

Chapitre1 Rappel sur les capteurs

I.	Définition	1
II.	Mesurande & Mesure (définitions) :	1
1.	mesurande.....	1
2.	mesurage:.....	1
3.	La grandeur de sortie ou réponse du capteur s :.....	1
III.	Classification	2
1.	Classification (actif, passif)	2
2.	Classification par rapport à l'électronique associée	4
3.	Classifications (capteur classique/capteur intelligent).....	5
4.	Classifications par rapport à la complexité du capteur	5
IV.	Propriétés d'un capteur.....	6
1.	Propriétés statiques	6
2.	Propriétés dynamiques	8
V.	Grandeur d'influence	9
VI.	Erreurs et incertitudes de mesure.....	10
	Les types d'erreurs classiques	10
VII.	Limites d'utilisation	11
VIII.	Chaine de mesure.....	12
IX.	Les différents types de capteur	14
1.	CAPTEURS passif jauge de contrainte	15

I. Définition

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique (mesurande), 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.

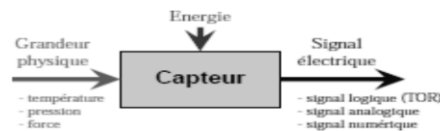


Figure 1

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

II. Mesurande & Mesure (définitions) :

1. mesurande

La grandeur physique objet de la mesure : déplacement, température, vitesse, pression, etc.... est désignée comme le mesurande et représentée par m

2. mesurage:

L'ensemble des opérations qui concourent à la connaissance de la valeur numérique du mesurande constitue son mesurage.

3. La grandeur de sortie ou réponse du capteur s :

qui soumis à l'action d'un mesurande non électrique présente une caractéristique de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) désignée par s et qui est fonction du mesurande : $s = F(m)$

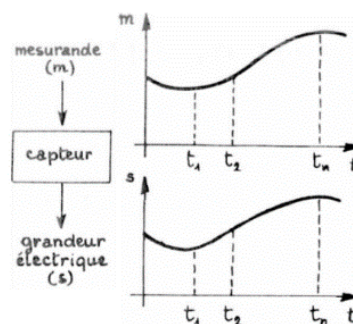


Figure 2

III. Classification

1. Classification (actif, passif)

1.1. Capteur actif

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.

Grandeur physique mesurée	EFFET UTILISE	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectrique	Tension
Flux de rayonnement optique	photo-émission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	photo-électrique	Tension
Force	piézo-électrique	Charge électrique
Pression		
Accélération		
Vitesse	induction électromagnétique	Tension
Position	Effet Hall	Tension
Courant		

- 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 $e(T_1, T_2)$.
- Effet piézo-électrique : L'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézo-électrique (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.
- 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 dont la longueur d'onde est inférieure à un seuil caractéristique du matériau.
- Effet Hall : Un champ B crée dans le matériau un champ électrique E dans une direction perpendiculaire.

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

1.2. Capteur passif

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).

Grandeur mesurée	Caractéristique électrique sensibilité	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
	Résistivité magnétique	Alliage ferromagnétique
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magneto résistants : bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

2. Classification par rapport au type de sortie

On peut aussi classer les capteurs selon le type des sorties électriques qu'ils délivrent : Analogique, Numérique et logique (TOR).

Type de capteur	Type de signal de sortie	Exemples
Logique TOR	Bas ou haut niveau <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tension (0 ou 12 v) ▪ Courant (absence ou présence) ▪ Visualisation (LED allumé ou éteinte) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Capteur de fin de course ▪ Détecteurs de proximité ▪ Capteur photoélectrique
Analogique	La sortie peut prendre une infinité de valeurs dans un intervalle donné	Thermocouple , Capteur à jauge de contrainte.....
Numérique	Elle se présente sous la forme : <ul style="list-style-type: none"> ▪ D'impulsions électriques ▪ Des échantillons 	Codeur incrémentale et codeur absolu

2. Classification par rapport à l'électronique associée

D'autres classifications peuvent être considérées et cela par rapport à l'intégration de l'électronique associée,

2.1. Capteur composite

Lorsqu'un corps d'épreuve est nécessaire dans un capteur, le capteur résultant est dit « capteur composite » comme le représente la figure 1 et remontré dans la figure

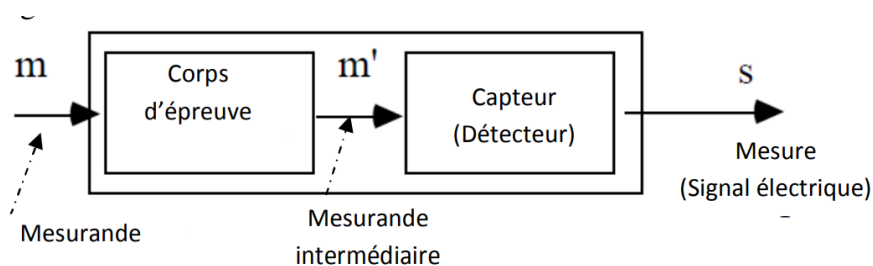


Figure 3 capteur composite

2.2. Capteur intégré

Un capteur intégré est un composant réalisé par les techniques de la Microélectronique et qui regroupe sur un substrat de silicium commun le capteur, le corps d'épreuve éventuel, des circuits électroniques de conditionnement du signal comme le représente la figure ci dessous

Lorsque l'électronique associée au capteur (détecteur ou corps d'épreuve + détecteur) est portée sur le même circuit intégré, le capteur est dit « capteur intégré »

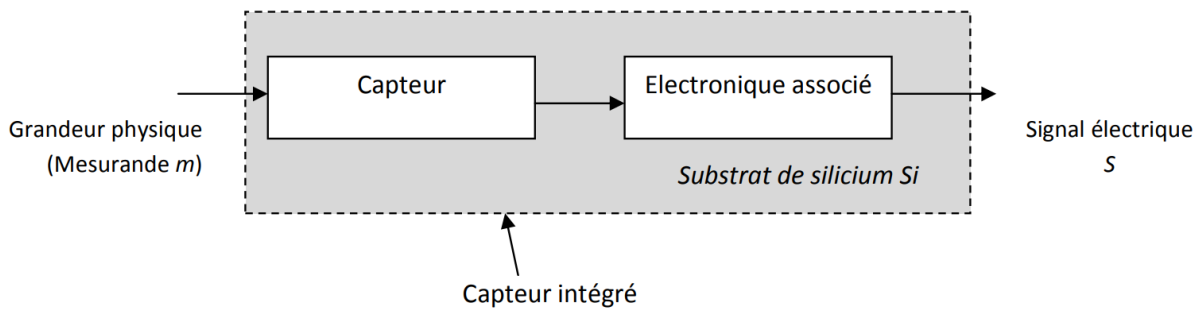


Figure 4 capteur intégré

L'intégration apporte de multiples avantages : miniaturisation, diminution des coûts par la fabrication en grande série, accroissement de la fiabilité par suppression de nombreuses connexions soudées, interchangeabilité améliorée, meilleure protection vis-vis des parasites, le signal étant conditionné à sa source.

L'utilisation sur silicium impose cependant une limitation de la plage d'emploi de -50°C à 150°C environ.

3. Classifications (capteur classique/capteur intelligent)

3.1. Capteur classique

Les capteurs qui ne comportent pas de microprocesseur sont appelés capteurs classiques. Donc il s'agit des types de capteurs déjà étudiés.

3.2. Capteur intelligent

Dans ce type de capteurs un microprocesseur et une interface de communication bidirectionnelle sont présents dans le circuit global du capteur.

4. Classifications par rapport à la complexité du capteur

4.1. Capteur en forme simple

Dans la forme de base de ce type de capteur peut se trouver un détecteur (transducteur) est un outil de mesure tel que : voltmètre. Les différents blocs qui le constituent sont placés en cascade (en boucle ouverte) et il n'y a aucune rétroaction (pas de boucle fermée) pour ajuster la lecture de la grandeur physique. Les capteurs composites et les capteurs intégrés y font partie.

4.2. Capteur en forme complexe

Dans ce type de capteur plusieurs grandeurs physiques sont à détecter et l'ajustement des lectures des grandeurs physiques sont possible via l'emploi d'une boucle fermée reliant la sortie

du capteur à son entrée. Il peut être aussi composé d'une unité de contrôle, d'un microprocesseur, d'une interface bidirectionnelle de communication.

IV. Propriétés d'un capteur

1. Propriété statiques

1.1. Résolution

Elle correspond à la plus petite variation du mesurande que le capteur est susceptible de détecter.

1.2. Sensibilité

C'est le coefficient qui lie la grandeur physique d'entrée à mesurer à la grandeur électrique de

sortie. $s = \frac{\Delta M_{mesure}}{\Delta M_{mesurande}}$

Exemple : Capteur de pression: $V(P) = S.P + V_0$ avec P étant la pression et V la tension mesurée d'où $s = \frac{dV}{dP} = A, A = 1mV/Pa$ alors le capteur peut mesurer 1Pa et il le montre comme 1mV.

La sensibilité permet :

- d'estimer l'ordre de grandeur de la sortie, connaissant l'ordre de variation du mesurande
- de choisir le capteur de façon que la chaîne de mesure satisfasse aux conditions de mesure imposées.

1.3. Linéarité

Un capteur est linéaire si sa sensibilité est constante. La relation entre grandeur physique à mesurer et grandeur électrique est alors linéaire (équation d'une droite).

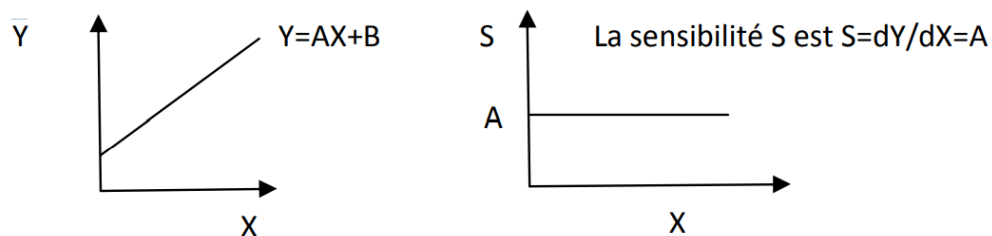


Figure 5 Sensibilité de la mesurande X à la mesure Y

1.4. Justesse

C'est l'aptitude d'un capteur à délivrer une réponse proche de la valeur vraie et ceci indépendante de la notion de la fidélité. si la valeur moyenne des mesures est proche de la valeur réelle. Tel que la valeur moyenne correspond à

$$\langle m_i \rangle = \frac{\sum_i m_i}{n}$$

- n : nombre des mesures effectuées
- m_i : les mesures effectuées

1.5. 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 un mesurande constant. Telsque la formule de l'écart type correspond à

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

Un capteur est d'autant plus fidèle que son écart type est faible.

Les mesures quantitatives de la fidélité dépendent de façon critique des conditions stipulées. Les conditions de répétabilité et de reproductibilité sont des ensembles particuliers de fidélité avec des conditions extrêmes. [SOURCE:ISO 3534-1]

1.6. Précision

Elle définit l'écart en % que l'on peut obtenir entre la valeur réelle et la valeur obtenue en sortie du capteur. Ainsi un capteur précis aura à la fois une bonne justesse, et une bonne fidélité.

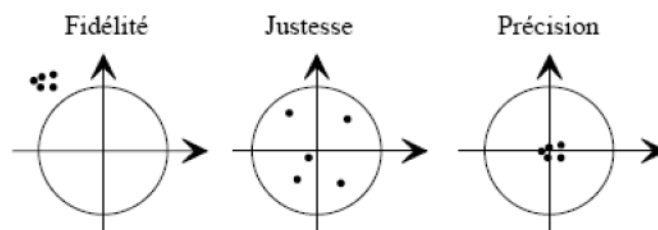


Figure 6

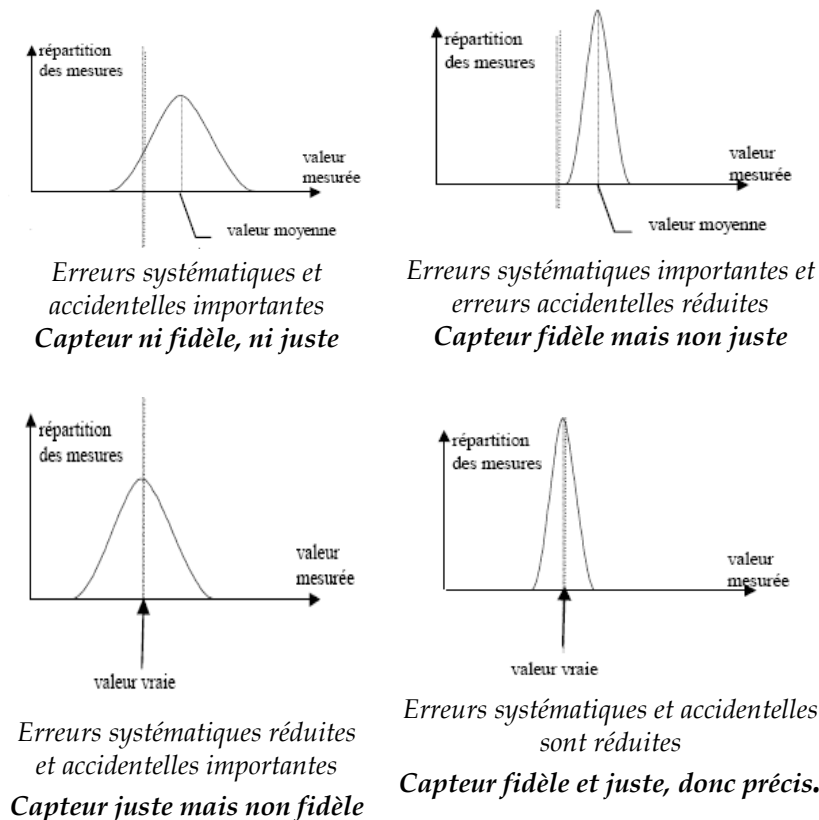


Figure 7

1.7. Plage de mesure

Les contraintes mécaniques, thermiques ou électriques auxquelles un capteur est soumis entraînent, lorsque leurs niveaux dépassent des seuils définis, une modification des caractéristiques du capteur. La plage de mesure où limites d'utilisation est la gamme des valeurs d'entrée qu'il peut traiter sans dégrader son fonctionnement. Exemple : La Pt100 à base du nickel peut mesurer des températures allant de -60°C à 180°C . En dehors de cette plage il ne faut pas compter sur le capteur pour la délivrance de mesures correctes.

2. Propriétés dynamiques

2.1 Rapidité/temps de réponse

- **le temps de retard à la montée ou délai de la montée, t_{dm}** : Est le temps nécessaire pour que la grandeur de sortie s croisse, à partir de sa valeur initiale de **10%** de sa valeur totale
- **le temps de montée, t_m** : Est l'intervalle de temps correspondant à la croissance de s de **10% à 90%** de sa variation totale

- **le temps de retard à la chute, t_{dc}** : Est le temps qu'il faut pour que la grandeur de sortie s décroisse à partir de sa valeur initiale de **10% de sa variation totale**.
- **le temps de chute t_c** : Est l'intervalle de temps correspondant à la décroissance de s de **10% à 90%** de sa variation totale.

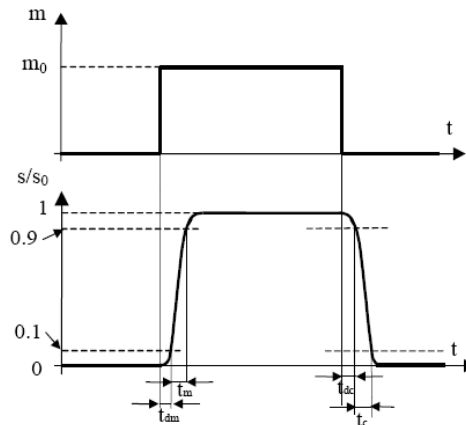


Figure 8 Temps de réponse d'un capteur à une grandeur du type échelon.

2.2 Bande passante

La bande passante est la plage de fréquence dans laquelle le capteur fonctionne correctement. Pour déterminer la bande passante d'un capteur donné, une variation périodique de la grandeur physique d'entrée est appliquée. Ensuite une mesure de la sortie associée est effectuée et la sensibilité du capteur en fonction de la fréquence est tracée (sensibilité dynamique). La bande passante est la plage de fréquence couvrant l'intervalle où la sensibilité du capteur est au-dessous de -3 dB.

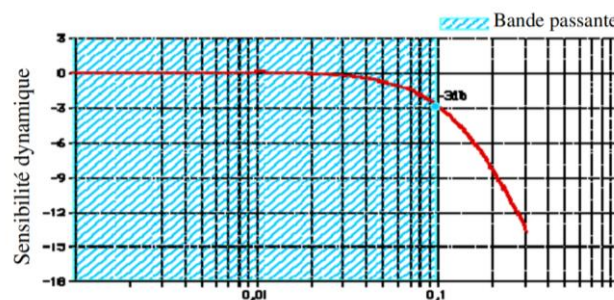


Figure 9 Bande passante de 0.1Hz à -3dB d'un capteur donné

V. Grandeur d'influence

Les grandeurs d'influence g_1, \dots, g_n sont des grandeurs externes au mesurande m qui, selon leur nature et leur importance, peuvent provoquer des perturbations sur les mesures effectuées par

les capteurs. C'est une cause d'erreurs influant sur le signal de sortie. Parmi les grandeurs d'influence sont: la température, la pression environnante, les vibrations mécaniques ou acoustiques, l'humidité, ...

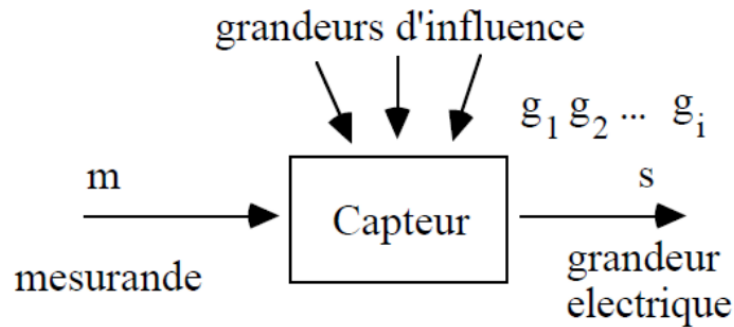


Figure 10 Grandeurs d'influence

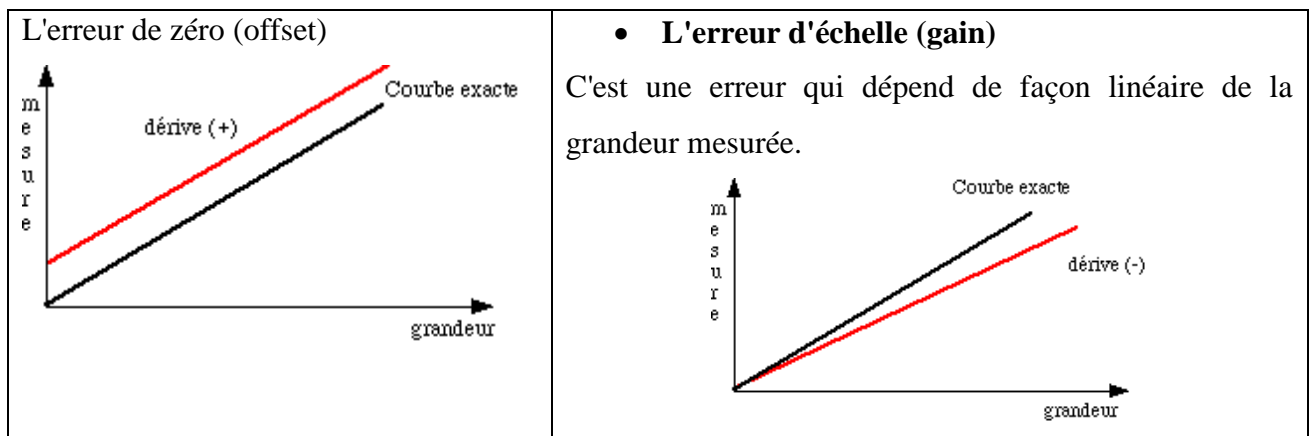
VI. Erreurs et incertitudes de mesure

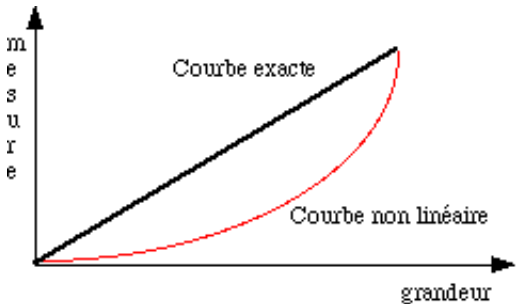
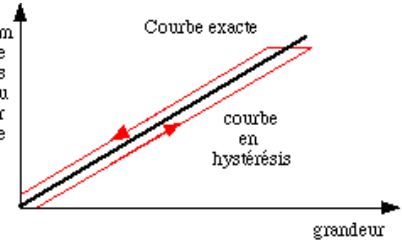
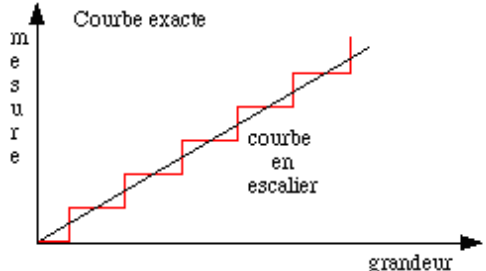
La valeur mesurée par un capteur diffère toujours de la valeur vraie du mesurande. L'écart entre valeur vraie et valeur mesurée résulte en particulier des imperfections du capteur ou de son montage ou de la méthodologie de mesure.

Ecart de mesure (erreur+incertitude) = mesure vraie du mesurande - valeur mesurée

- **Erreur de mesure:** écart qui ne peut être calculé et qui peut être (ou non) corrigé
- **Incertitude de mesure:** écart qui provient de la variation de paramètre non contrôlé et qui ne peut être qu'estimé.

Les types d'erreurs classiques



<ul style="list-style-type: none"> • L'erreur de linéarité <p>La caractéristique n'est pas une droite.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • L'erreur due au phénomène d'hystérésis <p>Il y a phénomène d'hystérésis lorsque le résultat de la mesure dépend de la précédente mesure.)</p> 
<ul style="list-style-type: none"> • L'erreur de mobilité <p>La caractéristique est en escalier, cette erreur est souvent due à une numérisation du signal..</p> 	

VII. Limites d'utilisation

Les composants électroniques ou mécaniques du capteur possèdent chacun des limites thermiques, mécaniques ou électriques, qui, une fois dépassées, entraînent une modification des caractéristiques de celui-ci. Il est donc indispensable de prévenir l'utilisateur de ces différentes limites d'utilisation :

- **Domaine nominal d'emploi (Domaine d'utilisation):** Il correspond aux conditions normales d'utilisation du capteur; ses limites sont les valeurs extrêmes que peuvent atteindre de façon permanente ou le mesurande, ou les grandeurs physiques qui lui sont associées ou les grandeurs d'influence, et ceci, sans que soient modifiées les diverses spécifications qui caractérisent le fonctionnement du capteur.
- **Etendue de mesure (EM) :** Elle est définie par la différence des valeurs extrêmes de la plage du mesurande dans laquelle le fonctionnement du capteur satisfait à des spécifications données $E.M. = m_{max} - m_{min}$. L'unité de l'E.M. est généralement l'unité du mesurande.
- **Domaine de non-détérioration :** Lorsque les valeurs ou du mesurande ou des grandeurs physiques associées ou des grandeurs d'influence dépassent les limites du domaine nominal d'emploi mais restent inférieures aux bornes du domaine de non-détérioration les

caractéristiques métrologiques du capteur risquent d'être modifiées ; cette altération est cependant réversible, le capteur retrouvant ses caractéristiques spécifiées lorsque les conditions de fonctionnement redeviennent celles du domaine nominal d'emploi.

- **Domaine de non-destruction:** Lorsque les valeurs ou du mesurande, ou des grandeurs physiques associées ou des grandeurs d'influence dépassent les limites du domaine de non-détérioration tout en restant inférieures aux bornes du domaine de non-destruction les caractéristiques du capteur sont modifiées de façon irréversible ; la réutilisation du capteur, dans son domaine nominal d'emploi nécessite donc un nouvel étalonnage.

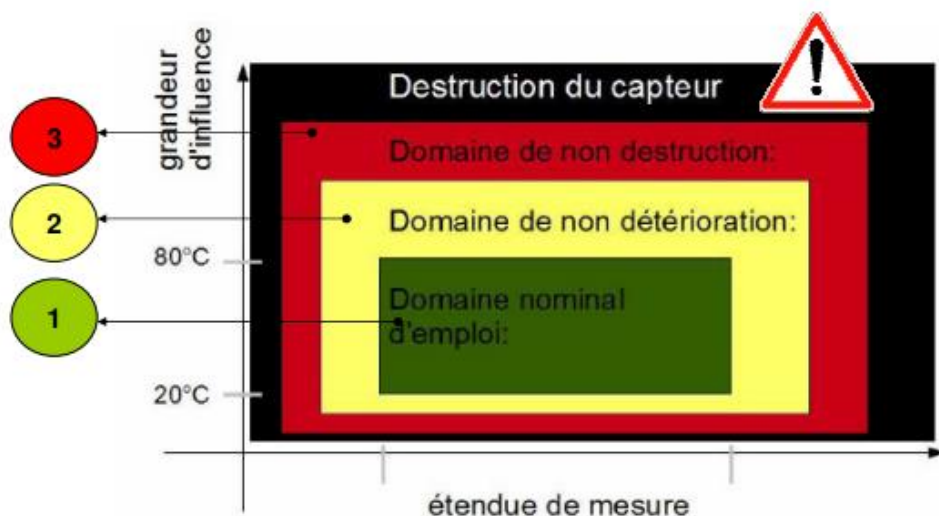


Figure 11

Exemple de spécification des limites d'emploi

Tableau 1 Capteur de force à jauges piézorésistives N556-1 (fabricant J.P.B.)

Domaine	Mesurande	Température
nominal	1 daN (E.M.)	0 °C à 60 °C
non-détérioration	1,5 x E.M	- 20 °C à 1 00 °C
non destruction	3 x E.M	- 50 ° C à 1 20 ° C

VIII. Chaîne de mesure

La chaîne de mesure est constituée d'une association d'éléments montés en chaîne (en cascade) comme représenté dans la figure ci dessous, dont certains sont optionnels selon les besoins.

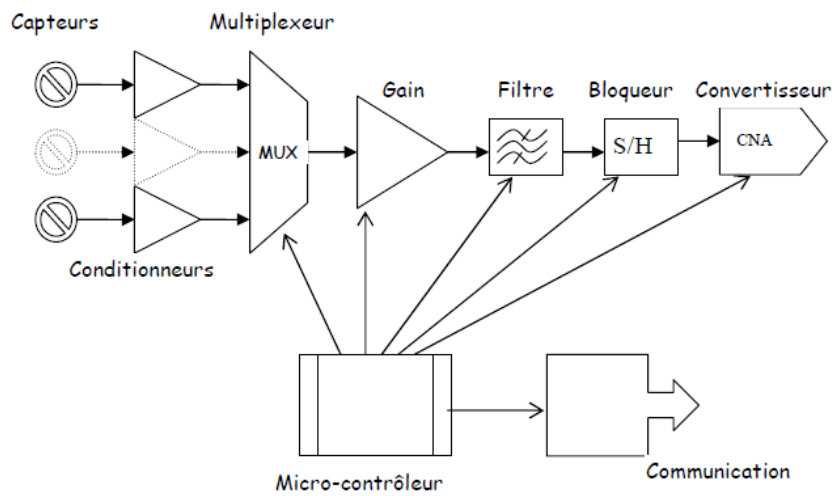


Figure 1.2 . La chaîne de mesure

Figure 12 exemple de chaîne de mesure

Les différents éléments qui peuvent être présents dans la chaîne de mesure sont :

- **Un multiplexeur analogique** chargé de sélectionner l'un des signaux électriques disponibles dans le cas d'un dispositif comprenant plusieurs capteurs
- **corps d'épreuve** : élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer. Il transforme la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dites mesurable.
- **Transducteur** : il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie.
- **Transmetteur (conditionneur)**: mise en forme, amplification, filtrage, mise à niveau du signal de sortie pour sa transmission à distance.
- **Un circuit amplificateur d'instrumentation (conditionneur)**: ou d'isolement pour réduire les tensions parasites de mode commun
- **Un circuit d'amplification** du niveau du signal
- **Un échantillonneur-bloqueur** pour mémoriser le niveau analogique pendant le temps nécessaire à son traitement
- **Un convertisseur analogique-digital** pour fournir une information numérique
- **Un calculateur** qui peut remplir une ou plusieurs des 3 tâches suivantes : l'orchestration de la chaîne de mesure (sélection des voies, des gains, des filtres), des opérations mathématiques de traitement du signal (filtrage, correction) et d'analyse des données

(statistique), la production du résultat de la mesure sur une interface d'entrée-sortie informatique (afficheur, mémoire de masse, circuit de communication).

IX. Les différents types de capteur

1. CAPTEURS actifs

1.1. Capteur de force

Effet utilisé piezoélectrique

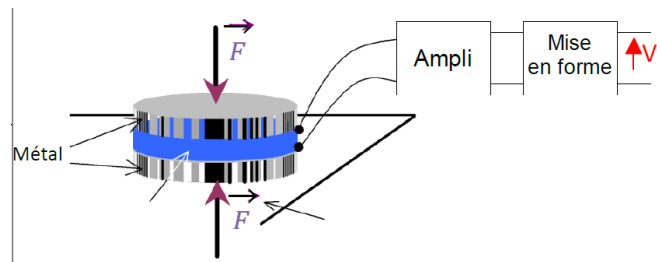


Figure 13 Principe d'un capteur de force

La tension V_s de sortie sera proportionnelle à la force F :

$$V_s = k.(F + F) = 2kF \text{ avec } k \text{ constante.}$$

1.2. Capteur de pression

Lorsqu'un corps (gaz, liquide ou solide) exerce une force F sur une paroi S (surface); on peut définir la pression P exercée par ce corps avec la relation ci- dessous :

$$P = \frac{F}{S}$$

Le capteur de force est inséré dans la paroi d'une enceinte où règne une pression P .

Une face du capteur est soumise à la force F (pression P) et l'autre face est soumise à la force F_0 (pression extérieure P_0).

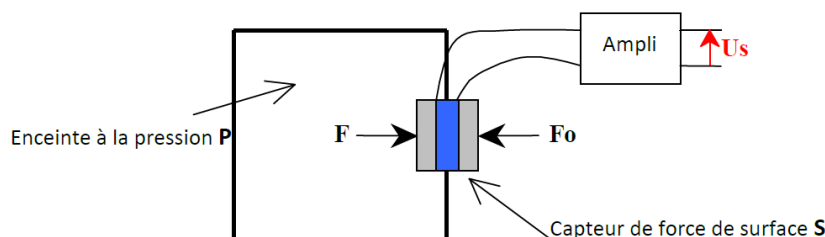


Figure 14

On a $F = P.S$, $F_0 = P_0S$ et $U_s = k.(F + F_0)$ (capteur de force, k constante)

$$\text{Donc } U_s = k.S(P + P_0), U_s = k'(P + P_0)$$

Il s'agit ici d'un capteur de pression qui mesure la somme de la pression extérieure P_0 et de la pression de l'enceinte P .

1.3. Capteur d'accélération

L'augmentation de vitesse V du véhicule donne une accélération a qui induit une force F exercée par la masse sur le capteur.

On a donc : $F = m \cdot a$ or $U_s = 2kF$ et donc $U_s = 2km \cdot a$

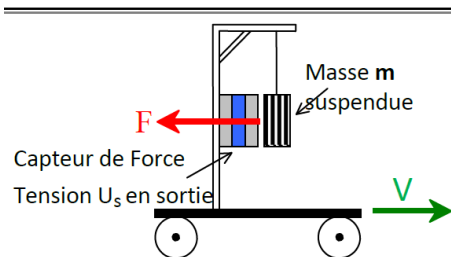


Figure 15 Principe d'un capteur d'accélération

1. CAPTEURS passif jauge de contrainte

Sous sa forme la plus simple, une jauge est constituée d'un très fin fil (2 microns) conducteur collé sur un support. Cette feuille très mince est arrangée suivant la forme de la Figure 1. Les brins de fil constituant la jauge étant principalement alignés suivant la direction de mesure, on peut admettre que le fil subit les mêmes déformations que la surface sur laquelle la jauge est collée.

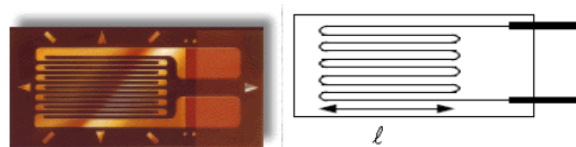


Figure 16 Jauge de contrainte

La résistance d'un fil conducteur est définie par la loi de Pouillet :

$$R = \frac{\rho L}{s}$$

où R est la résistance électrique

ρ la résistivité du matériau

L la longueur du fil

s la section du fil

qui peut se réécrire

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L}$$

où K est appelé le facteur de jauge tels que $K = c(1 - 2\nu) + (1 + 2\nu)$

La jauge est constituée d'une piste résistive collée sur un support en résine. Le tout est collé sur le corps dont on veut mesurer la déformation.

- Corps au repos (pas d'allongement)

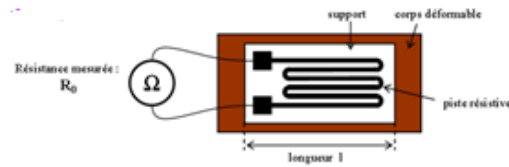
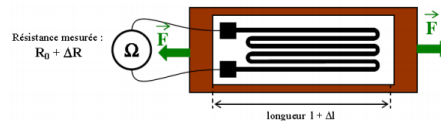


Figure 17 Corps au repos (pas d'allongement)

- Corps ayant subi un étirement (effort de traction)



Conditionneur de signal (pont de Wheatstone)

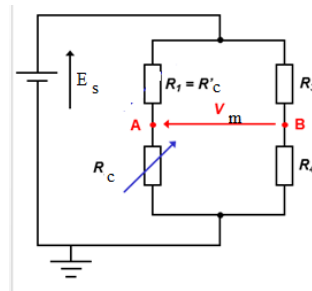


Figure 18: Pont de Wheatstone quart de pont.

R_c étant la résistance de la jauge à mesurer

Le signal de sortie s'écrit de la façon suivante :

$$V_m = V_{AB} = V_A - V_B$$

Avec $V_A = \frac{R_c}{R_1 + R_c}$, $V_B = \frac{R_4}{R_3 + R_4}$ d'où $V_m = \left(\frac{R_c}{R_1 + R_c} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) E_s$

$$V_m = \frac{R_3 R_c - R_1 R_4}{(R_3 + R_4)(R_1 + R_c)} E_s$$

La relation n'est pas linéaire. La sensibilité n'est pas constante

Le pont est dit équilibré quand $V_A = V_B$ ce qui correspond à la condition classique :

$$R_3 R_c = R_1 R_4$$

Choix pratique : $R_1 = R_3 = R_4 = R_{c0}$, $R_c = R_{c0} + \Delta R_c$

si $\Delta R_c \ll R_{c0}$ on obtient $V_m \approx \frac{\Delta R_c}{2 R_{c0}} \frac{E_s}{2} \approx \Delta V_m$

La variation de la résistance de la jauge ΔV_m est proportionnelle à ΔR_c car la sensibilité est constante.

Démonstration

$$m_0 \rightarrow V_m = \frac{R_3 R_{c0} - R_1 R_4}{(R_3 + R_4)(R_1 + R_{c0})} E_s = 0$$

$$m = m_0 + \Delta m \rightarrow R_c = R_{c0} + \Delta R_c \rightarrow V_m = \frac{R_{c0}(R_{c0} + \Delta R_c) - R_{c0}^2}{(2R_{c0})(2R_{c0} + \Delta R_c)} E_s \rightarrow V_m = \frac{R_{c0} \Delta R_c}{R_{c0}(2R_{c0} + \Delta R_c)} \frac{E_s}{2}$$

$$\rightarrow V_m = \frac{\Delta R_c}{2R_{c0}} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_c}{2R_{c0}}} \frac{E_s}{2}$$

$$\text{Or } \Delta R_c \ll R_{c0} \text{ donc } V_m \approx \frac{\Delta R_c}{2R_{c0}} \frac{E_s}{2} \approx \Delta V_m$$

$$\text{Donc, la sensibilité est : } S = \frac{\Delta V_m}{\Delta R_c} = \frac{E_s}{4R_{c0}}$$

Exemple capteur composite à base de jauge de contrainte

Corps d'épreuve : Cylindre, lame fléchée, membrane, etc.

Ainsi, par exemple, une traction F exercée sur une barre (longueur L , section A , module d'Young Y) entraîne une déformation $\frac{\Delta L}{L}$ qui est mesurable par la variation $\frac{\Delta R}{R}$ de la résistance d'une jauge collée sur la barre ; connaissant :

- d'une part, l'équation du corps d'épreuve qui lie la traction, mesurande primaire, à la déformation, mesurande secondaire : $\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{Y} \frac{F}{A}$
- et d'autre part l'équation du capteur liant sa grandeur d'entrée, ici la déformation, à sa réponse électrique $\Delta R/R$ soit : $\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L}$, K étant le facteur de Jauge
- on en déduit la relation entre traction et variation de résistance : $\frac{\Delta R}{R} = K \frac{1}{Y} \frac{F}{A}$

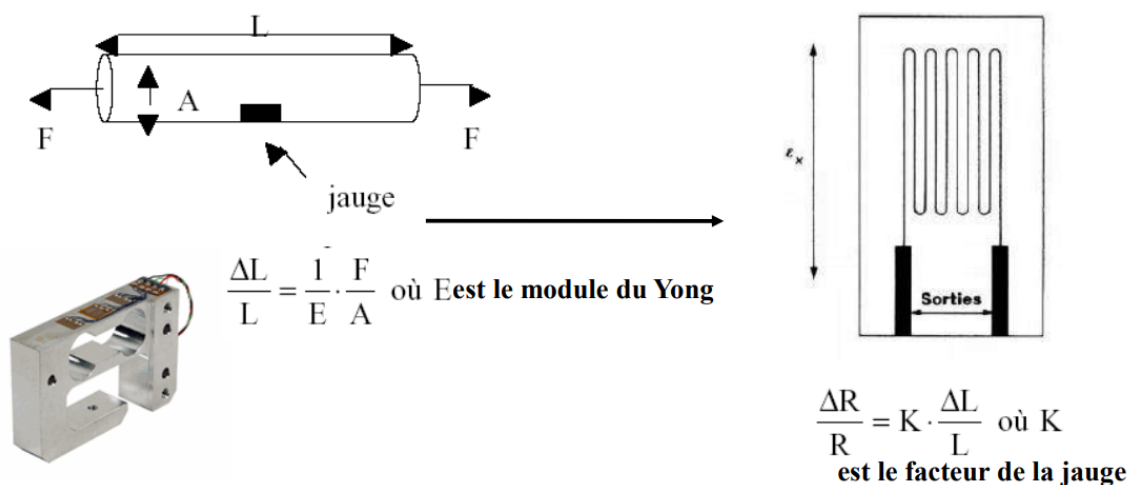


Figure 19 Exemple de capteur composite utilisant une jauge de contrainte