

CHAPITRE I DEFINITIONS ET CARACTERISTIQUES DES CAPTEURS

I- DEFINITION ET ROLE D'UN CAPTEUR :

I-1 Capteur :Définition : Dispositif qui transforme une grandeur physique en une grandeur (généralement un signal) électrique normée (exemple Norme 4-20 mA), interprétable / exploitable, par un système de détection, d'observation, de diagnostic, ou de contrôle/commande d'un processus industriel.



I-2 Rôle du capteur :

- Soit m (exemple de la température) un paramètre variable dans le temps d'un environnement ou d'un processus (exemple d'un four électrique).
- On suppose qu'on veut étudier les variations de la température (c.a ; d ; de m)
- Un capteur sensible à la température (une Résistance thermique ou un thermocouple réagit aux variations $m(t)$ de m , et délivre en sortie un signal électrique $s(t)$ qui est l'image du mesurande $m(t)$.
- L'élément principal du capteur, est le transducteur qui permet de transformer l'énergie propre au mesurande en énergie électrique. Dans certains cas le capteur ne contient qu'un transducteur, d'où la confusion dans certains cas.
- L'objectif est de concevoir et de réaliser un capteur optimal, permettant de suivre fidèlement et en temps réel, les variations de $m(t)$.

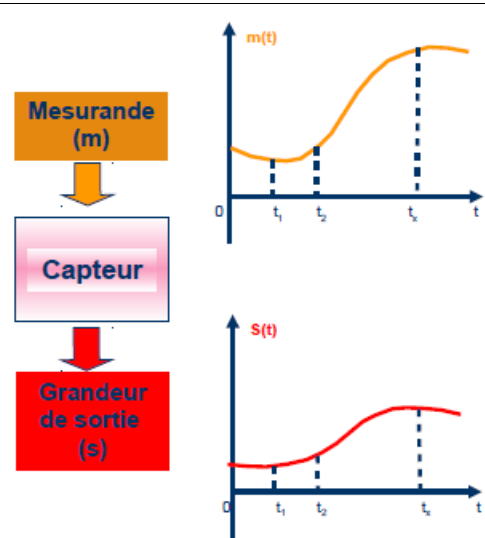


Fig. Variations de $s(t)$ et de $m(t)$

REMARQUE : Quelques types de capteurs sont représentés à la fin de ce chapitre [Bonnet]

- Les variations de la sortie $s(t)$ en fonction de $m(t)$, renseignent

I-3 Chaîne de mesure :

Pour pouvoir délivrer un signal exploitable, le capteur doit être inséré dans une chaîne de mesure :

Exemple de chaîne de mesure

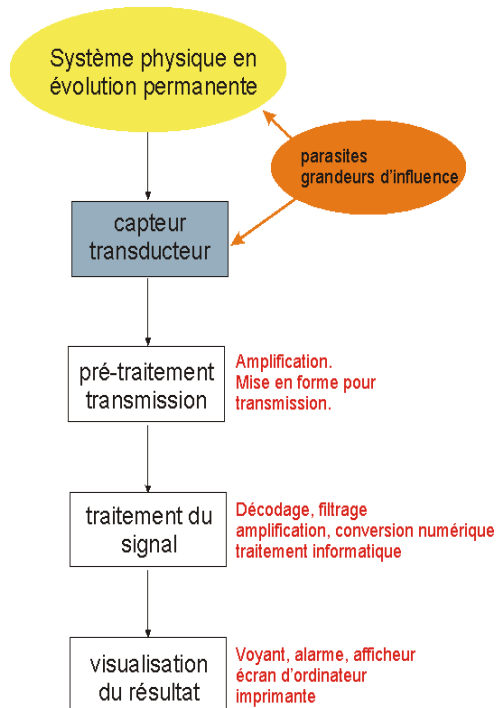


Fig. 1.2 Fonctions d'une chaîne de mesure

Certaines fonctions sont de plus en plus rassemblées et intégrées dans un même boîtier

I-4 Instrument de mesure : Son rôle est de délivrer une information exploitable sur site. Il inclue un (ou plusieurs) capteur requis pour une mesure particulière et certaines fonctions de la chaîne de mesure. Il intègre aussi les fonctions de transmission à distance. Sa principale particularité est d'être auto-suffisant.

II. PRINCIPE D'UN CAPTEUR INDUSTRIEL

II-1 Schéma de principe

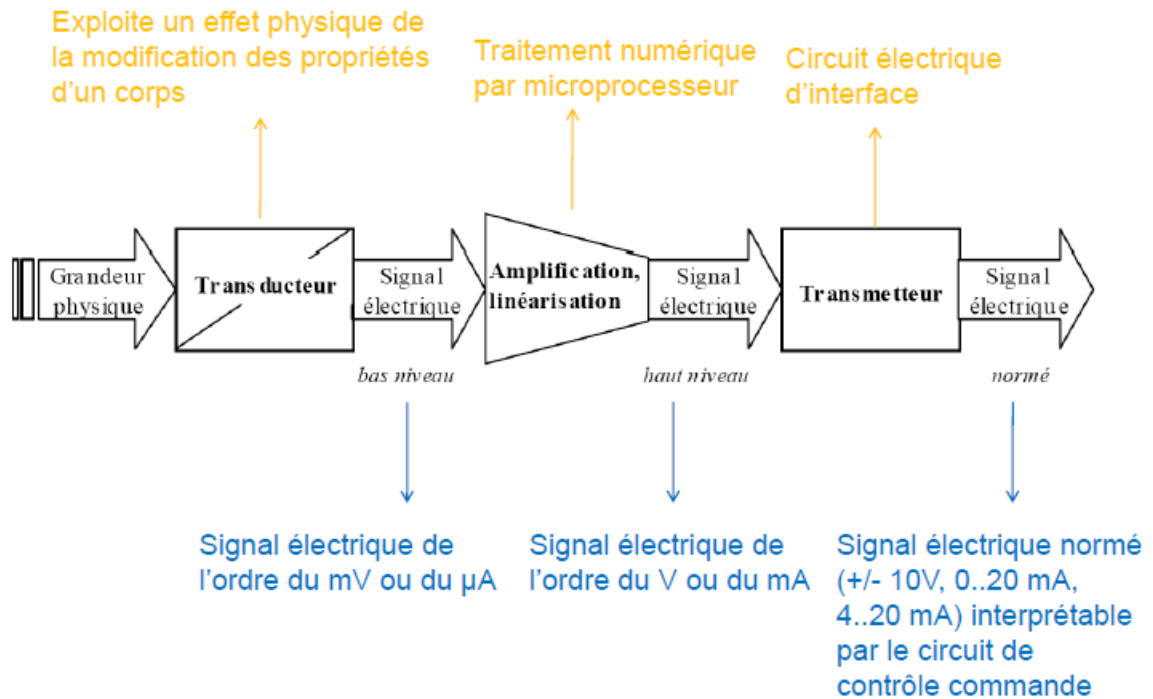


Fig. 1.3 Schéma de principe d'un capteur [Gte, Capteurs]

II.2 CARACTERISTIQUES GLOBALES D'UN CAPTEUR

Le choix d'un capteur est basé sur ses caractéristiques métrologiques, statiques, dynamiques, et économiques

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.

Linéarité : représente l'écart de sensibilité sur l'étendue de mesure

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

Bande Passante : L'étendue de fréquences du mesurande détectée par le capteur.

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

Coût :

II.3 Différents Types de capteur :

On différencie les capteurs de plusieurs manières (Applications, ...). Electriquement, on les classe en Capteurs actifs et capteurs passifs

- Capteurs actifs :

- Un capteur actif fonctionne en générateur. La sortie du capteur est équivalente à une source de tension (e), de courant (i) ou de charge (q) : $s=f(m)= (v, i, q,)$
- Exemples :

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermo électricité	Tension
Flux lumineux	Photo émission Pyro électricité	Courant Charge
Force, Pression, Accélération	Piézo électricité	Charge
Position	Effet Hall	Tension
Vitesse	Induction	Tension

- Le principe d'un capteur actif est donc généralement fondé sur un effet physique qui assure la conversion de l'énergie propre à la grandeur physique à mesurer (énergie thermique, mécanique ou de rayonnement) en énergie 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
- Effet Hall : Un champ magnétique B (aimant, angle θ /surface du matériau) et un courant électrique I créent dans le matériau une différence de potentiel

$$U_H = K_H B I \sin \theta$$
- Effet pyroélectrique : certains matériaux ont une polarisation spontanée en l'absence de champ électrique extérieur. Une variation de température induit une variation de cette polarisation et donc l'apparition de charges électriques à la surface du matériau
- Les capteurs Actifs ont besoin d'un circuit d'adaptation ou conditionneur de capteur actif pour fournir un signal électrique exploitable.
- Capteurs Passifs : Ils fonctionnent en général en impédances (résistance, inductance, capacité) dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée.
- La sortie est équivalente à un dipôle passif dont l'impédance Z ($Z=R, L, C, \dots$) varie avec le mesurande

La variation d'impédance résulte :

- d'une variation de dimension du capteur
Exemples : capteurs de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile
- d'une déformation résultant d'une force ou d'une grandeur s'y ramenant (pression, accélération).
Exemples : armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensomètre liée à une structure déformable :
EXEMPLE/ Si on suppose que le capteur se comporte intrinsèquement comme une résistance pure R, Sachant que

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Toute influence sur ρ (température, lumière, ...), l, ou S, va varier R.

Exemples de capteurs passifs et du paramètre variable :

Grandeur mesurée	Caractéristique électrique sensible	Types de matériaux utilisés
Température	Résistivité électrique	Platine, Nickel, cuivre ...
Rayonnement optique	Résistivité électrique	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité électrique	Alliage de Ni, Si dopé
Déformation	Perméabilité magnétique	Alliage ferromagnétique
Déformation	Capacité	Vide
Déplacement	Couplage mutuel	Transformateur magnétique
Déplacement	Self Inductance	Bobine, matériaux magnétiques
Position	Résistivité électrique	Matériaux magnétorésistants (Bismuth, Antimoine d'Indium)
Humidité	Résistivité électrique	Chlorure de Lithium
Humidité	Capacité	Polymère, or

Tableau : Exemples de Capteurs Passifs : Caractéristique électrique sensible, et matériau utilisé [Gte]

- Dans ce cas le matériau est évalué par une mesure de résistance (utilisant un montage potentiométrique ou un montage en pont)
- Tous les capteurs passifs nécessitent un conditionneur pour délivrer le signal électrique de mesure. Le conditionneur fournit principalement l'énergie nécessaire au capteur.
- Un conditionneur peut être utilisé judicieusement pour améliorer les performances de la mesure (Amélioration de la linéarité, du gain, ...). Les conditionneurs sont étudiés séparément.

II.4 ETUDE INTRINSEQUE DES CAPTEURS

II.4.1 Corps d'épreuve :

Dans certains cas ; le capteur est constitué d'un corps d'épreuve qui permet de transformer le mesurande physique primaire à mesurer en mesurande physique secondaire, plus facile à mesurer. Il peut y avoir plusieurs corps d'épreuve si nécessaire.

On aura dans ce cas $s(t) = F(m(t)) = F(m_{n2}(t) = F(L(m_1(t)))$

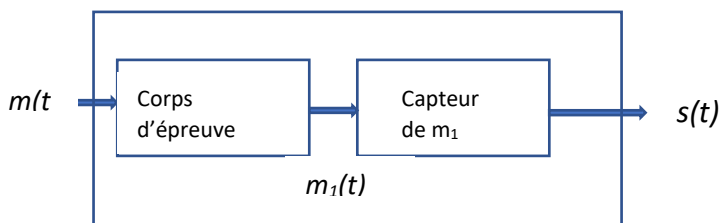


Fig. Capteur composite incluant un corps d'épreuve

Exemple de Corps d'épreuve : Mesure d'une force mécanique :

Utilisation d'un ressort élastique comme corps d'épreuve respectant la loi linéaire (ressort de raideur constante).

On a dans ce cas $F = -kx$ d'où $x = -\frac{F}{k}$

La mesure de la force F est donc transformée en mesure d'un déplacement x .

II.4.2 Structure des capteurs : Mesure Multiple [Bonnet]

Exemple : Mesure de la puissance électrique

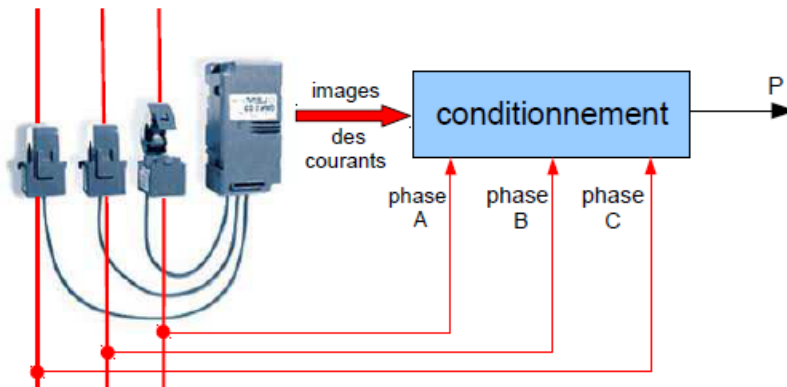
Sachant que : $p(t) = u(t) * i(t)$

Puissance électrique instantanée est le produit de la tension instantanée par le courant instantané.

Pour des signaux alternatifs, la puissance instantanée fluctue au cours d'une période (20ms).

Généralement, la puissance « active » est exprimée en valeur moyenne :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) * i(t) dt$$



III- FONCTIONNEMENT EN REGIME STATIQUE

Régime statique : La réponse statique est la réponse du capteur en régime permanent. (Pas de variation dans le temps : Mesurande reste constant).

-Caractéristique statique : : Exprimée par $s=F(m)$. Représente les réponses s en fonction des variations du mesurande m .

- La forme graphique de la caractéristique statique est appelée « Courbe d'étalonnage »

- Etendue de mesure $Em = m_{\max} - m_{\min}$

L'étendue de mesure détermine la plage de mesurande dans laquelle le capteur répond aux spécifications du constructeur.

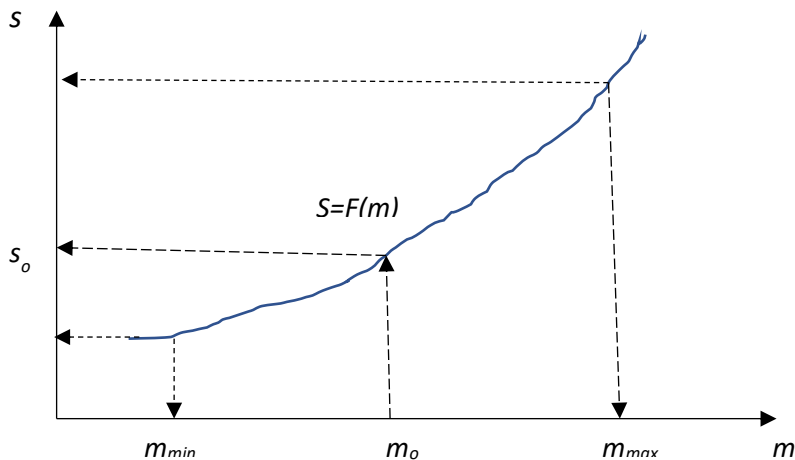


Fig. Courbe d'étalonnage

La courbe d'étalonnage permet de retrouver graphiquement m_o , si on a mesuré s_o .

La relation $s=F(m)$ dans sa forme théorique renseigne sur le fonctionnement intrinsèque du capteur ainsi que les matériaux utilisés.

Dans sa forme numérique, elle est retrouvée, après un « Etalonnage » : ensemble de points de mesure, utilisant des mesurandes « étalons ».

Exemple : Sonde de température résistive PT100 [Bonnet]

°C	+ 0	+ 1	+ 2	+ 3	+ 4	+ 5	+ 6	+ 7	+ 8	+ 9
0	100	100,39	100,78	101,17	101,56	101,94	102,33	102,72	103,11	103,59
+ 10	103,89	104,28	104,67	105,06	105,45	105,84	106,23	106,62	107,01	107,40
+ 20	107,79	108,18	108,57	108,95	109,34	109,73	110,12	110,51	110,89	111,28
+ 30	111,67	112,06	112,44	112,83	113,22	113,60	113,99	114,38	114,77	115,15
+ 40	115,54	115,93	116,31	116,70	117,08	117,47	117,86	118,24	118,63	119,01
+ 50	119,40	119,78	120,16	120,55	120,93	121,32	121,70	122,09	122,47	122,86
+ 60	123,24	123,62	124,00	124,39	124,77	125,15	125,54	125,92	126,30	126,69
+ 70	127,07	127,45	127,83	128,22	128,60	128,98	129,36	129,74	130,13	130,51

Partant de ces données de mesure de s en utilisant des températures étalons m_i , prises à un (01) °C près, et après représentation graphique de ces points, on retrouve la courbe d'étalonnage. Une Interpolation linéaire permet de retrouver les paramètres de la courbe d'étalonnage, c'est-à-dire $s = F(m)$ sous sa forme numérique.

Dans le cas de l'exemple ci-dessus, on a :

-Forme théorique de $R = F(T) = R_0 e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}$

-Forme numérique : Par approximation polynomiale, par interpolation linéaire, ou régression linéaire :

Dans le cas de la sonde de température PT100, on trouve :

$$R_T = 100(1 + 3.9083T - 5.775 \cdot 10^{-7}T^2)$$

1. Sensibilité en régime statique : La sensibilité S en un point de mesure m_0 est déterminée par le rapport de la variation de la réponse s par rapport à une variation du mesurande m

$$S = \left. \frac{\Delta s}{\Delta m} \right|_{m_0}$$

La sensibilité est déterminée en général graphiquement à partir de la courbe d'étalonnage. Elle représente la pente de la courbe d'étalonnage en m_0

Un capteur est dit « linéaire » si sa sensibilité est constante sur E_m =étendue de mesure.

De par leur nature, tous les capteurs sont non linéaires. Pour des raisons pratiques, on essaie de les utiliser sur des portions linéaires de leur courbe d'étalonnage. Sinon on essaie de les linéariser virtuellement.

Sensibilité théorique à partir du modèle théorique du capteur : Par dérivation

$$S = \left. \frac{ds}{dm} \right|_{m_0}$$

Dans le cas de la sonde de température PT100 : Si

$$R = F(T) = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

La sensibilité théorique est donnée par :

$$S(T) = \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2} * R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

Résolution : C'est la plus petite variation observable du mesurande :

Exemple : Capteur de température : $E_m = -20^\circ\text{C}$ à $+60^\circ\text{C}$.

Résolution : 0.1°C

Remarque : Ne pas confondre Résolution et précision

- Conception d'un capteur : S doit dépendre le moins possible de :
 - De la valeur de m (linéarité)
 - De la fréquence de variation (bande passante)

- Du temps (vieillessement)
- Des actions extérieures (grandeurs d'influence)

-

IV Les Grandeurs d'Influence :

- Ceux sont les grandeurs dont la variation peut influencer (modifier) la réponse du capteur. On peut en général estimer leur grandeur, mais on ne connaît pas leur origine.
 - Température : modifications des caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles
 - Pression, vibrations : déformations et contraintes pouvant altérer la réponse
 - Humidité : modification des propriétés électriques (constante diélectrique ou résistivité). Dégradation de l'isolation électrique
 - Champs magnétiques : création de fém d'induction pour les champs variables ou modifications électriques (résistivité) pour les champs statiques
 - Tension d'alimentation : lorsque la grandeur de sortie du capteur dépend de celle-ci directement (amplitude ou fréquence)
- Nécessité de :
 - Réduire les grandeurs d'influence (tables anti-vibration, blindages magnétiques...)
 - Stabiliser les grandeurs d'influence à des valeurs parfaitement connues
 - Compenser l'influence des grandeurs parasites par des montages adaptés (pont de Wheastone)

V - Les erreurs de mesure

Toute mesure est toujours entachée d'erreur. L'erreur de mesure est l'écart entre valeur mesurée et valeur vraie.

Elle est surtout due aux imperfections de la chaîne.

L'erreur est soit systématique soit accidentelle (aléatoire). Elle ne peut être qu'estimée. L'erreur accidentelle ou aléatoire est la plus difficile à traiter.

V-1 Erreur systématique:

Elle est soit constante, soit à variation lente par rapport à la durée de la mesure.

Elle est due à une méconnaissance de l'installation de mesure ou sa mauvaise installation. Elle peut avoir plusieurs causes

a-Erreurs sur la valeur d'une grandeur de référence: décalage du zéro, valeur erronée de la température de référence d'un thermocouple.

Solutions possibles : Réduites par une bonne vérification des appareils.

b-Erreurs sur les caractéristiques des appareils: erreur sur la sensibilité ou sur la courbe d'étalonnage.

Solution : Réduite par un ré-étalonnage fréquent dans des conditions sévères d'emploi.

c-Erreurs dues au mode et aux conditions d'emploi: Erreur de rapidité de mesure et erreur de finesse.

d-Erreurs dans l'exploitation des données brutes de mesure:

- Ecart à la linéarité d'un capteur ou d'un conditionneur.
- Auto-échauffement d'une résistance thermocinétique par le courant de mesure.

V-2 Erreurs accidentelles:

Elles sont aléatoires. Leurs causes peuvent être connues mais leurs valeurs ne le sont pas. Parmi les causes, on a :

a- Erreurs liées aux indéterminations intrinsèques des caractéristiques instrumentales:

- E_m : erreur de mobilité,
- E_l : Erreur de lecture d'un appareil à déviation
- erreur d'hystérésis (mécanique, magnétique).
- erreur de quantification d'un convertisseur analogique-digital:

b- Erreurs dues à la prise en compte par la chaîne de mesure de

- signaux parasites à caractère aléatoire:
- bruit de fond, inductions parasites,
- fluctuations de tension des sources d'alimentation,
- dérive temporelle de la tension de sortie d'un amplificateur.

c- Erreurs dues à des grandeurs d'influence:

Si on ne prend pas en compte à l'étalonnage de la variation des grandeurs d'influence

d- Réduction des erreurs accidentelles:

- Protection vis à vis des causes d'erreur: maintien en atmosphère à température stabilisée et hygrométrie contrôlée;
- supports anti-vibratoires; régulation de la tension d'alimentation;

- amplificateur a faible dérive; convertisseur A/D de résolution suffisante;
- blindage et mise à la masse convenable;
- amplificateur d'instrumentation a fort taux de rejection en mode commun,
- filtrage de signaux parasites.
- Utilisation de bons modes opératoires: méthode de mesure différentielle (push-pull); élimination d'inductions parasites par convertisseur à double rampe,
- extraction d'un signal du bruit par détection synchrone, méthode de corrélation.

Une évaluation des erreurs permet de définir des caractéristiques de fidélité, justesse, et de précision des capteurs

V-3 Fidélité, justesse, et précision

Le traitement statistique des erreurs accidentelles permet:

- de connaître la valeur la plus probable de la grandeur mesurée
- de fixer les limites de l'incertitude.

Ainsi, Si on dispose de n mesures m_1, m_2, \dots, m_n .

La valeur moyenne \bar{m} est donnée par :

$$\bar{m} = \frac{(m_1 + m_2 + \dots + m_n)}{n}$$

L'écart type donne une indication de la dispersion des mesures

$$\sigma = \sqrt{\frac{\left((m_1 - \bar{m})^2 + (m_2 - \bar{m})^2 + \dots + (m_n - \bar{m})^2\right)}{n - 1}}$$

Si ces erreurs sont indépendantes, la probabilité d'apparition de résultats différents satisfait à la loi normale ou loi de Gauss.

La probabilité $P(m_1, m_2)$ d'avoir un résultat compris entre m_1 et m_2 est donnée par

$$P(m_1, m_2) = \int_{m_1}^{m_2} p(m) dm$$

$p(m)$ est la fonction densité de probabilité de m . $P(m)$ est la fonction cumulative de m

Si on suppose qu'on est dans le cas général ou on a une distribution Gaussienne (Normale) des mesures On a

Pour la loi de Gauss:
$$p(m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(m-\bar{m})^2}{2\sigma^2}\right)$$

La valeur la plus probable est \bar{m} .

La probabilité d'apparition d'une mesure dans les limites indiquées est:

$$P(\bar{m} \pm \sigma) = 68,27\%$$

$$P(\bar{m} \pm 2\sigma) = 95,45\%$$

$$P(\bar{m} \pm 3\sigma) = 99,73\%$$

On définit les qualités d'une mesure par :

-La fidélité : exprimée en général par l'écart-type σ . C'est la qualité d'un appareil dont les erreurs accidentelles sont faibles.

-La justesse est la qualité d'un appareil dont les erreurs systématiques sont faibles.

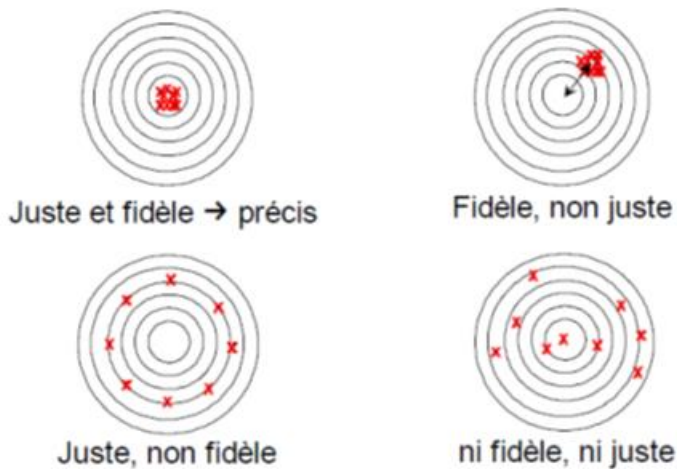
- Un appareil est précis s'il est fidèle et juste. Il doit donner des valeurs proches de la valeur vraie du mesurande.

a	b

c-	d-
----	----

FIG. 3.1 Différents types de répartition des résultats de mesure

- a- erreurs systématiques et accidentelles importantes: appareil ni juste ni fidèle.
b- erreurs systématiques grandes, erreurs accidentelles faibles: appareil fidèle mais pas juste.
c- erreurs systématiques faibles, erreurs accidentelles grandes: appareil juste mais non fidèle.
d- erreurs systématiques et accidentelles faibles: appareil juste et fidèle donc précis



Représentation de la fidélité, justesse, et précision.

VI - Etalonnage d'un capteur:

Il permet de retrouver sous forme graphique ou algébrique, la relation entre les valeurs du mesurande et celles obtenues en sortie, compte tenu de tous les paramètres additionnels.

VI-1 Etalonnage simple: s'applique à un mesurande défini par une grandeur physique unique et un capteur non sensible ou non soumis à des grandeurs d'influence..

- Mesure de distances fixes par un capteur potentiométrique sensible à la température.
- Mesure de forces constantes.
- Mesure de température stable.

Il se fait par

- Etalonnage direct ou absolu: par des étalons ou éléments de référence connus avec une très grande précision.

- Etalonnage indirect ou par comparaison: par utilisation d'un capteur de référence dont on connaît la courbe d'etalonnage.

VI-2- Etalonnage multiple:

Série d'étalonnages successifs pour la prise en compte de l'influence des paramètres actifs additionnels.

VI-3- Validité d'un étalonnage: répétabilité et interchangeabilité.

- La **repetabilite** est la qualite du capteur qui dans des conditions identiques et dans des limites specifiques donne une grandeur de sortie identique. La non repetabilite est due aux erreurs aleatoires faites a l'etalonnage.

- L'**interchangeabilite** d'une serie de capteurs: résultats identiques pour tous les capteurs de la série.

VII- Limites d'utilisation d'un capteur:

Un utilisateur doit être averti des divers limites d'utilisation d'un capteur et des risques qu'il encourt à les dépasser. FIG. 3.2

- Domaine nominal d'emploi: Domaine de conditions normales d'utilisation.
- Domaine de non détérioration: Domaine de dépassement de domaine nominal sans détérioration, même si les caracteristiques peuvent être modifiées.
- Domaine de non-destruction:
- Etendue de mesure: plage du mesurande dans laquelle le fonctionnement du capteur répond à des spécifications données

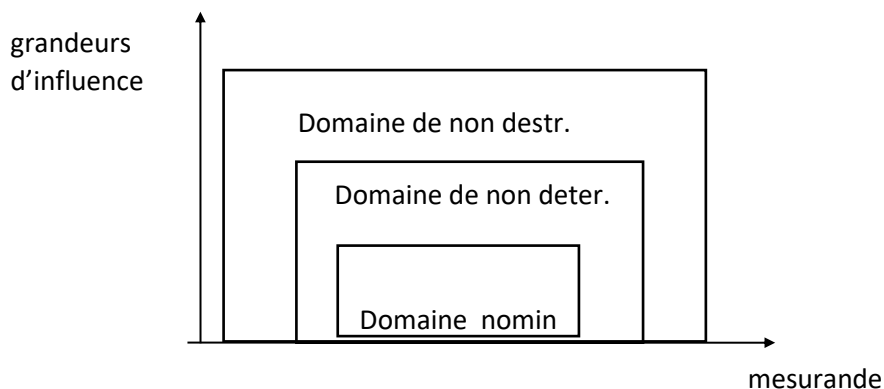


FIG. 3.2 Domaines d'utilisation du capteur

Exemple de spécification des limites d'emploi:

Capteur de force à jauge piézo-resistive N556-1 fabriqué par J.P.B.

Domaine	Mesurande	Température
Nominal	1 daN (E.M.)	0 °C à 60 °C
Non-deterioration	1,5 x E.M.	-20 °C à - 100 °C
Non-destruction	3 x E.M.	-50 °C à - 120 °C

VIII-Sensibilité

VIII-1 Définition: C'est le rapport $\Delta s / \Delta m$ autour d'une valeur constante du mesurande.

Elle est donnée par

$$S = \left. \frac{\Delta s}{\Delta m} \right|_{m=m_i}$$

Elle est fournie par le constructeur pour des conditions d'emploi spécifiées.

Son unité résulte du principe à la base du capteur et des grandeurs mises en jeu ($\Omega/^\circ\text{C}$, $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, ...)

Elle peut aussi dépendre du choix des matériaux, leurs dimensions et des grandeurs d'influence, la fréquence du mesurande, etc.

Il existe deux types de fonctionnement du capteur :

- **Le fonctionnement statique** : → **Sensibilité statique**

- **Le fonctionnement dynamique**. → **Sensibilité dynamique**

VIII-2 Sensibilité en régime statique: Obtenue après étalonnage en régime permanent.

Elle est définie en un point de fonctionnement.

Elle est égale à la pente de la caractéristique statique du point de fonctionnement.

VIII-3 Sensibilité en régime dynamique: Elle est définie lorsque le mesurande est une fonction périodique du temps. Dans ce cas, la grandeur de sortie s a en régime permanent la même périodicité que le mesurande.

Soit $m(t)$ le mesurande exprime par $m(t) = m_0 + m_1 \cos \omega t$

m_0 est la constante à laquelle est superposée une variation sinusoidale d'amplitude m_1 et de fréquence $f = \omega / 2\pi$.

La réponse du capteur est donnée par $s(t) = s_0 + s_1 \cos (\omega t + \psi)$. s_0 est la constante correspondant à m_0 et définissant le point de repos Q_0 sur la courbe d'étalonnage statique.

s_1 est l'amplitude de variation de la sortie provoquée par la partie variable du mesurande et ψ est le déphasage entre les variations de s et m .

Dans ce cas

$$S = \left[\frac{s_1}{m_1} \right]_{Q_0}$$

L'évolution de la sensibilité en régime dynamique ($S(f)$) en fonction de la fréquence f du mesurande définit la réponse en fréquence du capteur.

Si la variation est périodique, sa décomposition et celle de la réponse en séries de Fourier sont données par

$$m(t) = m_0 + \sum_{n=1}^{\infty} m_n \cos(n\omega t + \phi_n)$$

$$s(t) = s_0 + \sum_{n=1}^{\infty} s_n \cos(n\omega t + \psi_n)$$

Ceci donne

$$\left[\frac{s_n}{m_n} \right]_{Q_0} = S(f_n)$$

avec $f_n = n\omega / 2\pi$.

La réponse est la superposition des réponses aux différentes composantes $m_n \cos(n\omega t + \phi_n)$.

La variation de la sensibilité en fréquence a pour origine surtout l'inertie thermique, mécanique, ou électrique.

L'équation reliant s et m est en général une équation différentielle du premier ou du deuxième ordre. La réponse en régime sinusoïdal permanent s'étudie en ramenant cette équation différentielle à sa forme complexe équivalente par la transformation

$$d/dt \rightarrow j\omega \quad d^2/dt^2 \rightarrow -\omega^2$$

VIII-3-a- Réponse en fréquence d'un système du premier ordre:

Ce système est régi par l'équation différentielle: $A \frac{ds}{dt} + Bs = m(t)$

En faisant les transformations:

$$m(t) = m_1 \cos \omega t \rightarrow m_1 \exp(j\omega t)$$

$$s(t) = s_1 \cos(\omega t + \psi) \rightarrow s_1 \exp(j\omega t + \psi)$$

L'équation devient alors: $j\omega A s_1 \exp j\psi + B s_1 \exp j\psi = m_1$

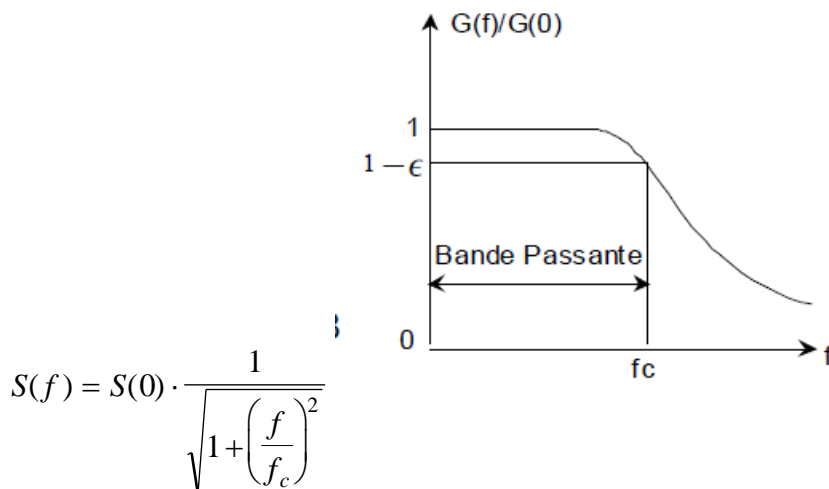
En posant $f_c = B/2\pi A$, fréquence de coupure, on obtient

$$s_1 = \frac{m_1}{B} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}} \quad \psi = -\operatorname{Arctg}\left(\frac{f}{f_c}\right)$$

L'expression de la sensibilité en fonction de la fréquence est donnée par

$$S(f) = \frac{s_1}{m_1} = \frac{1}{B} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}}$$

Lorsque f tend vers 0, la sensibilité en régime dynamique tend vers la sensibilité en régime statique $S(f)=1/B$. La réponse en fréquence peut donc s'écrire:



$$S(f) = S(0) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}}$$

Les FIG. 3. 4a et 3.4b représentent respectivement l'évolution de la réponse en module et en phase en fonction de la fréquence.

On constate en particulier que pour:

$f \ll f_c$, on a $S(f)=S(0)$ et $\psi=0$

$f = f_c$, on a $S(f_c)=S(0)/\sqrt{2}$ soit $20 \log_{10} (S(f_c)/S(0)) = -3 \text{ db}$

$\psi = -\pi/4$

$f \gg f_c$, $S(f) = S(0) \cdot f_c/f$, soit $20 \log_{10} (S(f_c)/S(0)) = -20 \text{ db}$

$\psi \rightarrow -\pi/2$.

La bande passante BP est la plage de fréquence à l'intérieur de laquelle la réponse en fréquence décroît au plus de 3 db à partir de sa valeur maximale. Dans le cas d'un système du premier ordre on a donc : $B = f_c$.

VIII-3-b- Réponse en fréquence d'un système du deuxième ordre :

Ce système est régi par l'équation différentielle:

$$A \frac{d^2 s}{dt^2} + B \frac{ds}{dt} + Cs = m(t)$$

A , B , et C constantes.

Après transformations dans le domaine complexe, on obtient

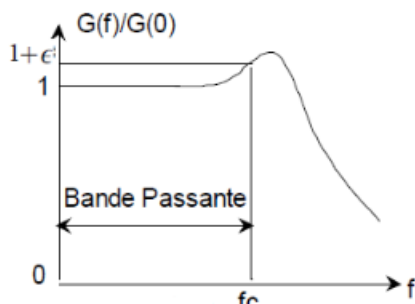
$$-Aw^2 s_1 \exp j\psi + jwBs_1 \exp j\psi + Cs_1 \exp j\psi_1 = m_1$$

En posant $f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{C}{A}}$, fréquence propre du système non amorti,

$$\xi = \frac{B}{2\sqrt{CA}}, \text{ coefficient d'amortissement du système,}$$

on obtient

$$S(f) = S(0) \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + 4\xi^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}$$



BP système du 2eme ordre

$$\psi = - \text{Arctg} \left(\frac{2\xi}{\frac{f_0}{f} \left(1 - \frac{f}{f_0}\right)^2} \right)$$

avec $S(0)=1/C$, la sensibilité en régime statique. Les courbes de variation de la réponse en fréquence (module et phase sont données FIG. Pour différentes valeurs de ξ .

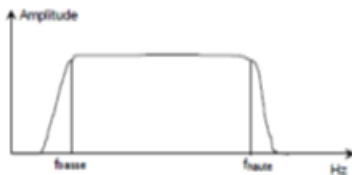
Pour $\xi < 1/2^{1/2}=0,707$, la réponse en fréquence présente un maximum pour $f_M=f_0.(1-2\xi)^{1/2}$.

Pour $\xi \geq 1/2^{1/2}$ est constamment décroissante

VIII-4 Bande passante :

Définition : La BP (Bande Passante) est la plage de fréquence de variation du mesurande où les caractéristiques du capteur spécifiées par le constructeur sont respectées.

Si la fréquence du mesurande est comprise entre f_{basse} et f_{haute} , l'amplitude du signal de sortie est alors conforme aux spécifications du constructeur



$$B.P. = [f_{basse}, f_{haute}]$$

VIII-5 Linéarité

Un capteur est linéaire dans une plage déterminée du mesurande si sa sensibilité y est indépendante de la valeur du mesurande. En cas de non linéarité, il faut inclure dans la chaîne des dispositifs de correction de linéarisation.

En régime statique, il doit exister une partie rectiligne sur la caractéristique statique. En régime dynamique, la sensibilité en fonction de f a pour expression:

- Premier ordre :

$$S(f) = S(0) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}}$$

- Deuxieme ordre :

$$S(f) = S(0) \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + 4\xi^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}$$

La linéarité en régime dynamique implique donc

- La linearité en régime statique. $S(0)$ indépendant de m .

- f_c , f_0 , ou ξ independants de m dans la plage de valeurs où $S(0)$ est constant.

VIII-6 Rapidité. Temps de réponse.

La réponse en fréquence s'applique en régime permanent de la grandeur de sortie en présence d'un mesurande périodique.

L'établissement du régime permanent est précédé d'un régime transitoire qu'il faut connaître. La fonction du temps de ce régime est solution générale sans second membre de l'équation différentielle du système.

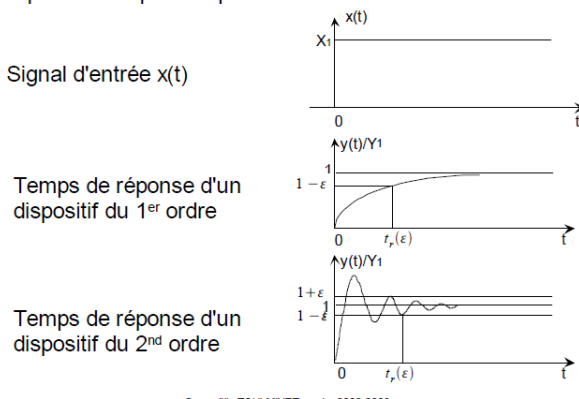
La rapidité permet de voir comment la grandeur de sortie suit dans le temps les variations du mesurande.

Elle est définie par le temps de réponse : intervalle de temps entre une variation brusque (échelon) du mesurande jusqu'à ce que la variation de la sortie du capteur ne diffère plus de sa valeur finale d'un écart supérieur à une limite $E\%$ fixée: $t_r(E\%)$.

VIII-6-a Temps de réponse d'un système du 1er ordre:

VIII-6-b- Temps de réponse d'un système du 2eme ordre:

Exemples de temps de réponse :



IX- Finesse

Permet d'estimer l'influence de la présence du capteur et de ses liaisons peut avoir sur la valeur du mesurande.

CONCLUSION

Le capteur idéal (en termes d'exploitation) est celui pour lequel :

- on dispose d'une relation linéaire connue entre la grandeur à mesurer et le signal de sortie du capteur
- les conditions d'emploi sont telles qu'aucune grandeur d'influence ne perturbe son fonctionnement
- aucun bruit parasite se superpose au signal utile
- ...

→ situation exceptionnelle

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

Capteurs de position

Faible distance



capteurs de proximité

Forte distance



règle de mesure

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

Capteurs de vitesse

Sans contact



Tachymétrie optique ou magnétique



Avec entraînement



Dynamo Tachymétrique

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

Capteurs de pression



Affichage mécanique



Capteurs électroniques



Capteurs industriels

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

Capteurs de force/couple

Pesage en extension



Balance



Pesage en compression



Couple



Types de mesurande : grandeurs mécaniques

Capteurs de débit

Gaz



Capteur automobile



Portable



Laboratoire



Capteur industriel

Liquides



Types de mesurande : grandeurs thermiques

Capteurs de température

modèle portable



Pyromètre Sans contact



Canne de mesure industrielle



Thermistance électronique

Types de mesurande : grandeurs électriques

Mesure de tension/courant

modèles de poche



Modèle de laboratoire



Haute tension



Forts courants



Boucle de Rogowski



Sans contact

Types de mesurande : grandeurs électriques

Mesure de champ magnétique



Capteur de champs basse fréquence



« boussole des tangentes »



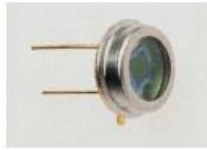
Détecteur de champ magnétique.
Hutech EMF detector
Seuil de detection : 2 mG

Types de mesurande : grandeurs de rayonnement (radiatives)

Capteurs de lumière



Photodiodes



Photorésistance



Phototransistor



Luxmètre

Types de mesurande : grandeurs de rayonnement (radiatives)

Capteurs de radiations



Compteur Geiger



Dosimètre électronique



Caméra infrarouge

Types de mesurande : grandeurs chimiques

Capteurs de gaz



Fixe



Analyseur de poche



Sonde Lambda



Capteur résistif de CO

Types de mesurande : grandeurs chimiques

Capteurs d'humidité



Capteur industriel de point de rosée

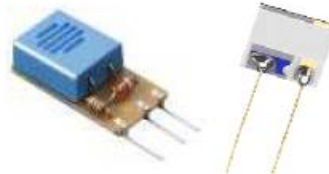
Capteur à oxyde d'aluminium



Capteur résistif



Capteurs capacitifs



Types de mesurande : grandeurs chimiques

Capteurs de pH



laboratoire



Sonde pH industrielle



Portable