

Chapitre 1: Les capteurs et chaine d'acquisition

1. Grandeurs électriques et grandeurs non électriques:

Les grandeurs électriques sont par exemple: le courant électrique I (unité: Ampère), tension électrique V (unité : Volt), charge électrique Q (unité: Coulomb), et impédance électrique Ω (unité: Ohm).

Les grandeurs physiques mesurables sont par exemple: Angle, Contrainte, Débit, Déplacement, Distance, Force, Lumière, Niveau, Position, Pression, Son, Température, Vitesse ...,

2. Définitions et généralités sur les capteurs:

Organe chargé de prélever une grandeur physique à mesurer (Angle, Contrainte, Débit, Déplacement, Distance, Force, Lumière, Niveau, Position....) et de la transformer en une grandeur ou signal électrique exploitable (courant électrique I , tension électrique V , charge électrique Q) (Figure1).

-La grandeur physique à mesurer « mesurande » constitue le signal d'entrer (ou stimulus) du capteur.

-La grandeur exploitable étant de nature électrique constitue le signal de mesure (signal électrique de sortie (réponse)) du capteur. Elle est une représentation de la grandeur à mesurer.

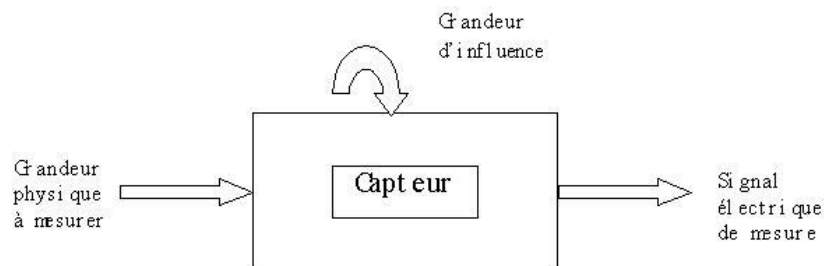


Figure1. Fonction d'un capteur [4]

Le capteur est donc un organe de saisie d'informations, c'est le premier maillon de toute chaîne de mesure, acquisition de données, de tout système d'asservissement, régulation, de tout dispositif de contrôle, surveillance, sécurité.

Hormis le **mesurande** à caractériser, le capteur peut être soumis à d'autres grandeurs physiques susceptibles d'influencer la grandeur électrique de sortie, qu'il n'est pas possible de distinguer de l'action du mesurande.

Ces grandeurs « **parasites** » auxquelles la réponse du capteur peut être sensible sont des **grandeurs d'influence**.

La réponse, $s = f(m)$ (1), d'un capteur devient:

$$s = f(m, g_1, g_2, \dots, g_n) \quad (2)$$

Pour avoir une réponse représentative du seul mesurande m , il faut:

- soit minimiser l'importance des grandeurs d'influence au niveau du capteur en le protégeant par isolement adéquat;
- soit stabiliser ces grandeurs d'influence à des valeurs fixes et connues et procéder à un étalonnage du capteur dans ces conditions de fonctionnement;
- soit utiliser un montage de compensation des parasites.

La **mesure** est l'évaluation d'une grandeur par comparaison avec une autre grandeur de même nature prise pour unité.

Le **mesurage** ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur [1,6].

3. Différents types de capteurs:

3.1. Capteurs actifs:

Fonctionnant en générateur, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre au mesurande : énergie thermique, mécanique ou de rayonnement.

Les plus importants parmi ces effets sont regroupés dans le tableau 1; dans la suite, on en donne une description sommaire destinée à éclairer leur mode d'application.

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Pyroélectricité	Charge
	Photoémission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photoélectromagnétique	Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension

Position (aimant)	Effet Hall	Tension
-------------------	------------	---------

Tableau 1. Capteurs actifs : principes physiques de base [1,7,9]

3.2. Capteurs passifs:

Il s'agit d'impédances dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande. Dans l'expression littérale d'une impédance sont présents des termes liés :

- d'une part à sa géométrie et à ses dimensions ;
- d'autre part aux propriétés électriques des matériaux : résistivité ρ , perméabilité magnétique μ , constante diélectrique ϵ (Tableau 2).

La variation d'impédance peut donc être due à l'action du mesurande :

- soit sur les caractéristiques géométriques ou dimensionnelles ;
- soit sur les propriétés électriques des matériaux ;
- soit plus rarement sur les deux simultanément.

Les paramètres géométriques ou dimensionnels de l'impédance peuvent varier si le capteur comporte soit un élément mobile, soit un élément déformable.

Dans le premier cas, à chaque position de l'élément mobile correspond une valeur de l'impédance et la mesure de celle-ci permet de connaître la position ; c'est le principe d'un grand nombre de capteurs de position ou de déplacement : potentiomètre, inductance à noyau mobile, condensateur à armature mobile [4].

Mesurande	Effet utilisé (grandeur de sortie)	Matériaux
Température	Résistivité	Platine, Nickel, cuivre, semi-conducteurs.
Très basse température	Cste diélectrique	Verre.
Flux optique	Résistivité	semi-conducteurs
Déformation	Résistivité Perméabilité	Alliages nickel Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Magnétorésistances: Bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

Tableau 2. Exemples d'application d'effets physiques à la réalisation de capteurs actifs : (a) thermoélectricité, (b) pyroélectricité, (c) piézoélectricité, (d) inductionélectromagnétique, (e) photoélectricité, (f) effet Hall [1,7,9]

Dans le second cas, la déformation résulte de forces -ou de grandeurs s'y ramenant (pression, accélération) appliquées soit directement soit indirectement au capteur : armature d'un condensateur soumise à une pression différentielle, jauge d'extensométrie liée rigidement à une structure soumise à contrainte. La modification d'impédance qu'entraîne la déformation du capteur est liée aux efforts auxquels celui-ci ou la structure intermédiaire se trouve soumis et elle en assure une traduction électrique.

Les propriétés électriques des matériaux, selon la nature de ces derniers, peuvent être sensibles à des grandeurs physiques variées : température, éclairage, pression, humidité... Si l'une seule de ces grandeurs est susceptible d'évolution, toutes les autres étant maintenues constantes il s'établit une correspondance univoque entre la valeur de cette grandeur et celle de l'impédance du capteur. La courbe d'étalonnage

traduit cette correspondance et permet, à partir de la mesure de l'impédance de déduire la valeur de la grandeur physique agissante qui est le mesurande. Le tableau 2 donne un aperçu des divers mesurandes susceptibles de modifier les propriétés électriques de matériaux employés pour la réalisation de capteurs passifs ; on y remarque, en particulier, la place importante des capteurs résistifs. L'impédance d'un capteur passif et ses variations ne sont mesurables qu'en intégrant le capteur dans un circuit électrique, par ailleurs alimenté et qui est son conditionneur [3,4].

3.3. Capteurs numérique:

La sortie est une séquence d'états logiques qui, en se suivant, forme un nombre. La sortie peut prendre une infinité de valeurs discrètes. Le signal des capteurs numériques peut être du type :

- Train d'impulsions, avec un nombre précis d'impulsions ou avec une fréquence précise.
- Code numérique binaire.
- bus de terrain.

Quelques capteurs numériques typiques :

- Codeur rotatif incrémental.
- Codeurs référentiels AA34 6,7 [9].

3.4. Capteurs intelligent:

En plus de leur faculté de mesurer une grandeur physique, ils possèdent d'autres fonctionnalités dont voici une liste non exhaustive :

- Fonctions configurables de traitement du signal (filtre, gains, etc.).
- Fonctions d'auto-test et d'auto-contrôle.
- Etalonnage automatique.
- Sortie sur des bus de terrain.

3.5. Capteurs composite:

Un corps d'épreuve est un capteur qui n'est pas sensible au mesurande, mais à l'un de ses effets.

Il permet de délivrer une grandeur physique non électrique appelée mesurande secondaire, un capteur adéquat convertit ce dernier en grandeur électrique.

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

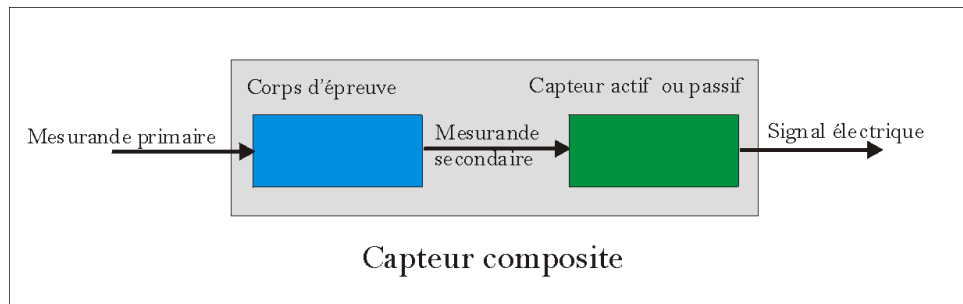


Figure2. Structure d'un capteur composite [7]

4. Phénomènes physiques utilisés dans les capteurs:

4.1. Effet thermoélectrique:

Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 est le siège d'une force électromotrice $e(T_1, T_2)$.

Application: détermination à partir de la mesure de e d'une température inconnue T_1 lorsque T_2 (0 °C par exemple) est connue (Figure3a).

4.2. Effet pyroélectrique:

Certains cristaux dits pyroélectriques, le sulfate de triglycine par exemple, ont une polarisation électrique spontanée qui dépend de leur température ; ils portent en surface des charges électriques proportionnelles à cette polarisation et de signes contraires sur les faces opposées.

Application: un flux de rayonnement lumineux absorbé par un cristal pyroélectrique élève sa température ce qui entraîne une modification de sa polarisation qui est mesurable par la variation de tension aux bornes d'un condensateur associé (Figure3b) [7].

4.3. Effet piézoélectrique:

L'application d'une force et plus généralement d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézoélectriques, le quartz par exemple, entraîne une déformation qui suscite l'apparition de charges électriques égales et de signes contraires sur les faces opposées.

Application : mesure de forces ou de grandeurs s'y ramenant (pression, accélération) à partir de la tension que provoquent aux bornes d'un condensateur associé à l'élément piézoélectrique les variations de sa charge (Figure3c).

4.4. Effet d'induction électromagnétique :

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

De même, lorsqu'un circuit fermé est soumis à un flux d'induction variable du fait de son déplacement ou de celui de la source de l'induction (aimant par exemple), la f.é.m. dont il est le siège est égale (et de signe contraire) à la vitesse de variation du flux d'induction [4].

La mesure de la f.é.m. d'induction permet de connaître la vitesse du déplacement qui est à son origine (Figure3d).

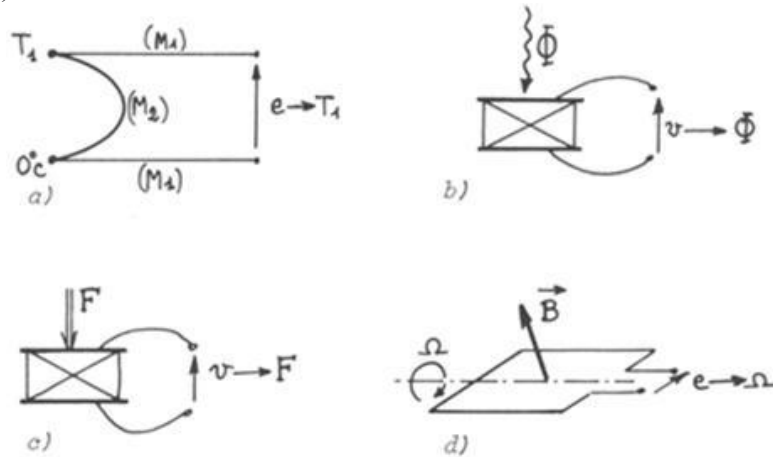


Figure3. : a) thermoélectricité, b) pyroélectricité, c) Piézoélectricité, d) induction électromagnétique [9]

4.5. Effets photoélectriques:

On en distingue plusieurs, qui diffèrent par leurs manifestations mais qui ont pour origine commune la libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement électromagnétique, dont la longueur d'onde est inférieure à une valeur seuil, caractéristique du matériau (Figure4).

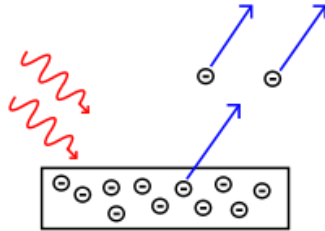


Figure4. Effet photoélectrique [4]

4.6. Effet photoémissif :

Les électrons libérés sont émis hors de la cible éclairée et forment un courant collecté par application d'un champ électrique (Figure5).

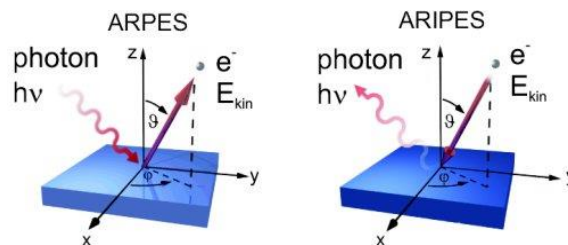


Figure5. Effet photoémissif [4]

4.7. Effet photovoltaïque:

Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction de semiconducteurs P et N illuminée ; leur déplacement dans le champ électrique de la jonction modifie la tension à ses bornes (Figure6).

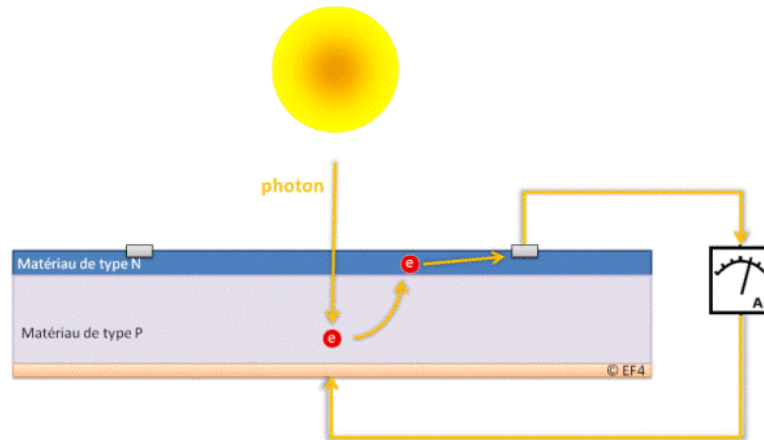


Figure6. Effet photovoltaïque [4]

4.8. Effet Hall:

Un matériau, généralement semi-conducteur et sous forme de plaquette, est parcouru par un courant I et soumis à une induction B faisant un angle θ avec le courant. Il apparaît, dans une direction perpendiculaire à l'induction et au courant une tension V_H qui a pour expression :

$$V_H = K_H I B \sin\theta \quad (3)$$

où K_H dépend du matériau et des dimensions de la plaquette.

Application : un aimant lié à l'objet dont on veut connaître la position détermine les valeurs de B et I au niveau de la plaquette : la tension V_H , qui par ce biais est fonction de la position de l'objet en assure donc une traduction électrique (Figure7).

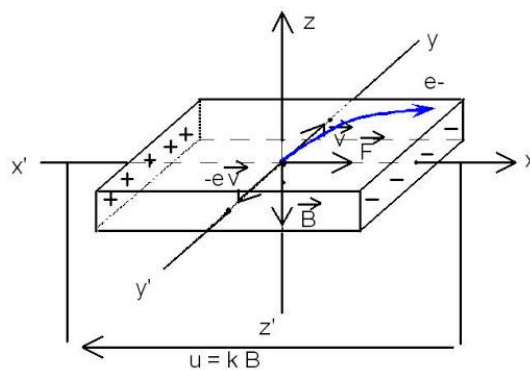


Figure7. Principe de l'effet Hall dans un conducteur filiforme à section rectangulaire [4]

4.9. Effet magnétorésistif:

La **magnétorésistance** est la propriété qu'ont certains matériaux de présenter une **résistance électrique** qui évolue lorsqu'ils sont soumis à un **magnétique**, mais ce dernier est cependant incapable de faire varier la résistance électrique de plus de 5 %.

Dans un semiconducteur, on peut observer une magnétorésistance proportionnelle à $(1+(\mu B)^2)$ (4), où μ est la mobilité électronique (en $m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ ou T^{-1}) et B le champ magnétique (en teslas). L'antimoniure d'indium, semiconducteur à haute mobilité, pourrait présenter une mobilité au-dessus de $4 m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ à 300 K. Ainsi, dans un champ de 0.25 T, on observerait une augmentation de magnétorésistance de 100 % [1].

4.10. Effet Doppler:

L'**effet Doppler** est le **décalage de fréquence d'une onde** (mécanique, acoustique, électromagnétique ou d'une autre nature) observé entre les mesures à **l'émission et à la réception**, lorsque la distance entre **l'émetteur** et le **récepteur** varie au cours du temps.

Ainsi l'effet Doppler exprime que si le receveur d'un signal vibrant est en mouvement par rapport à la source émettrice du dit signal, il perçoit une fréquence différente de celle d'émission [6].

La relation est donnée par:

$$F_o = F_s / (1 \pm V / V_c) \quad (5)$$

F_o (Hz) est la fréquence perçue par l'observateur (ou auditeur).

F_s (Hz) est la fréquence de la source.

V (m/s) est la vitesse relative entre source et receveur du signal.

V_c (m/s) est la célérité de l'onde dans le milieu d'évolution du phénomène.

Le signe + correspond à un moment où la source s'éloigne du récepteur.

Le signe - correspond à un moment où la source se rapproche du récepteur.

Exemple de Capteurs hyperfréquences utilisant l'effet Doppler:

Système non-intrusif installé en accotement de chaussée, sur mât, ou portique. Un train d'ondes électromagnétiques pulsées est émis à une fréquence de l'ordre de 10 et 25GHz par une antenne radar en direction d'un véhicule. Au contact du véhicule, l'onde est réfléchiée et renvoyée modifiée vers le capteur.

L'onde renvoyée par le véhicule permet de calculer la vitesse à partir du décalage de fréquence entre le signal émis et reçu. La forme et l'amplitude du signal reçu sont directement liées à la forme du véhicule et à sa surface de réflexion. La valeur de la SER (Surface Équivalente Radar exprimée en m^2) analysée permet de distinguer la silhouette des véhicules (VL/PL). Le capteur peut aussi estimer la longueur du véhicule [6,12].

4.11. Effet Seebeck:

Une différence de potentiel apparaît à la jonction de deux matériaux soumis à une différence de température. L'utilisation la plus connue de l'effet Seebeck est la mesure de température à l'aide de thermocouples. Cet effet est également à la base de la génération d'électricité par effet thermoélectrique.

La figure ci-dessous montre le circuit thermoélectrique de base. Deux matériaux conducteurs 1 et 2 de natures différentes sont reliés par deux jonctions froide et chaude de températures T_c et T_f . Dans le cas de l'effet Seebeck, une différence de température $dT = T_c - T_f$ est appliquée entre les deux jonctions, ce qui entraîne l'apparition d'une différence de potentiel dV entre eux.

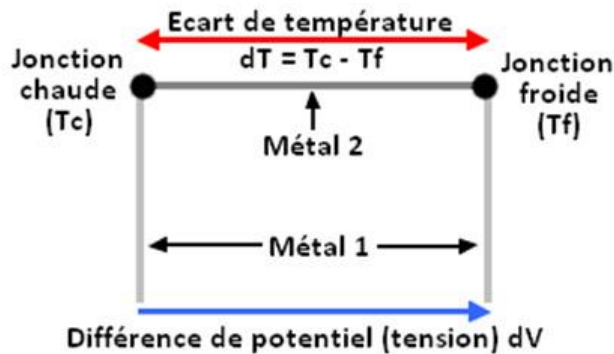


Figure8. Principe de l'effet Seebeck [10]

5. Structure globale d'une chaîne de mesure complète:

Généralement, la grandeur à mesurer, appelée mesurande, n'est pas accessible directement et les méthodes de mesure mises en œuvre font appel à différentes lois physiques et propriétés des matériaux. Une chaîne de mesure est généralement constituée des éléments suivants, schématisés sur la figure suivante :

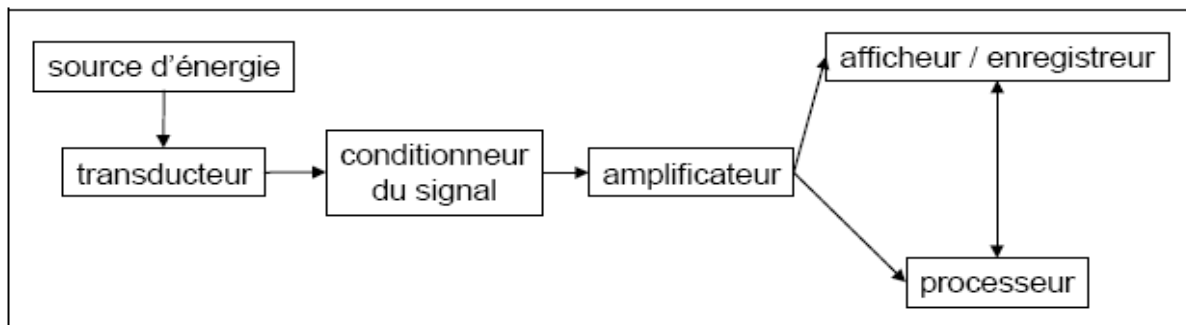


Figure8. Schéma type d'une chaîne de mesure [6]

- Transducteur:

C'est l'élément fondamental du dispositif, fondé sur l'utilisation d'une loi physique particulière. Il fait correspondre à une valeur G_e de la grandeur à mesurer une valeur G_s d'une autre grandeur, généralement électrique, appelée grandeur de sortie. On recherche généralement des transducteurs tels que la relation entre la variation du mesurande et la variation du signal sortant du transducteur soit linéaire, ou tout au moins à utiliser la partie linéaire de cette relation si celle-ci est plus complexe.

- Conditionneur:

C'est un circuit électrique ou électronique qui convertit, compense ou modifie le signal de sortie du transducteur afin de le transformer en un signal électrique usuel. Le conditionneur est souvent physiquement indissociable du transducteur. Le pont de Wheatstone évoqué à l'alinéa précédent permet ainsi de transformer la variation de résistance du transducteur en une variation de tension aux bornes du pont.

- Amplificateur:

C'est un élément indispensable lorsque le signal de sortie du conditionneur est faible, il est très souvent nécessaire de les amplifier dans des rapports de 10 à 1000, ou plus. Après amplification, on atteint des tensions comprises généralement entre 0 et 5 ou 10V.

- Afficheur/enregistreur:

C'est un élément qui mesure le signal (courant ou tension) sortant de l'amplificateur pour le restituer sous une forme lisible et interprétable par l'utilisateur.

- Processeur:

C'est un élément présent sur tous les dispositifs de mesure affichant et/ou délivrant un signal numérique. Il s'agit généralement d'un convertisseur analogique/numérique.

Dans la pratique, le terme « capteur » désigne des choses différentes selon les auteurs et les interlocuteurs :

- Le transducteur lui-même ;
- L'ensemble transducteur + conditionneur ;
- L'ensemble de la chaîne de mesure représentée en Figure 8.

Les distinctions sont parfois difficiles car de plus en plus de transducteurs sont physiquement associés à des conditionneurs et des amplificateurs, les progrès de la miniaturisation ayant permis de réduire considérablement la taille de ces éléments. L'intérêt principal de cette intégration matérielle réside dans la réduction des perturbations du signal de sortie du transducteur (interférences, parasites, pertes d'énergie et de signal, etc.) avant son traitement par les éléments suivants.

Nous appellerons capteur la partie de la chaîne de mesure en contact avec le milieu où s'effectue le mesurage, et transmetteur le reste des éléments de la chaîne de mesure [3,4].

6. 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.

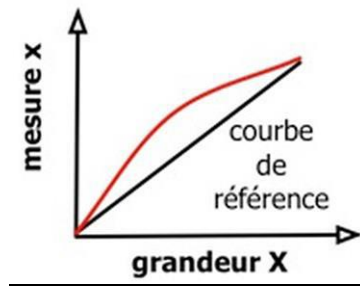


Figure1. Exemple d'écart de linéarité [6,7]

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:

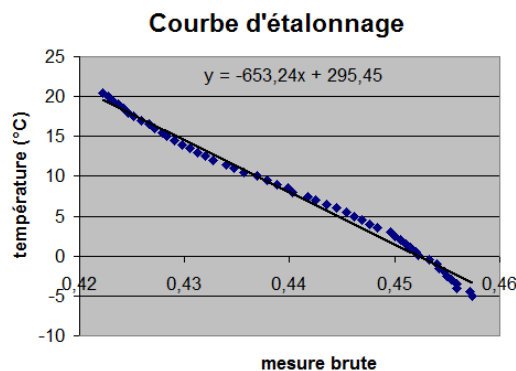


Figure2. Exemple d'étalonnage d'un capteur de température [7]

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.

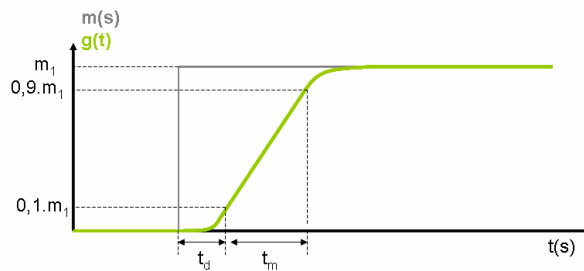


Figure3. Temps de réponse d'un capteur [8]

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.

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

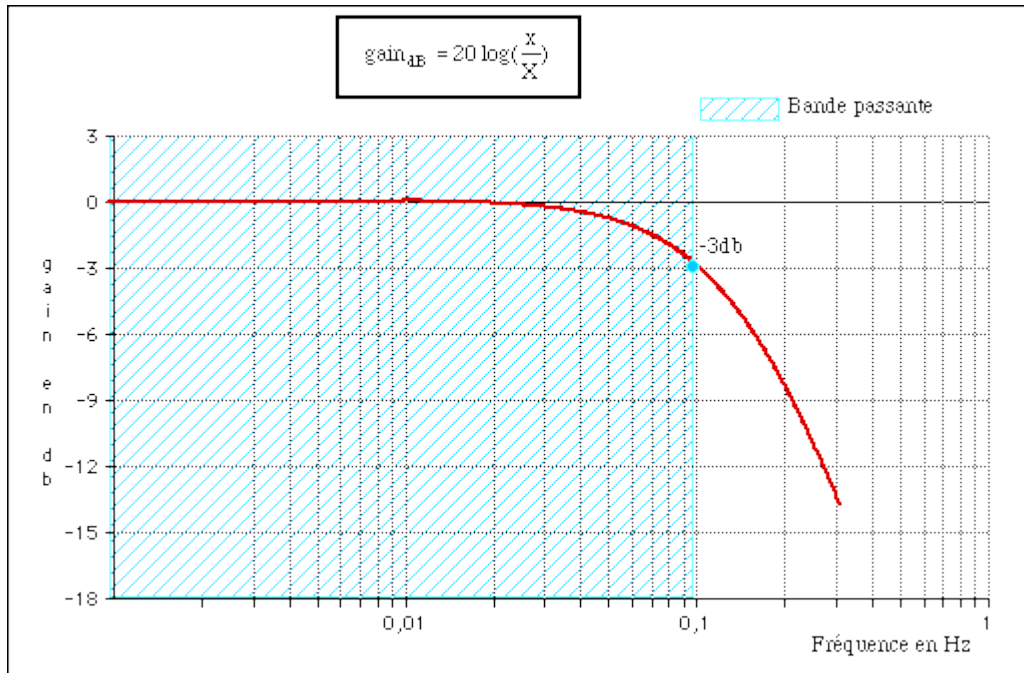


Figure4. Temps de réponse d'un capteur [4,5]

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 :

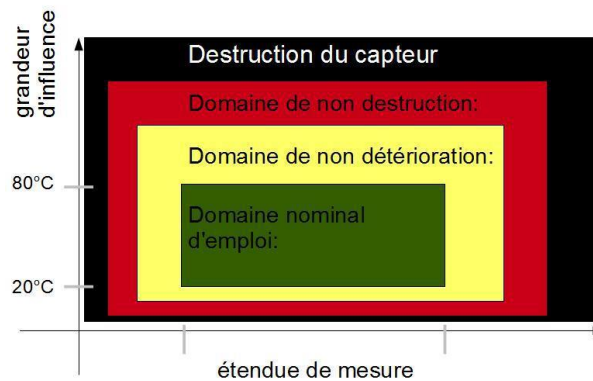


Figure5. Représentation des domaines limites d'utilisation d'un capteur [7]

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.

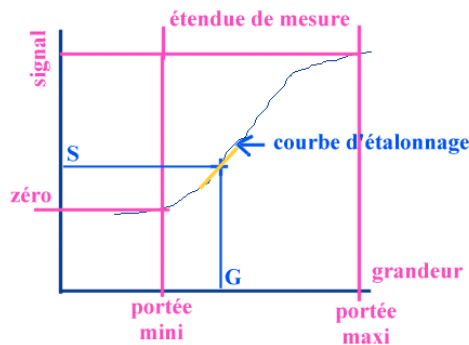


Figure6. courbe d'étalonnage d'un capteur [7]

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 antérieur dont un cas est une caractéristique possédant une hystérésis [1,3,7].

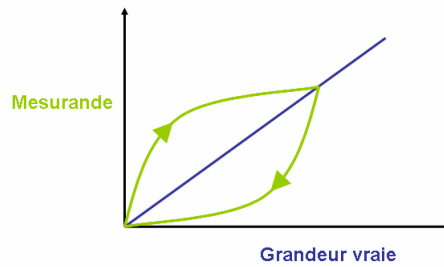


Figure7. Erreur accidentelle avec hystérésis [3]

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.

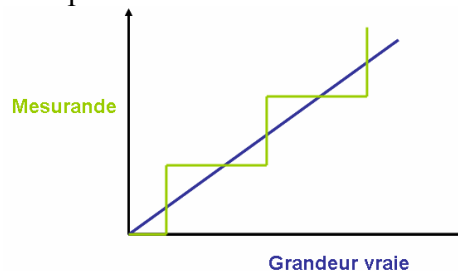


Figure8. Erreur accidentelle de mobilité [3]

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] .

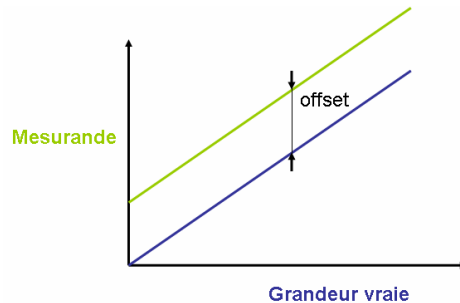


Figure9. Erreur systématique d'offset [6]

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 :

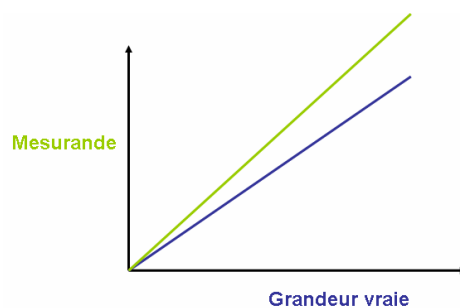


Figure10. Erreur systématique de gain [6]

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.

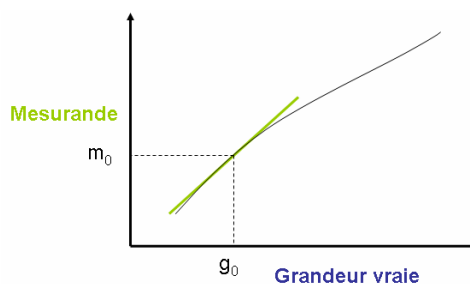
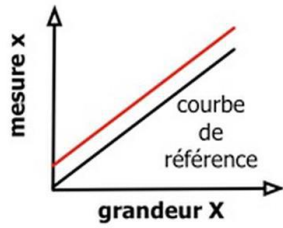


Figure11. Erreur systématique de linéarité [6]

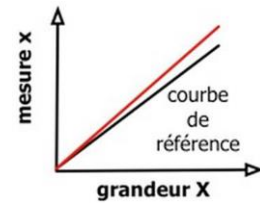
Certains capteurs intelligents intègrent une compensation des erreurs systématiques dues aux dérives thermiques par une fonction d'auto-zéro ou d'auto-gain (Figures12,13).



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.