

Les Capteurs

I. Généralités sur les capteurs

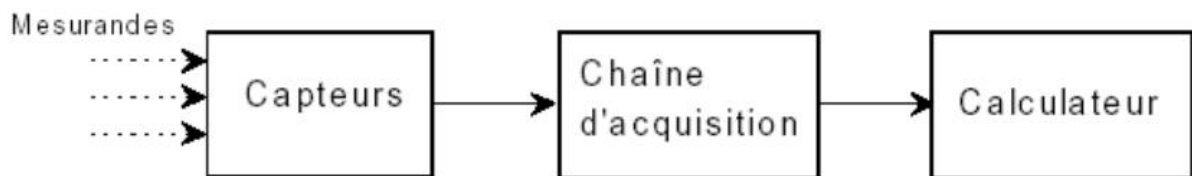
1.1. Définition et caractéristiques

Un capteur est un transducteur capable de transformer une grandeur physique en une autre grandeur physique généralement électrique (tension) utilisable par l'homme ou par le biais d'un instrument approprié.

Les capteurs sont les éléments de base des systèmes d'acquisition de données. Leur mise en œuvre est du domaine de l'instrumentation.

Le capteur est le 1^{er} élément d'une chaîne de mesure ou d'instrumentation.

Exemple



Un capteur n'est jamais parfait, il convient de connaître avec la plus grande précision possible son état d'imperfection. De plus, il faut prendre en compte la perturbation apportée au système par la mesure.

Le concepteur d'une chaîne instrumentale aura donc des choix à opérer.

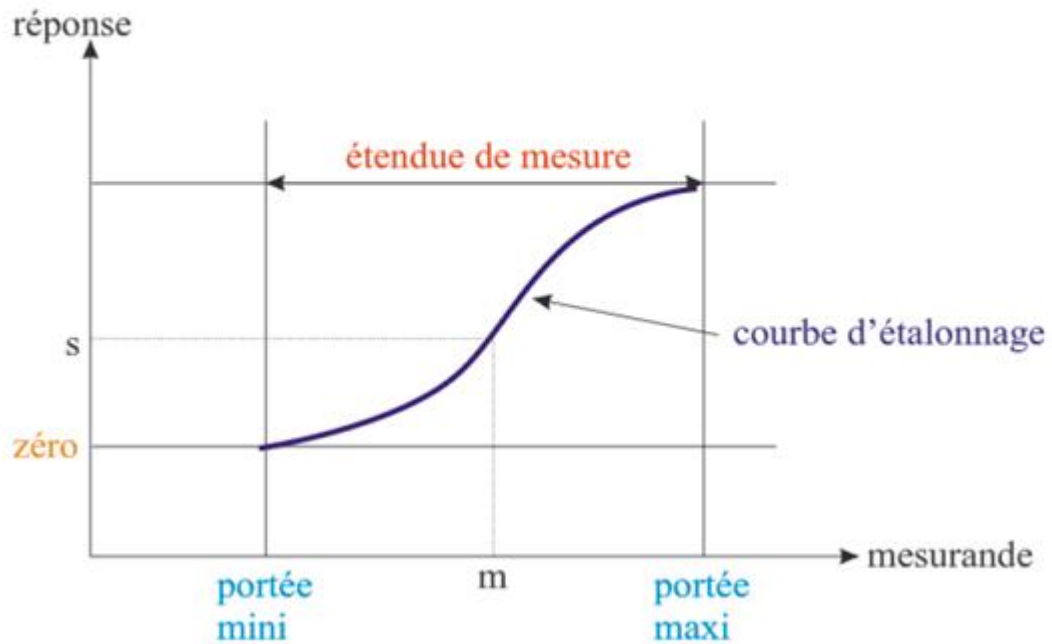
1.2. Caractéristiques d'un capteur

✓ *étendue de mesure*

La caractéristique d'un capteur, appelée aussi courbe d'étalonnage est la courbe d'entrée-sortie de celui-ci. C'est une courbe qui exprime la relation d'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée. Il s'agit d'une courbe en régime permanent qui ne donne pas d'informations sur les caractéristiques transitoires du capteur.

Sur cette courbe, on notera l'étendue de mesure. 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.

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.

✓ *sensibilité*

Pour une valeur donnée de la grandeur à mesurer G , 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 G .

$$s = \left(\frac{\Delta S}{\Delta G} \right)$$

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

✓ *précision*

La précision caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des indications proches de la valeur vraie de la grandeur mesurée.

✓ *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.

✓ *finesse*

C'est la qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner la valeur de la grandeur sans modifier celle-ci par sa présence (un capteur peut perturber son environnement et perçoit de ce fait une information sensiblement erronée).

✓ *rapidité*

La rapidité concerne le régime dynamique. Elle peut être caractérisée de trois manières différentes :

- par la bande passante à -3dB
- par la fréquence de résonance du capteur
- par le temps de réponse à un échelon

✓ *linéarité*

Cette notion 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. Cette notion a historiquement eu une certaine importance, mais en toute rigueur elle n'a aucun sens puisqu'aucun des phénomènes physiques utilisés dans les capteurs ne présente ce caractère de linéarité dès lors qu'on atteint une certaine précision.

1.3. Conditions de fonctionnement d'un capteur

Alors que les caractéristiques métrologiques font référence à des étalonnages en laboratoire, les conditions de fonctionnement sont en relation étroite avec l'utilisation pratique du capteur, dans un environnement donné, en présence des grandeurs d'influence plus ou moins contrôlées. Il s'agit des grandeurs qui, appliquées de l'extérieurs, sont susceptibles de modifier les caractéristiques du capteur. Ces grandeurs peuvent être de nature mécanique, thermique, électrique, chimique ...

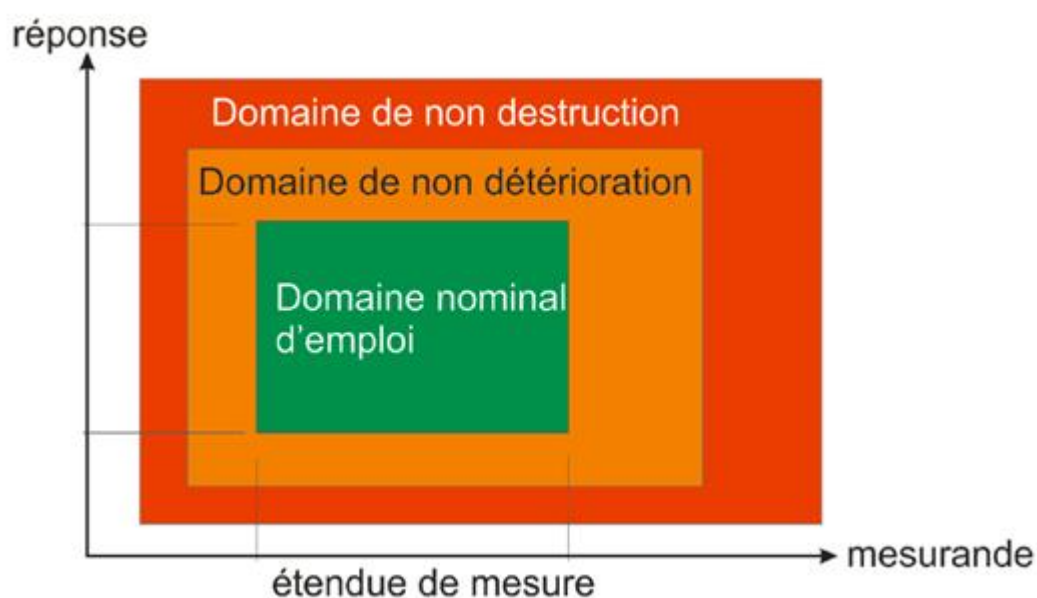
Les constructeurs n'envisagent en général que quelques grandeurs d'influence. Ce sera donc souvent à l'utilisateur d'identifier l'importance de certaines d'entre elles dans le contexte de leur application spécifique. Il ne faut surtout pas supposer que parce que le constructeur ne dit rien à propos d'une grandeur d'influence potentielle que cela signifie à coup sur qu'elle n'a aucune influence sur le comportement du capteur !

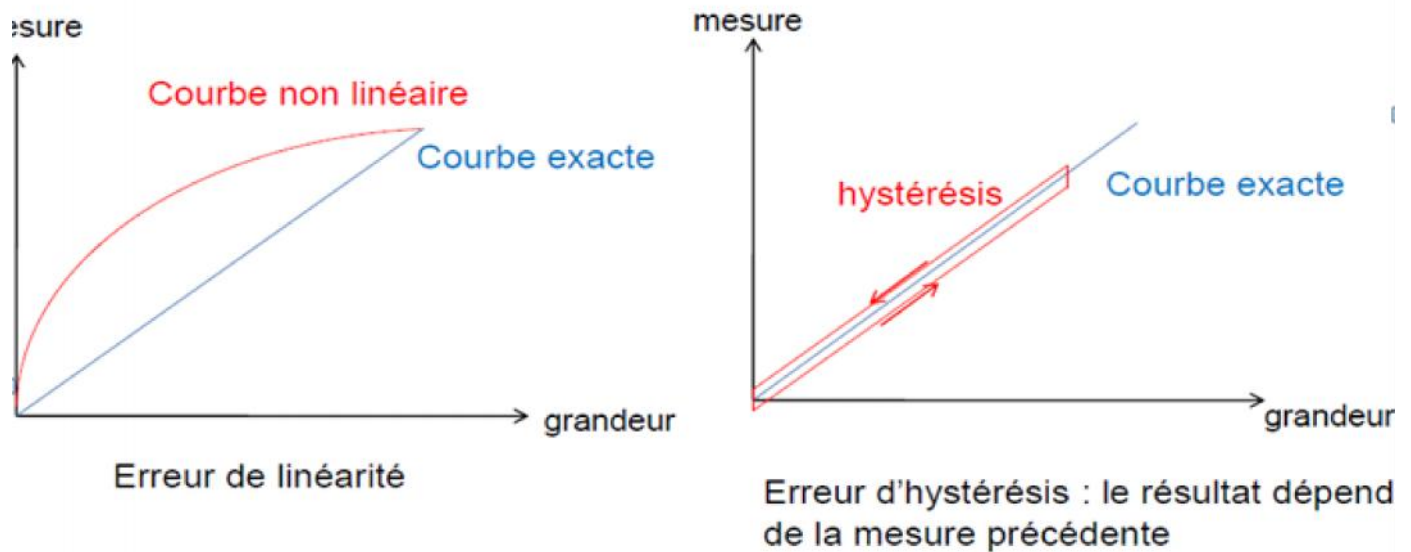
1.4. Limites d'utilisation d'un capteur et étendue de mesure

Des modifications des propriétés et des caractéristiques du capteur peuvent apparaître si celui-ci est soumis à des grandeurs d'influence telles la température, des contraintes mécaniques ou électriques.

Il existe 4 domaines d'utilisation du capteur qui peuvent plus ou moins affecter les caractéristiques de ce capteur :

- **Le domaine nominal d'emploi:** correspond aux conditions normales d'utilisation du capteur
- **Le domaine de non-détérioration:** dans ce domaine les caractéristiques risquent d'être modifiées mais cette altération est réversible et le capteur pourra retrouver ses caractéristiques normales lorsqu'il retrouvera son domaine nominal d'emploi
- **Le domaine de non-destruction:** si le capteur est utilisé dans ce domaine, les altérations seront irréversibles et seul un ré-étalonnage permettra de re-mesurer dans le domaine nominal d'emploi
- **Le domaine de destruction:** le capteur ne sera plus utilisable et même un étalonnage ne pourra le modifier, la seule solution étant de racheter un capteur





2. Capteurs passifs et capteurs actifs.

Si l'on s'intéresse aux phénomènes physiques mis en jeu dans les capteurs, on peut classer ces derniers en deux catégories.

- Capteurs actifs
- Capteurs passifs

Un capteur actif: est généralement fondé dans son principe sur effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie à la grandeur physique à prélever, énergie thermique, mécanique ou de rayonnement.

Les effets physiques les plus rencontrés en instrumentation sont :

- **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 d'origine thermique $e(T_1, T_2)$.
- **Effet piézo-électrique :** L'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézoélectriques (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une déformation et d'une même charge électrique de signe différent sur les faces opposées.
- **Effet d'induction électromagnétique :** La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique (détection de passage d'un objet métallique).

- **Effet photo-électrique** : La libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique.
- **Effet Hall** : Un champ magnétique B et un courant électrique I créent dans le matériau une différence de potentiel U_H .
- **Effet photovoltaïque** : Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction PN illuminée, leur déplacement modifie la tension à ses bornes.

Tableau 1 : Grandeurs d'entrée et de sortie et effet utilisé pour les capteurs actifs

Grandeur physique mesurée	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Photoémission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photo-électrique	Tension
Force	Piézo-électricité	Charge électrique
Pression		
Accélération	Induction électromagnétique	Tension
Vitesse		
Position (Aimant)	Effet Hall	Tension
Courant		

Capteurs passifs :

Il s'agit généralement d'impédance dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée. La variation d'impédance résulte :

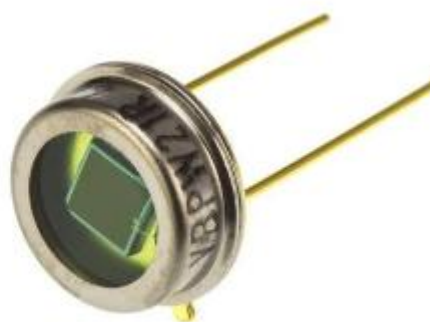
- Soit d'une variation de dimension du capteur, c'est le principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteur de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile.
- Soit d'une déformation résultant de force ou de grandeur s'y ramenant, pression accélération (Armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensomètre liée à une structure déformable).

Tableau 2 : Type de matériau utilisé et caractéristique électrique des capteurs passifs

Grandeur mesurée	Caractéristique électrique	Type de matériau utilisé
Température	Résistivité	Métaux : platine, nickel, cuivre ...
Très basse température	Constante diélectrique	Verre
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité	Alliage de Nickel, silicium dopé
	Perméabilité	Alliage ferromagnétique
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnéto résistants : bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium



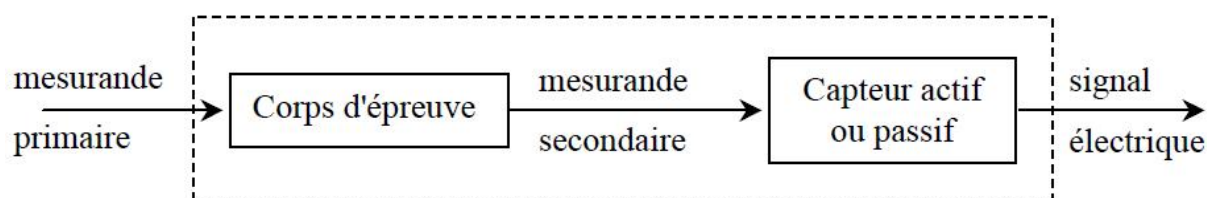
Capteur actif



Capteur passif

Corps d'épreuve

Pour des raisons de coût ou de facilité d'exploitation, on peut être amené à utiliser un capteur, non pas sensible au mesurande mai à l'un de ses effets. C'est le cas en résistance des matériaux lorsqu'on utilise des jauges extensométriques (R 1860 dans les Techniques de l'Ingénieur).



Le corps d'épreuve est le dispositif qui, soumis au mesurande en assure une première traduction en une autre grandeur physique non électrique, qu'un capteur adéquat traduit en grandeur électrique. L'association corps d'épreuve + capteur actif ou passif est un capteur composite.

La relation, que le corps d'épreuve établit entre les mesurandes primaires et secondaires, est très souvent linéaire. Les performances de l'association corps d'épreuve + capteur doivent être déterminées par un étalonnage global afin de prendre en compte les modifications éventuelles que leur montage et leur liaison apportent à leurs caractéristiques à vide. Si de plus l'électronique est associée, on parle de capteur intégré.

Grandeurs d'influence

Le capteur, de par ses conditions d'emploi, peut se trouver soumis non seulement au mesurande mais à d'autres grandeurs physiques qui peuvent entraîner un changement de la grandeur électrique de sortie qu'il n'est pas possible de distinguer de l'action du mesurande. Ce sont les grandeurs d'influence. Les principales sont :

La température qui modifie les caractéristiques électriques (résistance), mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur.

La pression, l'accélération et les vibrations susceptibles de créer des déformations et des contraintes qui altèrent la réponse du capteur.

L'humidité à laquelle, par exemple, la constante diélectrique ou la résistivité peuvent être sensibles et qui risque de dégrader l'isolation électrique entre composants du capteur ou entre le capteur et son environnement.

Les champs magnétiques variables ou statiques. Les premiers créent des f.é.m. d'induction qui se superposent au signal utile, les seconds peuvent modifier une propriété électrique comme la résistivité lorsque le capteur utilise un matériau magnétorésistif.

La tension d'alimentation (amplitude et fréquence) lorsque la grandeur électrique de sortie en dépend de par le principe même du capteur.

La lumière ambiante qui vient s'ajouter au flux lumineux à mesurer.

Afin de pouvoir déduire la valeur de m de la mesure de s , il est nécessaire :

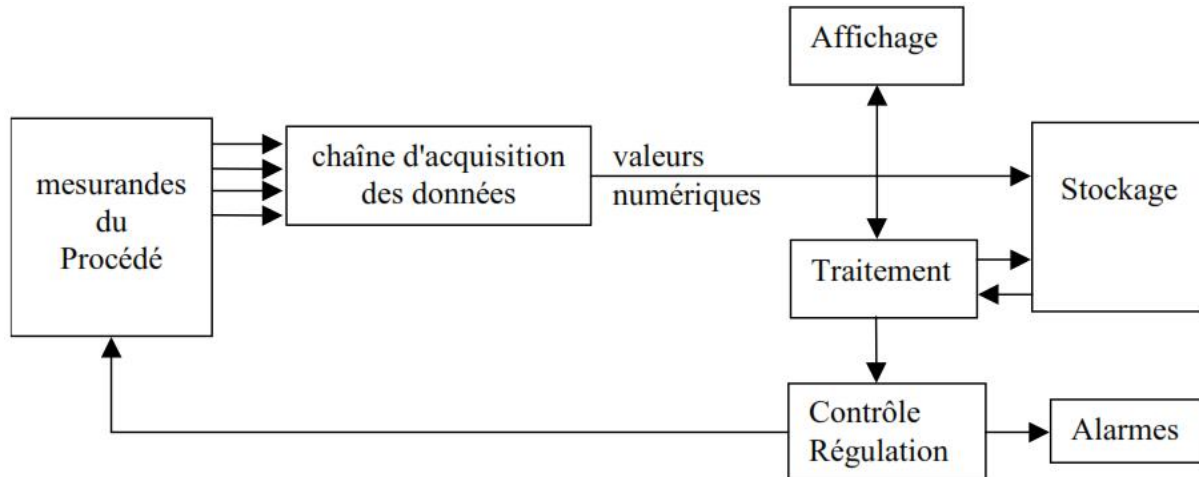
Soit de réduire l'importance des grandeurs d'influence au niveau du capteur en le protégeant par un isolement adéquat : support antivibratoire, blindages magnétiques, ...

Soit de stabiliser les grandeurs d'influence à des valeurs parfaitement connues et d'étalonner le capteur dans ces conditions de fonctionnement : enceintes thermostatées ou à hygrométrie contrôlée, source d'alimentation contrôlée/régulée.

Soit d'utiliser des montages qui permettent de compenser l'influence des grandeurs parasites : pont de Wheatstone avec un capteur identique placé dans une branche adjacente au capteur.

Chaîne d'acquisition

Une chaîne d'acquisition recueille les informations nécessaires à la connaissance et au contrôle d'un procédé : elle délivre ces informations sous une forme appropriée à leur exploitation.



La chaîne de mesure est constituée, en particulier, de blocs ou d'éléments derrière le capteur destinés à traiter le signal délivré soit par le capteur actif, soit par l'ensemble capteur passif + conditionneur. En sortie de la chaîne, le signal est traité pour aboutir à sa mesure. Une chaîne de mesure doit pouvoir assurer au moyen de dispositifs appropriés les fonctions suivantes :

L'extraction de l'information concernant chacune des grandeurs physiques à connaître et la traduction en signal électrique au moyen de capteurs et de conditionneurs.

Le **traitement analogique du signal** afin d'éviter la dégradation du signal par le bruit et les parasites : amplification, filtrage.

La **sélection** à l'aide du multiplexeur parmi l'ensemble des signaux disponibles du seul signal requis.

La **conversion du signal sous forme numérique** adaptée au calculateur chargé de l'exploiter, au moyen de l'échantillonneur bloqueur et du convertisseur analogique numérique.

La **coordination des opérations précédentes** est assurée par un calculateur¹, qui peut être chargé de divers traitements sur les signaux numériques destinés à faciliter leur exploitation (linéarisation) ou corriger des défauts de l'appareillage (dérives thermiques compensées après auto-zéro et auto-étalonnage par exemple).

Erreurs de mesure

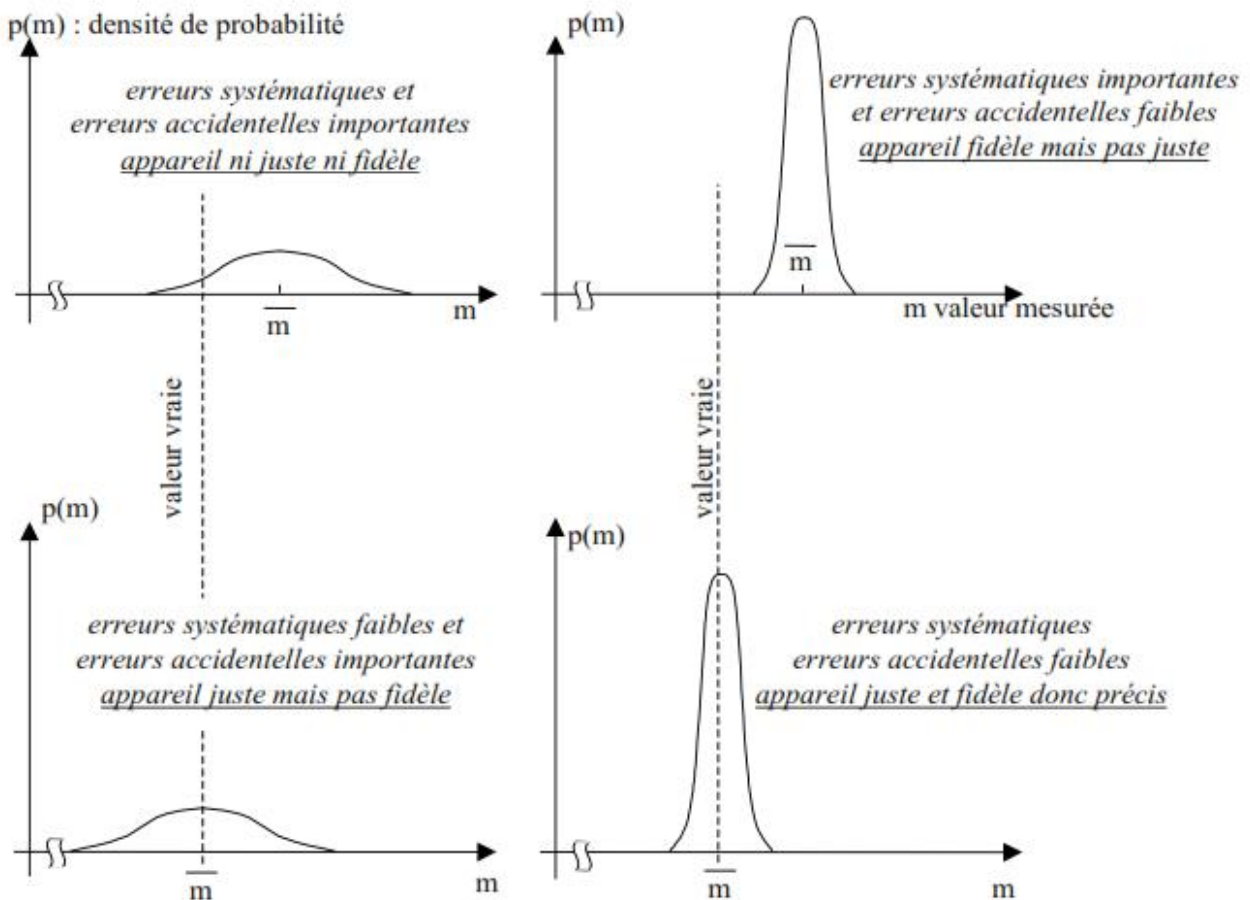
La valeur vraie du mesurande m est celle à laquelle est soumis le capteur et non celle qu'on détermine par la mesure. L'expérimentateur connaît m en fin de chaîne : il peut exister une erreur globale pouvant être due à différentes causes.

a) Erreurs systématiques (qui entachent chaque mesure)

Ce sont des erreurs constantes et/ou des variations lentes par rapport à la durée des mesures liées par exemple à la dérive, le vieillissement, la mauvaise utilisation du capteur, l'erreur de référence.

b) Erreurs accidentelles ou aléatoires (qui n'entachent pas chaque mesure)

Elles sont dues aux grandeurs d'influence, erreurs de lecture, de seuil, parasites, etc.... Il faut remédier à toutes ces erreurs par le blindage, des méthodes de stabilisation, la réjection du bruit et le filtrage.



3. Conditionneurs des capteurs passifs

Le choix d'un conditionneur est une étape importante dans la réalisation d'un ensemble de mesure. C'est, en effet, l'association capteur + conditionneur qui détermine le signal électrique. De la constitution du conditionneur dépend un certain nombre de performances de l'ensemble de mesure : sa sensibilité, sa linéarité, son insensibilité à certaines grandeurs d'influence...

Les types de conditionneurs les plus généralement utilisés sont :

Le montage potentiométrique qui est l'association en série d'une source, du capteur et d'une impédance qui peut être ou non du même type. C'est un montage simple, dont l'inconvénient majeur est sa sensibilité aux parasites.

Le pont d'impédances dont l'équilibre permet la détermination de l'impédance du capteur et/ou dont le déséquilibre est une mesure de la variation de cette impédance. C'est donc un double potentiomètre. Le caractère différentiel de la mesure permet de réduire de façon importante l'influence des parasites.

Le circuit oscillant où est inclus l'impédance du capteur qui en fixe la fréquence.

L'amplificateur opérationnel dont le gain sera déterminé par l'impédance du capteur.

Les **oscillateurs** utilisés en conditionneur peuvent être de type sinusoïdal ou de relaxation. Ils délivrent un signal dont la fréquence est modulée par l'information ce qui leur assure une bonne protection contre les parasites, en particulier dans le cas de télémessures. En outre, la conversion de l'information sous forme numérique est facilitée puisqu'il suffit de faire un comptage de période.

Les ponts

Le montage en pont peut être décrit comme un double montage potentiométrique. C'est pourquoi on retrouve dans l'étude des ponts des méthodes de linéarisation et de compensation de grandeurs d'influence semblables à celles utilisées dans les montages potentiométriques.

L'intérêt des ponts résulte de la **nature différentielle de la mesure** qui la rend moins sensible aux bruits et aux dérives de la source. Cette propriété générale est mise en évidence ci-dessous dans l'exemple particulier d'un pont résistif.

4. Conditionneurs du signal

Le capteur et son conditionneur éventuel sont la source du signal électrique dont la chaîne de mesure doit assurer le traitement de la façon la plus appropriée au but poursuivi. Dans cette partie, on va donc aborder un certain nombre de dispositifs de traitement – les conditionneurs du signal – dont la fonction est en rapport direct avec la nature du signal et avec les conditions de mesure. On va s'intéresser :

au **type d'interface** adéquat entre la source du signal et le reste de la chaîne de mesure selon que cette source est un générateur de tension, de courant ou de charge,

à la **linéarisation** du signal,

à l'**amplification** du signal en présence de tension de mode commun,

à l'**extraction de l'information** relative au mesurande lorsque ses variations modulent le signal électrique.

4.1. Adaptation de la source du signal à la chaîne de mesure

Le capteur, associé à son conditionneur, équivaut à un générateur constitué d'une source et d'une impédance interne délivrant le signal au circuit qui le charge. Afin que le signal soit obtenu dans les meilleures conditions de sensibilité et de stabilité vis à vis des variations éventuelles de l'impédance interne, le générateur équivalent doit être chargé par une impédance appropriée.

4.2. *Linéarisation*

Il existe un certain nombre de procédés de linéarisation qui permettent de corriger les défauts de linéarité d'un capteur ou de son conditionneur, lorsque dans leur domaine d'emploi des écarts à la linéarité interdisent de considérer la sensibilité comme constante à la précision des mesures.

Ces procédés peuvent être classés en deux groupes :

- D'une part ceux qui interviennent sur la source même du signal électrique de façon à linéariser ce dernier dès son origine,
- D'autre part, ceux qui interviennent en aval de la source afin de corriger la non linéarité du signal qu'elle fournit par un traitement analogique ou numérique.