., ainsi que des sources d'interférence électromagnétique telles que les champs électromagnétiques.

L'effet des grandeurs d'influence sur la mesure peut être exprimé sous forme d'erreur de mesure ou d'incertitude de mesure. Pour minimiser l'impact des grandeurs d'influence sur la mesure, les capteurs et instruments de mesure sont souvent conçus pour être isolés ou compensés pour ces effets. La connaissance et la maîtrise des grandeurs d'influence sont donc importantes pour assurer la précision et la fiabilité des mesures.

### 3.4. Domaine d'utilisation

### 3.4.1. Domaine nominal d'emploi

Domaine nominal d'emploi est la plage de mesure pour laquelle le capteur est spécifié pour fonctionner avec une précision et une fiabilité optimales. Cela inclut généralement la plage de valeurs de mesure pour laquelle le capteur est linéaire et fournira une réponse précise et reproductible. Par exemple, pour un capteur de pression, le domaine nominal d'emploi peut être de 0 à 1000 psi, ce qui signifie que le capteur est conçu pour fonctionner de manière optimale dans cette plage de pression. En dehors de cette plage, la précision et la fiabilité du capteur peuvent être compromises.

Il est important de noter que même si un capteur peut fonctionner en dehors de son domaine nominal d'emploi, cela peut entraîner des erreurs de mesure et une usure prématurée du capteur. Il est donc recommandé d'utiliser le capteur dans son domaine nominal d'emploi pour garantir une mesure précise et fiable.

### 3.4.2. Domaine de non-détérioration

Lorsque les valeurs ou 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.

### 3.4.3. Domaine de non-destruction

Lorsque les valeurs ou du mesurande, ou des grandeurs physiques associées ou des grandeurs d'influence dépassent les limites du domaine de non-détérioration tout en restant inférieures aux bornes du domaine de non-destruction les caractéristiques du capteur sont modifiées de façon irréversible ; la réutilisation du capteur, dans son domaine nominal d'emploi nécessite donc un nouvel étalonnage. Le domaine de non-détérioration dépend du type de capteur, de la technologie utilisée, de la construction, des matériaux et des conditions environnementales. Il est important de connaître le domaine de non-détérioration d'un capteur avant de l'utiliser pour éviter des erreurs de mesure et des dommages coûteux au capteur.

Exemple : Capteur de force à jauges piezorésistives N556-1

Domaine	Mesurande	Température
Nominal	0-10 N (E.M)	0°C à 60°C
Non-détérioration	1,5 x E.M	-20°C à 100°C
Non-destruction	3 x E.M	-50°C à 120°C

## 3.5. Critères de choix d'un capteur

Le choix d'un capteur dépend du type de mesure à effectuer et des exigences de l'application. Voici quelques critères de choix à prendre en compte :

**La grandeur physique à mesurer** : le capteur doit être capable de mesurer la grandeur physique souhaitée avec la précision et la sensibilité requises.

**L'étendue de mesure** : le capteur doit être capable de mesurer la plage de valeurs attendues de la grandeur physique. Il est important de vérifier si cette plage est conforme aux spécifications de l'application.

**La sensibilité** : la sensibilité du capteur doit être suffisante pour détecter les variations de la grandeur physique à mesurer.

**La linéarité** : la réponse du capteur doit être linéaire dans la plage de mesure afin que les données collectées soient fiables et précises. La non-linéarité peut entraîner des erreurs importantes.

**La résolution** : la résolution du capteur doit être suffisante pour la précision requise dans l'application.

**La fréquence de mesure** : la fréquence à laquelle les mesures doivent être effectuées doit être prise en compte. Certains capteurs ne peuvent pas mesurer à des fréquences élevées.

**La stabilité à long terme** : la stabilité à long terme est importante si les mesures doivent être effectuées sur une longue période.

**La précision** : la précision est l'écart entre la valeur mesurée et la valeur réelle. La précision dépend des spécifications du capteur, de l'étalonnage et de l'environnement dans lequel le capteur est utilisé.

**La résistance environnementale** : le capteur doit être capable de résister aux conditions environnementales dans lesquelles il sera utilisé.

**Le coût** : le coût du capteur doit être pris en compte en fonction des exigences de l'application et des contraintes budgétaires.

Il est important de considérer ces critères et d'autres lors du choix d'un capteur pour garantir que celui-ci convient à l'application et fournit des données fiables et précises.

### 3.6. Les erreurs de mesure

Les erreurs de mesure sont des écarts entre la valeur mesurée d'une grandeur physique et la valeur réelle de cette grandeur. Ces erreurs peuvent être causées par différents facteurs, tels que les imprécisions du capteur lui-même, les variations de la température, les interférences électromagnétiques, les défauts de la chaîne de mesure, etc. On peut distinguer plusieurs types d'erreurs de mesure :

**Erreur systématique** : Les erreurs systématiques ont généralement pour cause une connaissance erronée ou incomplète de l'installation de mesure ou sa mauvaise utilisation.

**Erreur aléatoire** : cette erreur est causée par des fluctuations aléatoires dans les mesures, souvent dues à des facteurs environnementaux. Elle peut être réduite en moyennant les mesures et en augmentant le nombre de mesures.

**Erreur de linéarité** : cette erreur se produit lorsque la réponse du capteur n'est pas linéaire sur toute la plage de mesure. Elle peut être corrigée en appliquant une correction de linéarité, qui consiste à établir une fonction mathématique qui lie la sortie du capteur à la grandeur mesurée.

**Erreur de précision** : cette erreur est due aux imprécisions du capteur et peut être corrigée en améliorant la qualité du capteur ou en utilisant des capteurs plus précis.

Il est important de connaître les différentes sources d'erreur pour être en mesure de les minimiser ou de les corriger et ainsi améliorer la précision des mesures effectuées avec des capteurs.

Les erreurs de mesure peuvent être calculées en comparant la valeur mesurée par le capteur à la valeur réelle ou attendue. Il existe différentes méthodes de calcul en fonction de la nature de l'erreur. Voici quelques exemples :

**Erreur absolue** : la différence entre la valeur mesurée et la valeur réelle ou attendue. Elle peut être exprimée en unité de mesure ou en pourcentage.

**Erreur relative** : l'erreur absolue divisée par la valeur réelle ou attendue, exprimée en pourcentage.

Il est important de noter que la précision des calculs dépend de la précision des mesures elles-mêmes. Il est donc essentiel de prendre en compte la résolution et la sensibilité du capteur lors des calculs d'erreur.

### 3.7. L'incertitude d'un dispositif

L'incertitude d'un dispositif est la mesure de l'erreur qui peut être introduite dans une mesure lorsqu'un dispositif de mesure est utilisé. Elle peut être causée par plusieurs facteurs tels que la précision du dispositif, la répétabilité des mesures, les erreurs systématiques, etc.

Pour calculer l'incertitude apportée par un dispositif, il est généralement nécessaire de connaître les caractéristiques métrologiques du dispositif telles que la précision, la répétabilité, l'exactitude, la sensibilité, etc. Ensuite, en utilisant des techniques statistiques telles que la propagation des erreurs, on peut estimer l'incertitude totale d'une mesure.

Par exemple, si un capteur de température a une incertitude de  $\pm 0,5$  °C et qu'il est utilisé pour mesurer une température de 25,0 °C, l'incertitude de mesure serait de  $\pm 0,5$  °C. Cependant, si cette mesure est utilisée dans un calcul ultérieur, l'incertitude pourrait être propagée à ce calcul, ce qui pourrait augmenter l'incertitude totale de la mesure.

Il est donc important de prendre en compte l'incertitude apportée par un dispositif de mesure dans l'interprétation des résultats de mesure et dans la prise de décisions basées sur ces résultats.

## 4. La meilleure droite

Est une droite qui représente la meilleure approximation linéaire des données expérimentales. Elle est utilisée pour déterminer la relation linéaire entre deux variables, telles que la tension de sortie d'un capteur et la quantité mesurée, comme la température ou la force.

Pour trouver la meilleure droite, on utilise généralement la méthode des moindres carrés. Cette méthode consiste à trouver la droite qui minimise la somme des carrés des écarts entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites par la droite.

Les étapes pour trouver la meilleure droite :

1. Tracer un graphique des données expérimentales.
2. Déterminer l'équation de la droite de régression linéaire en utilisant la méthode des moindres carrés.
3. Calculer le coefficient de corrélation pour déterminer la force de la relation linéaire entre les deux variables.
4. Tracer la droite de régression sur le graphique des données.

La pente de la droite de régression représente la sensibilité du capteur, tandis que l'ordonnée à l'origine représente l'offset ou la valeur de mesure lorsque la quantité mesurée est nulle.

La linéarité d'un capteur peut être évaluée en comparant les données expérimentales à la droite de régression. Si les données sont étroitement alignées sur la droite, cela indique une relation linéaire forte entre les deux variables, ce qui signifie que le capteur est linéaire. Si les données sont dispersées et ne suivent pas la droite, cela indique une relation linéaire faible ou inexistante, ce qui signifie que le capteur n'est pas linéaire.

La résolution, la rapidité, le temps de réponse et la bande passante peuvent également être évalués en utilisant la meilleure droite. Par exemple, la résolution peut être calculée en divisant la plage de mesure par le nombre de bits du convertisseur analogique-numérique utilisé pour numériser la sortie du capteur. La rapidité, le temps de réponse et la bande passante peuvent être estimés en analysant la pente et la forme de la courbe de la droite de régression.

L'étalonnage du capteur fournit à l'expérimentateur un certain nombre de points associés ( $s_i$  et  $m_i$ ) qui, même pour un capteur théoriquement linéaire, ne sont pas forcément tous alignés du fait de l'imprécision des mesures ou des imperfections dans la réalisation du capteur. Il est possible cependant, à partir des points expérimentaux de calculer l'équation de la droite qui en est la représentation la plus probable. Cette droite, dite meilleure droite, est telle que la somme des carrés des écarts  $d_i$  des divers points expérimentaux à cette droite soit minimale.

On établit que l'équation de la meilleure droite étant :  $s = a m + b$

$$a = \frac{N \cdot \sum s_i \cdot m_i - (\sum s_i) \cdot (\sum m_i)}{N \cdot \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2}$$

$$b = \frac{(\sum s_i) \cdot (\sum m_i^2) - (\sum s_i \cdot m_i) \cdot (\sum m_i)}{N \cdot \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2}$$

N étant le nombre de points d'étalonnage.

L'écart de linéarité est la spécification qui permet d'apprécier la plus ou moins bonne linéarité d'une courbe d'étalonnage : il est défini à partir de l'écart maximum entre la courbe

---

d'étalonnage et la meilleure droite, cet écart étant exprimé en % de la valeur maximale de la grandeur de sortie dans la plage considérée.

## **5. Conclusion**

Ce chapitre, dédié à quelques caractéristiques métrologiques, Conditions de fonctionnement et les critères de choix d'un capteur.