

CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES DES CAPTEURS

II.1. DEFINITIONS

II.1.1 Mesurande

C'est la grandeur physique que l'on souhaite connaître (déplacement, température, pression, rayonnement, force... etc.).

II.1.2. Capteur

Un capteur est un dispositif qui transforme une grandeur physique d'entrée, appelée mesurande $[m]$, en une grandeur généralement de nature électrique (Charge, Tension, Courant ou Impédance) appelée réponse $[s]$.

$$\text{Avec : } s = F(m)$$

Le capteur nous permet de délivrer une image exploitable (signal électrique par exemple).

Remarque

a. On parle aussi de **transducteur**: Lorsque la grandeur physique d'entrée (le mesurande) étant transformée en une autre grandeur physique de sortie ou en un signal électrique.

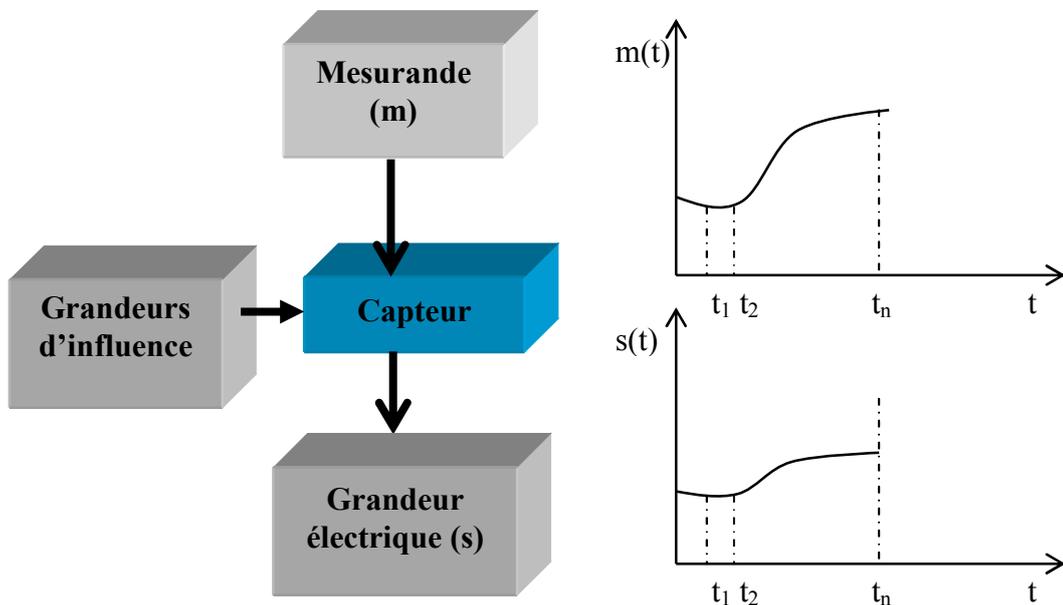


Figure II.1: Principe d'un capteur.

b. Généralement, on obtient une grandeur de sortie du type électrique. Elle peut être soit : une charge (Q), une tension (V), un courant (I), une impédance (R, L, C).

c. Domaines d'utilisation des capteurs: Tous les domaines d'activité nécessitent l'emploi de capteurs: Automobile (domaine principal), contrôle de la production, agriculture, sécurité, médical (domaine du micro-capteur) et électroménager.....

II.1.3. Corps d'épreuve et Capteurs composites

Pour des raisons de coût ou de facilité d'exploitation, on peut être amené à utiliser un capteur, non pas sensible au mesurande mais à l'un de ses effets.

Le corps d'épreuve est le dispositif qui assure une première traduction de la grandeur physique en une autre grandeur physique non électrique (appelée mesurande secondaire plus facile à mesurer), qui sera traduit par la suite en une grandeur électrique à l'aide d'un capteur adéquat (actif ou passif).

L'ensemble formé par le corps d'épreuve et le capteur adéquat (actif ou passif) constitue un capteur composite.

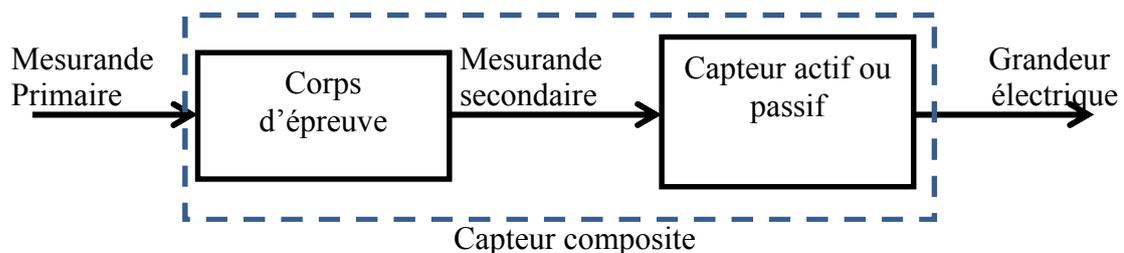


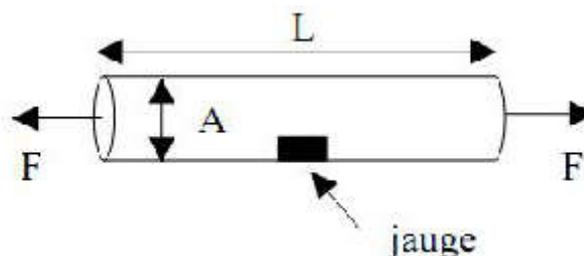
Figure II.2: Structure d'un capteur composite

Remarque

Les corps d'épreuve sont très utilisés pour la mesure de grandeurs mécaniques: Ces dernières imposent au corps d'épreuve des déformations ou des déplacements auxquels un capteur approprié (actif ou passif) est sensible.

Exemple 1

Une traction F exercée sur une barre (de longueur L , de section A et de module d'Young Y) entraîne une déformation $\Delta L/L$ qui est mesurable par la variation $\Delta R/R$ de la résistance d'une jauge collée sur la barre.



* Connaissant, l'équation du corps d'épreuve qui lie la traction (le mesurande primaire ΔF) à la déformation (mesurande secondaire ΔL):

$$\frac{\Delta L}{L} = \left(\frac{1}{Y}\right) \cdot \left(\frac{F}{A}\right) \quad (\text{II.1})$$

* Connaissant d'autre part l'équation du capteur liant sa grandeur d'entrée, ici la déformation ($\Delta L/L$), à sa réponse électrique ($\Delta R/R$) soit:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \left(\frac{\Delta L}{L}\right) \quad (\text{II.2})$$

Avec K : étant le facteur de jauge.

Par conséquent, on peut déduire la relation entre la traction (F) et la variation de résistance (ΔR):

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{K}{Y}\right) \cdot \left(\frac{F}{A}\right) \quad (\text{II.3})$$

Exemple 2

- ✓ Une pression est mesurable au moyen d'une membrane (corps d'épreuve), dont la déformation est traduite électriquement par une jauge de contrainte. La membrane d'un microphone électrodynamique est un corps d'épreuve car c'est de son mouvement, conséquence de la pression acoustique à laquelle est soumise, que résulte le signal électrique.
- ✓ Dans un accéléromètre, la masse sismique est le corps d'épreuve qui convertit l'accélération, mesurande primaire, en une force d'inertie (mesurande secondaire) auquel est sensible un capteur piézoélectrique.
- ✓ La relation qu'établit le corps d'épreuve entre le mesurande primaire et le mesurande secondaire est très souvent linéaire : c'est le cas en particulier pour les déplacements et déformations résultant de contraintes mécaniques, à condition que ne soit pas dépassée la limite d'élasticité du corps d'épreuve. Les performances de l'association corps d'épreuve-capteur doivent être déterminées par un étalonnage global de l'ensemble qu'ils constituent afin qu'il soit tenu compte des modifications éventuelles que leur montage et leur liaison apportent à leurs caractéristiques individuelles « à vide ».

II.1.4. Constitution d'une chaîne de mesure

Pour obtenir une image d'une grandeur physique, on fait appel à une chaîne de mesure qui peut faire intervenir plusieurs phénomènes différents. La structure de base d'une chaîne de mesure comprend au minimum trois étages:

II.1.4.1. Un capteur

Un dispositif (simple ou composite) très sensible aux variations de la grandeur physique à mesurer et qui délivre une autre grandeur physique ou électrique à partir de ces variations. Généralement, il est constitué de deux éléments :

- ✓ **Corps d'épreuve:** élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer (appelée aussi mesurande). Dont le but est de transformer la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique non électrique dite mesurande secondaire.
- ✓ **Elément 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.

II.1.4.2. Un conditionneur de signaux

Un circuit électronique dont le rôle principal est l'alimentation électrique du capteur, la mise en forme et l'amplification du signal délivré par le capteur si nécessaire. Le circuit de conditionnement permet de donner au signal délivré par le capteur un niveau compatible avec l'unité de visualisation ou d'utilisation. Cet étage peut parfois intégrer un filtre qui réduit les perturbations présentes sur le signal. Il peut comprendre pour des applications numériques un circuit de conversion du signal CAN.

II.1.4.3. Une unité de visualisation et/ou d'utilisation

Cette unité permet de lire la valeur de la grandeur et/ou de l'exploiter dans le cas d'un asservissement par exemple. Cette structure de base se rencontre dans toutes les chaînes de mesure quelle que soit leur complexité et leur nature. De nos jours, compte tenu des possibilités offertes par l'électronique et l'informatique, les capteurs délivrent un signal électrique et la quasi-totalité des chaînes de mesure sont des chaînes électroniques.

Exemple : Par exemple, la mesure d'un débit peut se faire en plusieurs étapes :

- Transformation du débit en une pression différentielle,
- Transformation de la pression différentielle en une déformation mécanique d'une membrane,
- Transformation de la déformation mécanique en une grandeur électrique (à l'aide d'un piézoélectrique) via un circuit électronique associé. L'ensemble de ces étapes constitue une chaîne de mesure.

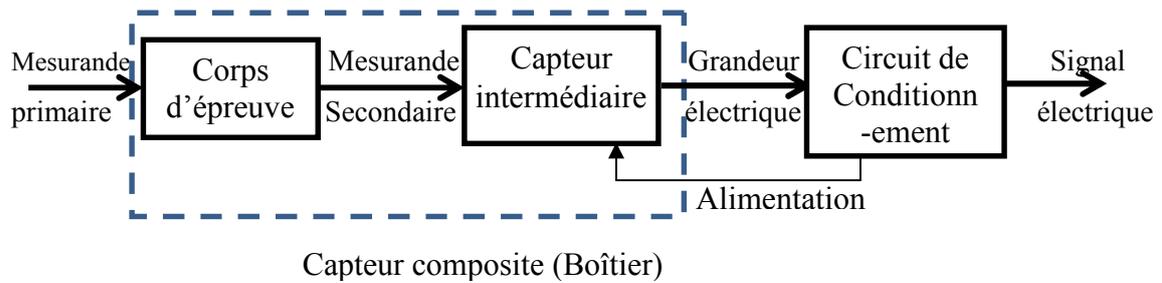


Figure II.3: Constitution d'une chaîne de mesure classique.

De manière classique, la sortie de la chaîne de mesure est du type électrique (Charge, Courant, Tension). Si la chaîne de mesure fait intervenir plusieurs transducteurs, on appelle corps d'épreuve celui en contact direct avec le mesurande. Le dernier transducteur est associé à un conditionneur qui fournit la grandeur électrique de sortie de manière exploitable.

Le choix du circuit de conditionnement est une étape importante dans le cadre de la chaîne de mesure car:

- il est associé au capteur,
- il détermine la nature finale du signal électrique,
- il va influencer les performances de la mesure.

II.1.5. Différents types de grandeurs physiques

On peut classer les grandeurs physiques en six familles, chaque capteur sera obligatoirement associé à l'une de ces familles:

II.1.5.1. Mécaniques: Déplacement, force, masse, débit

II.1.5.2. Thermiques: Température, capacité thermique, flux thermique... .

II.1.5.3. Electriques: Courant, tension, charge, impédance, diélectrique

II.1.5.4. Magnétiques: Champ magnétique, perméabilité, moment magnétique

II.1.5.5. Radiatifs: Lumière visible, rayons X, micro-ondes ...(Capteurs : Photodiodes, photorésistance, Phototransistor).

II.1.5.6. (Bio-) Chimiques: Humidité, Gaz, Sucre, Hormone

II.1.6. Grandeurs d'influence

Les grandeurs d'influence sont des grandeurs physiques étrangères (parasites) auxquelles la réponse du capteur peut être sensible. Selon la nature et l'importance des grandeurs d'influence le capteur peut subir des perturbations. C'est donc une cause d'erreurs agissant sur le signal de sortie.

Exemples

- | | |
|--|--|
| - La température | - L'humidité, la projection d'eau, l'immersion |
| - La pression environnante | - Les ambiances corrosives |
| - Les vibrations mécaniques ou acoustiques | - Les perturbations électromagnétiques |
| - La position du capteur et sa fixation | - Les rayonnements nucléaires |
| - L'alimentation électrique du capteur. | - Les accélérations et la pesanteur |

II.2. PRECISION SUR LES EFFETS UTILISES

Les effets physiques les plus rencontrés en instrumentation sont :

II.2.1. Thermoélectricité

C'est le principe de tout thermocouple. C'est un circuit constitué de deux conducteurs de nature chimique différente et dont les jonctions sont mises à des températures différentes T_1 et T_2 . Il apparaît aux bornes de ce circuit une tension (force électromotrice : *f.e.m*) liée à la différence de température ($\Delta T = T_1 - T_2$).

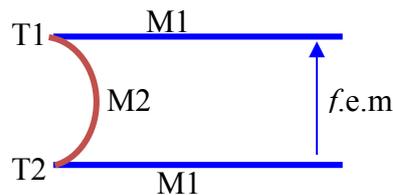


Figure II.4: Effet thermoélectrique – thermocouple.

II.2.2. Pyroélectricité

Certains cristaux présentent une polarisation électrique proportionnelle à leur température. Ainsi, en absorbant un flux de rayonnement, le cristal pyroélectrique va s'échauffer et par la suite sa polarisation va se modifier. Par conséquent, une variation de tension est détectable.

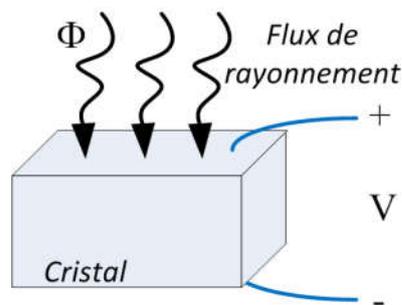


Figure II.5: Effet pyroélectrique - Pyromètre

II.2.3. Piézoélectricité

La piézoélectricité (du grec « piézein » presser, appuyer) est la propriété de certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une force : des charges apparaissent sur les faces du cristal.

L'application d'une force sur ce type de matériau engendre l'apparition de charges électriques créées par la déformation du matériau. Le cristal se déforme lorsqu'on lui applique une tension électrique : c'est l'effet inverse de la piézo-électricité. Parmi les matériaux piézoélectriques, on peut citer : le quartz, la topaze, la tourmalite, la berlinite.

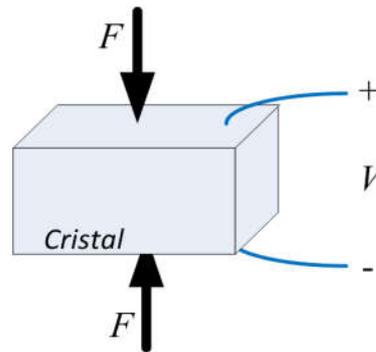


Figure II.6: L'effet piézoélectrique – accéléromètre

Applications : Le briquet, le bouton poussoir, les microphones, les haut-parleurs.....

II.2.4. Induction électromagnétique

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ d'induction fixe, il est le siège d'une force électromotrice proportionnelle au flux coupé par unité de temps donc à sa vitesse de déplacement.

Applications :

- ✓ La mesure de la *f.e.m.* d'induction permet de connaître la vitesse de déplacement qui est à son origine.
- ✓ Détection de passage d'un objet métallique.

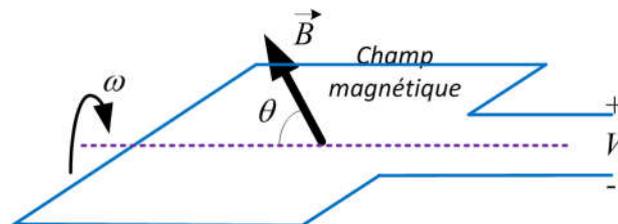


Figure II.7: Capteur à effet d'induction magnétique – capteur de vitesse

II.2.5. Photo-électrique

Il en existe plusieurs effets photo-électriques, qui diffèrent par leurs manifestations, mais ils ont tous le même principe ; sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'un rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde est inférieure à une valeur seuil caractéristique du matériau. Ce dernier libère des charges électriques dans la matière et celles-ci en fonction du rayonnement.

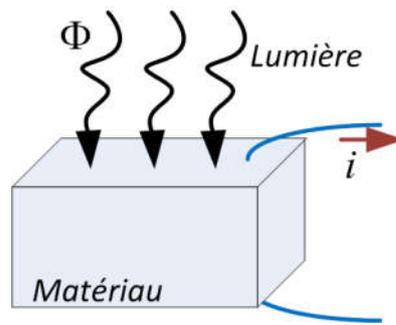


Figure II.8: Effet photoélectrique – capteur de lumière

II.2.6. Effet Hall

On appelle *effet Hall*, lorsqu'un conducteur est parcouru par un courant électrique et plongé dans une induction magnétique perpendiculaire B à la direction de ce courant, on constate l'apparition d'une différence de potentiel v et d'un champ électrique transversal E . On peut le schématiser cet effet hall par la figure suivante:

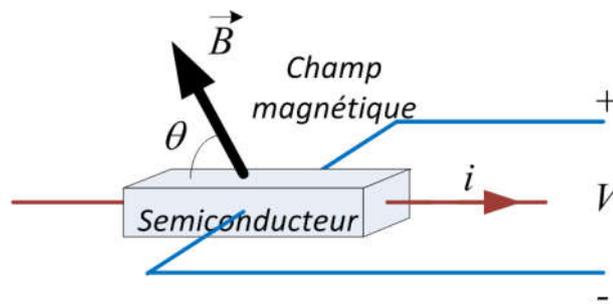


Figure II.9: capteur à effet Hall – capteur de distance.

La tension qui règne entre les deux faces A et C et appelée tension de Hall. On peut la mesurer par la relation suivante:

$$V_H = d.E = dvB \quad (\text{II.4})$$

Avec : d la distance entre A et C.

Ceci nous permet de déterminer le nombre de porteurs de charges par unité de volume à partir de la mesure du courant parcourant le conducteur, de l'induction magnétique B et de la tension de Hall V_H .

Dans le cas Un semi-conducteur de type parallélépipède rectangle, placé dans une induction magnétique B et parcouru par un courant I , voit l'apparition, dans la direction perpendiculaire au courant et à l'induction, une différence de potentiel qui a pour expression :

$$V_H = K_H.I.B.\sin \theta \quad (\text{II.5})$$

K_H est fonction du matériau ($K_H = I/Nq$), θ est l'angle entre I et B .

II.2.7. Photovoltaïque

Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction PN illuminée, leur déplacement modifie la tension à ses bornes.

II.3. CLASSIFICATION DES CAPTEURS

Si l'on s'intéresse aux phénomènes physiques mis en jeu dans les capteurs c'est à dire selon la caractéristique électrique de la grandeur de sortie, on peut classer ces dispositifs en deux grandes familles.

- ✓ Capteurs passifs
- ✓ Capteurs actifs

II.3.1 Capteurs passifs

Dans cette famille, le capteur se comporte en sortie comme un dipôle passif qui peut être résistif, capacitif ou inductif. Donc, il s'agit généralement d'impédance dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée. La variation d'impédance résulte :

- ✓ Soit d'une variation de dimension du capteur, c'est le principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteur de position, potentiomètre, inductance a noyaux mobile, condensateur a armature mobile.
- ✓ Soit d'une déformation résultant de force ou de grandeur s'y ramenant, pression accélération (Armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensomètre liée a une structure déformable). Le tableau 01 résume, en fonction du mesurande, les effets utilisés pour réaliser la mesure.

Grandeur mesurée	Effet utilisé (Grandeur de sortie)	Type de matériau utilisé
Température	Résistivité	Platine, nickel, cuivre,
Très basse T°	Constante diélectrique	verres
Flux optique	Résistivité	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité	Alliage de nickel
	Perméabilité	Alliages ferromagnétiques, SC dopé
Position	Résistivité	Magnétorésistances : Bismuth, antimoine d'indium.....
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

Tableau 01: Les principaux effets utilisés pour réaliser un capteur passif

II.3.2. Capteurs actifs

Grandeur physique mesurée	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité (Thermocouple)	Tension
Flux optique	Photoémission	Courant
	Effet Pyroélectricité	tension
	Effet Photovoltaïque	tension
Force	Piézoélectricité	Charge électrique
Pression		
Position	Effet Hall	Tension
Courant		
Vitesse	Induction	Tension

Dans cette famille, la sortie du capteur est équivalente à un générateur. C'est un dipôle actif qui peut être du type courant, tension ou charge. Un capteur actif est généralement fondé dans sur un effet physique qui assure la conversion de l'énergie propre à la grandeur physique à prélever (énergie thermique, mécanique ou de rayonnement...) en énergie électrique.

Les principaux effets physiques mis en jeu sont présentés ci-dessous.

Accélération	électromagnétique	
--------------	-------------------	--

Tableau 02: Les principaux effets utilisés pour réaliser un capteur actif.

II.3.3. Capteur intégré

Un capteur intégré est un composant réalisé par les techniques de la micro-électroniques et qui regroupe sur un substrat de silicium commun, le capteur à proprement dit, le corps d'épreuve et l'électronique de conditionnement du signal. L'intégration apporte la miniaturisation, la diminution dans le coûts et une meilleure protection vis-à-vis des parasites.

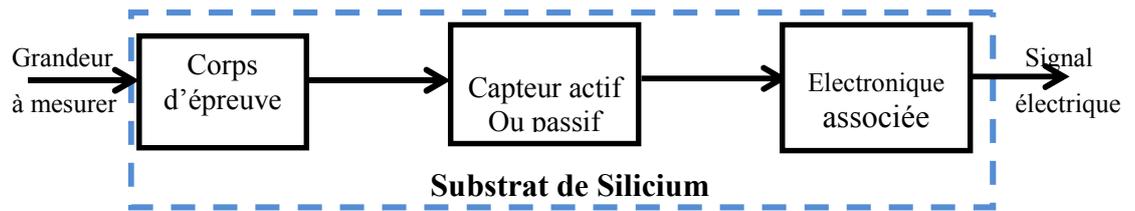


Figure II.10: Structure générale d'un capteur intégré

II.4. METROLOGIE DES CAPTEURS

Chaque application envisagée implique un cahier des charges. Le choix du capteur dépend de ses attributs ou ses caractéristiques métrologiques. Ces caractéristiques font référence à des étallonnages réalisés en laboratoire. Elles sont définies quand le régime statique est atteint. Il est fondamental de connaître avec précision les caractéristiques d'un capteur afin de pouvoir déterminer les limites de fonctionnement de celui-ci. En effet, les limites de fonctionnement d'un capteur conditionnent les limites de fonctionnement du système dont il fait partie.

II.4.1. Gamme de mesure - étendue de mesure

La gamme de mesure, c'est l'ensemble des valeurs du mesurande pour lesquelles un instrument de mesure est supposé fournir une mesure correcte. L'étendue de mesure correspond à la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de la gamme de mesure.

Remarque

* Pour les appareils à gamme de mesure réglable, la valeur maximale de l'étendue de mesure est appelée pleine échelle.

* Lorsqu'un appareil indicateur possède un cadran gradué en unités de la grandeur à mesurer, son étendue de mesure n'est pas toujours confondue avec l'étendue de graduation.

Exemple

Appareil de pesage, étendu de la graduation (0, 2 kg), étendu de la mesure (150 g, 2 kg).

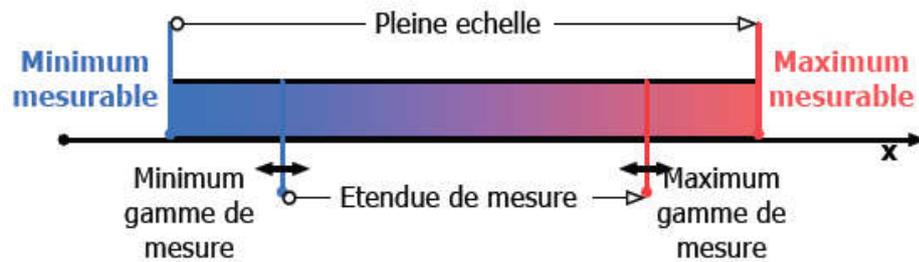


Figure II.11: Echelle de mesure.

II.4.2. Les performances d'un capteur

De manière à classer les capteurs en fonction de leurs performances métrologiques, on est amené à définir des paramètres qui permettent de les sélectionner en fonction de l'application.

II.4.2.1. Etendue de la mesure

Elle définit la zone dans laquelle les caractéristiques du capteur sont assurées par rapport à des spécifications données. On peut classer cette zone en trois domaines :

a. Domaine nominal d'emploi

C'est la zone dans laquelle le mesurande peut évoluer sans modification des caractéristiques métrologiques du capteur.

b. Domaine de non-détérioration

Sont les Valeurs limites des grandeurs d'influences sur le capteur (mesurande, température environnante, pression, etc...) sans que les caractéristiques du capteur ne soient modifiées après annulation de surcharges éventuelles.

c. Domaine de non-destruction

Elle définit les limites garantissant la non-destruction du capteur mais dans laquelle il peut y avoir des modifications permanentes des caractéristiques du capteur.

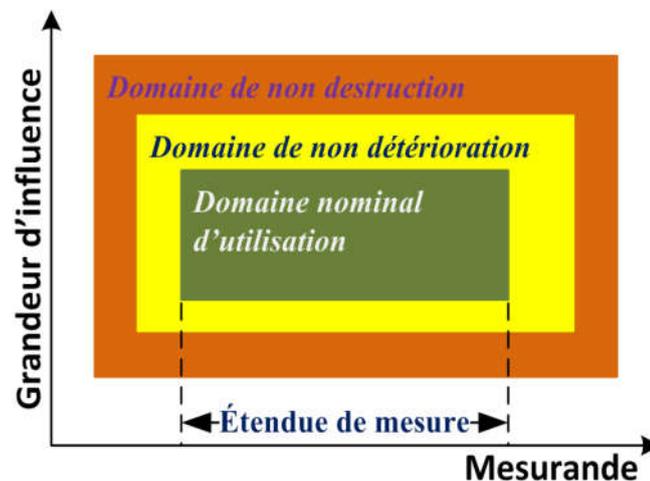


Figure II.12 : Les trois domaines de fonctionnement d'un capteur

II.4.3. Résolution

La résolution d'un capteur correspond à la plus petite variation du mesurande que le capteur est susceptible de déceler.

- ✓ Lorsque l'appareil de mesure est un appareil numérique, on définit la résolution par la formule suivante : Résolution=Etendue de mesure / Le nombre de points de mesure
- ✓ La résolution peut ne pas être constante sur toute l'étendue de la mesure. La résolution s'applique aussi aux convertisseurs analogiques/numériques (A/N).

II.4.4. Caractéristique d'entrée-sortie d'un capteur

Elle donne la relation d'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée. Elle est donnée classiquement par une courbe en régime permanent. Elle ne donne pas d'informations sur les caractéristiques transitoires du capteur.

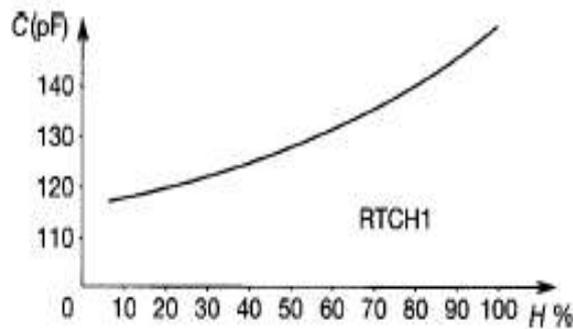


Figure II.13: Exemple de caractéristique d'un capteur d'humidité du type capacitif.

II.4.5. Sensibilité

Elle détermine l'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée en un point donné. C'est la pente de la tangente à la courbe issue de la caractéristique du capteur. Dans le cas d'un capteur linéaire, la sensibilité du capteur est constante.

$$\text{Sensibilité} = \frac{d(\text{Grandeur de sortie})}{d(\text{mesurande})} \Big|_{\text{pt d'étude}}$$

Remarque

Il faut noter que la sensibilité d'un capteur peut être fonction du conditionneur auquel il est associé. Dans l'exemple de la figure II.13, la sensibilité moyenne du capteur est de 0.4pF/%H.

II.4.6. Finesse

Elle qualifie l'incidence de l'instrument de mesure sur le phénomène mesuré. Elle est grande lorsque l'appareil perturbe très peu la grandeur à mesurer. C'est la qualité d'un capteur

à ne pas venir modifier par sa présence la grandeur à mesurer. Cela permet d'évaluer l'influence du capteur sur la mesure. On la définit non seulement vis à vis du capteur mais aussi vis à vis de l'environnement d'utilisation du capteur.

Exemple

- ✓ Dans le cas d'une mesure thermique, on cherchera un capteur à faible capacité calorifique vis à vis des grandeurs l'environnant. La finesse et la sensibilité sont en général antagonistes. Alors, il faut chercher un compromis à faire.
- ✓ Pour un capteur d'induction magnétique B , un capteur à forte perméabilité sera très sensible, par contre sa présence aura tendance à perturber les lignes de champ et la mesure de l'induction ne sera pas celle sans capteur, d'où une mauvaise finesse. Mais cette erreur peut être évaluée en vue d'une correction post-mesure et ainsi faire abstraction de la présence du capteur.

II.4.7 Linéarité

La linéarité est une caractéristique qui définit la constance de la sensibilité sur toute la plage de mesure. C'est la zone dans laquelle la sensibilité du capteur est indépendante de la valeur du mesurande. Cette zone peut être définie à partir de la définition d'une droite obtenue comme approchant au mieux la caractéristique réelle du capteur, par exemple par la méthode des moindres carrés.

On définit à partir de cette droite l'écart de linéarité qui exprime en % l'écart maximal entre la courbe réelle et la droite approchant la courbe.

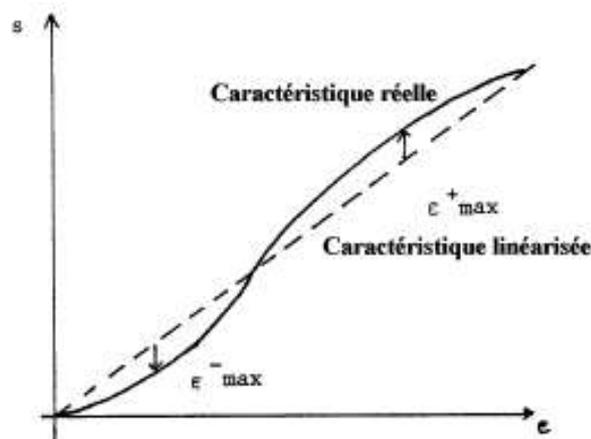


Figure II.14: Exemple de linéarisation de caractéristiques

II.4.8. Caractéristiques statistiques d'un capteur

Ces paramètres permettent de prendre en compte la notion d'erreurs accidentelles qui peuvent survenir sur un capteur.

Rappel

Soit n mesures effectuées sur un mesurande, on définit à partir de ces n mesures :

- ✓ La valeur moyenne:

$$\langle m \rangle = \frac{\sum m_i}{n}$$

- ✓ L'écart type mesure la dispersion d'une série de mesures autour de leur valeur moyenne:

$$\langle \sigma \rangle = \sqrt{\frac{\sum (m_i - \langle m \rangle)^2}{n - 1}}$$

II.4.8.1. Fidélité

Elle définit la qualité d'un capteur à délivrer une mesure répétitive sans erreurs. L'erreur de fidélité correspond à l'écart type obtenu sur une série de mesures correspondant à une valeur constante du mesurande. (Les résultats de mesures répétées d'une même valeur de mesurande restent groupés autour d'une valeur moyenne). Un capteur est d'autant plus fidèle que son écart type est faible.

II.4.8.2. Justesse

La justesse c'est l'aptitude d'un capteur à délivrer une réponse proche de la valeur vraie et ceci indépendamment de la notion de fidélité (les erreurs de fidélité n'étant pas prise en compte). Elle est liée à la valeur moyenne obtenue sur un grand nombre de mesures par rapport à la valeur réelle. Un instrument est d'autant plus juste que la valeur moyenne est proche de la valeur vraie.

II.4.8.3. Précision

La précision est un des paramètres les plus importants d'un système de mesure. La précision d'un capteur définit l'écart en % que l'on peut obtenir entre la valeur réelle et la valeur obtenue en sortie du capteur. Elle caractérise l'aptitude d'un capteur à donner une mesure M proche de la valeur vrai m de la grandeur mesurée.

La figure II.15, illustre la fidélité, la précision et de la justesse. Un capteur précis aura à la fois une bonne fidélité et une bonne justesse.

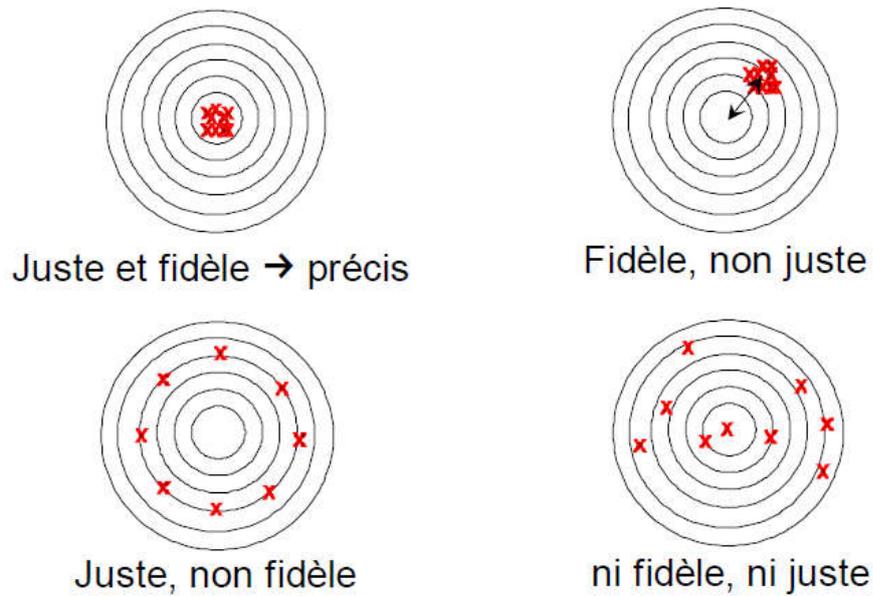


Figure II.15: Caractéristiques statistiques d'un capteur

Remarque Erreur de précision = erreur de justesse + erreur de fidélité.

II.4.9. Rapidité, Temps de réponse

Elle caractérise l'aptitude d'un dispositif à répondre aux variations temporelles du mesurande. Le temps de réponse est défini comme étant le temps nécessaire pour que la réponse du capteur atteigne 90% de son amplitude maximale lorsqu'il est exposé au mesurande.

Dans le cas d'un échelon de la grandeur entraînant la croissance de la mesure on définit le temps de réponse à $\pm 10\%$, 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.

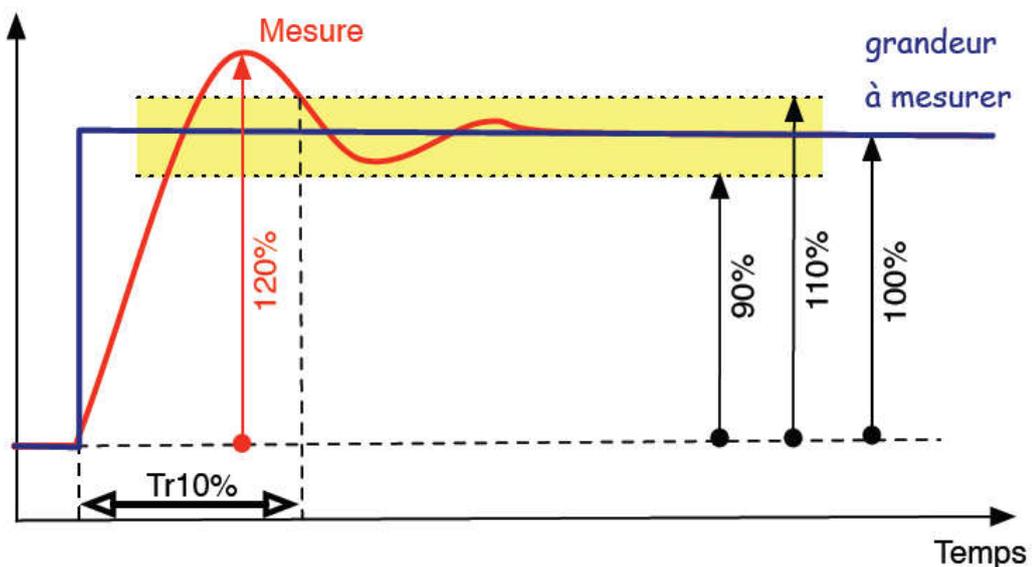


Figure II.16 : Temps indicielle

II.4.10. Bande passante

La bande passante est la bande de fréquence pour laquelle le gain du capteur est compris entre deux valeurs comme il est illustré sur la figure II.17. Le gain du capteur est le rapport x/X généralement exprimé en dB.

Remarque :

- ✓ Par convention, le signal continu a une fréquence nulle.
- ✓ Dans le cas ci-dessous on peut estimer le temps de réponse par la formule:
 $T = 0.16/f_{\max}$ avec $f_{\max} = 0.1\text{Hz}$.

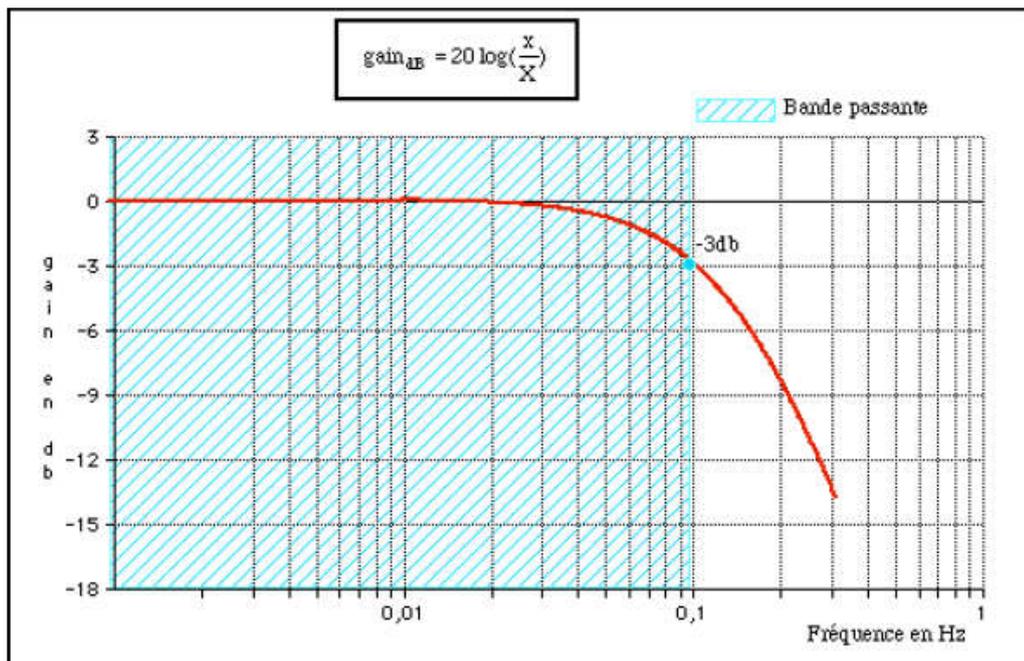


Figure II.17: Bande passante