

COMPLEMENTS DE COURS – CAPTEURS INDUSTRIELS

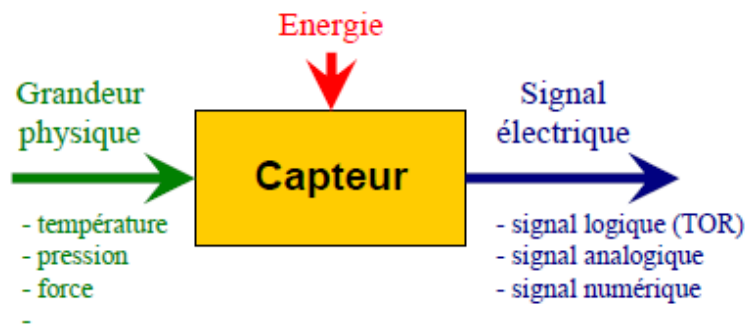


Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs, ...), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, ...).

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

Définitions :

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.



- **Etendue de mesure** : Valeurs extrêmes pouvant être mesurées 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 : Sensibilité de 10mV/N.
- **Précision** : Aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie.
- **Rapidité** : Temps de réponse du capteur. La rapidité est ici liée à la bande passante.

Éléments de métrologie (définitions) :

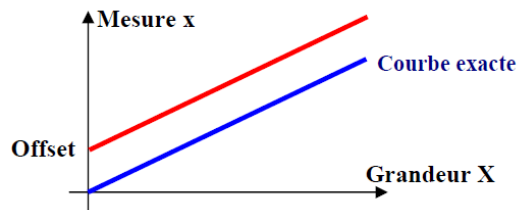
- Le mesurage : C'est l'ensemble des opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.
- La mesure (x) : C'est l'évaluation d'une grandeur par comparaison avec une autre grandeur de même nature prise pour unité. *Exemple : 2 mètres, 400 grammes, 6 secondes.*
- La grandeur (X) : Paramètre 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, industriel.

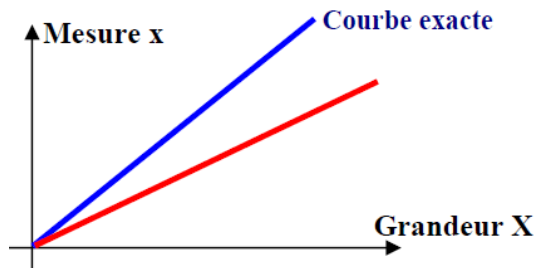
- L'incertitude (dx) : Le résultat de la mesure x d'une grandeur X n'est pas complètement défini par un seul nombre. Il faut au moins la caractériser par un couple (x, dx) et une unité de mesure. dx est l'incertitude sur x . Les incertitudes proviennent des différentes erreurs liées à la mesure. Ainsi, on a : $x-dx < X < x+dx$. Exemple : 3 cm \pm 10 %, ou 3 cm \pm 3 mm.
- Erreur absolue (e) : Elle mesure l'imprécision sur un mesurage effectué : $e = x-X$.
Exemple : Une erreur de 10 cm sur une mesure de distance.
- Erreur relative (er) : Rapport entre l'erreur de mesure et la grandeur vraie. Une erreur relative s'exprime généralement en pourcentage de la grandeur mesurée : $e_r = \frac{e}{X}$
Exemple : Une erreur de 10 % sur une mesure de distance (10 % de la distance réelle).

Les types d'erreurs classiques :**Erreur de zéro (offset)**

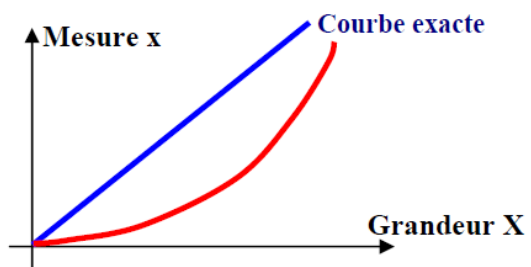
Décalage de l'origine.

**Erreur d'échelle (gain)**

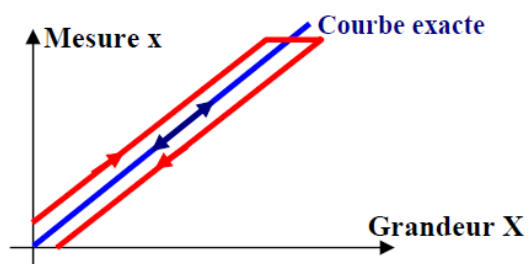
C'est une erreur qui dépend de façon linéaire de la grandeur mesurée.

**Erreur de linéarité**

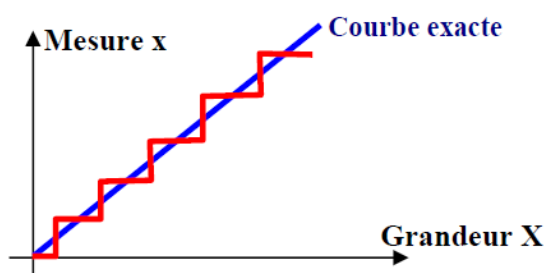
La caractéristique n'est pas une droite.

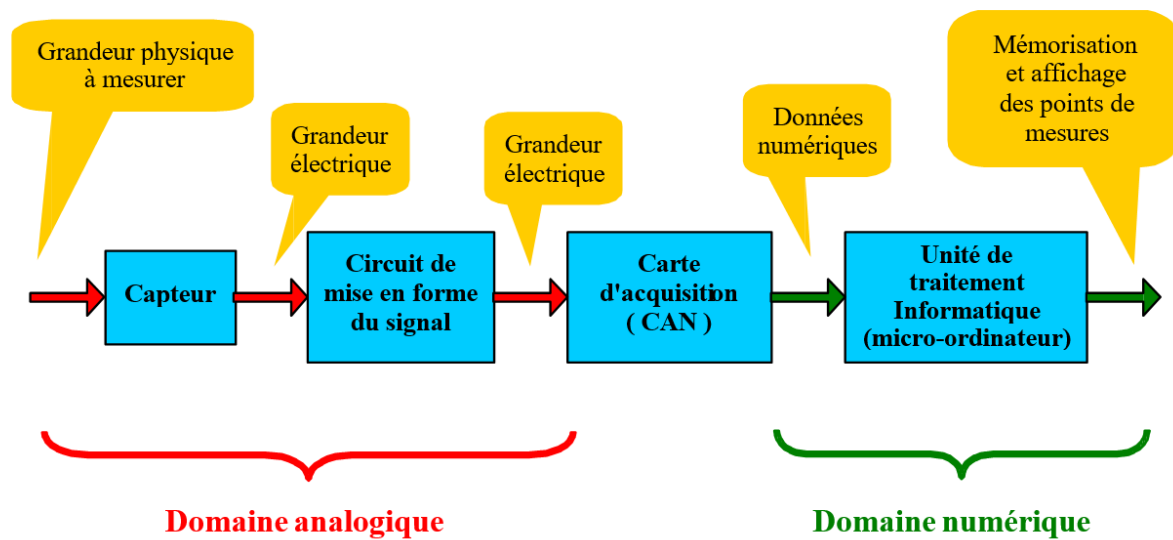
**Erreur due au phénomène d'hystérésis**

Il y a phénomène d'hystérésis lorsque le résultat de la mesure dépend de la précédente mesure.

**Erreur de quantification**

La caractéristique est en escalier, cette erreur est souvent due à une numérisation du signal.



Caractéristique d'une chaîne de mesure informatisée :

La structure de base d'une chaîne de mesure comprend au minimum 4 étapes :

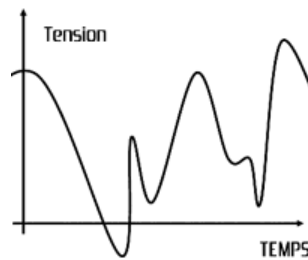
- **Un capteur** sensible aux variations d'une grandeur physique et qui, à partir de ces variations, délivre un signal électrique.
- **Un conditionneur de signal** dont le rôle principal est l'amplification du signal délivré par le capteur pour lui donner un niveau compatible avec l'unité de numérisation. 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 nombre (enregistrement, affichage de courbes, traitements mathématiques, transmission de données...).

Certains capteurs délivrent directement un mot binaire, image de la grandeur physique mesurée, en leur sortie. Ils intègrent, dans un seul boîtier le capteur + le circuit de mise en forme + le CAN (Convertisseur Analogique Numérique).

Classification des signaux :

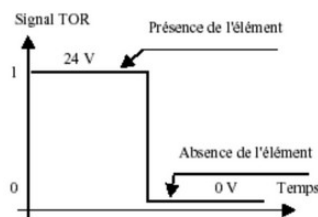
Un **signal** est dit **analogique** si l'amplitude de la grandeur physique le représentant peut prendre une infinité de valeurs dans un intervalle donné.

- **Signal continu** : Signal qui varie « lentement » dans le temps (température, débit, niveau, ...).
- **Signal temporel** : La forme du signal est importante (pression cardiaque, chromatographie, impact, ...).
- **Signal fréquentiel** : L'information désirée est transportée par le spectre fréquentiel (analyse vocale, sonar, spectrographie, ...).

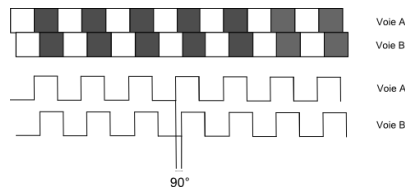


Un **signal** est dit **numérique** si l'amplitude de la grandeur physique le représentant ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs. En général, ce nombre fini de valeurs est une puissance de 2.

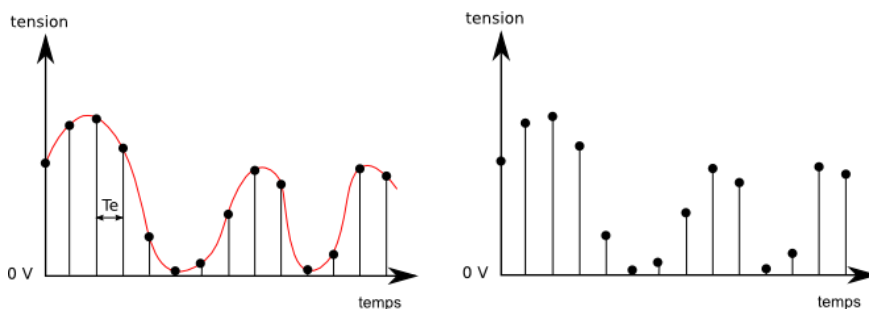
- **Tout ou rien (TOR)** : Il informe sur l'état bivalent d'un système (vanne ouverte ou fermée).

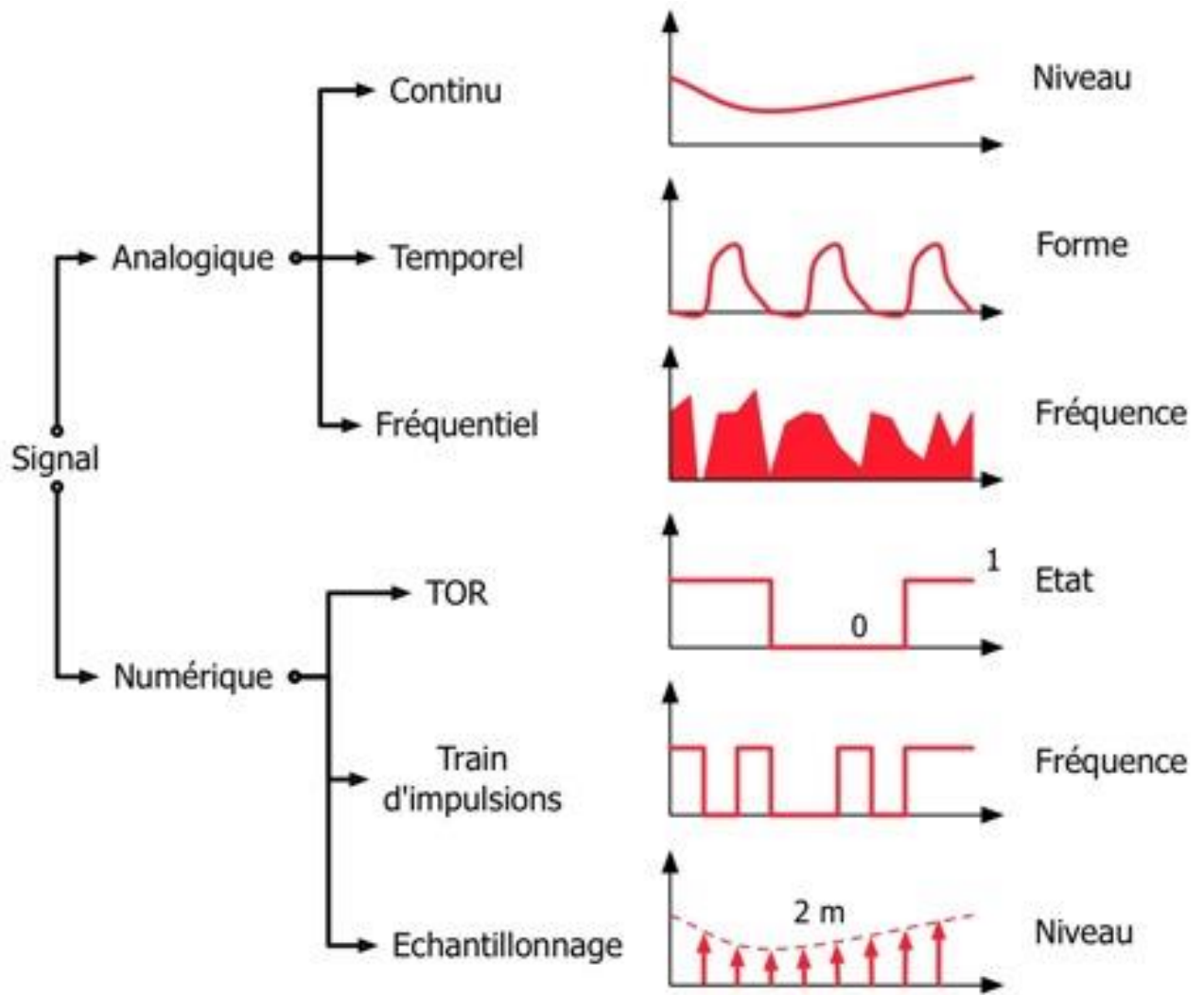


- **Train d'impulsion** : Chaque impulsion est l'image d'un changement d'état (un codeur incrémental donne un nombre fini et connu d'impulsions par tour).

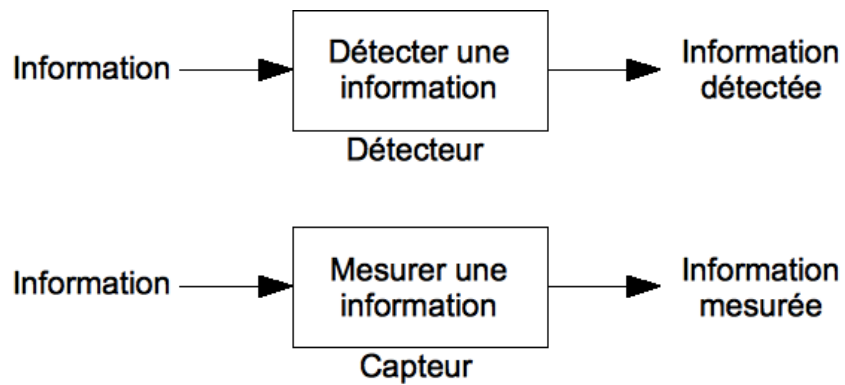


- **Echantillonnage** : Image numérique d'un signal analogique.



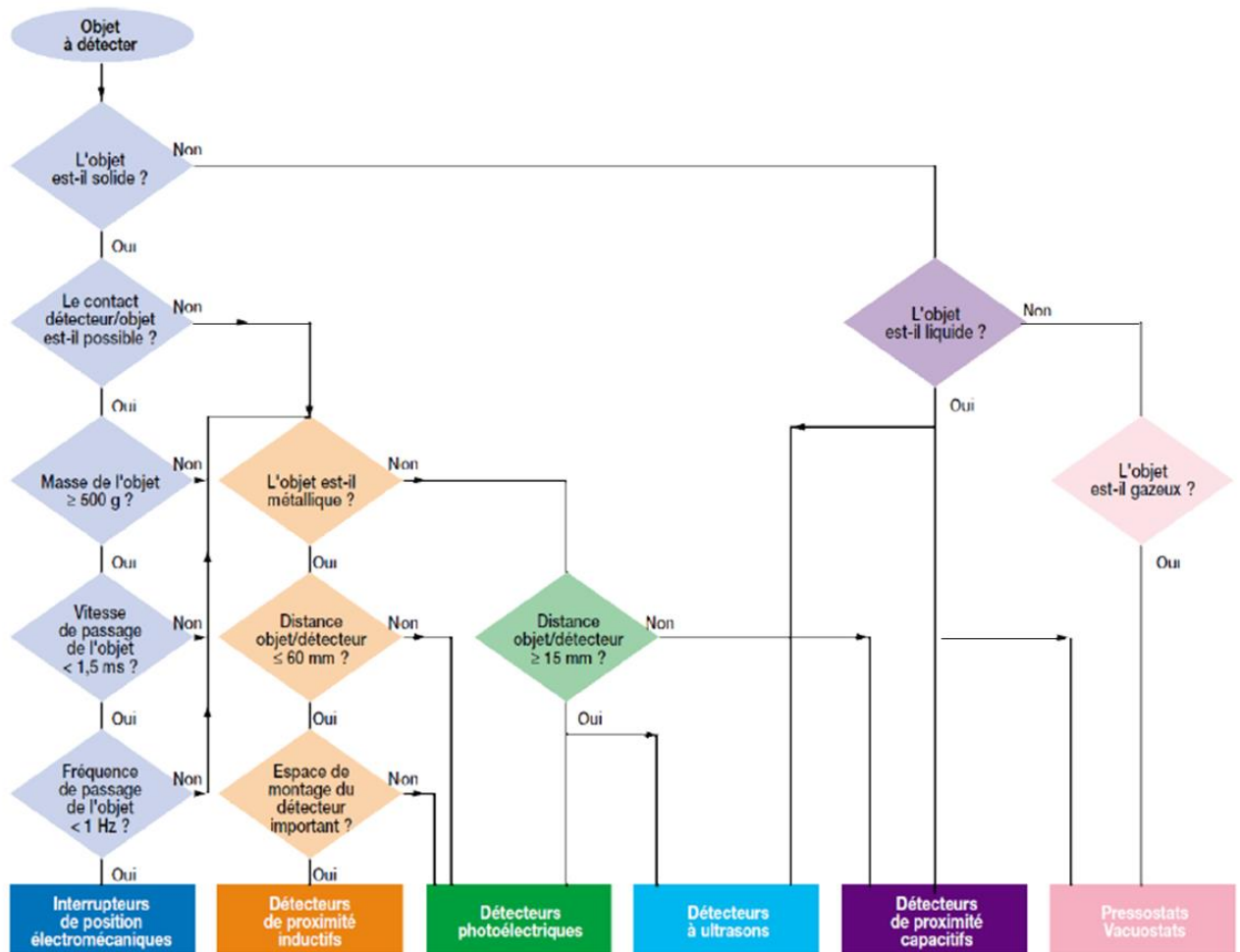


Différentes familles de capteurs



Les détecteurs :

Les détecteurs délivrent une information de type tout ou rien (TOR).



Les 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 physiques 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.
- Effet d'induction électromagnétique : La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique (détection de passage d'un objet métallique).
- Effet photoélectrique : La libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique.
- Effet Hall : Un champ magnétique B et un courant électrique I créent dans le matériau une différence de potentiel U_H .
- Effet photovoltaïque : des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction PN illuminée, leur déplacement modifie la tension à ses bornes.

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		

Les capteurs passifs :

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

Soit d'une variation de dimension du capteur, c'est le principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteur de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile.

Soit d'une déformation résultant de force ou de grandeur s'y ramenant, pression accélération (armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensomètre liée à une structure déformable).

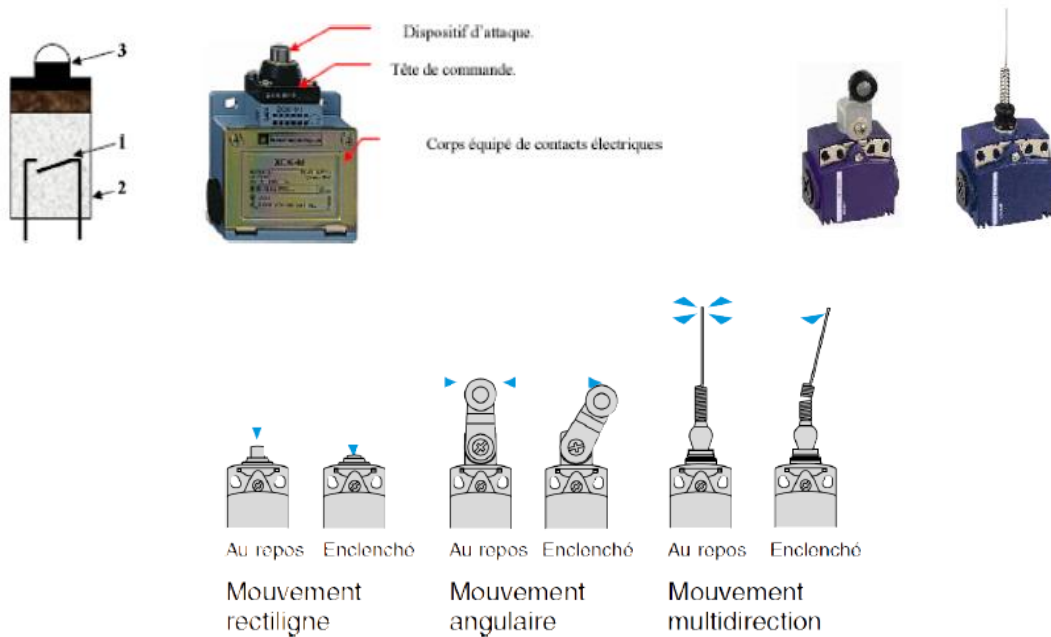
Grandeur mesurée	Caractéristique électrique sensible	Type de matériau utilisé
Température	Résistivité	Métaux : platine, nickel, cuivre ...
Très basse température	Constante diélectrique	Verre
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité	Alliage de Nickel, silicium dopé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

LES DETECTEURS D'OBJETS :

Détecteur à contact mécanique

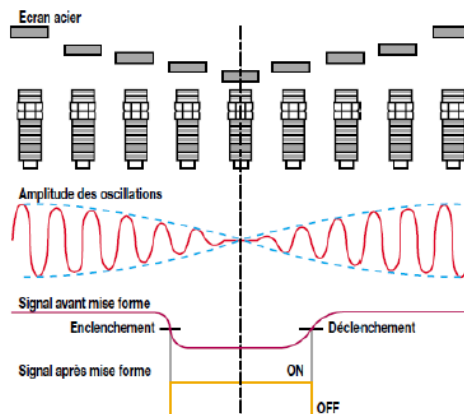
Ces détecteurs sont utilisés pour détecter la présence d'un objet solide. Ils délivrent une information électrique de type tout ou rien. Il existe plusieurs technologies de capteurs qui dépendent du contexte industriel.

Ils sont composés d'un dispositif d'attaque (3), permettant la fermeture d'un contact électrique (1).



Détecteur inductif

Ces détecteurs sont utilisés pour détecter la présence, l'absence ou le passage d'un objet **métallique**. La détection est **sans contact**. Ces détecteurs comportent un oscillateur qui va générer un champ magnétique alternatif. Lorsqu'un objet métallique entre dans ce champ, l'amplitude de ce dernier est réduite, provoquant ainsi le changement d'état de sortie du détecteur (passage de l'état 0 à l'état 1).



LES CAPTEURS DE POSITION OU DE DEPLACEMENT/DEFORMATION :

Les déplacements ou les positions que nous mesurons peuvent être linéaires ou angulaires. Les deux types de mouvement peuvent être convertis l'un dans l'autre grâce à des dispositifs mécaniques (crémaillère, vis-sans-fin, ...) mais ceux-ci entraînent des erreurs (jeux, hystérésis, influence de la température, ...).

La plupart des capteurs de déplacement à sortie analogique sont des capteurs à impédance variable.

Les capteurs à résistance variable :

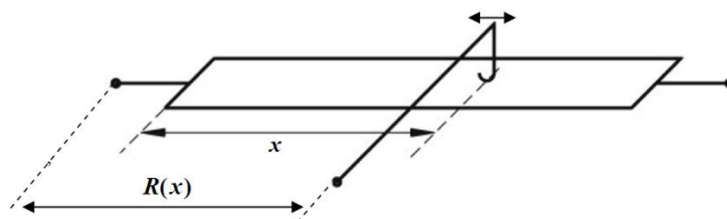
- Potentiomètre linéaire → Déplacement de quelques millimètres à plusieurs dizaines de centimètres.
- Potentiomètre angulaire → Déplacements de quelques degrés à une dizaine de tours.
- Jauges extensométriques → micro déplacements.

Potentiomètres

Potentiomètre linéaire :

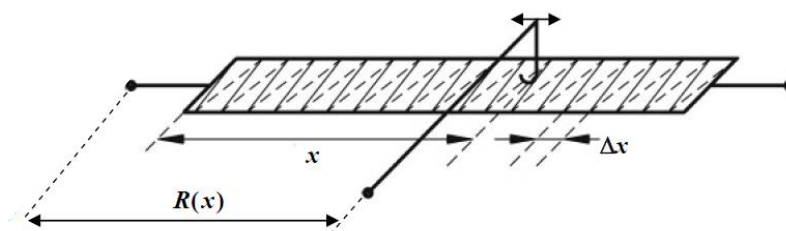
Le potentiomètre à piste conductrice est réalisé à partir d'une matière plastique chargée par une poudre de métal ou de carbone.

La limite de résolution de ce type de potentiomètre dépend de la granulométrie de la poudre conductrice et peut descendre pour un potentiomètre linéaire jusqu'à 0,1 μm .



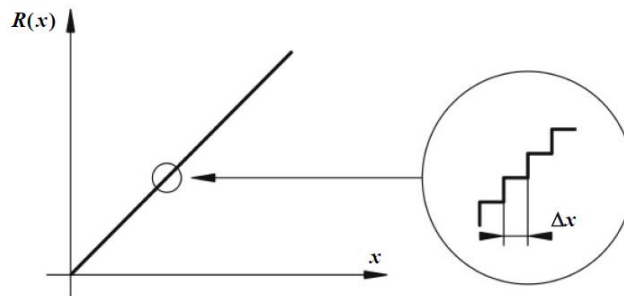
Le potentiomètre à résistance bobinée présente une limite de résolution liée au pas du bobinage :

- Pas linéaire Δx
- Pas angulaire $\Delta\theta = \frac{\Delta x}{r}$ (avec r le rayon)



Remarque : Résolution d'un potentiomètre à résistance bobinée :

Une image agrandie de la caractéristique d'un potentiomètre linéaire bobiné montre sa structure en escalier (équivalence avec une erreur de quantification), dont les marches ont une largeur de Δx . La limite de résolution d'un potentiomètre linéaire bobiné se situe au mieux à environ $10\ \mu\text{m}$, cette limite se vérifie également pour les déplacements du curseur sur le bobinage toroïdal d'un potentiomètre angulaire.

**Remarque : Limitation, durée de vie d'un potentiomètre :**

Le frottement du curseur sur le fil ou sur la piste conductrice d'un potentiomètre entraîne un phénomène d'usure qui limite sa durée de vie. Ce phénomène est sensible lorsque le curseur subit un mouvement oscillatoire autour d'une position moyenne et lorsqu'il est traversé par un courant important. La **durée de vie** d'un potentiomètre est évaluée en **nombre de cycles** de manœuvre, elle vaut de l'ordre de 10^6 à 10^8 cycles.

Afin de garantir un bon contact entre la résistance et le curseur, la **vitesse** de ce dernier doit être **limitée**. Les limites de vitesse sont de l'ordre du m/s.

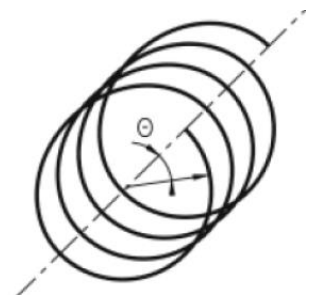
On réalise actuellement des potentiomètres hybrides combinant l'utilisation d'un bobinage et d'une piste conductrice afin de rassembler les avantages des deux techniques.

Potentiomètres angulaires :

La plupart des potentiomètres angulaires ont une étendue de mesure inférieure ou égale à 360° . Ces potentiomètres un tour peuvent voir le déplacement de leur curseur limité ou non par des butées mécaniques.

Il existe des potentiomètres multi-tours (en général 10 tours) dont le mouvement de l'axe dépasse 360° .

Cette augmentation de l'étendue de mesure peut être obtenue par l'introduction d'un réducteur mécanique entre l'axe de commande et le mouvement du curseur ou par une construction particulière du potentiomètre où le curseur se déplace le long d'une résistance à géométrie hélicoïdale (vrai potentiomètre multi-tours).

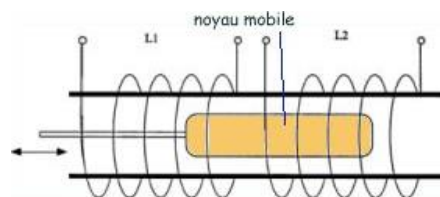


Capteurs à inductance variable

Les capteurs à inductance variable permettent de mesurer des déplacements linéaires et angulaires par une modification de la géométrie de leurs conducteurs ou de leur circuit magnétique. Un capteur de position linéaire peut être constitué d'une bobine à l'intérieur de laquelle se déplace un noyau ferromagnétique.

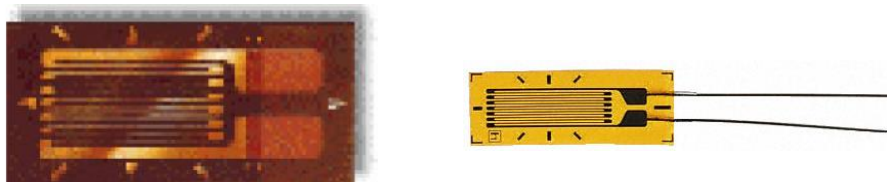
Le circuit magnétique peut se réduire à ce noyau ou comprendre un circuit de fermeture cylindrique entourant la bobine.

L'inductance de celle-ci est maximale lorsque le noyau magnétique occupe une position centrale ($x=0$). La sensibilité du capteur est nulle à cet endroit. Pour cette raison et compte tenu de l'ambiguïté des mesures autour de l'origine, cette zone doit être exclue de l'étendue de mesure x_u .



Capteurs à résistance variable par déformation (Jauges d'extensométrie)

Les jauges de déformation (ou jauges extensométriques usuellement appelées jauges de contraintes), furent inventées pour mesurer les déformations des structures en vue d'évaluer l'état de contraintes.



Il s'agit de petits circuits électriques très fins qui, collés sur les pièces à étudier, en subissent les déformations, ce qui entraîne une variation de leur résistance électrique. Les mesures électriques peuvent être très précises et très sensibles puisque l'on atteint facilement des déformations de l'ordre du micromètre.

La fidélité des jauges permet dès l'origine d'envisager leur usage pour fabriquer des capteurs. Avec les mêmes jauges et la même instrumentation en aval, il est possible d'imaginer de nombreux types de capteurs.

Les jauges sont très souvent à trames métalliques mais peuvent être aussi du type semi-conducteur en silicium. Ces dernières donnent un signal plus élevé et offrent la possibilité d'un très faible encombrement (capteurs intégrés). Cependant, les jauges à semi-conducteur ont l'inconvénient d'être sensibles à la température ; cette sensibilité peut être compensée par un microprocesseur (mise en mémoire des courbes résistance/température). L'avantage des jauges métalliques est que, leurs caractéristiques dépendant de nombreux paramètres liés aux diverses variétés d'alliages, elles peuvent être mieux adaptées aux différents cas d'espèces.

Les jauges métalliques restent les plus utilisées actuellement en extensométrie.

Principe :

La résistance d'un conducteur est donnée par la relation $R = \rho \cdot \frac{L}{S}$

Avec ρ la résistivité ($\Omega \cdot m$)

L la longueur du conducteur (m)

S la section du conducteur (m^2)

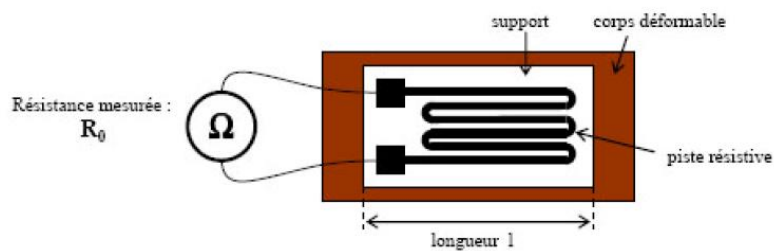
La déformation du conducteur (jauge d'extensométrie) modifie la longueur L entraînant une variation de la résistance R .

La relation générale pour les jauges est $\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta L}{L}$ où k est le facteur de jauge (constante).

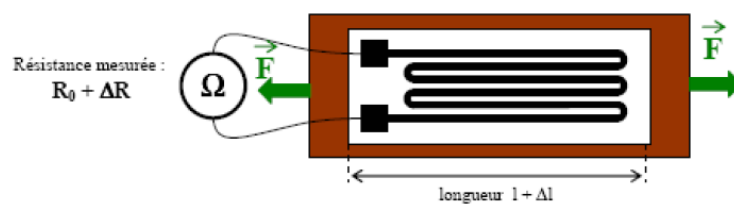
Fonctionnement d'une jauge simple :

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.

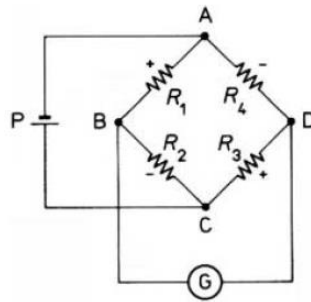
Corps au repos (pas d'allongement)



Corps ayant subi un étirement (effort de traction)



Remarque : Dans le cas d'une contraction, la résistance de la jauge serait $R_0 - \Delta R$.

Conditionneur de signal (pont de Wheatstone) :

Soit un circuit constitué par quatre résistances égales R_1 , R_2 , R_3 et R_4 montées en pont. Si nous l'alimentons par une source de courant P suivant la diagonale, nous avons à l'équilibre une tension nulle entre B et D . La variation de l'une des résistances fait apparaître une tension V_S entre B et D qui peut être mesurée par un instrument G . Pour de très faibles variations de résistance (de l'ordre de quelques micro-ohms dans le cas des jauges), la tension de sortie V_S est pratiquement proportionnelle aux variations relatives de résistance $\frac{\Delta R}{R}$ de chacune des jauges. Négligeant les termes d'ordre supérieur, elle vaut :

$$V_S = \frac{V_e}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

Avec V_e : force électromotrice de la source

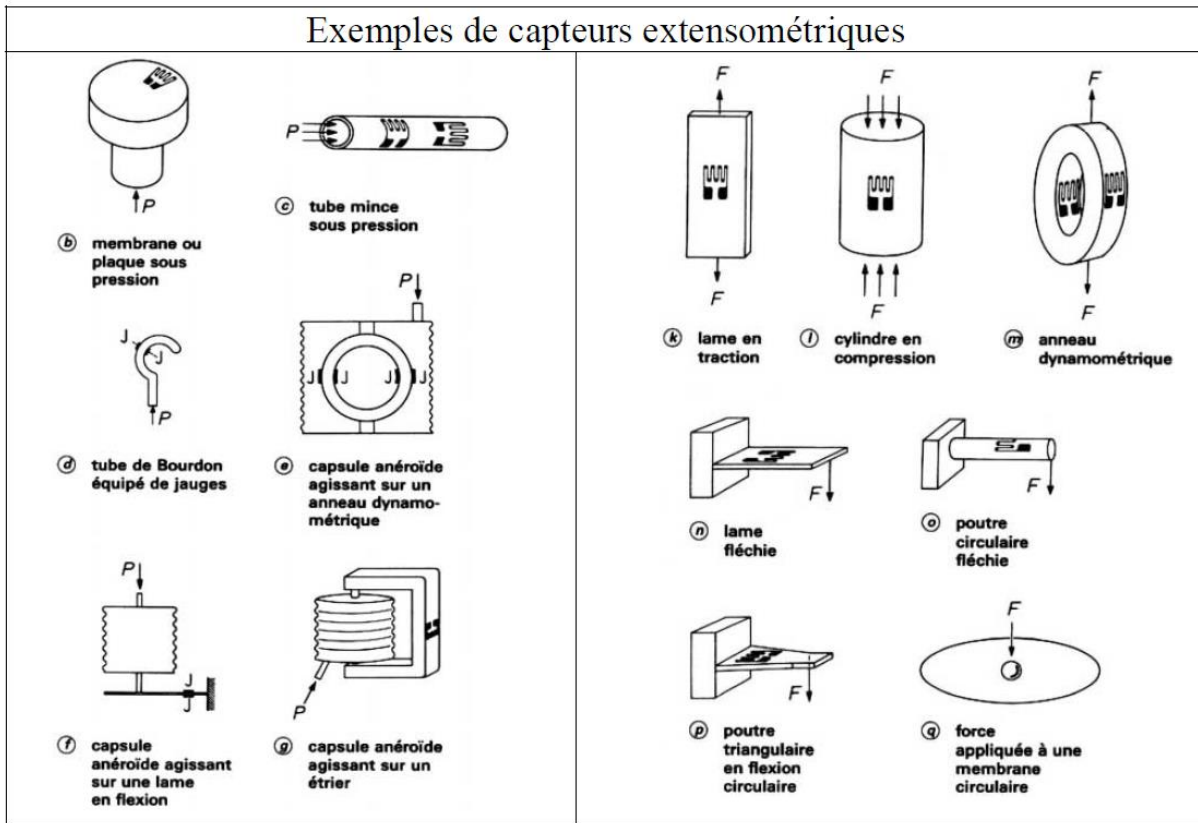
Un capteur est constitué par un tel pont dont une, deux ou quatre des résistances sont des jauges électriques collées sur le corps d'épreuve, les autres étant des résistances fixes. Le cas le plus fréquent est celui de **quatre jauges**.

La tension de sortie V_S peut être exploitée de différentes manières :

- On peut la mesurer directement à l'aide d'un millivoltmètre
- On peut la comparer, par méthode d'opposition, à une tension de référence
- On peut l'utiliser comme indication de déséquilibre pour rétablir la symétrie par variation de potentiomètres montés en parallèle sur les jauges

Remarque :

Lorsque l'on colle les jauges sur un corps d'épreuve (matériau déformable et de raideur connue), la mesure de la tension V_S est alors une image de la force qui déforme ce corps d'épreuve. On obtient ainsi un capteur de force, de pression, de couple, ...



Disposition des jauges :

Des capteurs d'aspect semblable ont des applications différentes suivant la disposition des jauges, dans le pont de Wheatstone. Ainsi, le cylindre de la figure ci-dessous est équipé de 4 jauges, 2 longitudinales et 2 transversales. Suivant le câblage de ces jauges dans le pont, nous avons soit un capteur de pesée (Figure 1-b), soit un capteur indiquant l'excentrement du centre de gravité d'une masse placée sur ce cylindre (Figure 1-c).

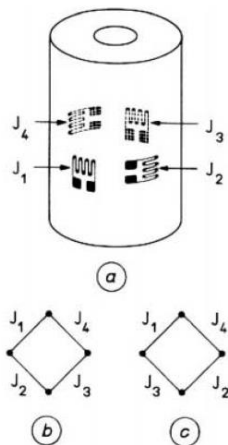


Figure n°1

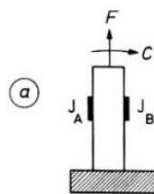


Figure n°2

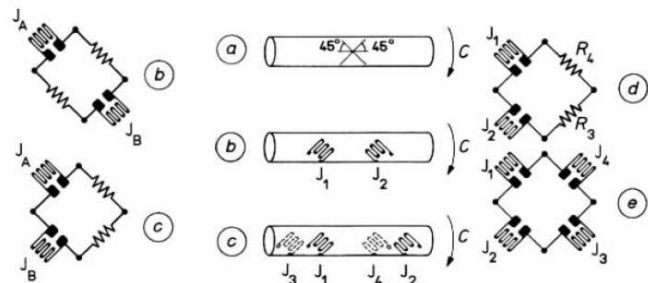


Figure n°3

Autre exemple, une poutre ou une lame de section symétrique soumise à une flexion pure subit des déformations égales et de signes contraires en des points symétriques par rapport à la ligne neutre. Ainsi, les deux jauges JA et JB de la figure 2 subissent, sous l'effet du couple C de flexion pure,

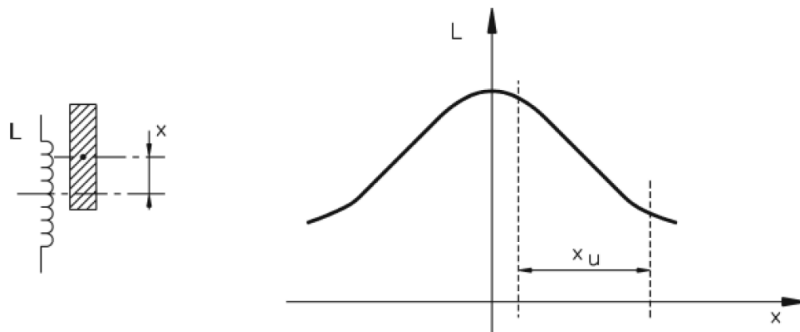
des déformations égales et de signes contraires, alors que, sous l'action d'une traction pure F , elles subissent des déformations égales et de mêmes signes.

En les groupant suivant la figure 2-b, on obtient F à l'exclusion de C , et avec le montage de la figure 2-c, on mesure C à l'exclusion de F .

Un arbre circulaire (figure 3) soumis à un couple C de torsion pure subit ses déformations maximales suivant les directions situées à 45° de la direction des génératrices (figure 3-a). Ces déformations sont égales et de signes contraires. Deux jauges J_1 et J_2 (figure 3-b) placées sur la même génératrice, collées perpendiculairement l'une à l'autre à $\pm 45^\circ$ de l'axe et câblées comme en figure 3-d, donneront une information liée au couple de torsion. Ce montage est cependant sensible à certaines flexions.



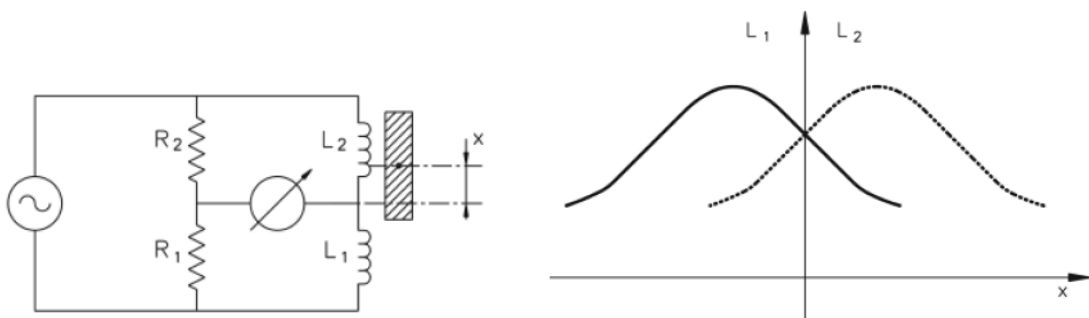
Capteur à diviseur inductif



Afin de pouvoir utiliser le capteur inductif autour de l'origine, on utilise le diviseur inductif constitué de deux bobines analogues à la précédente.

Lorsque le noyau magnétique occupe une position centrale ($x=0$), les deux inductances sont égales et forment avec un diviseur résistif ($R_1=R_2$) un pont équilibré.

Tout déplacement du noyau à partir de cette position entraîne l'augmentation d'une inductance et la diminution de l'autre et fait apparaître un déséquilibre dont le signe indique le sens du déplacement.



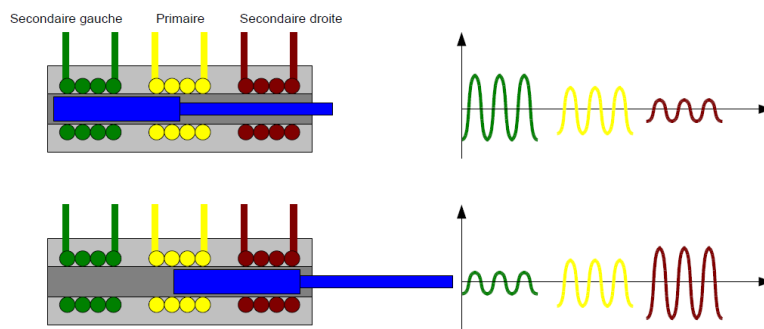
Transformateur Différentiel Linéaire (LVDT)

Le capteur de déplacement le plus utilisé est le transformateur différentiel fréquemment désigné par ses initiales en anglais LVDT (Linear Variable Differential Transformer).

C'est un transformateur comprenant un enroulement primaire et deux enroulements secondaires, symétriques par rapport au primaire.

Le couplage magnétique entre primaire et secondaire est assuré notamment par le noyau ferromagnétique mobile dont on mesure la position.

L'enroulement primaire est alimenté par une tension sinusoïdale $e_1 = E_1 \cdot \cos(\omega \cdot t)$ et les enroulements secondaires sont reliés en opposition de façon à ce que les forces électromagnétiques qui y sont induites se soustraient.



$$e_2 = M_{12} \cdot \frac{di_1}{dt} \qquad e_{2'} = M_{12'} \cdot \frac{di_1}{dt} \qquad V_{mes} = e_2 - e_{2'} = (M_{12} - M_{12'}) \cdot \frac{di_1}{dt}$$

e_2 = force électromagnétique induite dans l'enroulement secondaire 2.

$e_{2'}$ = force électromagnétique induite dans l'enroulement secondaire 2'.

M_{12} = coefficient d'induction mutuelle entre les enroulements 1 et 2.

$M_{12'}$ = coefficient d'induction mutuelle entre les enroulements 1 et 2'.

V_{mes} = tension aux bornes des deux enroulements secondaires connectés en série.

La variation de ces coefficients en sens contraire en fonction de x entraîne une bonne compensation des non linéarités autour de $x = 0$.

En effet, si l'on a :

$$M_{12}(x) = M(0) + a \cdot x + b \cdot x^2 + \dots \qquad \text{et par symétrie } M_{12'}(x) = M(0) - a \cdot x + b \cdot x^2 + \dots$$

$$\text{Alors } M_{12} - M_{12'} = 2 \cdot a \cdot x \qquad \text{Et } V_{mes} = 2 \cdot a \cdot x \cdot \frac{di_1}{dt}$$

La tension de sortie V_{mes} varie donc linéairement en fonction de x de part et d'autre de la position origine $x = 0$.

Le capteur à transformateur différentiel est remarquable pour ses qualités de linéarité et de résolution. De plus, il supporte des environnements hostiles : haute température (600 °C) ou basse température (-250 °C), haute pression (200 bars), radioactivité élevée, milieu corrosif.

Capteurs capacitifs

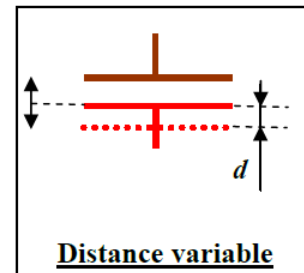
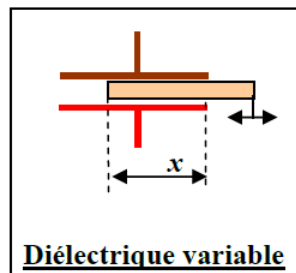
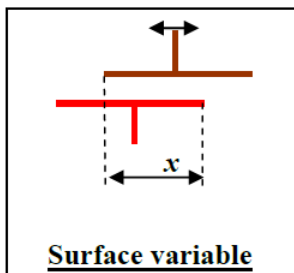
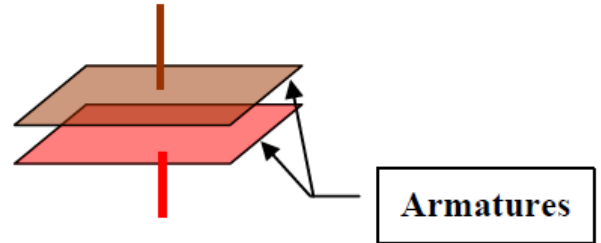
Il s'agit soit de condensateurs plans, soit de condensateurs cylindriques.

Pour un condensateur plan : $C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d}$

Où S = surface des armatures

d = distance entre armatures

ε = permittivité du milieu entre les armatures



Un changement de capacité peut être induit par :

- La variation de permittivité du milieu entre les armatures. La variation de permittivité peut être due à une variation de niveau d'un liquide entre les armatures du condensateur et permet de mesurer ce niveau.
- La variation de distance entre les armatures, traduit des déplacements rectilignes. Le condensateur à écartement variable ne peut être utilisé que pour des étendues de mesure faibles (en général inférieures au mm). La capacité varie en fonction inverse de la distance.
- La variation de surface est réalisée dans un condensateur plan avec une armature coulissante ou dans un condensateur cylindrique dont une armature coulisse le long de l'axe. Le condensateur à surface variable a une étendue supérieure au cm.



Remarque : L'influence des capacités parasites des armatures du capteur avec les surfaces métalliques voisines de même que celle des câbles de liaison est importante. L'utilisation de circuits électroniques de conditionnement connectés directement au capteur permet de réduire ces influences.

Capteurs à sortie binaire

Les capteurs à sortie binaire représentent la forme la plus élémentaire d'un capteur digital puisque l'information de sortie se limite à une variable binaire ou bit.

Ces capteurs peuvent comprendre un dispositif intrinsèquement binaire, comme un interrupteur ouvert ou fermé. Les interrupteurs de fin de course, les commandes par bouton poussoirs font partie de cette catégorie.

Lors de leur fermeture, les interrupteurs mécaniques peuvent subir des rebonds entraînant des réouvertures transitoires du circuit. Lorsque ces interrupteurs sont utilisés pour produire les variables d'entrée d'un système logique, il peut être nécessaire de les munir d'un circuit auxiliaire pour éviter les effets de rebonds.

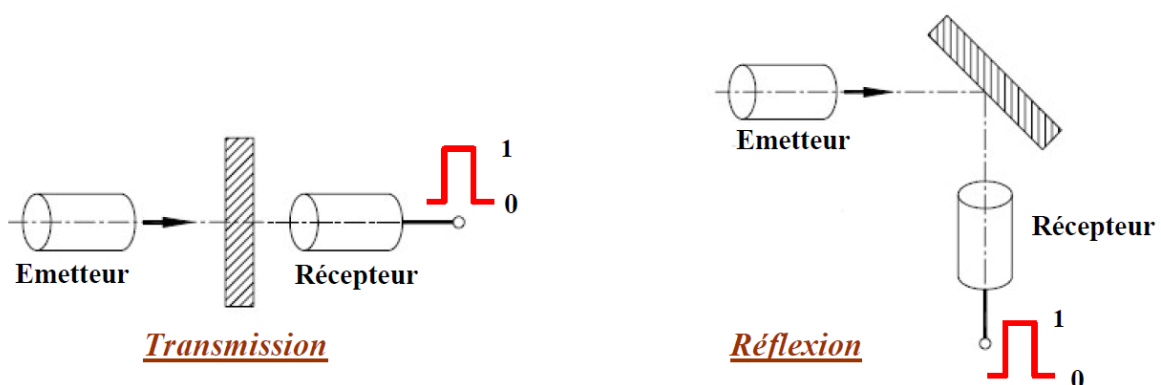
On réalise des capteurs de position à sortie binaire à l'aide de capteurs analogiques munis à leur sortie d'une bascule ou d'un circuit de conditionnement et d'une bascule. Ces capteurs sont souvent connus sous le nom de capteurs de proximité et existent sous forme de capteur inductif, capacitif, magnétique ou photoélectrique.



Capteurs photoélectriques :

Les capteurs photoélectriques sont souvent utilisés comme capteurs de position à sortie binaire. Ils comprennent généralement un émetteur de lumière (diode photoémissive ou diode laser) et un récepteur (photodiode ou phototransistor).

Ils sont conçus pour détecter la présence d'un objet sur le trajet lumineux allant de l'émetteur au récepteur par transmission ou par réflexion.



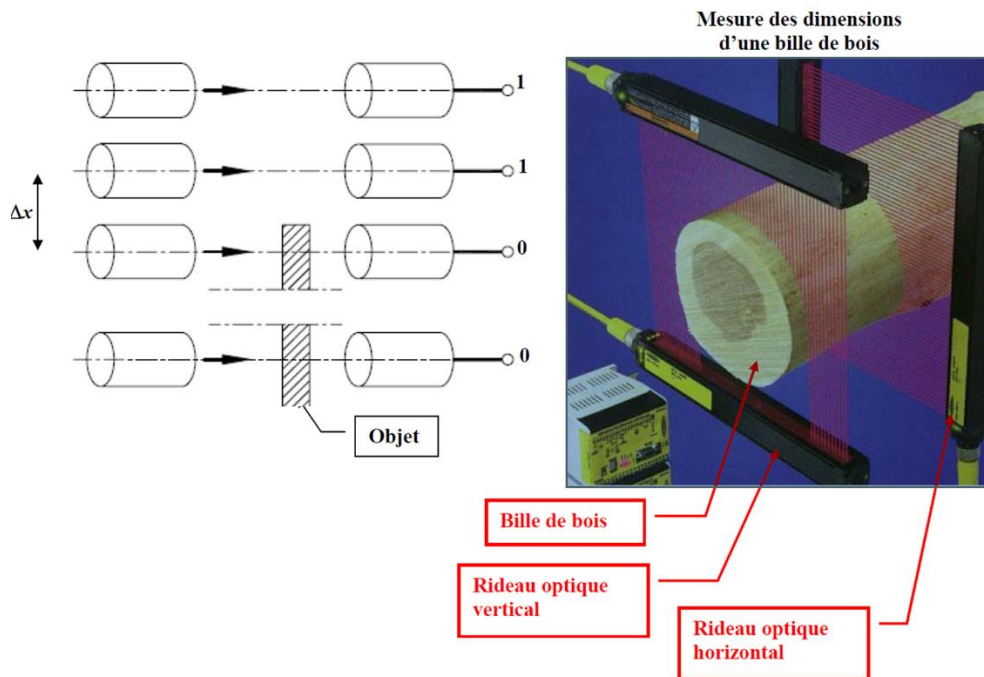
Exemples : Réalisation pratique de capteurs photoélectriques :

Rideau optique :



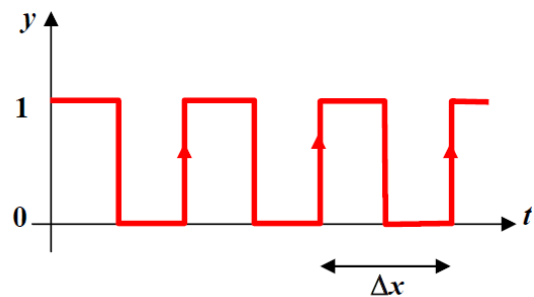
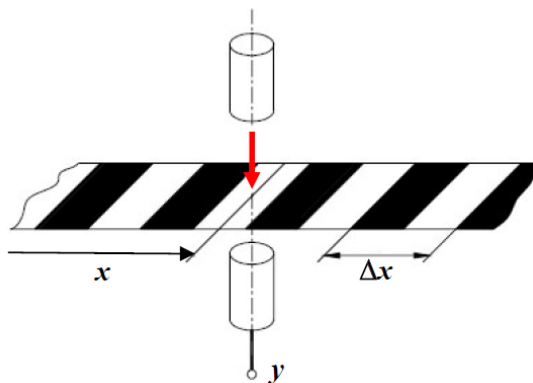
Un ensemble de capteurs photoélectriques à sortie binaire peut être utilisé sous forme d'un « rideau optique ».

Celui-ci permet non seulement de détecter la présence d'un objet mais aussi d'en mesurer une dimension avec une résolution Δx égale à la distance entre capteurs successifs.



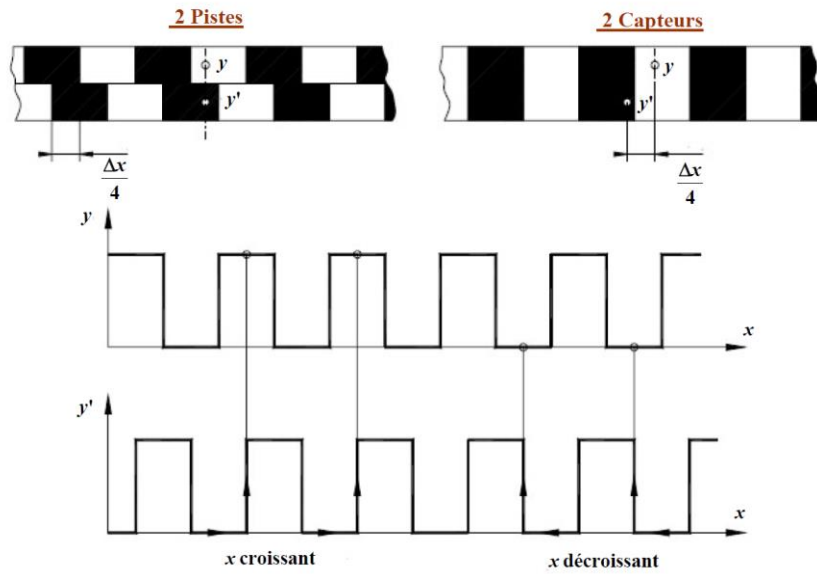
Principe du capteur incrémental :

Les capteurs de déplacement incrémentaux sont des capteurs de déplacement relatif. Leur fonctionnement est basé sur le déplacement de structures par rapport à des capteurs à sortie binaire. Ces structures, associées avec des capteurs appropriés, peuvent être une règle transparente, munie de plaques opaques, une pièce portant des bossages ferromagnétiques périodiques ou une plaque comportant des plages conductrices.

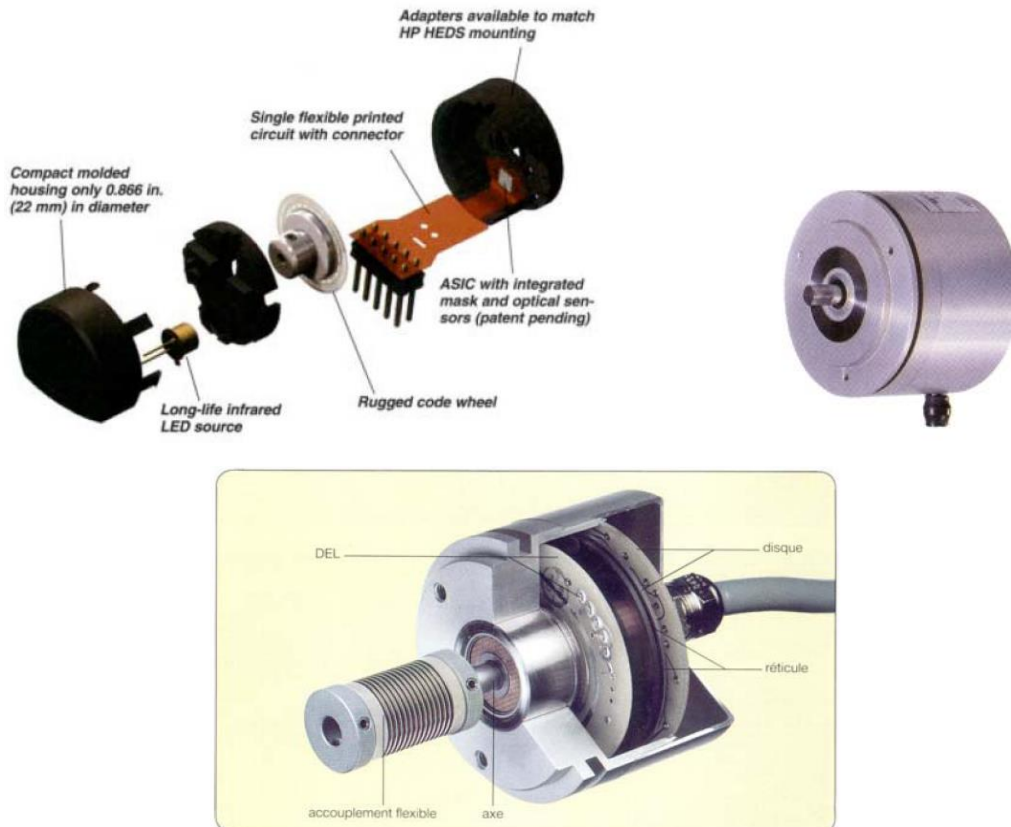


Lorsque le déplacement peut s'effectuer dans es deux sens de déplacement, les déplacements élémentaires doivent être additionnés ou soustraits suivant le sens.

La **détection du sens** du mouvement suppose le **doublment de la structure périodique** sous forme de deux structures **décalées d'un quart de période spatiale** ou le décalage de deux capteurs à sortie binaire.



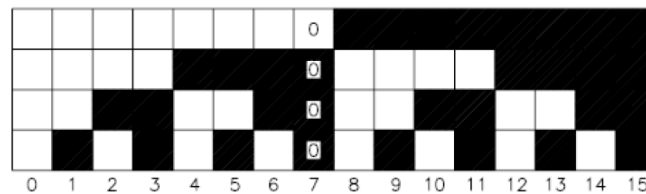
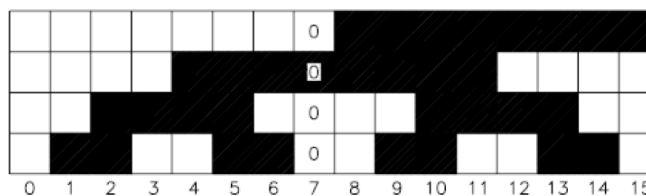
Capteur angulaire incrémental optique :



Capteurs codés :

Les capteurs codés fournissent à tout instant un ensemble de n variables binaires donnant par le code associé la position instantanée.

Ces capteurs sont pour les positions linéaires des règles, pour les positions angulaires des disques, qui sont divisés en n surfaces (bades pour les règles, secteurs pour les disques) qui matérialisent le mot binaire associé à la position à traduire, suivant un code et une technologie déterminés.

Code binaire naturel**Code Gray (binaire réfléchi)****Remarque : Lecture de faux codes :**

Un jeu de n bits permet de coder 2^n positions. On rencontre des capteurs de position linéaires ou angulaires codés sur 8, 12 et 16 bits.

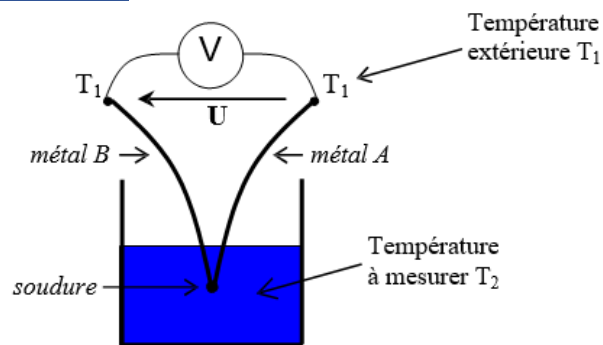
Le code binaire naturel se prête aisément aux opérations arithmétiques. Il présente l'inconvénient de conduire au **changement simultané** de plusieurs bits pour certaines variations d'une seule unité. Ainsi le passage de la position 7 (0111) à la position 8 (1000) produit 4 changements simultanés. Si les dispositifs de lecture ne sont pas parfaitement alignés, les changements de bits ne sont pas lus simultanément et il y a un risque d'erreur pendant la transition.

Ce risque d'erreur peut être évité de plusieurs manières :

- En utilisant un code dont un seul bit change lors du passage d'une position codée à la suivante (code à distance unité), comme le code Gray ou le code n parmi p .
- En conservant le code binaire naturel ou le code Gray mais en employant le signal fourni par une piste supplémentaire pour n'autoriser la lecture que dans des positions non ambiguës.
- En utilisant un système de double lecture par des capteurs décalés.

CAPTEURS DE TEMPERATURE

Thermomètre à thermocouple



On constate que si la température T_2 est différente de T_1 alors il apparaît une tension U aux bornes des deux fils soumis à la température T_1 .

Le phénomène inverse est également vrai : si on applique une tension, alors il y aura un échauffement ou refroidissement au point de liaison des deux conducteurs (modules à effet Peltier).

Application : Mesure des hautes températures ($900^\circ\text{C} \rightarrow 1300^\circ\text{C}$)

Thermistance

Une thermistance est un composant dont la résistance varie en fonction de la température. En première approximation, la relation entre résistance et température est la suivante :

$$R_\theta = R_0 \cdot (1 + a \cdot \theta)$$

Avec R_θ la résistance à la température θ

R_0 la résistance à la température 0°C

a le coefficient de température

Utilisation :

On insère la thermistance dans un pont de jauge. On obtient ainsi une tension V en sortie du pont

$$V = k(\theta - \theta_0)$$

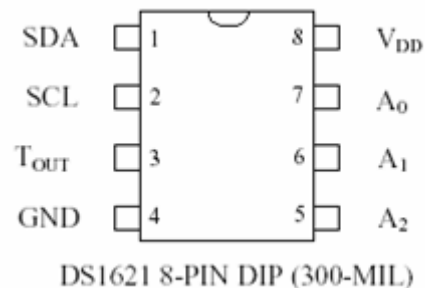
Si on prend $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$, on obtient $V = k \cdot \theta$

On peut aussi alimenter la thermistance avec un générateur de courant. La tension à ses bornes sera donc proportionnelle à la résistance.

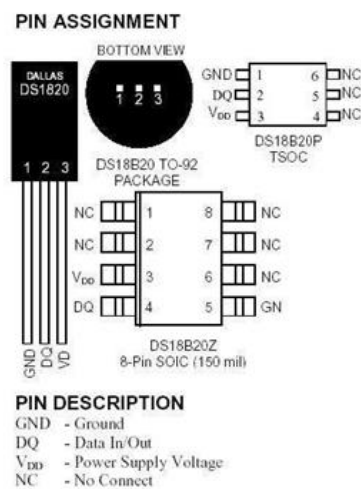
Capteurs à sortie numérique directe

On trouve actuellement sur le marché, des capteurs de température à sortie numérique directe de type série. Il s'agit notamment des capteurs DALLAS.

Ce capteur DS1621 peut mesurer une température variant de -55°C à 125°C avec une précision de $0,5^{\circ}\text{C}$. Pour transmettre la mesure (9 bits), il utilise la norme I2C qui consiste à transmettre en série les bits de mesure sur la ligne SDA en synchronisation avec la ligne SCL (horloge).



Ce capteur DS1820 peut mesurer une température variant de -55°C à 125°C avec une précision maximale de $0,125^{\circ}\text{C}$.

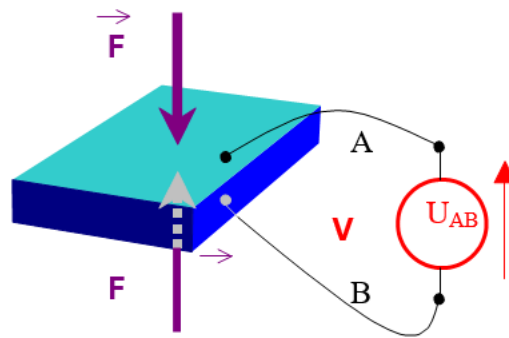


Pour transmettre la mesure (résolution réglable de 9 à 12 bits), il utilise la norme 1-wire qui consiste à transmettre en série sur un seul fil, le résultat de la mesure.

LES CAPTEURS DE FORCE, DE PRESSION, DE DEFORMATION

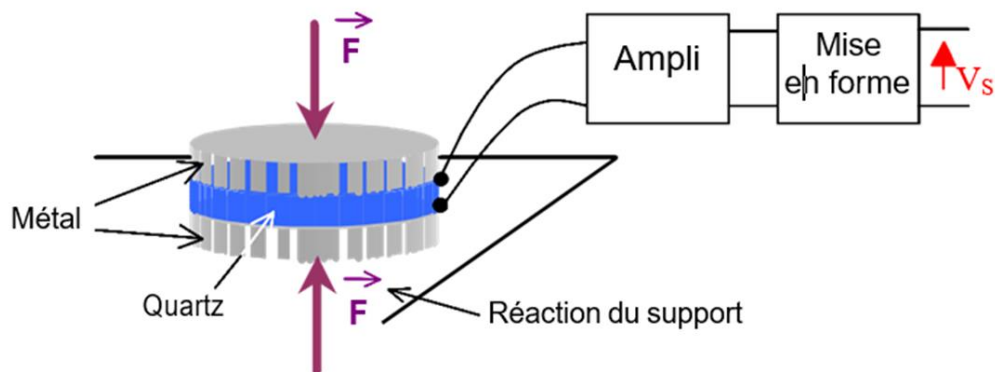
Capteur à effet piézoélectrique

Une force appliquée à une lame de quartz induit une déformation qui donne naissance à une tension électrique.



Capteur de force

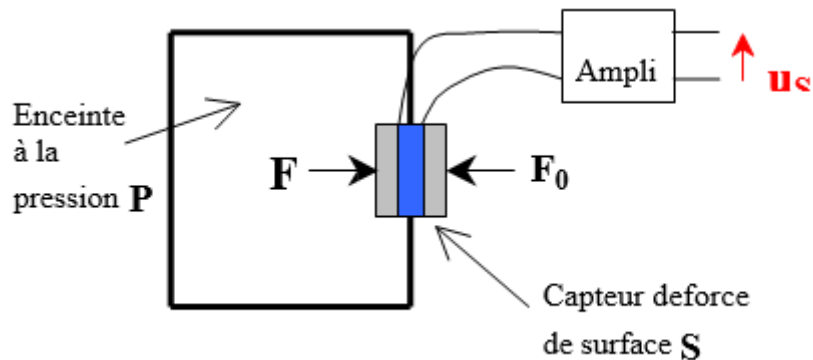
La tension V_S de sortie sera proportionnelle à la force F : $V_S = k \cdot (F + F) = 2k \cdot F$ avec k constante.



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 :

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).



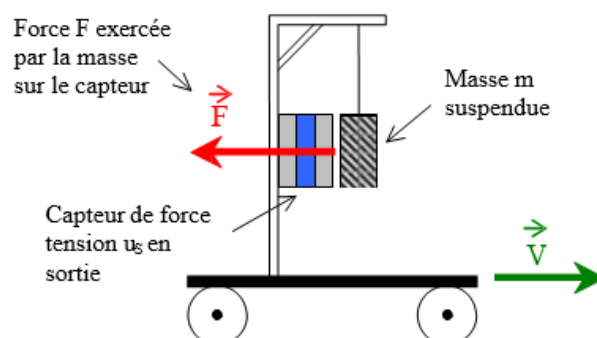
$$\text{On a } F = P \cdot S \quad F_0 = P_0 \cdot S$$

$$\text{Et } u_s = k \cdot (F + F_0) \text{ (capteur de force, } k = \text{constante).}$$

$$\text{Donc } u_s = k \cdot S \cdot (P + P_0) = k' \cdot (P + P_0)$$

$$\rightarrow u_s = k' \cdot (P + P_0)$$

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 .

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.

$$\text{On a donc : } F = m \cdot a \text{ mais } u_s = 2k \cdot F \text{ donc } u_s = 2k \cdot m \cdot a$$

Récepteur à ultrason

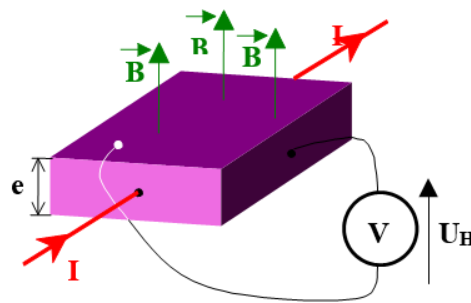
La réception d'un son engendre une variation de pression à la surface du récepteur.

Un capteur de pression sur cette surface donnera donc une tension image du signal ultrasonore.

Capteur à effet Hall

L'effet Hall :

Un barreau de semi-conducteur soumis à un champ magnétique uniforme B et traversé par un courant I , est le siège d'une force électromotrice U_H sur deux de ses faces.



La tension de Hall U_H est définie par la relation ci-dessous :

$$U_H = R_H \cdot \frac{I \cdot B}{e}$$

Avec :

R_H : Constante de Hall (fonction du semi-conducteur)

I : Intensité de la source de courant (A)

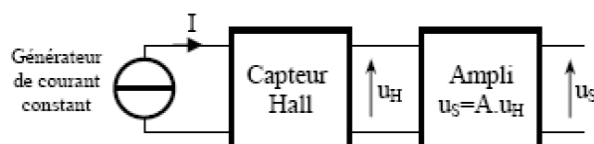
B : Intensité du champ magnétique (T)

E : Epaisseur du barreau de silicium

Si on maintient le **courant I constant**, on a donc une tension U_H **proportionnelle au champ magnétique B** : $U_H = k \cdot B$ avec k constante égale à $R_H \cdot \frac{I}{e}$.

Capteurs de champ magnétique :

La structure typique d'un capteur de champ magnétique est la suivante :



La sensibilité de ce capteur pourra être ajusté en agissant sur I et sur le gain A de l'ampli.

Application : Capteur angulaire dans les gyromètres mécaniques

Capteurs à effet photoélectrique

L'effet photoélectrique :

Un semi-conducteur est un matériau pauvre en porteurs de charges électriques (isolant). Lorsqu'un photon d'énergie suffisante excite un atome du matériau, celui-ci libère plus facilement un électron qui participera à la conduction.

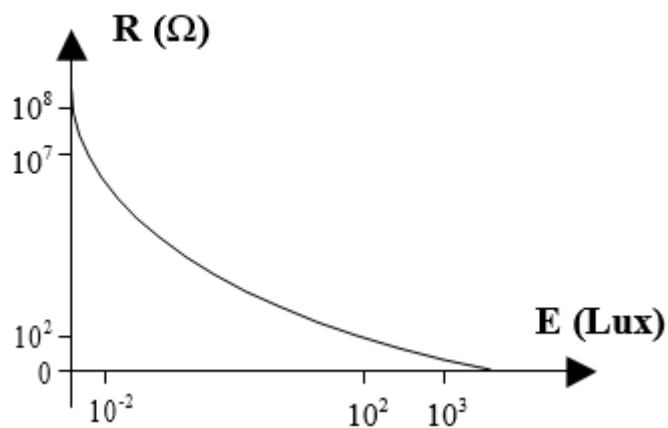
Les photorésistances :

Une photorésistance est une résistance dont la valeur varie en fonction du flux lumineux qu'elle reçoit.

Exemple :

Obscurité	→	$R_0 = 20 \text{ M}\Omega$ (0 lux)
Lumière naturelle	→	$R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ (500 lux)
Lumière intense	→	$R_2 = 100 \Omega$ (10000 lux).

Courbe :



Avantages : Bonne sensibilité / Faible coût et robustesse

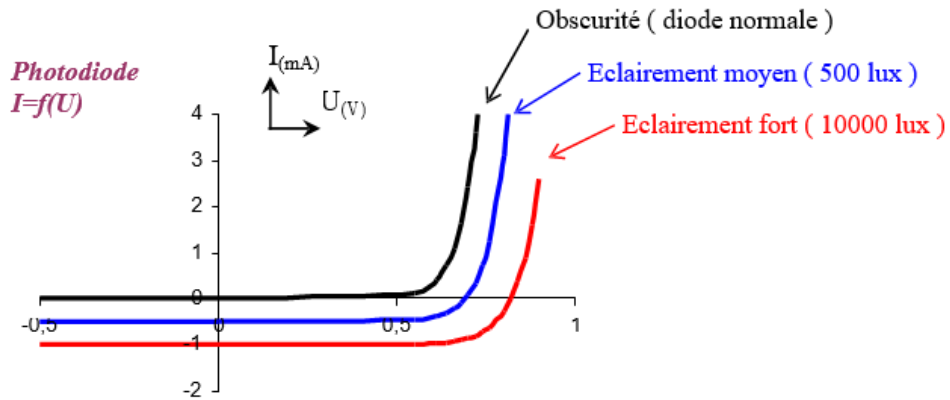
Inconvénients : Temps de réponse élevé / Bande passante étroite / Sensible à la chaleur

Utilisation : Détection des changements obscurité/lumière (éclairage public)

Les photodiodes :

Une photodiode est une diode dont la jonction PN peut être soumise à un éclairage lumineux.

Le graphe $I=f(U)$ pour une photodiode dépend de l'éclairement (Lux) de la jonction PN.



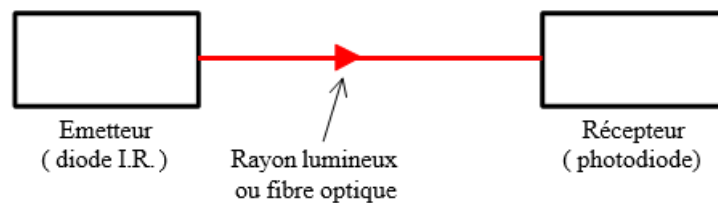
On constate que lorsque la diode est éclairée, elle peut se comporter en générateur ($I=0 \rightarrow U \approx 0,7V$ pour 1000 Lux). On a donc une photopile (effet photovoltaïque).

Avantages : Bonne sensibilité / Faible temps de réponse (bande passante élevée)

Inconvénients : Coût plus élevé qu'une photorésistance / Nécessite un circuit de polarisation précis

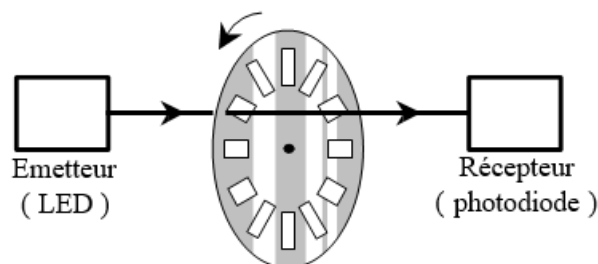
Utilisations :

Transmissions de données



Télécommande IR / Transmission de données par fibre optique / Détection de passage

Roue codeuse



Mesures d'angle et de vitesse / Comptage d'impulsions