

Module : Mesure et instrumentation

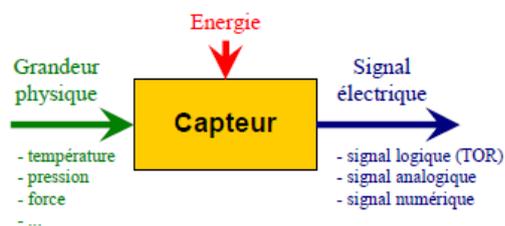
I- GÉNÉRALITÉS

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs ...), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, ...).

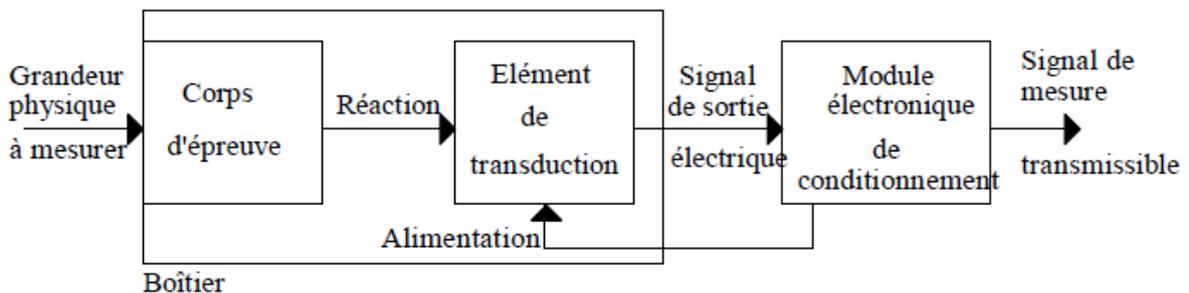
Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

1- Définitions

Capteur : Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande. C'est le premier maillon de toute une chaîne de mesure, acquisition de données, de tout système d'asservissement, régulation, de tout dispositif de contrôle, ...



2. Constitution d'un capteur



Corps d'épreuve : élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer (appelée aussi mesurande). Il transforme la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dite mesurable.

Élément 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.

- la grandeur physique à mesurer s'appelle le mesurande ;
- le cœur du capteur est le transducteur de mesure, dispositif destiné à modifier la forme physique de l'information ; son entrée est un effet physique mesurable, sa sortie un signal électrique image (tension ou courant).

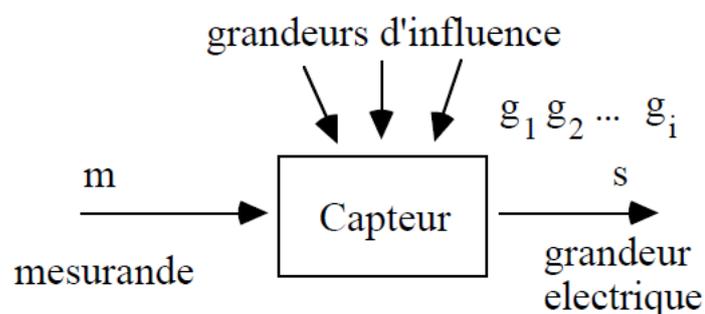
Boîtier : élément mécanique de protection, de maintien et de fixation du capteur.

Module électronique de fonctionnement : il a, selon les cas, les fonctions suivantes :

- alimentation électrique du capteur (si nécessaire)
- mise en forme et amplification du signal de sortie
- filtrage, amplification
- conversion du signal (CAN,...)

3. Grandeurs d'influences

Les grandeurs d'influence sont des grandeurs étrangères qui, selon leur nature et leur importance, peuvent provoquer des perturbations sur les capteurs. C'est donc une cause d'erreurs agissant sur le signal de sortie.



Exemple :

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

4. Caractéristiques métrologiques d'un capteur

Etendue de mesure : Valeurs extrêmes pouvant être mesurée par le capteur.

Résolution : Plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur.

Sensibilité : Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.

Exemple : Le capteur de température LM35 a une sensibilité de 10mV / °C.

Précision : Aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie.

Rapidité : Temps de réaction du capteur. La rapidité est liée à la bande passante.

5. Éléments de métrologie (définitions)

Le mesurage : C'est l'ensemble des opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.

La mesure (x) : C'est l'évaluation d'une grandeur par comparaison avec une autre grandeur de même nature prise pour unité.

Exemple : 2 mètres, 400 grammes, 6 secondes.

La grandeur (X) : Paramètre qui doit être contrôlé lors de l'élaboration d'un produit ou de son transfert.

Exemple : pression, température, niveau.

On effectue des mesures pour connaître la valeur instantanée et l'évolution de certaines grandeurs. Renseignements sur l'état et l'évolution d'un phénomène physique, chimique, industriel.

L'incertitude (dx) : Le résultat de la mesure x d'une grandeur X n'est pas complètement défini par un seul nombre. Il faut au moins la caractériser par un couple (x, dx) et une unité de mesure. dx est l'incertitude sur x . Les incertitudes proviennent des différentes erreurs liées à la mesure.

Ainsi, on a : $x-dx < X < x+dx$

Exemple : 3 cm \pm 10%, ou 3 cm \pm 3 mm.

Erreur absolue C'est la différence entre la vraie valeur du mesurande et sa valeur mesurée. Elle s'exprime en unité de la mesure.

Exemple : Une erreur de 10 cm sur une mesure de distance.

Erreur relative (er) : C'est le rapport de l'erreur absolue au résultat du mesurage. Elle s'exprime en pourcentage de la grandeur mesurée. $er = e/X$; $er\% = 100 er$

Exemple : Une erreur de 10 % sur une mesure de distance (10 % de la distance réelle).

6. Les types d'erreurs classiques

Il existe différents types d'erreurs de mesure que nous présentons dans ce qui suit.

6.1 Les erreurs illégitimes (Illegitimate errors)

Elles résultent d'une fausse manoeuvre, d'une mauvaise utilisation ou d'un dysfonctionnement de l'appareil de mesure. Ce sont des fautes commises lors de la mesure et elles ne sont généralement pas prises en compte dans la détermination de cette dernière.

6.2 Les erreurs systématiques (Systematic errors)

Ce sont des erreurs reproductibles, elles sont constantes et/ou à variation lente par rapport à la durée de mesure. Elles introduisent donc un décalage constant entre la valeur vraie et la valeur mesurée. Ces erreurs peuvent avoir plusieurs causes, dont nous présentons les plus fréquentes.

6.2.1 Les erreurs sur la valeur d'une grandeur de référence

Nous citons à titre d'exemples le décalage du zéro d'un appareil analogique, la valeur erronée de la température de référence d'un thermocouple ou la valeur inexacte de la tension d'alimentation d'un pont. Ces erreurs peuvent être éliminées par la vérification rigoureuse des appareils de mesure.

6.2.3 Les erreurs dues au mode ou aux conditions d'emploi

Les principales sont :

- l'erreur de rapidité qui résulte d'une mesure faite avant que le régime permanent ne soit atteint.
- l'erreur de finesse qui est due à la modification de la valeur du mesurande par la présence du capteur lui même.

6.2.4 Les erreurs dans l'exploitation des données brutes de mesures

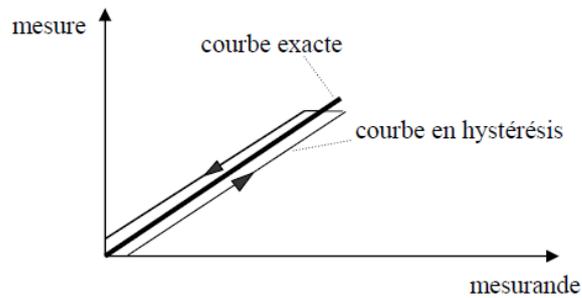
Ce sont des erreurs de correction ou d'interpolation qui résultent d'une appréciation erronée des corrections qu'il peut être nécessaire d'appliquer au résultat brut de la mesure afin d'obtenir une valeur plus juste. Ces erreurs peuvent être des écarts à la linéarité d'un capteur dont la caractéristique n'est pas une droite ...

Il existe d'autres types d'erreurs tels que les erreurs sur la sensibilité ou sur la courbe d'étalonnage d'un capteur. Le vieillissement d'un capteur, la fatigue mécanique ou l'altération chimique de ses composants, entraînent une modification de sa courbe d'étalonnage initiale. Ces erreurs peuvent être réduites par un réétalonnage fréquent des capteurs.

6.3 Les erreurs accidentelles ou aléatoires (Random errors)

Ce sont des erreurs non reproductibles, leurs apparitions et leurs valeurs sont considérées comme aléatoires. Certaines de leurs causes peuvent être connues, mais les valeurs des erreurs qu'elles entraînent au moment de la mesure sont inconnues. Elles sont déterminées à partir de lois statistiques.

Exemple : **L'erreur d'hystérésis** : Lorsqu'un des éléments de la chaîne de mesure comporte un composant présentant de l'hystérésis(par exemple un ressort), sa réponse dépend de ses conditions d'utilisation antérieure. Cette erreur est évaluée en supposant qu'elle est égale à la moitié de l'écart maximal des valeurs de la grandeur de sortie correspondant à une valeur du mesurande, selon que cette dernière est obtenue par des valeurs croissantes ou décroissantes.



L'erreur de quantification d'un convertisseur analogique/digital : l'opération de quantification attribue une valeur unique à l'ensemble des valeurs analogiques comprises dans une plage correspondant à un bit de poids le plus faible (L.S.B).

L'incertitude maximale est de $\pm 1/2$ LSB.

6.3.2 Les erreurs dues à la prise en compte par la chaîne de mesure de signaux parasites de caractère aléatoire

Le bruit de fond produit par l'agitation thermique des porteurs de charge dans les résistances qui entraînent des fluctuations de tension qui se superposent au signal utile, les fluctuations de tension des sources d'alimentation qui agissent sur les performances des appareils et modifient l'amplitude du signal ... engendrent ce type d'erreurs.

6.3.3 Les erreurs dues à des grandeurs d'influence

Lorsque les conséquences des variations des grandeurs d'influence n'ont pas été prises en compte lors de l'étalonnage du capteur, on peut considérer que leur contribution est aléatoire. Ce type d'erreurs apparaît lorsque l'appareil de mesure est utilisé dans des conditions environnementales différentes de celles dans lesquelles il a été étalonné.

7. FIDELITE, JUSTESSE ET PRECISION

La fidélité : elle caractérise un appareil de mesure dont les erreurs aléatoires sont faibles, ce qui se traduit par des résultats de mesure groupés autour de leur valeur moyenne. L'écart type, dont l'importance reflète la dispersion des résultats est souvent considéré comme l'erreur de fidélité et en permet une appréciation quantitative.

La justesse : elle caractérise un appareil de mesure dont les erreurs systématiques sont faibles. La valeur la plus probable du mesurande déterminée par un tel appareil de mesure est très proche de la vraie valeur.

La précision : elle caractérise un appareil de mesure qui est tel que chaque mesure soit très proche de la valeur vraie du mesurande, un appareil précis est donc à la fois juste et fidèle. La précision peut être spécifiée numériquement comme l'intervalle autour de la valeur mesurée, à l'intérieur duquel on est assuré de trouver la valeur vraie.

Fidélité + Justesse \Leftrightarrow Précision

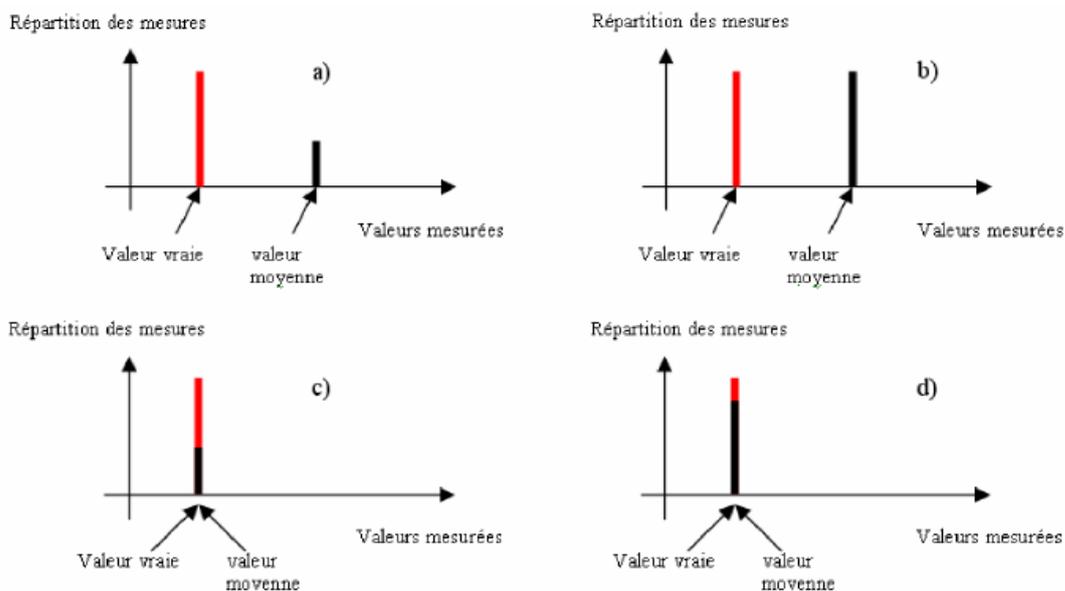
Fidélité et justesse pour le cas des capteurs: La justesse est la qualité d'un capteur à fournir des indications précises. La fidélité est la qualité d'un capteur à fournir des indications identiques pour une même valeur de la grandeur à mesurer.

a : capteur ni fidèle, ni juste (erreurs et incertitudes de mesure importantes)

b : capteur fidèle mais non juste

c : capteur juste mais non fidèle

d : capteur juste et fidèle, donc précis (erreurs et incertitudes de mesure réduites)



8. LES CARACTERISTIQUES STATIQUES D'UN CAPTEUR

8. 1 Gamme de mesure

La **gamme de mesure** est l'ensemble des valeurs du mesurande pour lesquelles un instrument de mesure est supposé fournir une mesure correcte.

• Limites d'utilisation du capteur

Les contraintes mécaniques, thermiques ou électrique ont des seuils :

- Domaine Nominal d'Emploi pas de modification des caractéristiques
- Domaine de non détérioration modification possible des caractéristiques, réversible
- Domaine de non-destruction modification des caractéristiques, irréversible

8.2 La courbe d'étalonnage ou l'étalonnage statique (Static calibration)

Elle est propre à chaque appareil de mesure et permet de transformer la mesure brute en une mesure corrigée. Elle est obtenue en soumettant le capteur à une série de valeurs constantes de la grandeur à mesurer, et à relever avec précision les valeurs correspondantes des grandeurs électriques de sortie, lorsque le régime permanent est atteint. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de tableaux ou de graphiques (courbes, abaques ...).

L'étalonnage permet d'ajuster et de déterminer, sous forme graphique ou algébrique, la relation entre le mesurande et la grandeur électrique de sortie. Il s'agit donc d'une procédure de réglage qui permet de minimiser les erreurs. Il nécessite donc la connaissance de la "courbe exacte".

8.3 La sensibilité (sensitivity)

La sensibilité est une caractéristique déterminante dans le choix d'un capteur, elle est définie par le rapport de la variation de la grandeur de sortie à la variation de la grandeur d'entrée à mesurer, autour d'une valeur constante du mesurande considéré.

La valeur de la sensibilité, dans des conditions d'emploi spécifiées, est généralement fournie par le constructeur. Elle permet à l'utilisateur d'estimer l'ordre de grandeur de la réponse du

capteur, connaissant l'ordre de grandeur des variations du mesurande et de choisir le capteur afin que l'ensemble de la chaîne de mesure satisfasse aux conditions de mesure adéquates.

Soit m la valeur à mesurer et s l'indication ou le signal fourni par le capteur. A chaque valeur de m appartenant à l'étendue de mesure, correspond une valeur de s : $s=f(m)$.

La sensibilité autour d'une valeur de m est le rapport S :

$$S = \left(\frac{ds}{dm} \right)_{m=\text{constante}}$$

Si la fonction est linéaire, la sensibilité du capteur est constante :

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

Dans ce cas, la sensibilité en régime statique est égale à la pente de la courbe d'étalonnage du capteur.

8.4 La résolution

La résolution d'un appareil de mesure est la plus faible variation du mesurande qui provoque une variation de la grandeur de sortie du capteur considéré, elle représente la plus petite variation de la grandeur d'entrée que le système de mesure sera capable d'identifier.

8.5 La répétabilité (Precision)

La répétabilité est l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesure d'une même grandeur effectuée selon la même procédure, avec le même appareillage, par la même personne, en un même lieu et pendant une durée de temps courte vis à vis de la durée de la mesure.

Attention : Une bonne répétabilité ne signifie pas que le capteur est satisfaisant mais que le processus est répétitif. Par contre, la non-répétabilité est généralement significative d'une mauvaise qualité du capteur, les grandeurs d'influence susceptibles de perturber les résultats de mesure évoluent généralement de manière peu sensible pendant une courte période de temps.

9. Caractéristiques dynamiques

Rapidité/temps de réponse :

C'est le temps au bout duquel la sortie atteint 90% ou 95% de sa valeur finale quand la grandeur d'entrée est un échelon. Le temps de réponse a pour origine l'inertie mécanique, thermique ou électrique de l'élément sensible (ex : quelques s pour une Pt100).

II. Structure des capteurs (notions de corps d'épreuve)

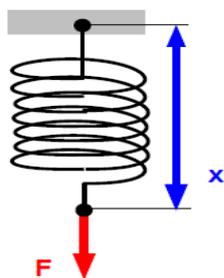


- Le **corps d'épreuve** a pour fonction de transformer la grandeur à mesurer (**mesurande**) en une grandeur physique secondaire (**mesurande secondaire**) plus facile à mesurer.
- Pour de nombreux capteurs, il peut y avoir plusieurs corps d'épreuve avant la mesure électrique

Corps d'épreuve

- **Exemple simple:** Mesure d'une force mécanique

On utilise comme corps d'épreuve un élément élastique, respectant la loi linéaire (raideur constante) .

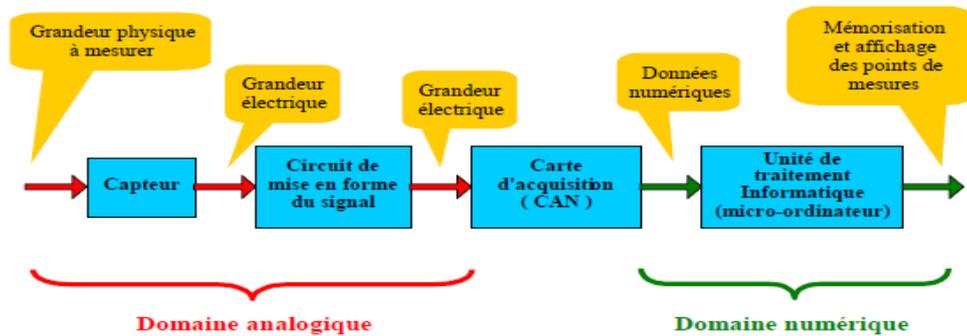


$$F = -kx \Rightarrow x = -\frac{F}{k}$$

Le mesurande **force** est transformé en mesurande **déplacement**

Le capteur de force utilise ainsi les technologies du capteur de déplacement

III. Caractéristiques d'une chaîne de mesure informatisée



La structure de base d'une chaîne de mesure comprend au minimum quatre étages :

- Un capteur sensible aux variations d'une grandeur physique et qui, à partir de ces variations, délivre un signal électrique.
- Un conditionneur de signal dont le rôle principal est l'amplification du signal délivré par le capteur pour lui donner un niveau compatible avec l'unité de numérisation; cet étage peut parfois intégrer un filtre qui réduit les perturbations présentes sur le signal.
- Une unité de numérisation qui va échantillonner le signal à intervalles réguliers et affecter un nombre (image de la tension) à chaque point d'échantillonnage.
- L'unité de traitement informatique peut exploiter les mesures qui sont maintenant une suite de nombres (enregistrement, affichage de courbes, traitements Mathématiques, transmissions des données ...).

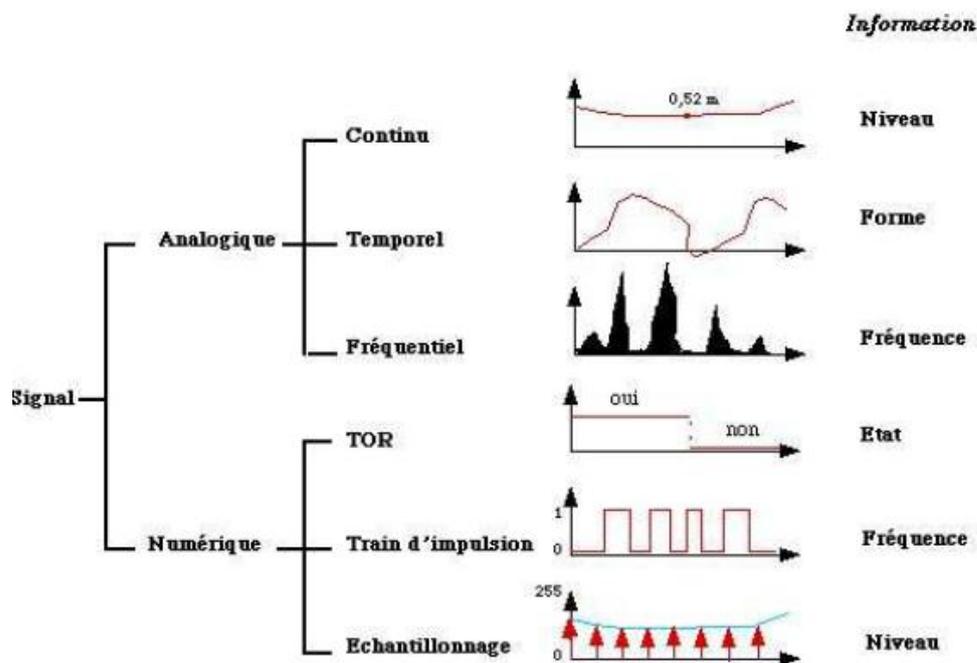
De nos jours, compte tenu des possibilités offertes par l'électronique et l'informatique, les capteurs délivrent un signal électrique et la quasi-totalité des chaînes de mesure sont des chaînes électroniques et informatiques.

Certains capteurs, par exemple le thermomètre DALLAS DS1621, délivrent directement un mot binaire, image de la température, en leur sortie. Ils intègrent, dans un seul boîtier (DIL 08) le capteur + le circuit de mise en forme + le CAN.

1. Classification des signaux

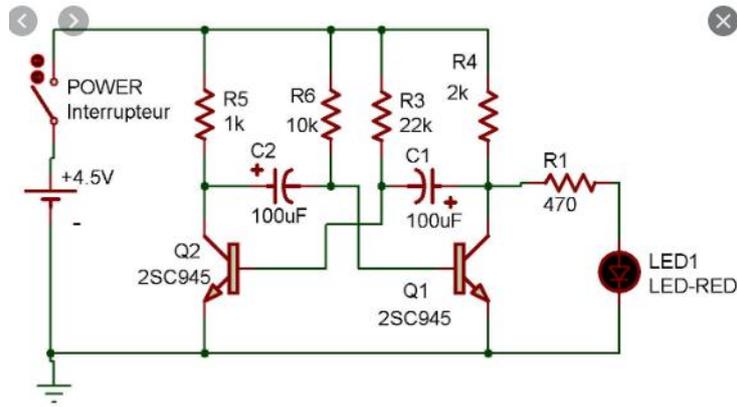
Les principales grandeurs physiques à mesurer sont :

- la présence d'un objet ; sa position ; son déplacement linéaire / angulaire ; sa vitesse linéaire / angulaire ; son accélération ;
- la force ; le couple ; la pression ;
- la température ; l'humidité ; la luminosité ; la vitesse du vent ;
- le débit ; le niveau ; le bruit ...



Un signal est dit analogique si l'amplitude de la grandeur physique le représentant peut prendre une **infinité** de valeurs dans un intervalle donné.

La grandeur électrique délivrée en sortie par ce type de capteur est en relation directe (le plus souvent proportionnelle) à la grandeur physique à capter. Le signal varie de façon continue au cours du temps.



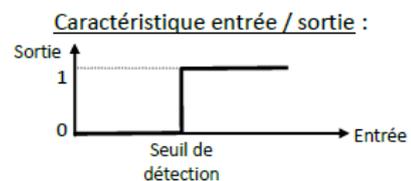
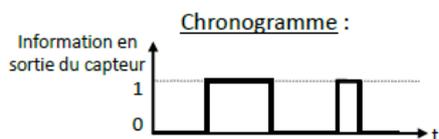
- **Signal continu** : C'est un signal qui varie 'lentement' dans le temps : température, débit, niveau.
- **Forme** : C'est la forme de ce signal qui est importante : pression cardiaque, chromatographie, impact.
- **Fréquentiel** : C'est le spectre fréquentiel qui transporte l'information désirée : analyse vocale, sonar, spectrographie.

Un signal est dit numérique si l'amplitude de la grandeur physique le représentant ne peut prendre qu'un nombre **fini** de valeurs. En général ce nombre fini de valeurs est une puissance de 2.

Tout ou rien (TOR) : Il informe sur l'état bivalent d'un système.

Exemple : une vanne ouverte ou fermée.

Ces capteurs génèrent une information électrique de type binaire (vrai ou faux) qui caractérise le phénomène à détecter. On parle alors plutôt de détecteurs.

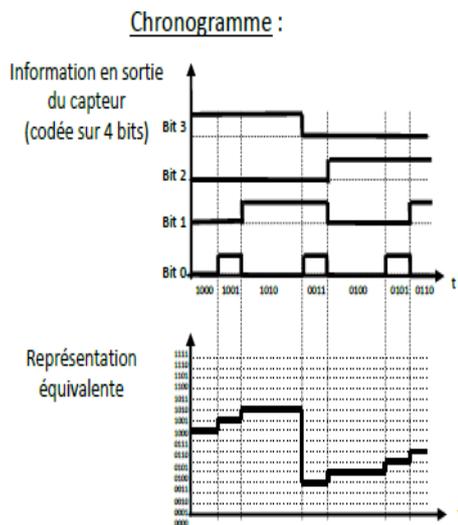


- **Train d'impulsion** : Chaque impulsion est l'image d'un changement d'état. Exemple : un codeur incrémental donne un nombre fini et connu d'impulsion par tour.
- **Echantillonnage** : C'est l'image numérique d'un signal analogique.

Exemple : température, débit, niveau, son (pression)...

- Capteur numérique

Ce type de capteur délivre en sortie une information électrique à caractère numérique, c'est-à-dire ne pouvant prendre qu'un nombre limité de valeurs distinctes. Le signal varie de façon discontinue au cours du temps. L'information délivrée par ces capteurs est un code numérique sur plusieurs bits.



Caractéristique entrée / sortie :



Ex : Codeur absolu de position angulaire à 4096 positions / tr
"000010001111" = 143 correspond à 12,6°



Rq : - Plus le nombre de bits est important, plus le signal numérique tend vers un signal analogique.

- On parle aussi de signal numérique lorsque le code a subi une conversion parallèle → série pour être transmis. Le signal est alors sous forme logique, mais transporte l'information d'une valeur numérique (ex : USB, RS232, bus CAN, etc.).

2. LES DIFFÉRENTES FAMILLES DE CAPTEURS

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

a. 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 à la grandeur physique à prélever, énergie thermique, mécanique ou de rayonnement.

Les effets physique les plus classiques 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 piézo-électriques (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une déformation et d'une même charge électrique de signe différent sur les faces opposées.
Ex : - mesure d'effort, d'accélération (accéléromètre)
- ✓ **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.
Ex : - mesure de lumière (capteur CCD, photodiode)
- ✓ **Effet Hall** : Un champ magnétique B et un courant électrique I créent dans le matériau une différence de potentiel UH .
Ex : - mesure de courant (pince ampèremétrique)
- ✓ **Effet photovoltaïque** : Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction PN illuminée, leur déplacement modifie la tension à ses bornes.

Grandeur physique mesurée	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Photo-émission	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		

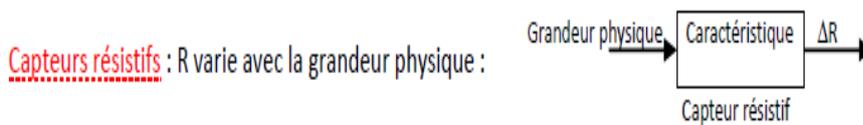
b. Capteurs passifs

Il s'agit généralement **d'impédance** dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée. Ils font intervenir une impédance dont la valeur varie avec la grandeur physique ; il faut donc intégrer un capteur passif dans un circuit avec une alimentation.

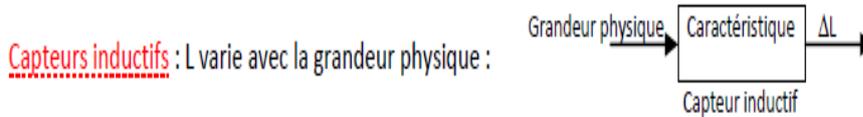
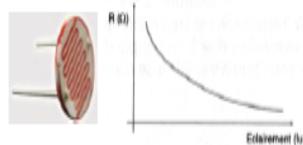
La variation d'impédance résulte :

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).



- Ex :
- mesure de température par résistance à fil de platine (sonde Pt100), thermistance (CTN, CTP)
 - mesure d'effort par jauge de contrainte
 - mesure d'intensité lumineuse par photorésistance (cf. Somfy) :

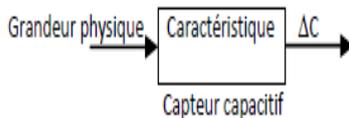


- Ex :
- mesure de déplacement par inductance variable (Transformateur Différentiel Linéaire LVDT)
 - mesure d'effort par capteur magnéto-élastique :



Le noyau de la bobine se déplace avec l'objet dont on veut mesurer le déplacement.

Capteurs capacitifs : C varie avec la grandeur physique :



- Ex :
- mesure de déplacement et de position : l'objet dont on veut mesurer le déplacement se déplace avec une armature du condensateur
 - mesure de niveau : la présence de liquide modifie la valeur de la capacité.

