

Cours de techniques de mesures

Capteurs industriels usuels

Introduction

Ce sont les capteurs qui transforment les grandeurs physiques indispensables aux objectifs des mesures, en grandeurs électriques facilement mesurables et enregistrables.

Introduction

Grandeur physique



- Générer un effet de la grandeur physique
- Transformer l'effet en une grandeur mesurable
(*étalon, corps d'épreuve*)
- Convertir / enregistrer / afficher la mesure
- Augmenter la résolution

**Principe
physique de la
mesure**

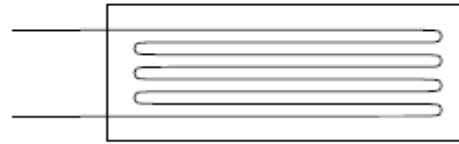
**Traitement du
signal**

Capteurs communs:

- Capteurs de température
- Capteurs à jauge de contrainte
- Capteurs de déplacement
- Capteurs piézo-électriques

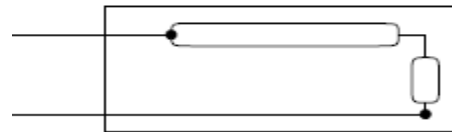
Capteurs à jauges de contrainte

Deux grandes familles : **à trames métalliques**



Jauge métallique

à semi-conducteurs



Jauge à semi conducteur

Elles sont intégrées dans un film souple qu'on peut coller sur un support rigide

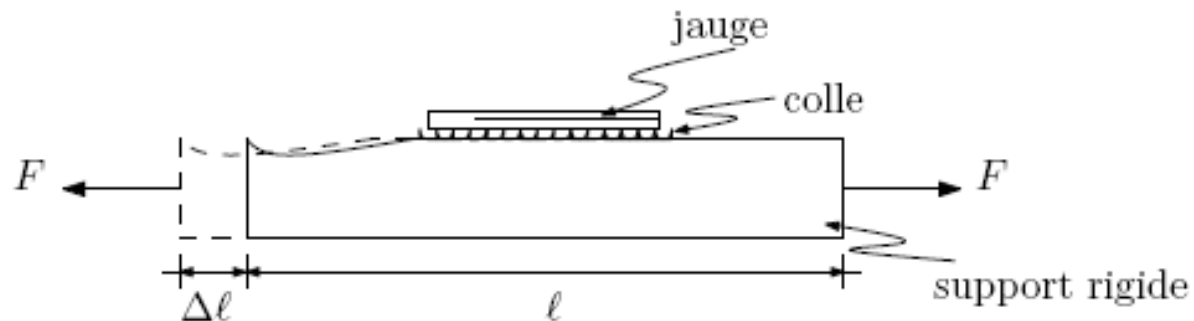
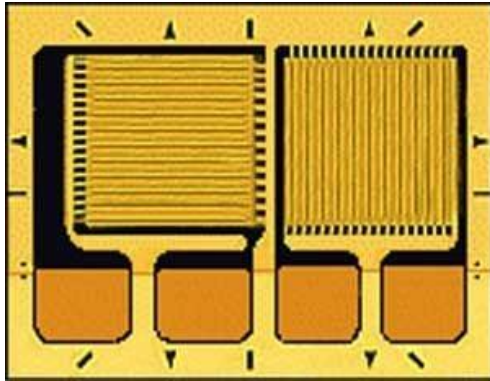


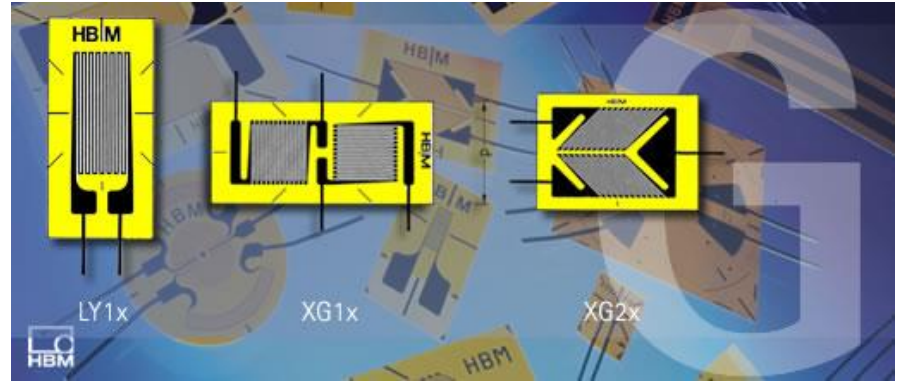
Illustration de quelques jauges de contrainte.



Jauges biaxiales Vishay



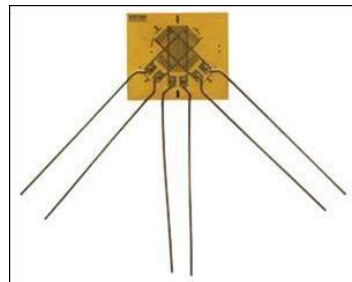
Jauges Vishay



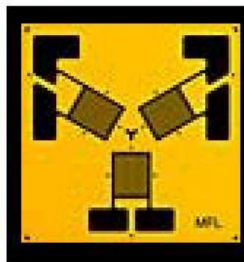
Diverses jauges de HBM



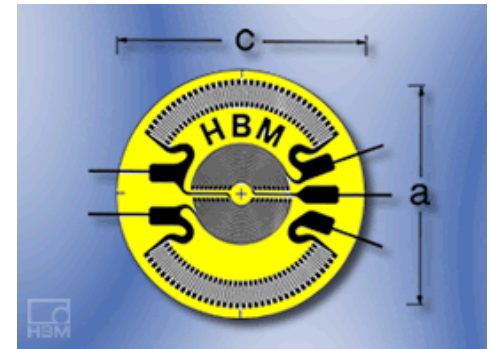
Rosette pour membrane



Rosette 45°



Rosette 120°



Rosette pour membrane

Généralités

- Les jauges de contrainte servent à mesurer des déformations.
- L'application d'une contrainte σ (F/S) sur une pièce en respectant la **loi de Hooke (domaine élastique 0.2 % ; déformation \sim contrainte)**
- Crée une déformation ε ; $\varepsilon = \Delta l / l$.
- Le module de **Young E** lie la contrainte et la déformation s'ils sont dans le même sens $\varepsilon = \sigma / E$.
- Le coefficient de **Poisson ν** (≈ 0.3) lie la déformation de la direction de la contrainte principale à la déformation perpendiculaire. $\varepsilon_{\perp} = -\nu \cdot \varepsilon_{\parallel}$
- Sensibilité à la température \Rightarrow coeff. de température $\beta_{j/s} \approx 0.7 - 2.5 \text{ E}^{-5} / ^{\circ}\text{C}$

Remèdes: Jauges auto compensées $\beta_{j/s} \approx 1.5 \text{ E}^{-6} / ^{\circ}\text{C}$

Propriétés du pont de wheatstone.

- Bande passante dépend de la taille (100KHz pour une jauge de 1 mm^2)

Lois de comportement

Variation de résistance par : $R = \rho \cdot \frac{\ell}{S}$

L'application d'un effort F sur le support métallique se traduit par une variation relative de la longueur du support induisant une variation relative de la résistance de la jauge.

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta \ell}{\ell}$$

Avec K : facteur de jauge valant 2 à 4 pour les jauges métalliques allant jusqu'à 150 pour les jauges semi-conductrices.

Lois de comportement

La variation de résistance est due aux variations de la résistivité et aux changements géométriques. $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{2\Delta d}{d}$

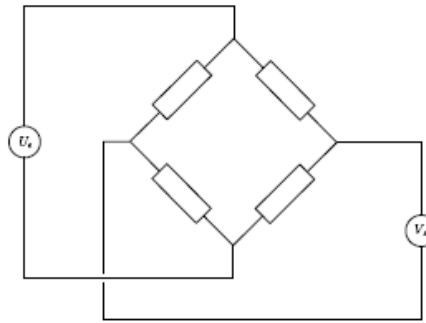
L'effet piezorésistif $\frac{\Delta \rho}{\rho} = c \frac{\Delta V}{V}$ avec **c : constante de Bridgman** montre le lien entre la variation de la résistivité des métaux et leur variation de volume.

En tenant compte des déformations longitudinales ε_l et transverse ε_t on arrive à l'expression $\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon_l$ avec **K le facteur de jauges** $K = 1 + c + 2\nu(1 - c)$

Les métaux utilisés pour les **jauges métalliques** ont un **c = 1** et **v = 0.3** d'où généralement **K ~ 2**

Le pont de Wheatstone

C'est le montage le plus utilisé pour mesurer avec les jauges de contrainte. Car il met en évidence les différences entre les éléments constitutants

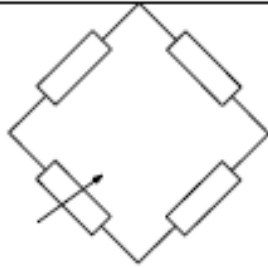


évidence les différences entre le pont.

Propriété: Les éléments adjacents sont de signe contraire les éléments opposés sont de même signe.

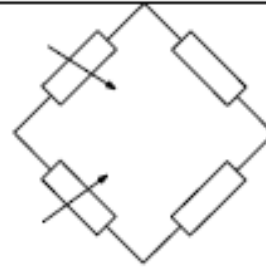
Les principales configurations de montage sont résumées dans le tableau suivant.

Pour des montages très précis on peut être emmené à compenser la longueur des lignes dont la variation sous l'effet de T peut être du même ordre de grandeur que les mesures voulues.



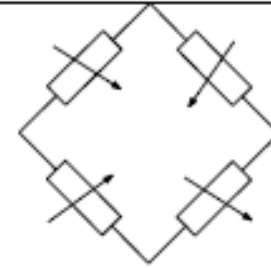
Montage en 1/4 de pont

- Une seule R varie
- Montage non linéaire
- Montage sensible à T



Montage en 1/2 de pont

- $2R$ varient ; soit des adjacents, soit des opposés \Rightarrow comportement dépend du choix. Mais généralement si 2 branches adjacents
- Montage linéaire
- Compensation de ΔT



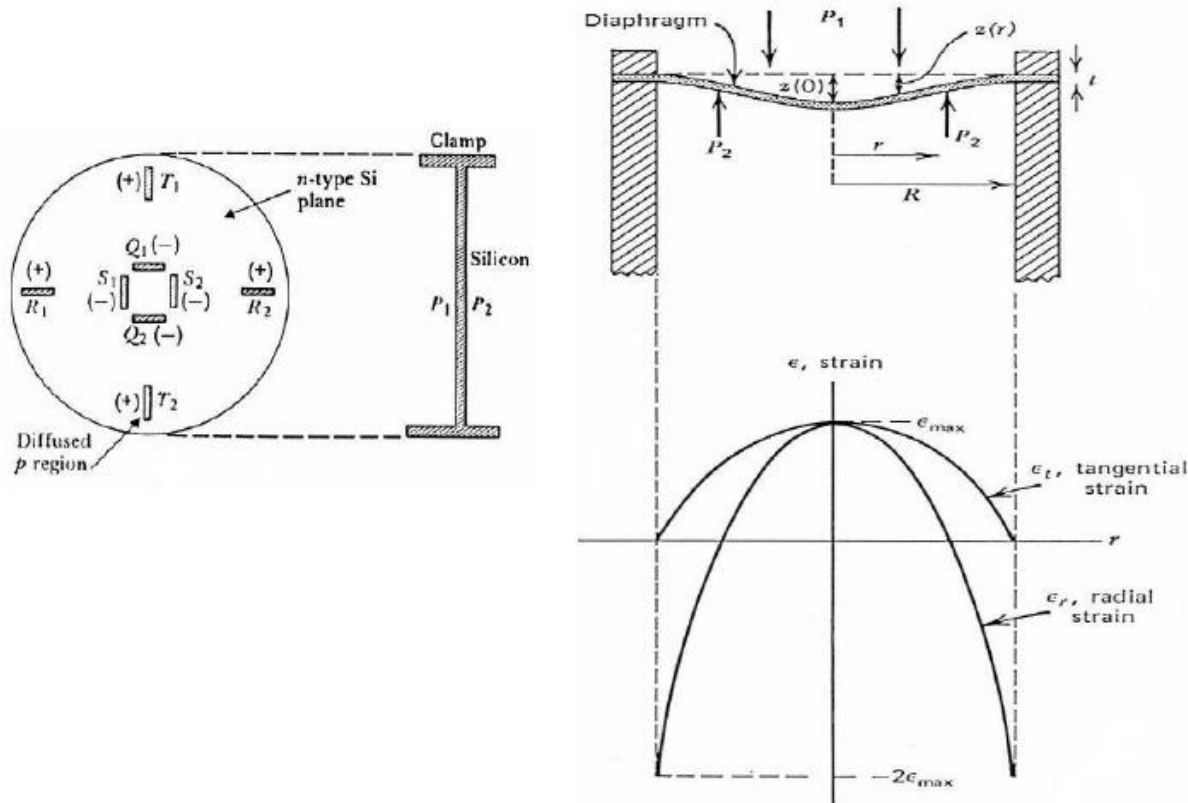
Montage en pont complet

- Les $4R$ varient selon les configurations de montage
- Est linéaire,
- A une meilleure sensibilité
- Compense les efforts parasites (si on mesure de la flexion et qu'un effort parasite de traction apparaît, il est compensé)

Capteurs courants à jauges de contrainte

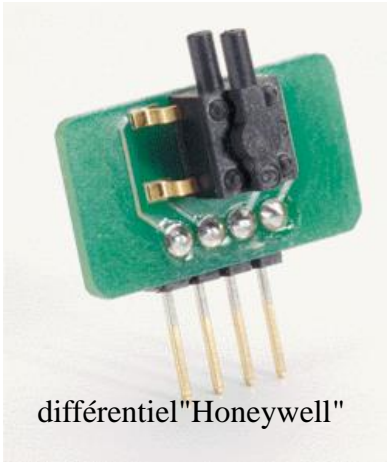
Capteurs de pression

Basés sur la déformation d'une membrane.



Capteurs courants à jauges de contrainte

Capteurs de pression



différentiel "Honeywell"



PM Instrument



Pression diff. "FUJI"



Automobile



"ONERA"



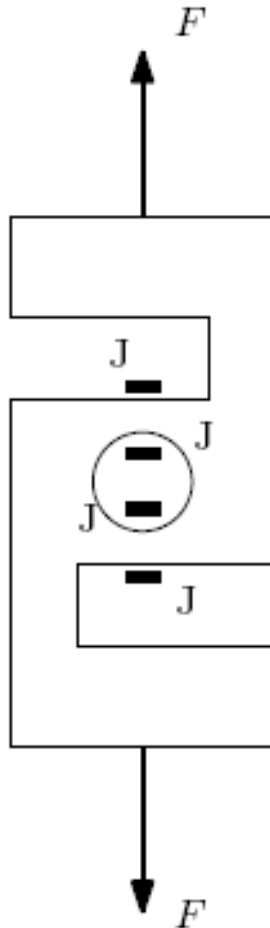
Piezorésistif "Sensortechinics"

Capteurs de force

Basés sur la déformation en général en flexion d'une structure.



Traction, compression
"TESTWELL"



Couple;
Rondelle de charge "TEST"



Traction compression
"Captronics"



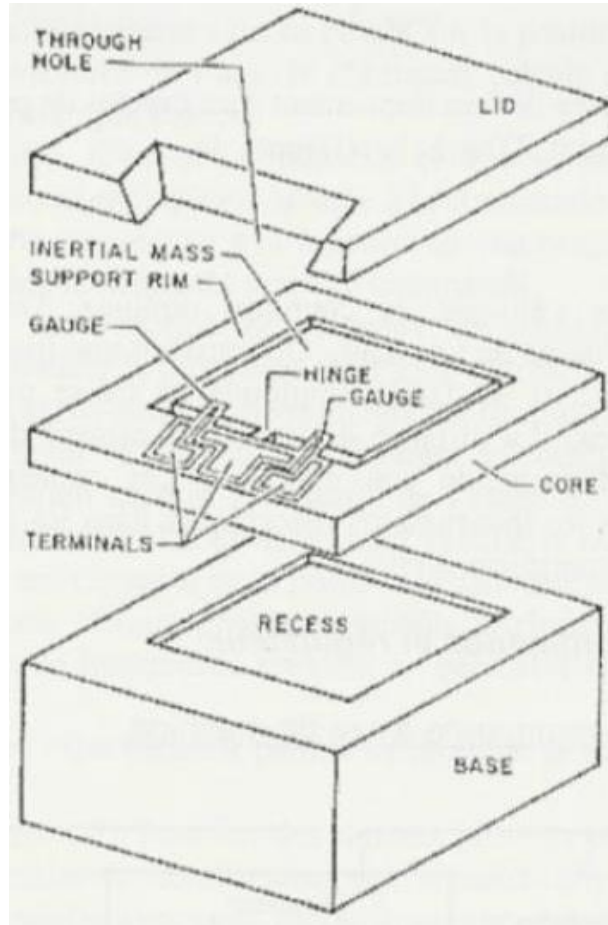
Traction compression
"TME"

Capteurs d'accélération

L'effort à l'encastrement est à l'image de l'accélération subie par la masse suspendue

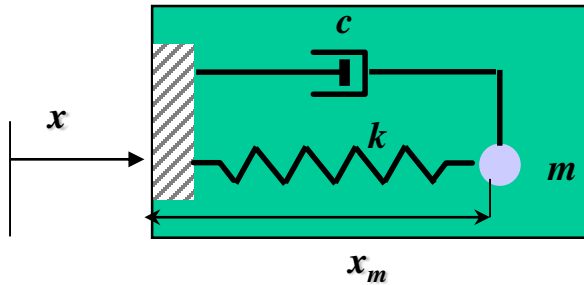


TDM AKA



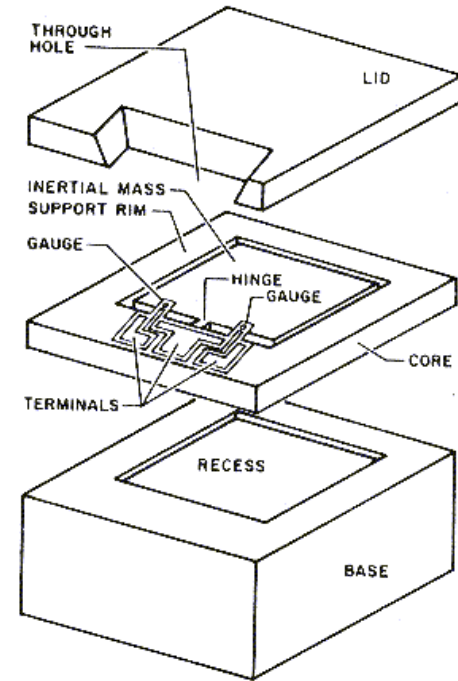
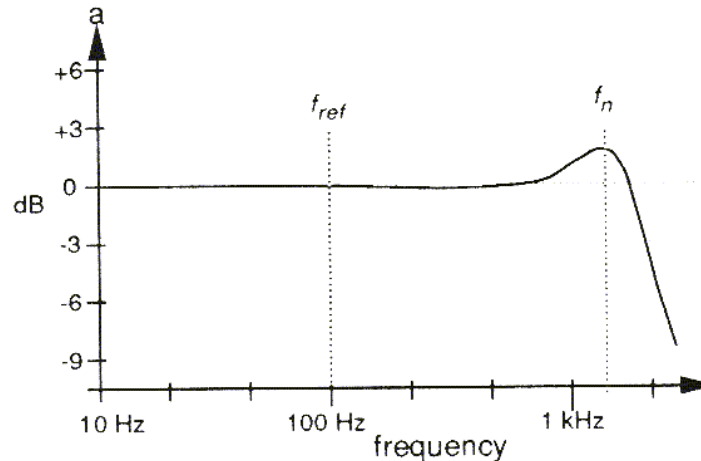
Quelques détails sur les accéléromètres.

- ❑ Corps d'épreuve: poutre en flexion
- ❑ Mesure: déformation due à la force inertielle (jauges intégrées)
- ❑ Filtre passe bas 2^d ordre
- ❑ Fréquences caractéristiques: f_n , f_{ref}

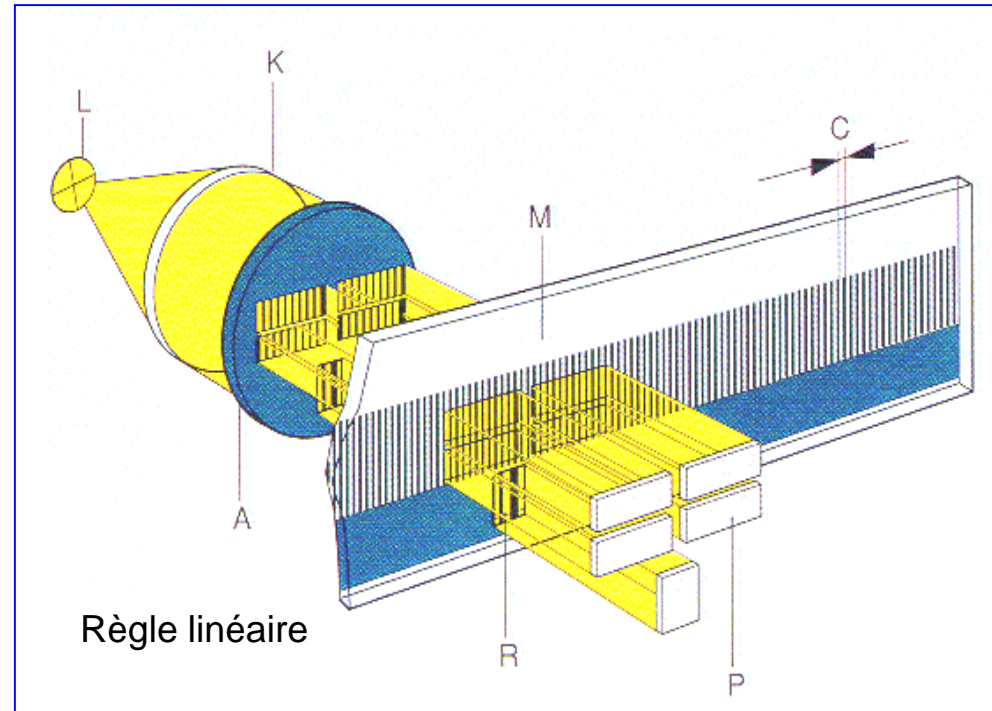


$$m\ddot{x}_m + c\dot{x}_m + kx_m = -m\ddot{x}$$

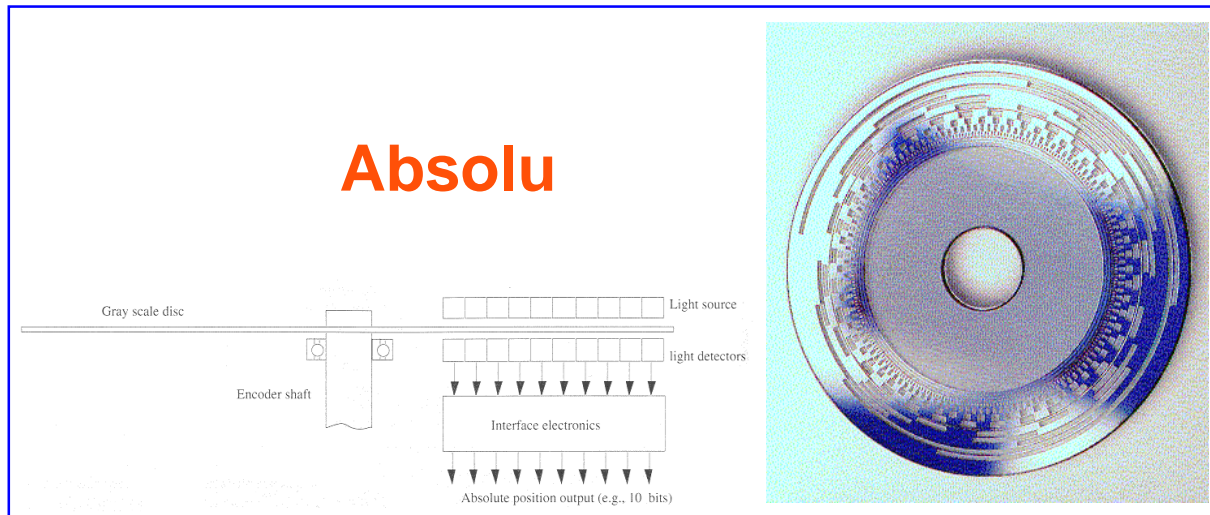
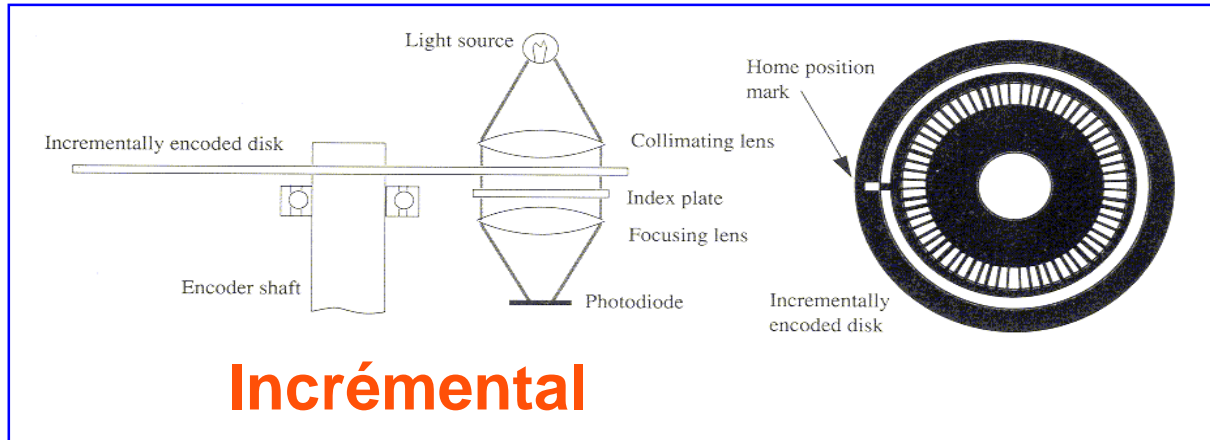
$$G(s) = \frac{-1}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}$$



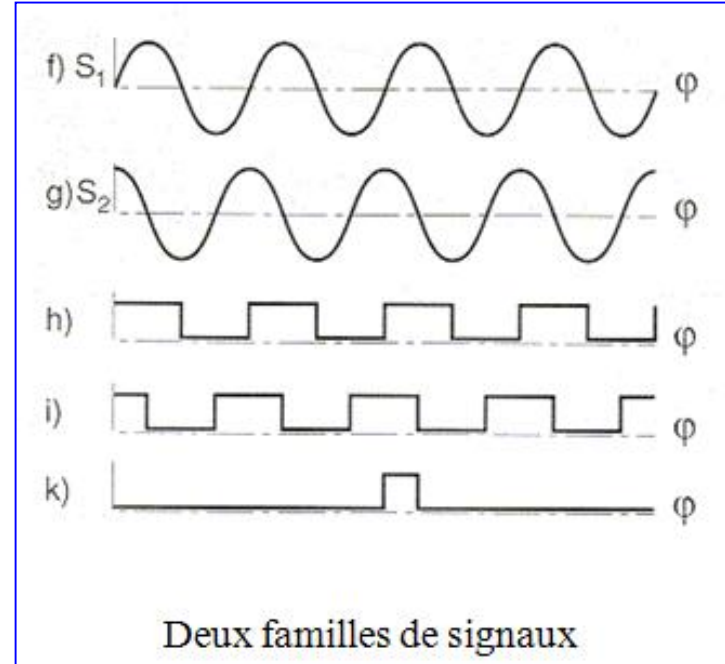
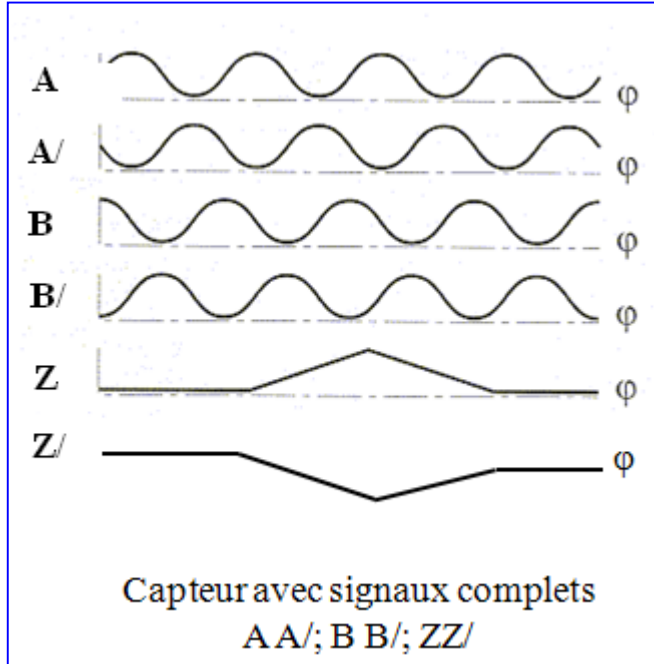
- ❑ Etalon: réseau (C)
- ❑ Méthode de mesure:
 - Transmission
 - Réflexion
- ❑ Signaux en crénaux:
 - Obturation
 - Quadrature
- ❑ Signaux sinusoïdaux:
 - Interférence/diffraction
 - Interpolation
- ❑ Mesure:
 - Incrémentale
 - Absolue



Capteurs de déplacement optiques incrémentaux et absolus:



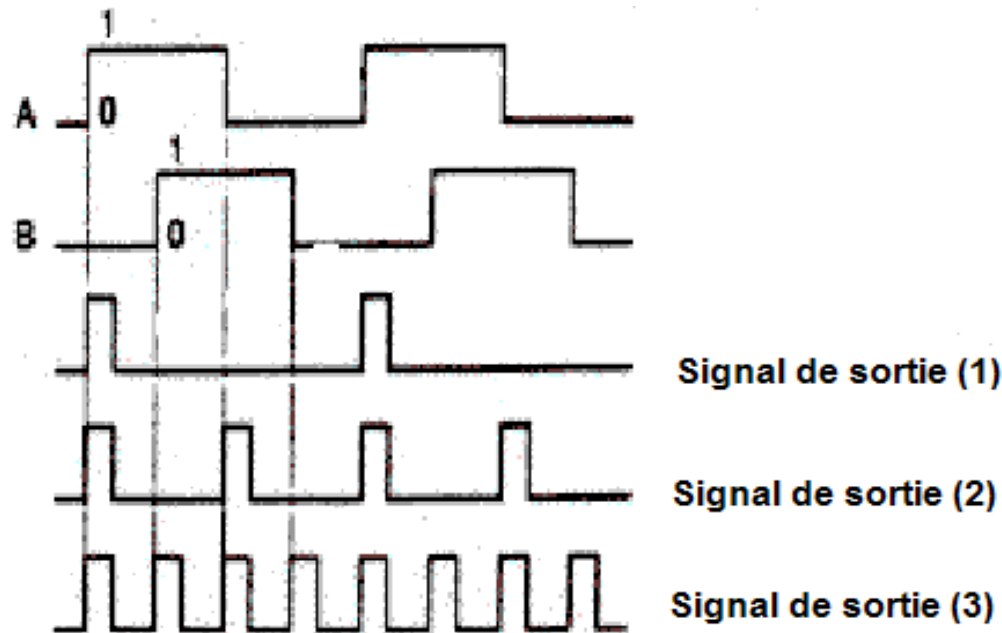
Capteurs de déplacement optiques incrémentaux signaux



$$S_1 = A \sin \varphi \quad \text{et} \quad S_2 = A \cos \varphi$$

$$\text{avec } \varphi = \frac{2\pi x}{C/i} \quad i = 1 \text{ ou } 2$$

Exploitation des signaux A,A/ & B,B/
Pour une **augmentation de la résolution d'un facteur 4**

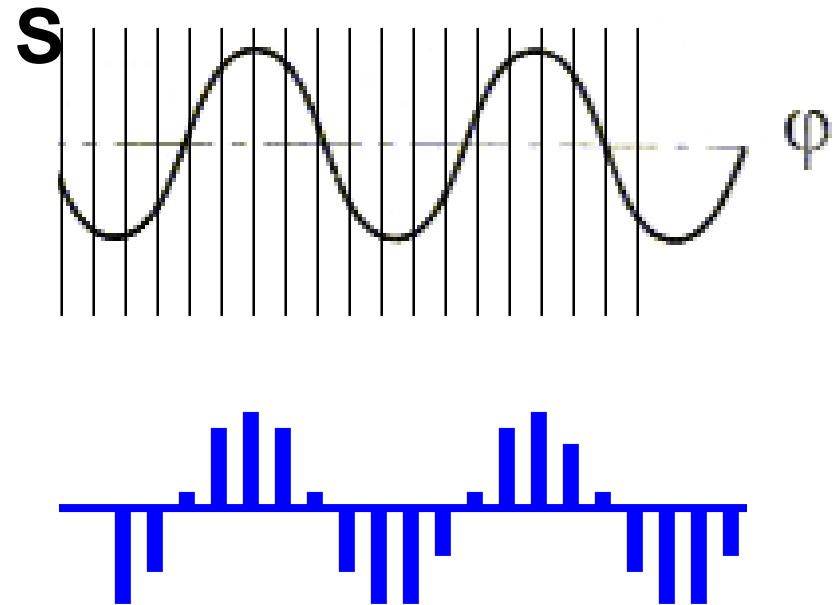
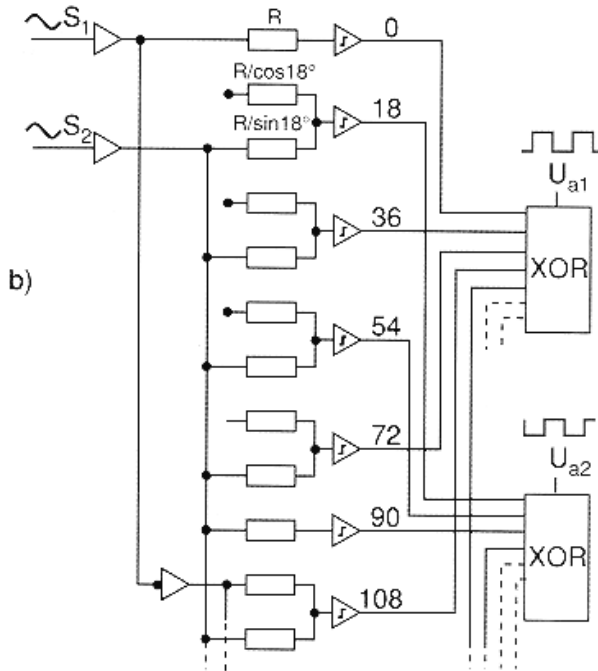


- (1) Flanc montant de A => précision de base.
- (2) Flancs montants et descendants de A précision double
- (3) Flancs montants et descendants de A et B précision quadruple

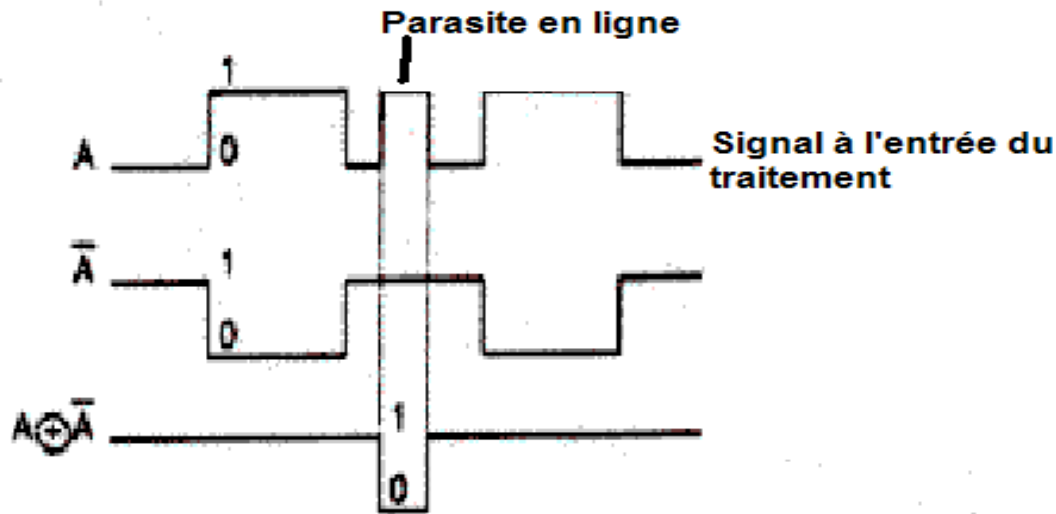
Augmentation de la résolution par interpolation

Par diviseur de tension

Par traitement digital



Exploitation des signaux A,A/ & .B,B Pour **déte**cter un parasite (une **erre**ur)

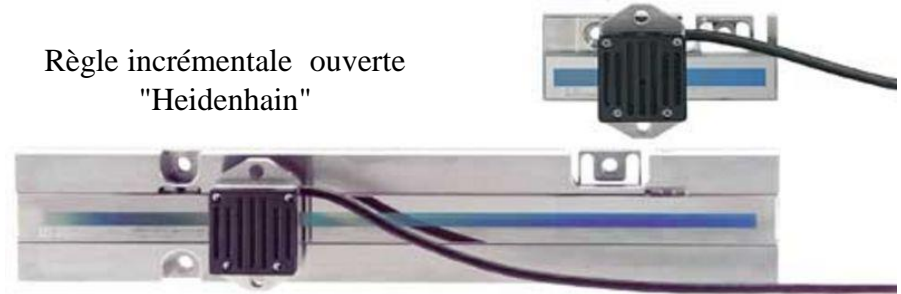


Le ou exclusif entre A et A/ donne normalement toujours 1
 En présence d'une perturbation on a 0 donc erreur.
 Cette détection d'erreur est aussi appliquée à BB/ et ZZ/

Quelques capteurs incrémentaux



Codeur incrémental
"LTN"



Règle incrémentale ouverte
"Heidenhain"



Règle incrémentale fermée
"Heidenhain"



Palpeurs incrémentaux
"Heidenhain"

Les capteurs de déplacement inductif de type LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

Principe de fonctionnement:

Le champ d'une bobine primaire est plus ou moins couplé avec deux bobines secondaires selon la position d'un noyau plongeur ferromagnétique.

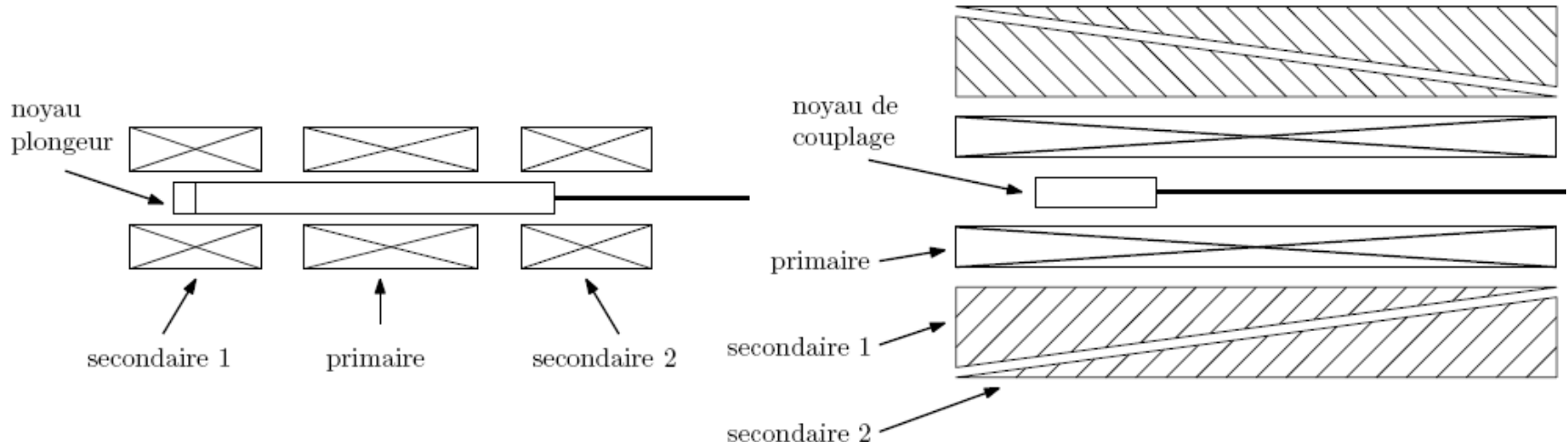
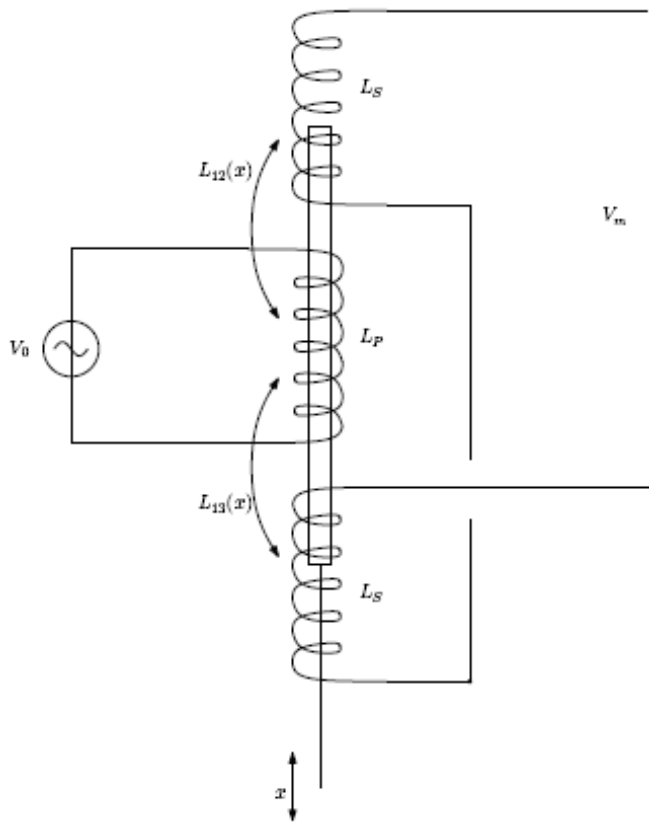


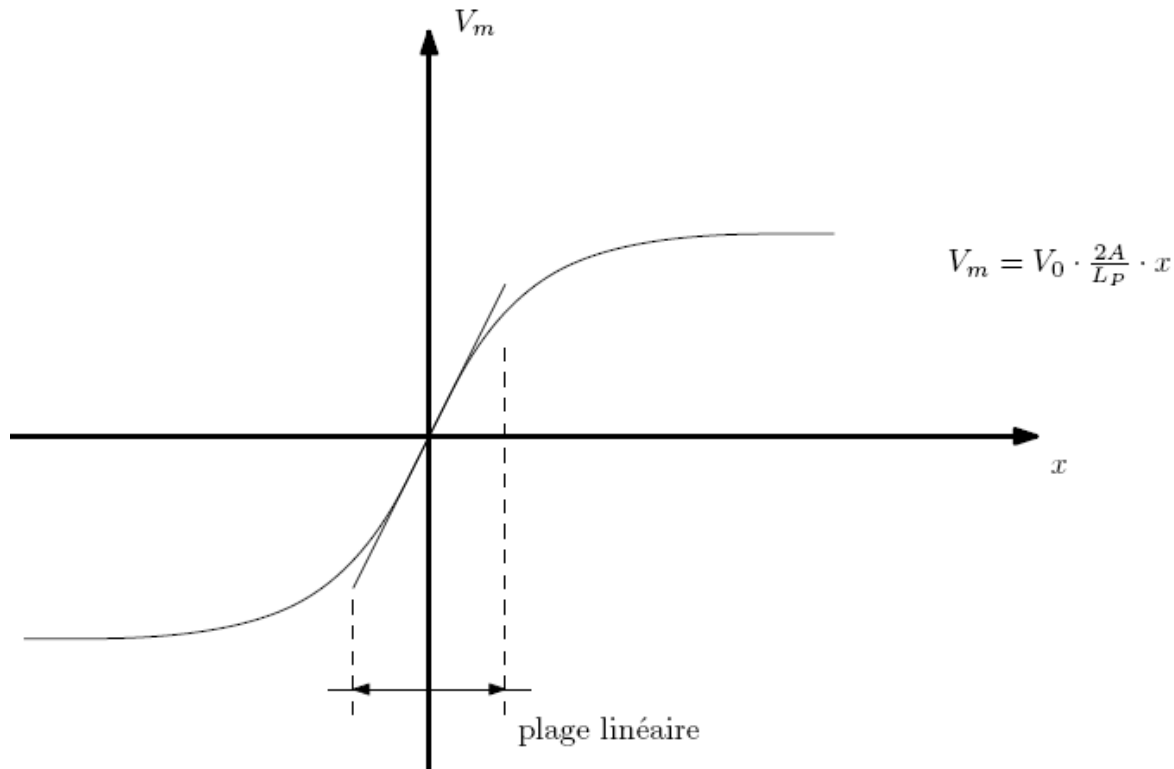
Schéma équivalent et équations



On montre que $V_m \cong V_0 \cdot -\frac{2j\omega A}{R_P + j\omega L_P} \cdot x$;
 généralement, $j\omega L_P \gg R_P \rightarrow V_m \cong -\frac{2V_0 A}{L_P} x$
 $2Ax$ est un facteur découlant du couplage $L_{12}(x) - L_{13}(x)$.

Conditionnement

On utilise la démodulation synchrone pour recueillir le signal proportionnel au déplacement.



Allure du signal
à la sortie du
démodulateur

Caractéristiques principales

Le LVDT est un capteur de déplacement absolu

Il est très robuste

Sa résolution est submicronique

La linéarité est de l'ordre de 0,1% de la pleine échelle

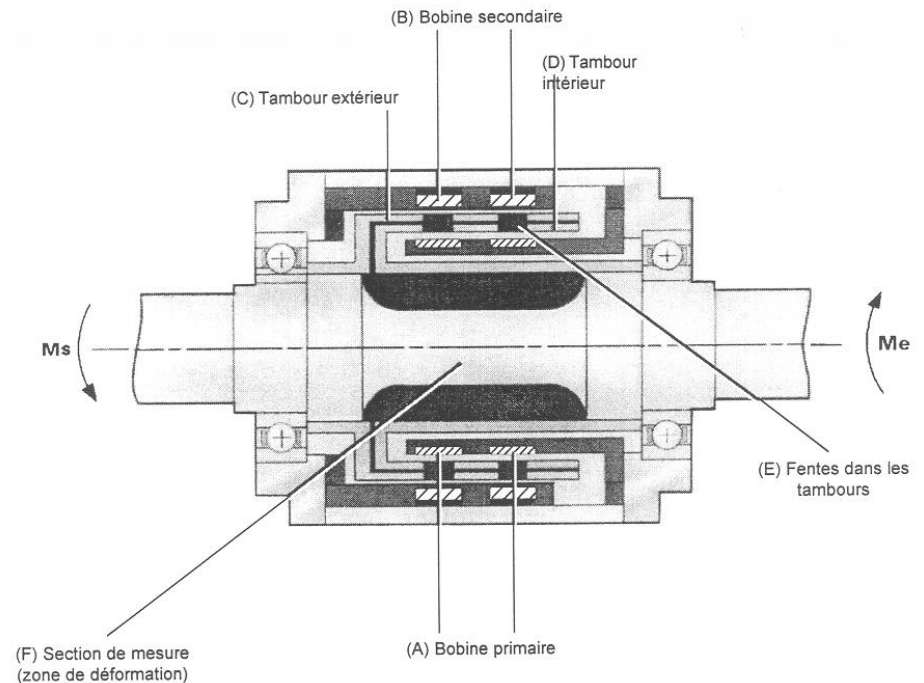
Quelques LVDT



LVDT
"RDP"

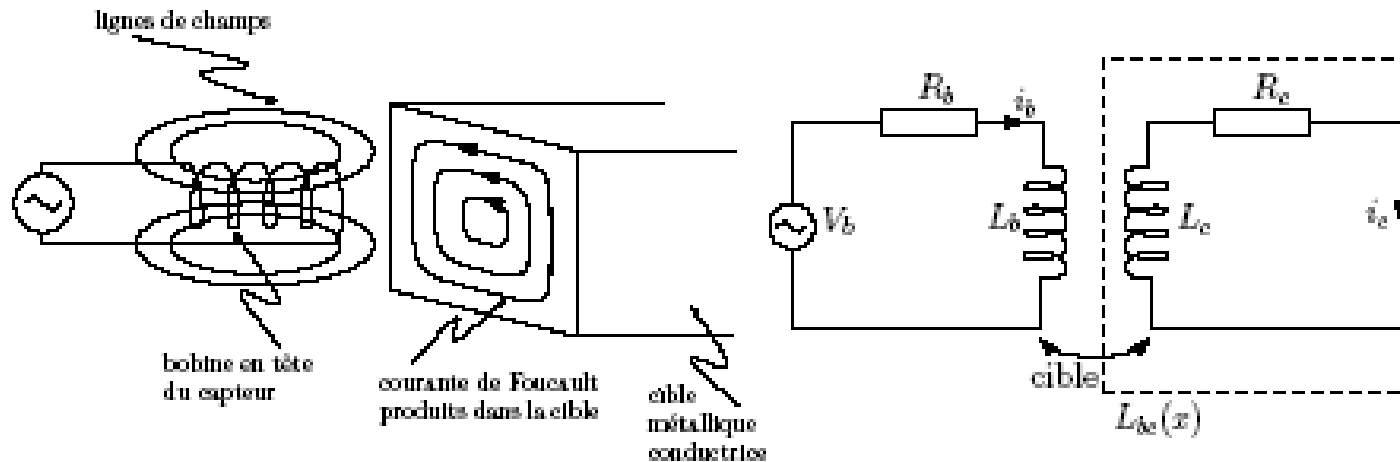
Couplemètre

- ❑ Mesure: déformation due au couple
- ❑ Corps d'épreuve: arbre
- ❑ Transformateur différentiel en rotation



Le capteur de déplacement à courant de Foucault

Principe de fonctionnement et équations



$$V_b = \left[R_b + \frac{\omega^2 L_{bc}^2}{R_c^2 + \omega_c^2 L_c^2} \cdot R_c + j\omega \left(L_b - \frac{\omega^2 L_{bc}^2}{R_c^2 + \omega_c^2 L_c^2} \cdot L_c \right) \right] \cdot i_b$$

$$L_{bc}(x) = k(x) \sqrt{L_b \cdot L_c}$$

$K(x)$ est compliqué ; $K(x) \rightarrow 0$ quand $x \rightarrow \infty$

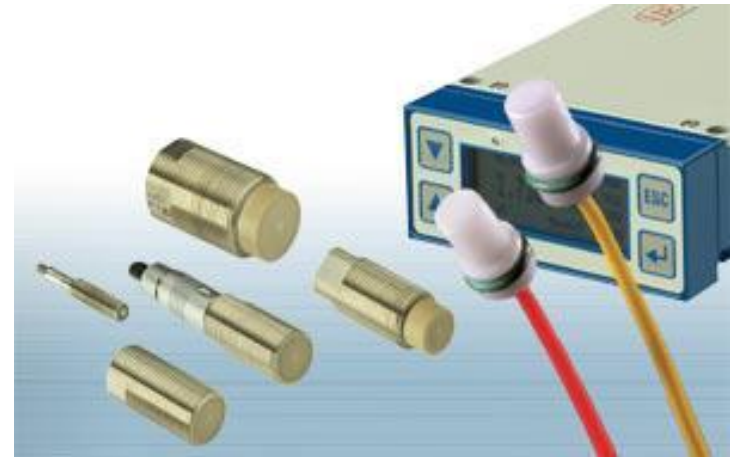
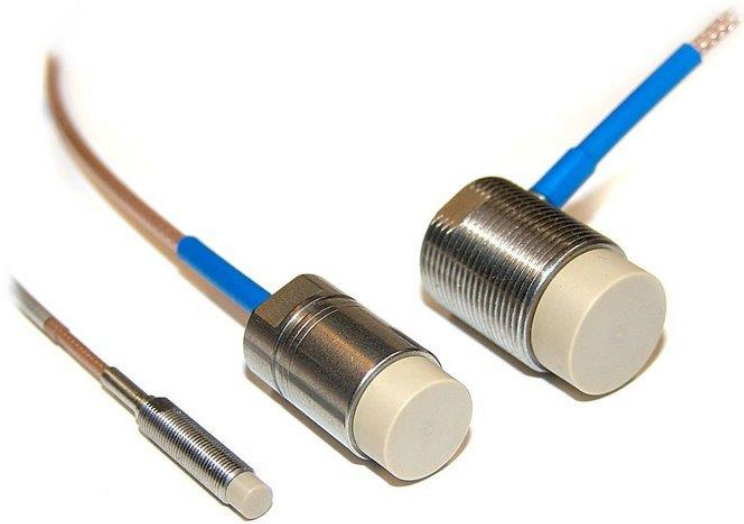
Le capteur de déplacement à courant de Foucault

Conditionnement: Montage en pont & démodulation synchrone

Caractéristiques et utilisation:

- excellente résolution 30nm
- utiliser sur une portion linéaire
- on trouve aussi des exécutions détecteur
- être attentif à la taille de la cible.
- être attentif à la nature et à la structure de la cible

Quelques capteurs à courant de Foucault



Les capteurs de déplacement par triangulation

Principe de fonctionnement:

Un faisceau lumineux incident est focalisé sur la cible.

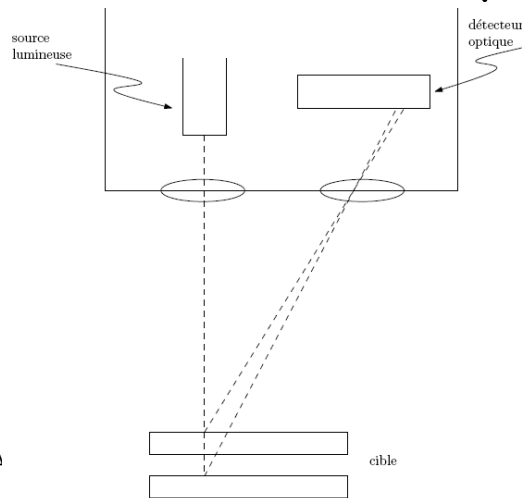
Le faisceau réfléchi éclaire en fonction de la distance un endroit sur un capteur optique de type CCD (charge coupled device) ou PSD (position sensitive device)

Principaux type

-Les capteurs à réflexion diffuse

Plage: 20 à 75mm

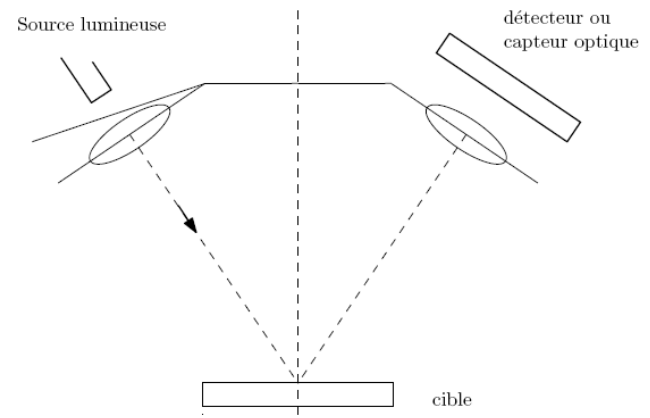
Résolution: 2 à 5 μm



-Les capteurs à réflexion spéculaire

Plage: environ 50 μm

Résolution: environ 15 nm



Les capteurs de déplacement par triangulation



Capteur à réflexion diffuse
"SUNX"



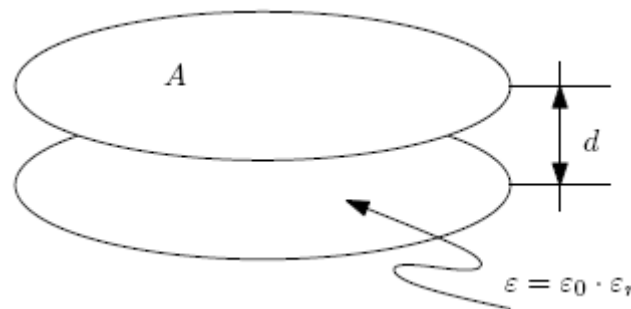
Capteur laser
"Keyence"

Les capteurs de déplacement capacitif

Principe de fonctionnement:

Basé sur la variation de la capacité d'un condensateur plan en fonction de la distance entre les armatures.

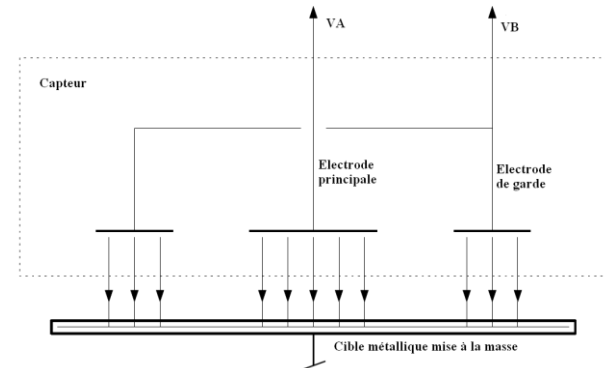
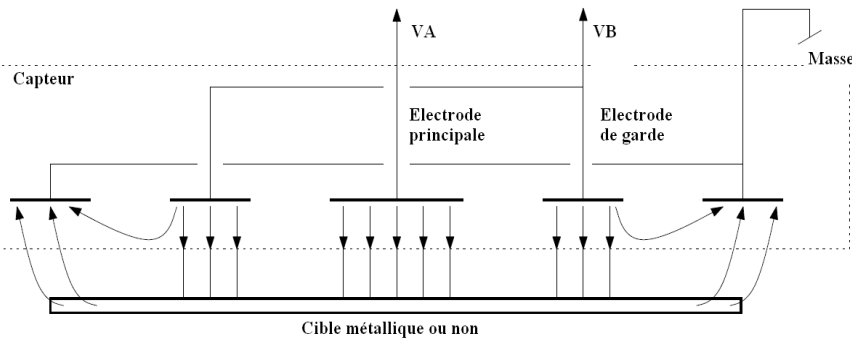
$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$



Principales exécutions

-Tout types de cibles

-Cibles métalliques



Quelques exécutions de déplacement capacitif



Pour cibles métalliques, et non métalliques
"Micro Epsilon"

Les capteurs de déplacement capacitif

Mise en œuvre

On impose un courant sinusoïdal à la capacité; la tension à ses bornes vaut:

$$V = I \cdot \frac{1}{j\omega C} = \frac{I}{j\omega \epsilon A} \cdot d$$

La tension est proportionnelle à la distance.

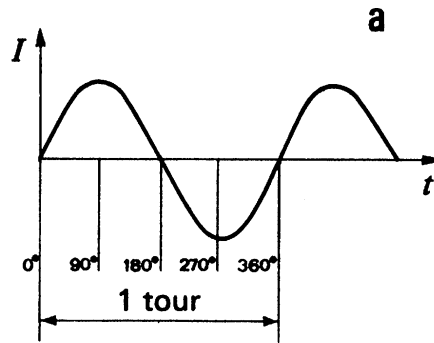
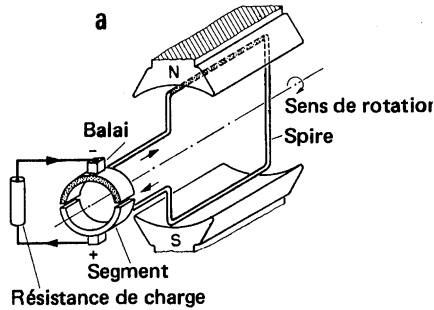
Caractéristiques principales

Les capteurs capacitifs peuvent descendre à 3nm de résolution

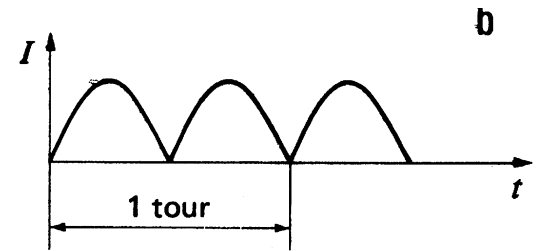
La dynamique est supérieure à 10KHz

Ils conviennent à tout types de cibles.

□ Vitesse angulaire



Courant dans l'induit

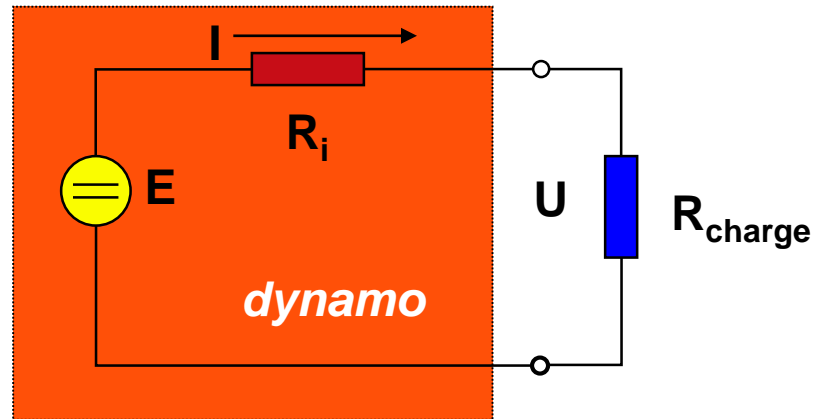


Courant dans la charge

$$U = R_{charge} I = E(\omega) - R_i I$$

$$I \text{ très faible}$$

$$U \approx E(\omega)$$



Génératrices tachymétriques



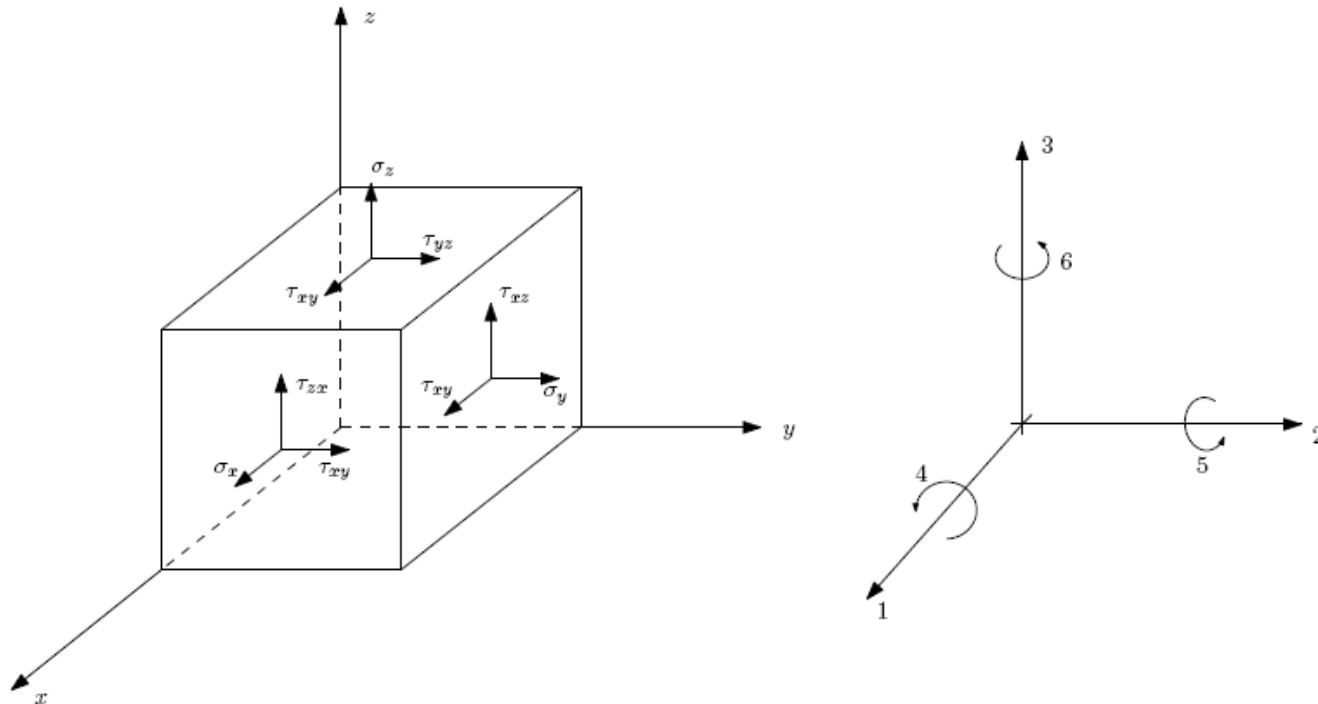
Capteurs piézo-électriques

Les capteurs piézo-électriques

Principe de fonctionnement:

Ils sont basés sur la variation de la polarisation D d'un réseau cristallin soumis à une contrainte mécanique.

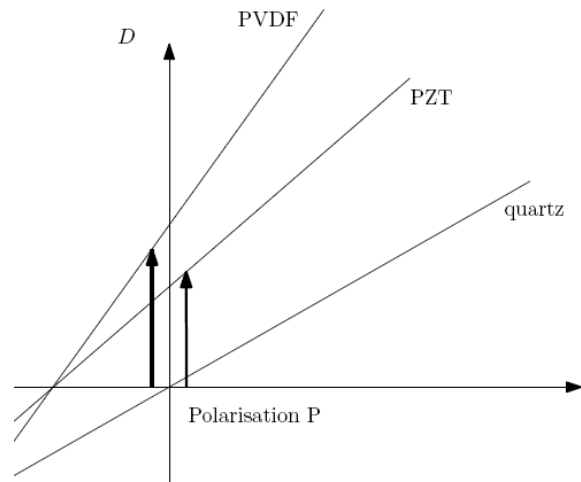
Repère et efforts



Capteurs piézo-électriques

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix}}_{\text{coeff. axiaux}} \underbrace{\begin{bmatrix} d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix}}_{\text{coeff. de cisaillement}} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix}$$

Matériaux présentant un effet piezo électrique

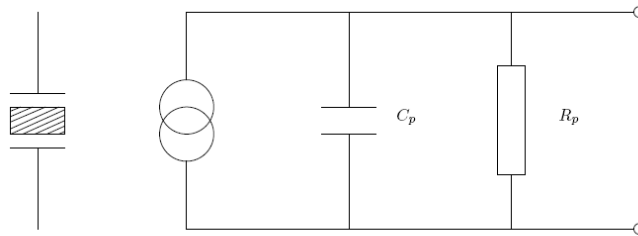


Capteurs piézoélectriques

Mise en œuvre

Les capteurs piezo électriques sont utilisés pour des mesures dynamiques.

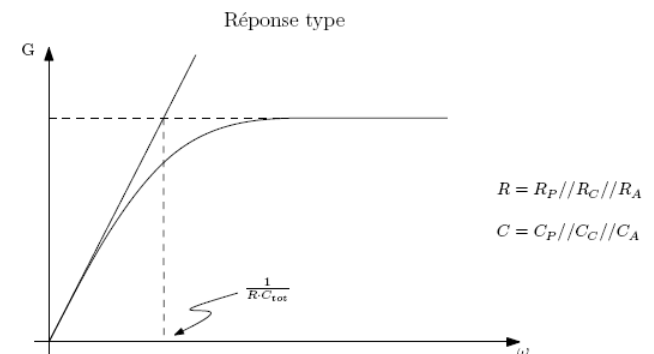
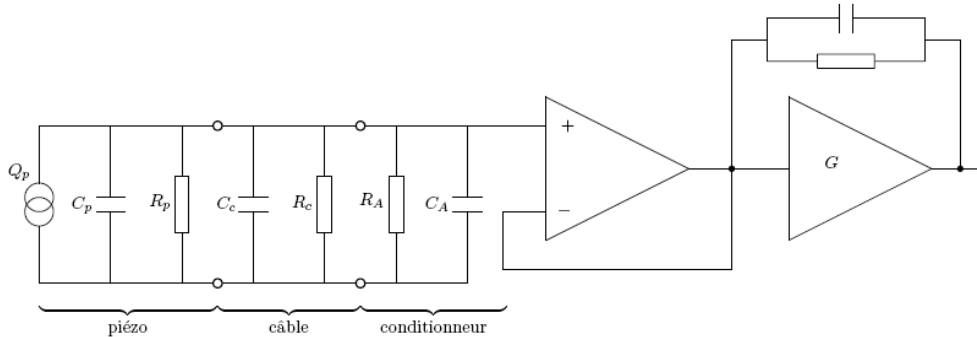
Schéma équivalent électrique



$$R_p \cong 1000[M\Omega] ; C_p \cong 50[pF]$$

Pour conditionner un capteur piezo on utilise un amplificateur de charge. Leur particularité est une très grande impédance d'entrée.

Schéma de l'ensemble capteur câble ampli.



Capteurs piézoélectriques

Capteurs piézoélectriques usuels

Accéléromètres:

-Excellente bande passante, fréquence de résonance jusqu'à 150 KHz



Accéléromètre piezoélectrique
Triaxial "Brüel&Kjaer"

Capteurs de force:

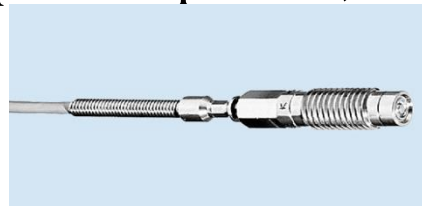
-Rigidité et fréquence de résonance plus grandes que ceux des capteurs à jauges de contrainte.



Rondelle de charge
"Kistler"

Capteurs de pression:

-Excellente dynamique temporelle, haute plage de pression.

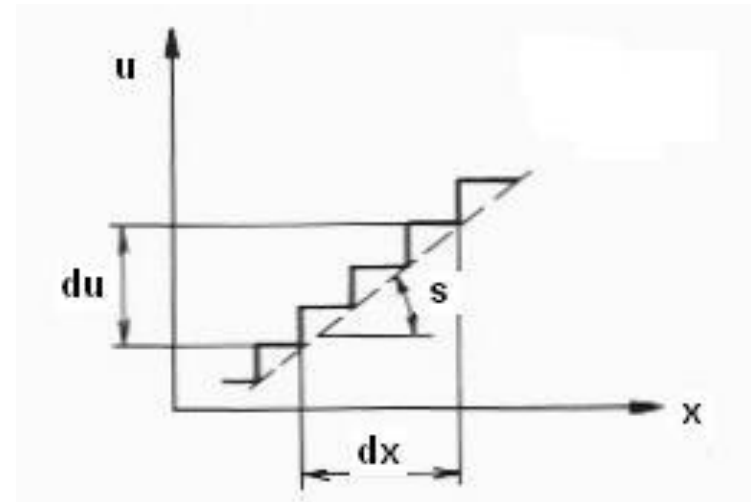


"Kistler"

Caractéristiques des capteurs

Sensibilité

$$S = \frac{du}{dx}$$



Caractéristiques des capteurs

Résolution

$$R = \frac{1}{S}$$

Pouvoir de résolution

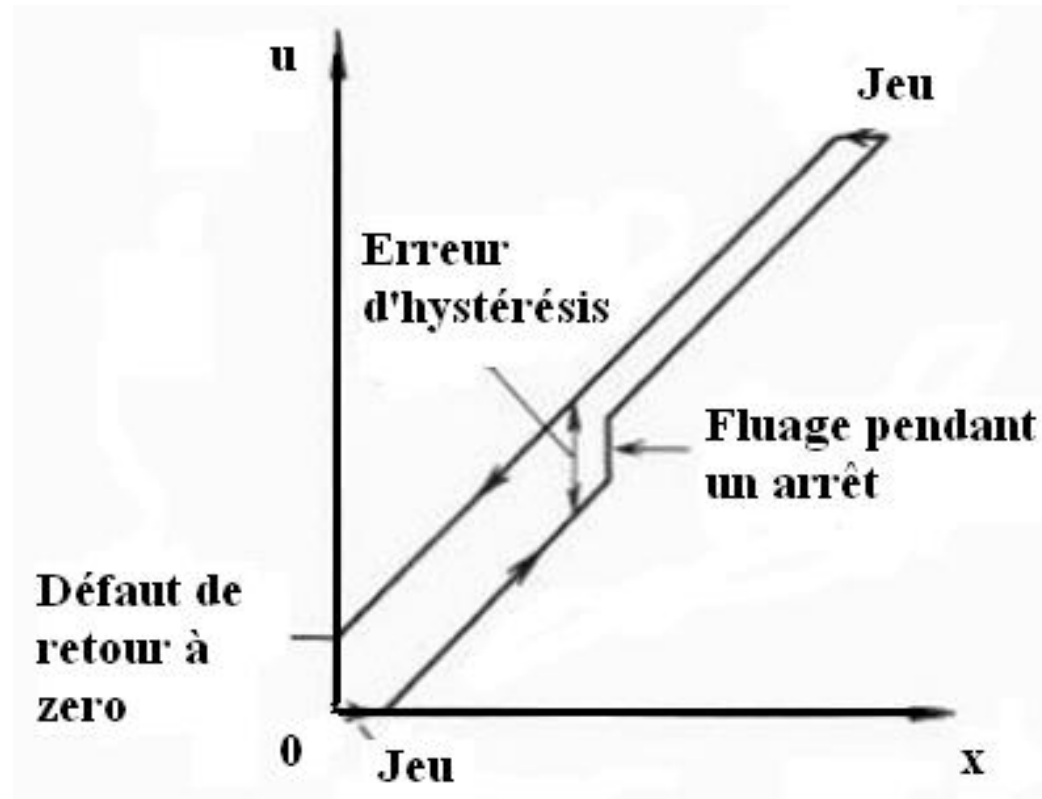
$$P = \frac{R}{Em}$$

résolution divisée par l'étendue de la mesure

Caractéristiques des capteurs

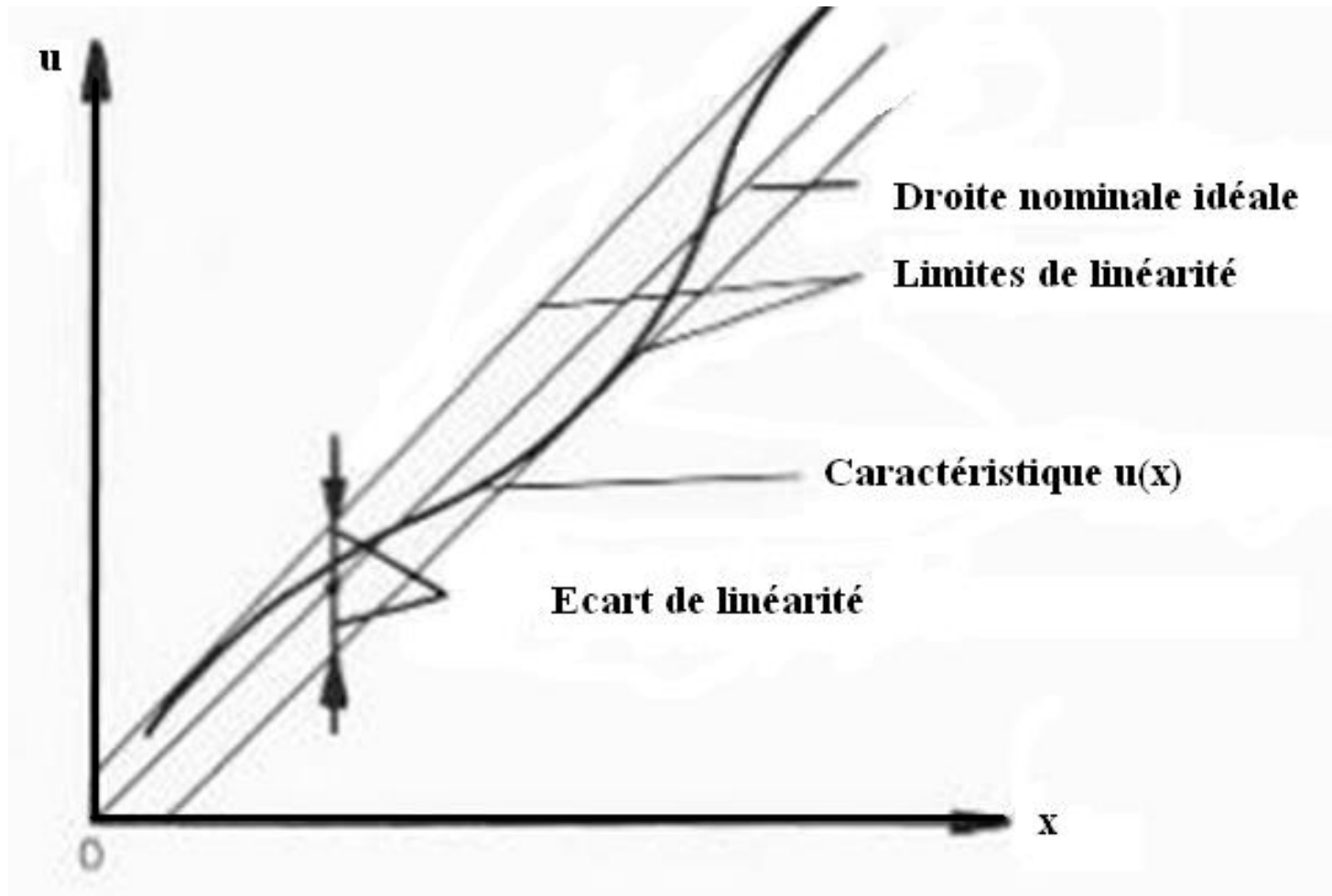
Hystérésis

Ou erreur de réversibilité. On obtient des indications différentes pour la même mesurande en croissant ou en décroissant



Caractéristiques des capteurs

Non linéarité



Caractéristiques des capteurs

Précision

Qualité globale d'un instrument. Un instrument est d'autant plus précis que la valeur fournie est proche de la valeur vraie.

Finesse

Capacité à peu perturber la mesurande.

Erreur absolue

Différence entre la mesure et la mesurande $E = X_m - X$

Caractéristiques des capteurs

Correction

Erreur absolue changée de signe $C = - E$

Erreur relative

S'exprime en %

$$E_r = \frac{E}{X}$$

Erreur absolue sur valeur vraie

Erreur systématique

Erreur qui reste constante en valeur absolue et en signe quand on fait plusieurs mesures

Caractéristiques des capteurs

Rapidité temps de réponse

Abilité de la sortie d'un capteur à suivre les variations temporelles de la mesurande.

Étalonnage

Permet d'ajuster et de déterminer sous forme algébrique ou graphique, la relation entre la grandeur de sortie et la mesurande.