

CAPTEURS ET INSTRUMENTATION



1

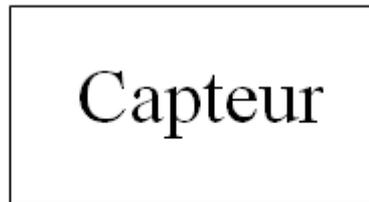
Généralités sur les Capteurs

1-Définitions et caractéristiques générales

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.

Grandeur physique
d'entrée ———
le mesurande m
ou excitation



Grandeur électrique
de sortie
la réponse s

$$s = f(m)$$

**La mesure de s doit permettre de connaître la valeur de m .
Pour faciliter l'exploitation de la réponse, on s'efforce de réaliser des capteurs dont la relation $s=f(m)$ est linéaire. Dans ce cas s et m sont proportionnels.**

2-Mode de fonctionnement des capteurs

Les capteurs fonctionnent selon deux principes de base suivant l'origine du signal électrique de sortie . On distingue : les capteurs actifs et, les capteurs passifs.

a) Capteurs actifs

Une partie de l'énergie physique prélevée sur la mesurande est transformée directement en une énergie électrique qui constitue le signal de sortie. Ce signal est un **courant**, une **tension** ou une **quantité d'électricité**.

b) Capteurs passifs

C'est l'**impédance** du capteur qui est sensible aux variations du mesurande. Ces variations d'impédance ne sont mesurables que par l'intermédiaire d'un circuit électronique de pré-conditionnement. Les capteurs passifs doivent être alimentés par une source d'énergie extérieure. Cette source peut être une tension continue ou modulée en fréquence .

2-Mode de fonctionnement des capteurs

a) Capteurs actifs

Une partie de l'énergie physique prélevée sur la mesurande est transformée directement en une énergie électrique qui constitue le signal de sortie. Ce signal est un **courant**, une **tension** ou une **quantité d'électricité**.

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux lumineux	Photoémission Effet photovoltaïque	Courant Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

2-Mode de fonctionnement des capteurs

b) Capteurs passifs

C'est **l'impédance** du capteur qui est sensible aux variations du mesurande.

Mesurande	Caractéristique électrique sensible	Types de matériaux utilisés
Température Très basse température	Résistivité Constante diélectrique	Métaux : platine, nickel, cuivre. Semi-conducteurs. Verres.
Flux lumineux	Résistivité	Semi-conducteurs.
Déformation	Résistivité Perméabilité magnétique	Alliages de nickel, silicium dopé. Alliage ferromagnétique.
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnétorésistants : bismuth, antimoniure d'indium.
Humidité	Résistivité Constante diélectrique	Chlorure de lithium. Alumine ; polymères.

3- Chaîne de mesure

C'est l'ensemble des traitements du signal issu du capteur qui va permettre l'interprétation ou l'affichage correct du mesurande. On parle aussi de conditionnement du signal.

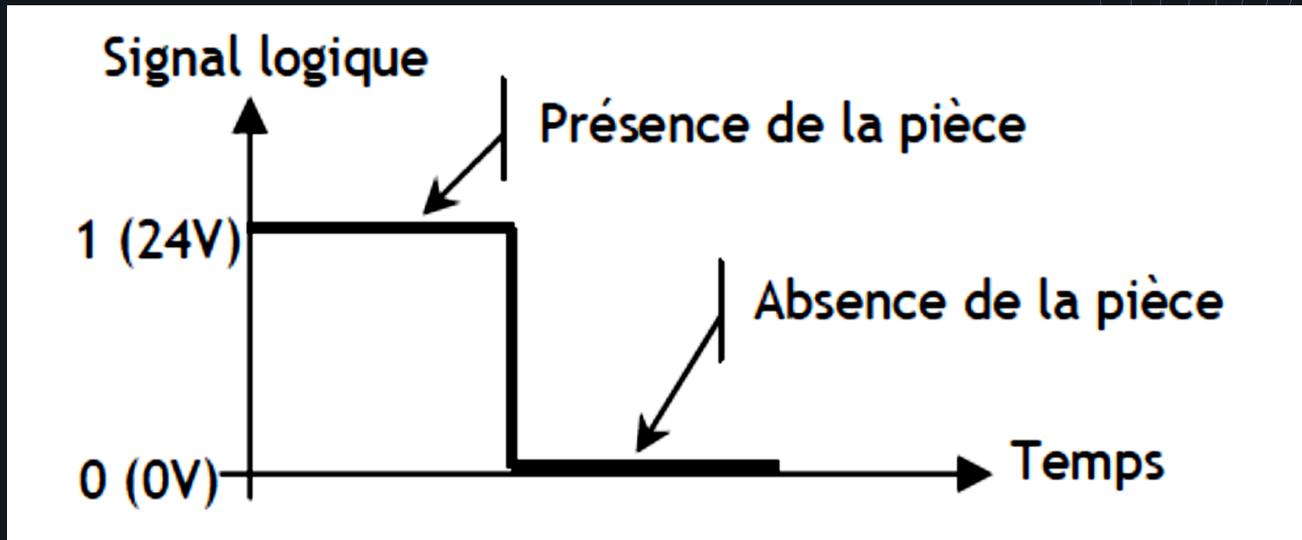


Chaîne de mesure simple

3- Nature du signal de sortie

a) Logique :

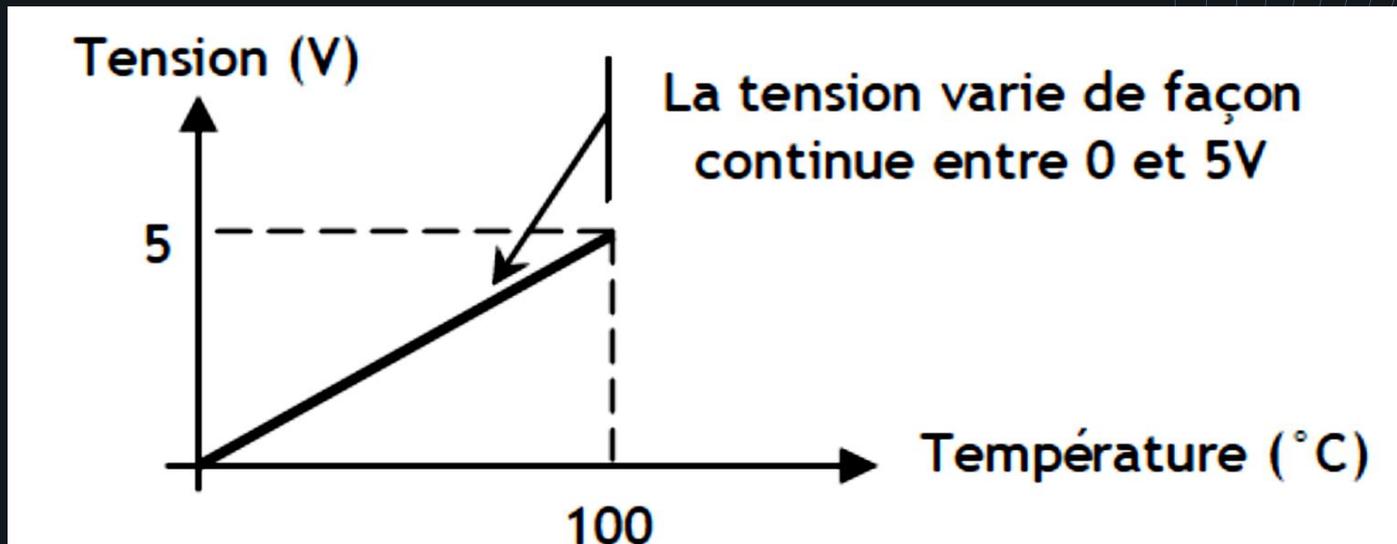
L'information ne peut prendre que les valeurs 1 ou 0 ; on parle alors d'un capteur Tout ou Rien (TOR). La figure ci-contre montre la caractéristique d'un capteur de position.



3- Nature du signal de sortie

b) Analogique :

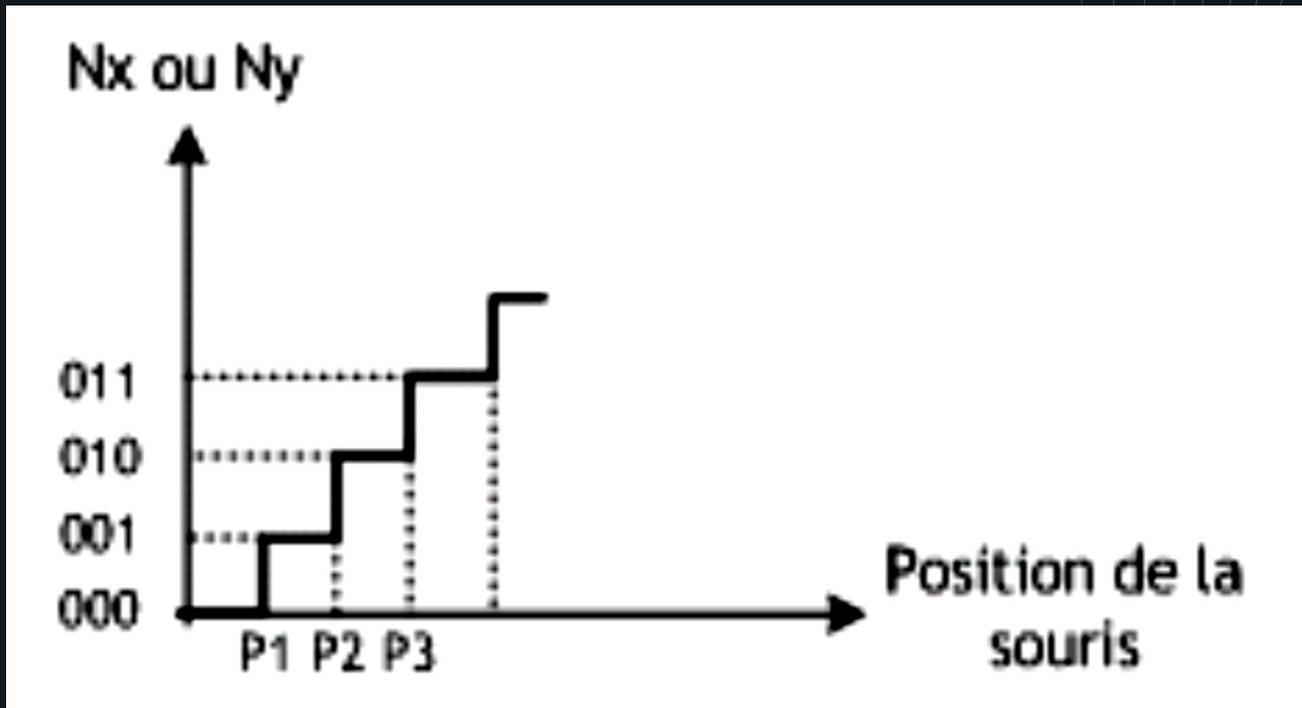
L'information peut prendre toutes les valeurs possibles entre 2 certaines valeurs limites ; on parle alors d'un capteur analogique. La figure ci-contre montre la caractéristique d'un capteur de température.



3- Nature du signal de sortie

c) Numérique :

L'information fournie par le capteur permet à la PC d'en déduire un nombre binaire sur n bits ; on parle alors d'un capteur numérique. La figure par contre illustre le principe de fonctionnement de la souris



2

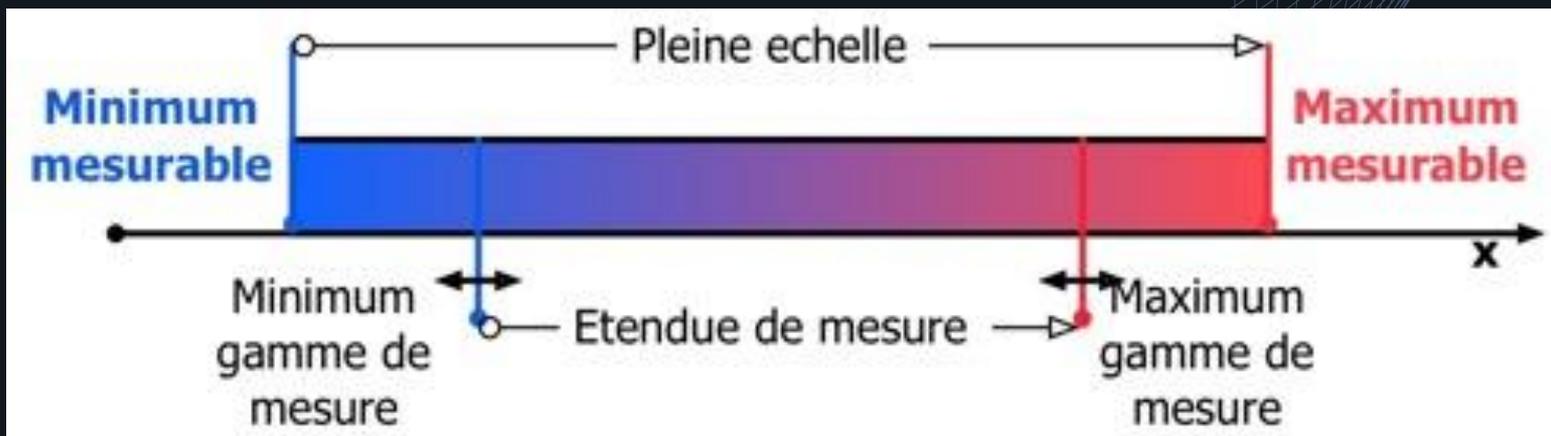
Caractéristiques métrologiques d'un capteur

Caractéristiques métrologiques d'un capteur

Les liens entre un capteur et la grandeur qu'il mesure sont définis par ses caractéristiques d'emploi.

1. Etendue de mesure

Domaine de mesure pour lequel les indications du capteur ne doivent pas être entachées d'une erreur supérieure à l'erreur maximale tolérée. On appelle les valeurs limites du domaine, « portée minimale » et « portée maximale ».



Caractéristiques métrologiques d'un capteur

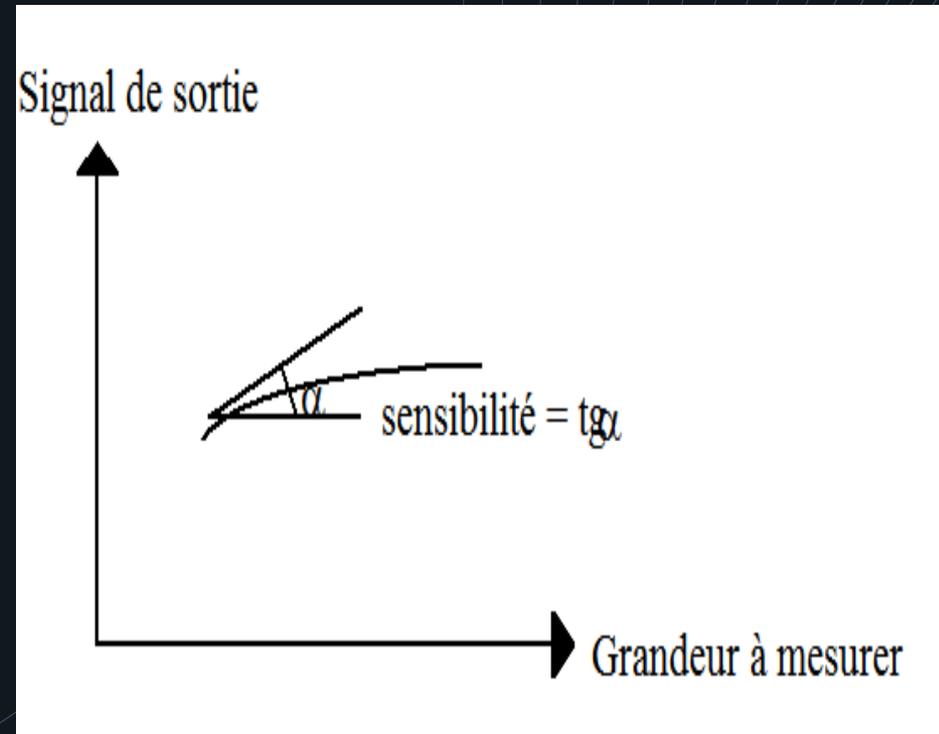
2. Sensibilité

C'est le rapport de la variation du signal de sortie à la variation correspondante de la grandeur à mesurer. C'est à dire à la pente de la courbe de réponse du capteur pour une valeur donnée :

$$S = ds/de$$

ds : variation de sortie

de : variation de l'entrée

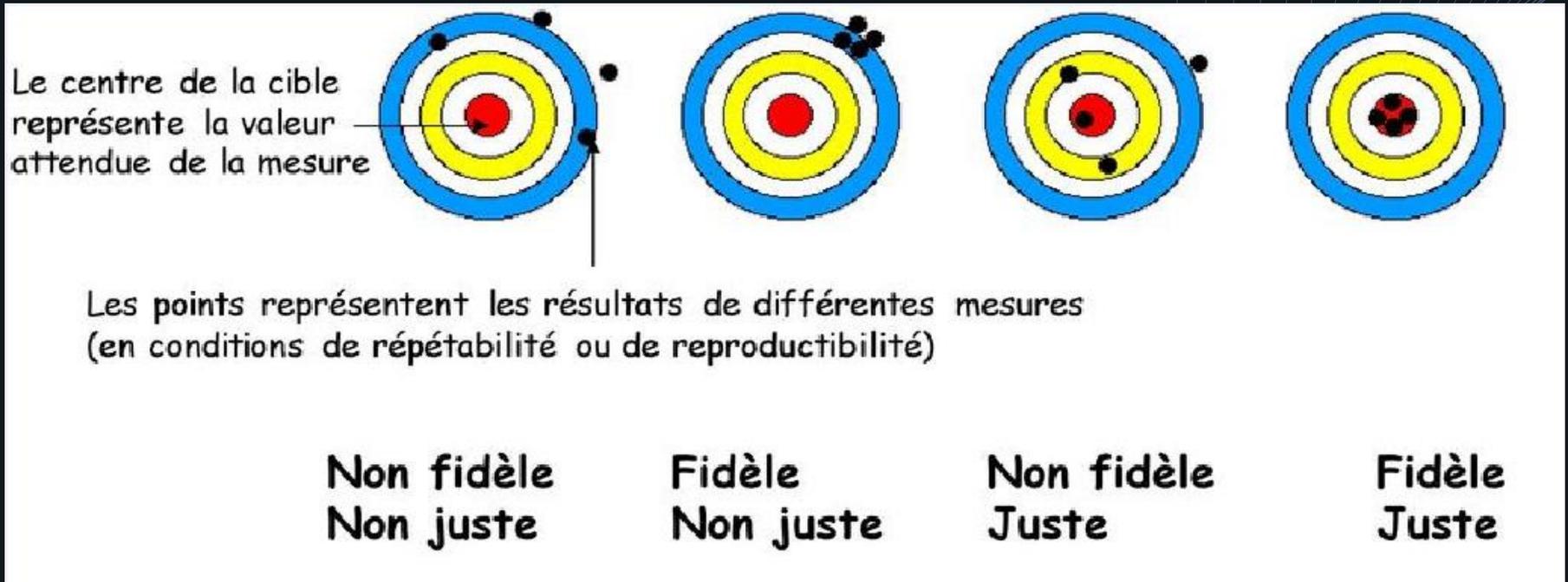


Caractéristiques métrologiques d'un capteur

4. Fidélité et justesse

La justesse est la qualité d'un capteur à fournir des indications précises.

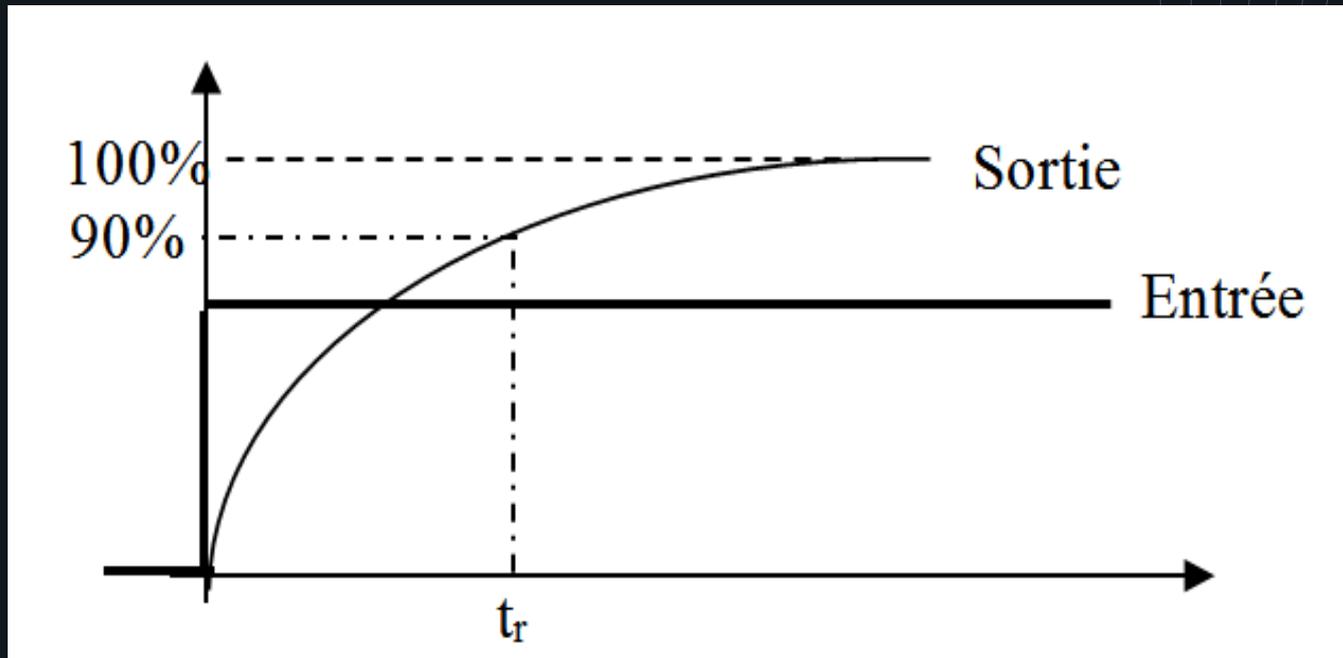
La fidélité est la qualité d'un capteur à fournir des indications identiques pour une même valeur de la grandeur à mesurer.



Caractéristiques métrologiques d'un capteur

5. Rapidité

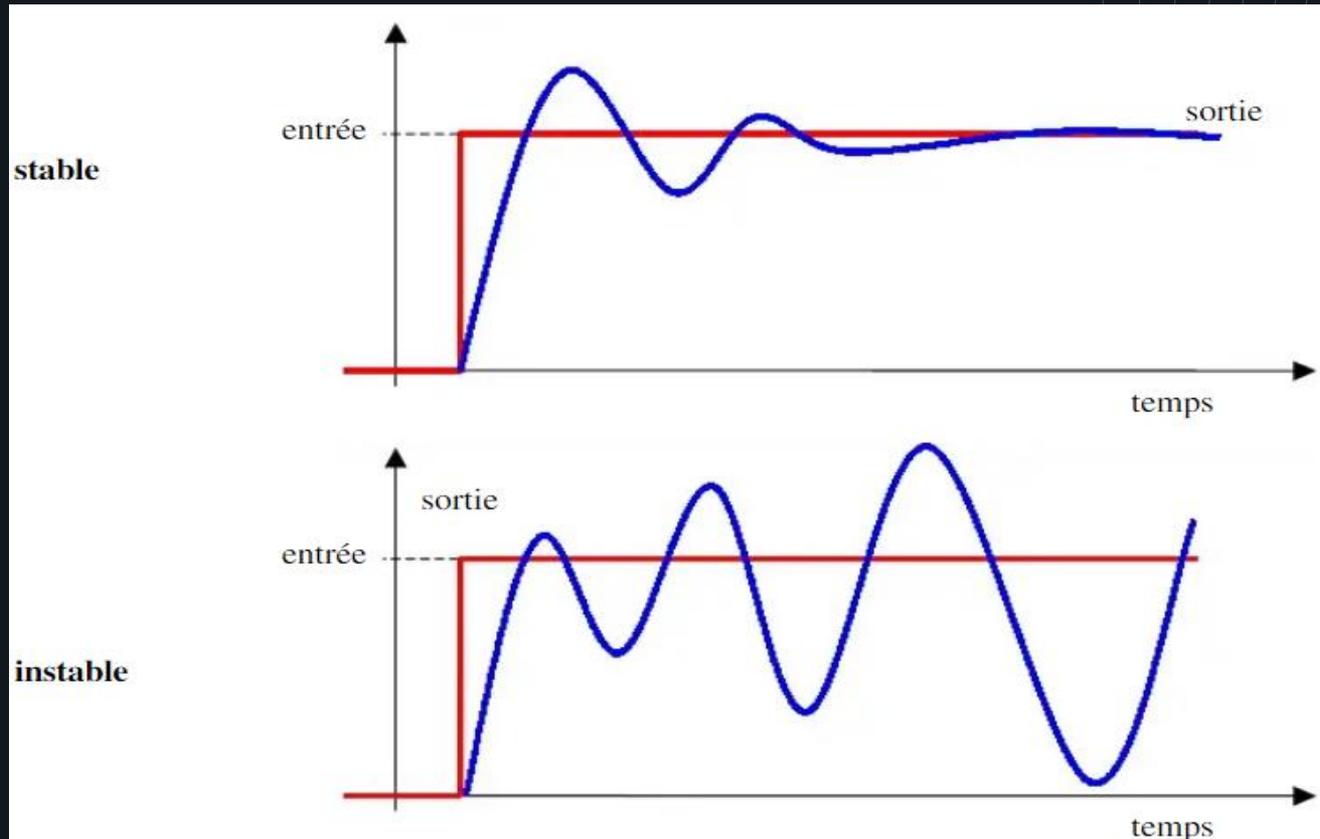
C'est l'aptitude du capteur à suivre dans le temps les variations de la grandeur à mesurer . Il faut donc tenir compte du temps de réponse, de la bande passante et la fréquence de coupure du capteur .



Caractéristiques métrologiques d'un capteur

6. Stabilité

La stabilité qualifie la capacité d'un capteur à conserver ses performances pendant une longue durée (problème de dérive du zéro par exemple).



Caractéristiques métrologiques d'un capteur

7. Répétabilité et Reproductibilité

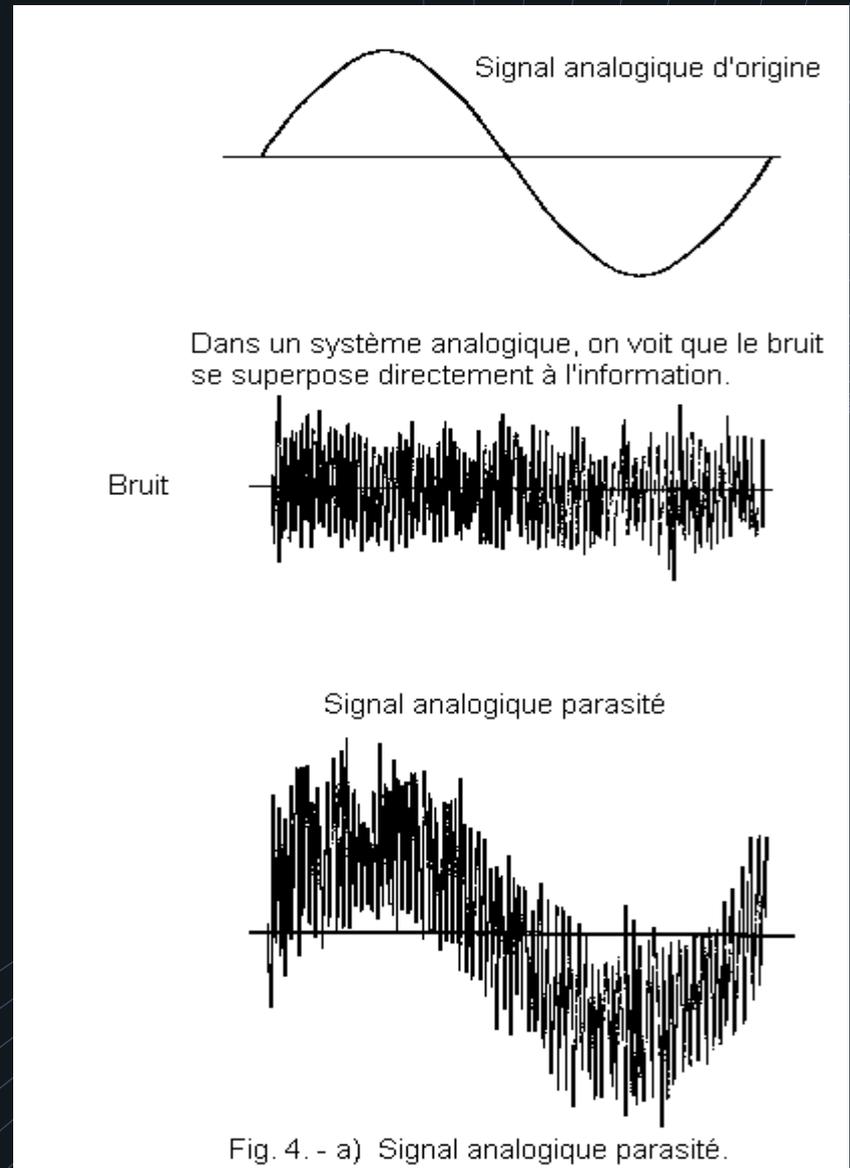
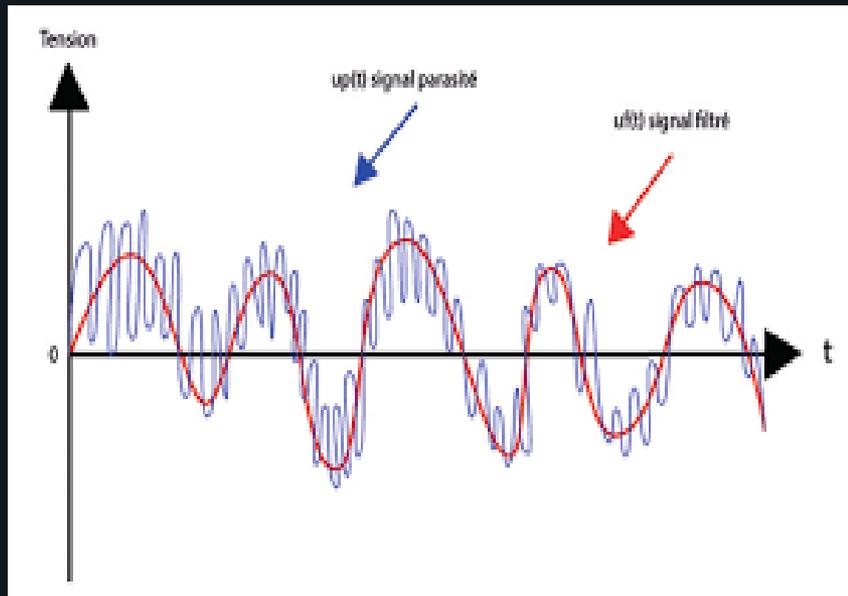
La répétabilité est l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesures successifs d'une même grandeur effectuée avec la même méthode, par le même observateur, avec les mêmes instruments de mesure et à des intervalles de temps assez courts .

La reproductibilité est l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesures successifs d'une même grandeur dans le cas où les mesures sont effectuées dans les conditions différentes que pour la répétabilité .

Caractéristiques métrologiques d'un capteur

8. Bruit de fond

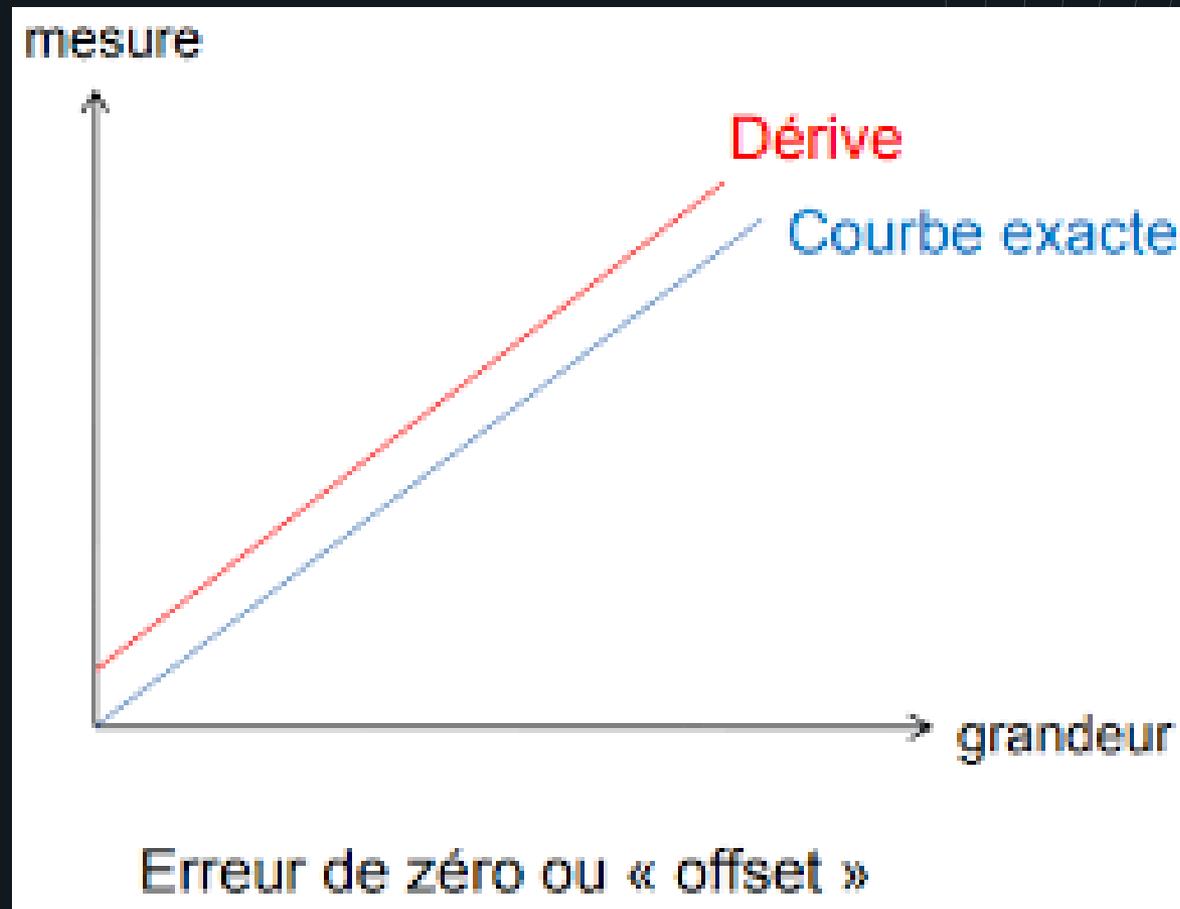
C'est une variation parasite, souvent aléatoire, du signal de sortie, dont la valeur moyenne est nulle et qui vient se superposer à la valeur à mesurer .



Caractéristiques métrologiques d'un capteur

9. Erreur de mesure

- L'erreur de zéro (offset)

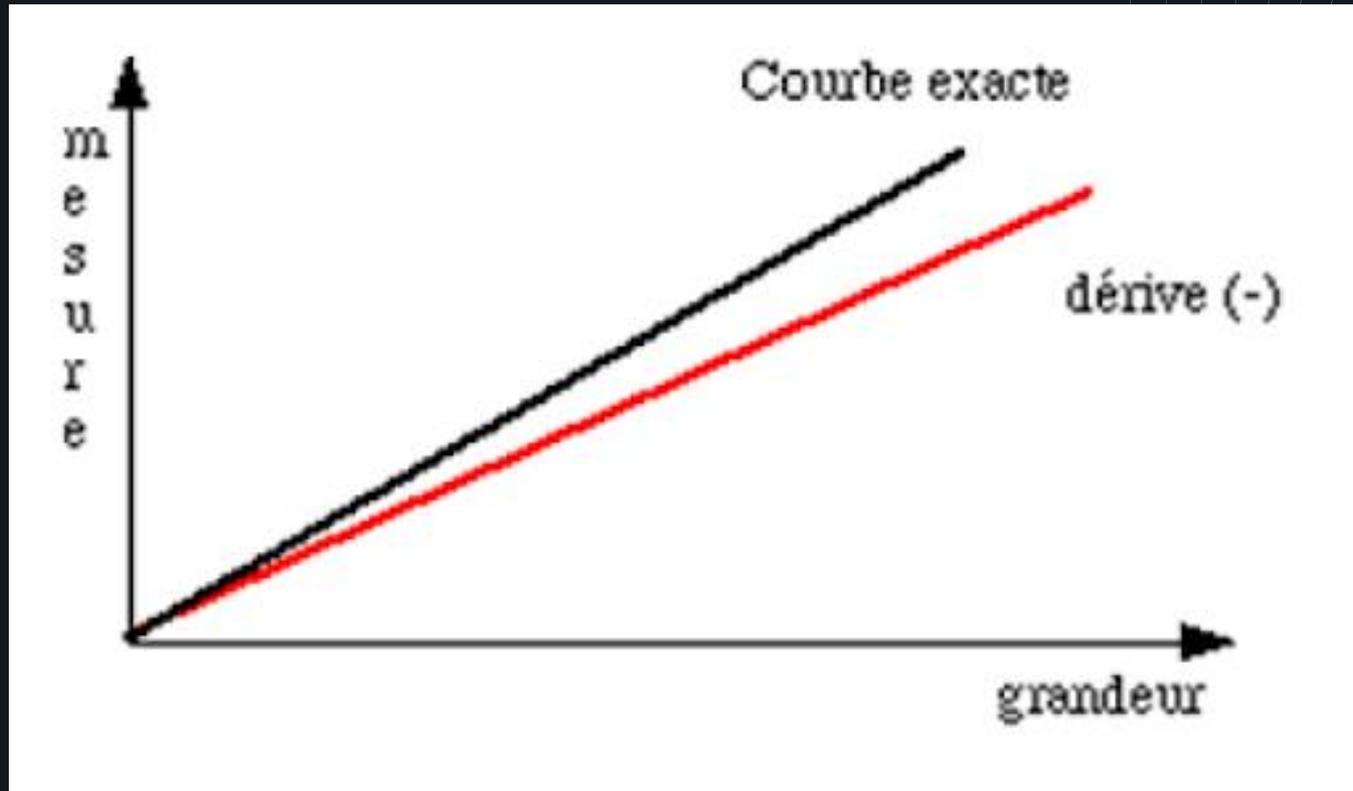


Caractéristiques métrologiques d'un capteur

9. Erreur de mesure

•L'erreur d'échelle (gain)

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

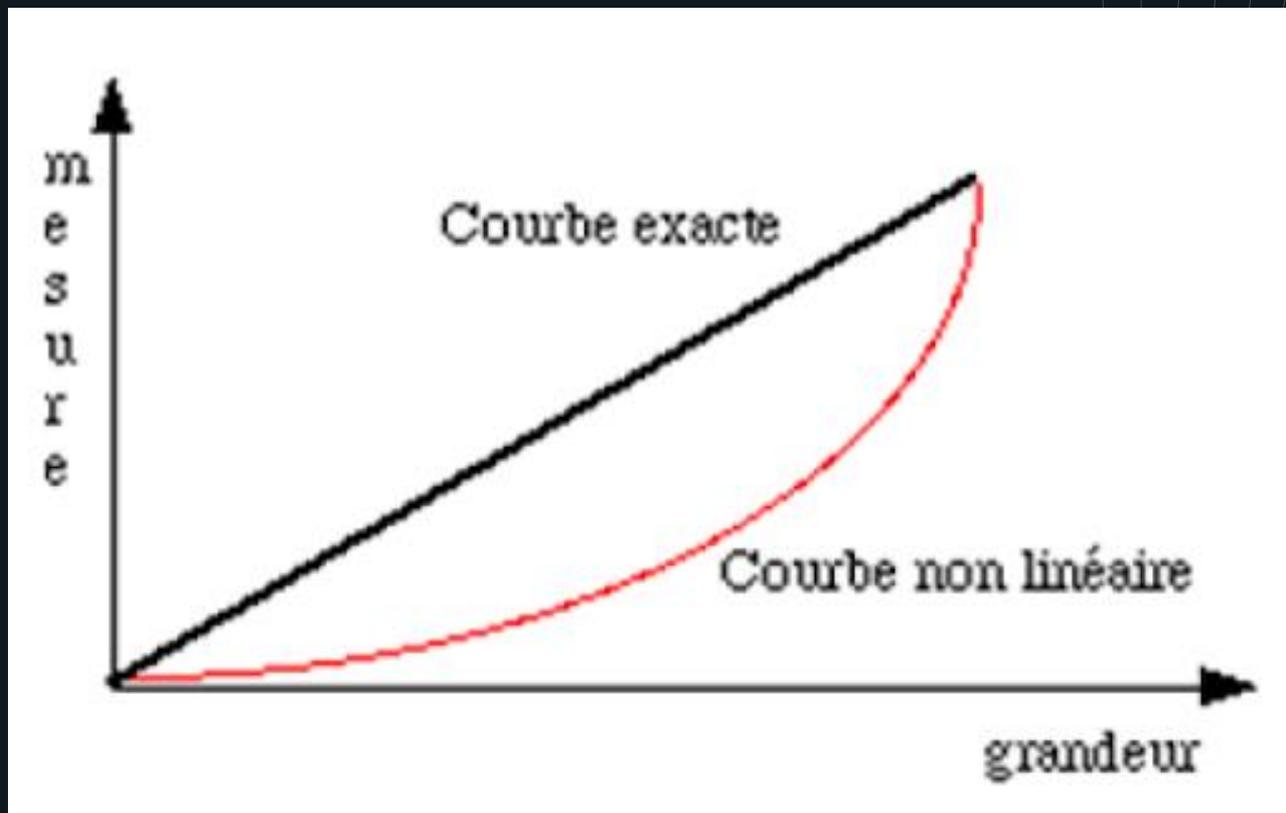


Caractéristiques métrologiques d'un capteur

9. Erreur de mesure

- L'erreur d'échelle (gain)

La caractéristique n'est pas une droite.

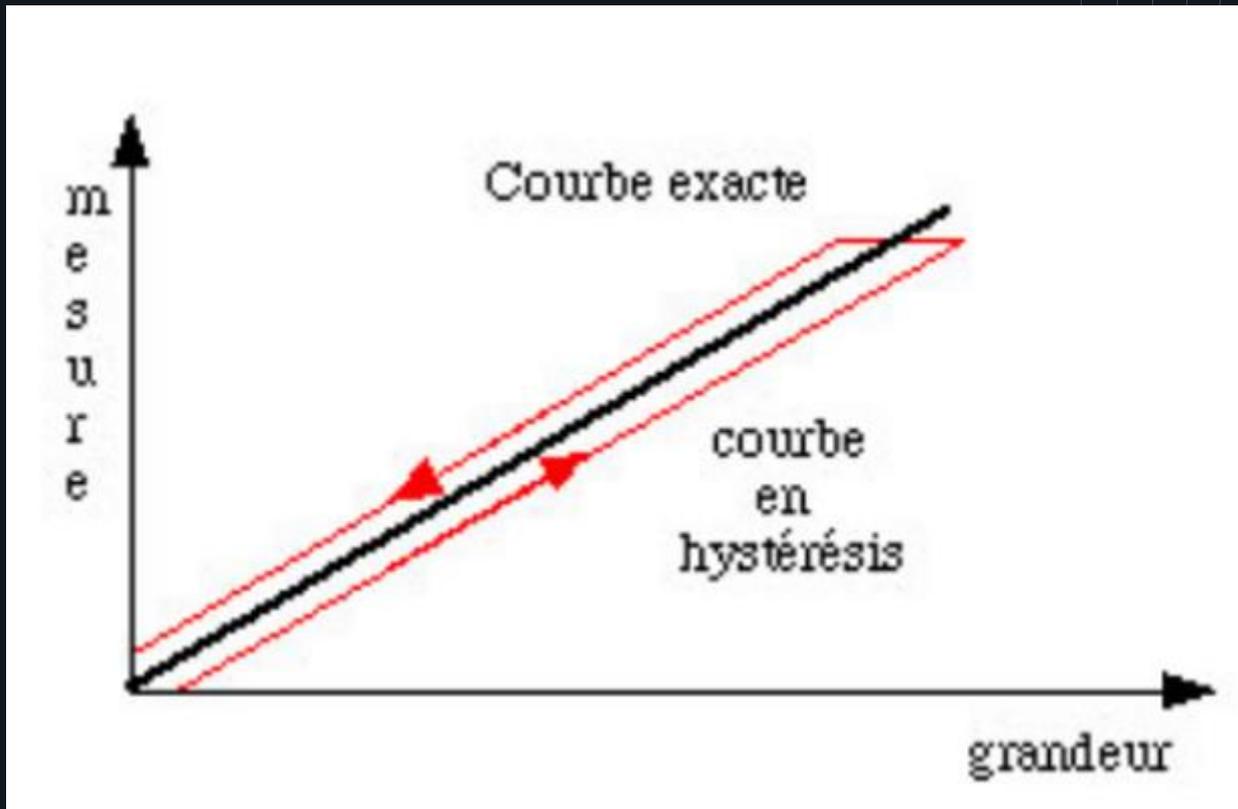


Caractéristiques métrologiques d'un capteur

9. Erreur de mesure

- L'erreur due au phénomène d'hystérésis

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

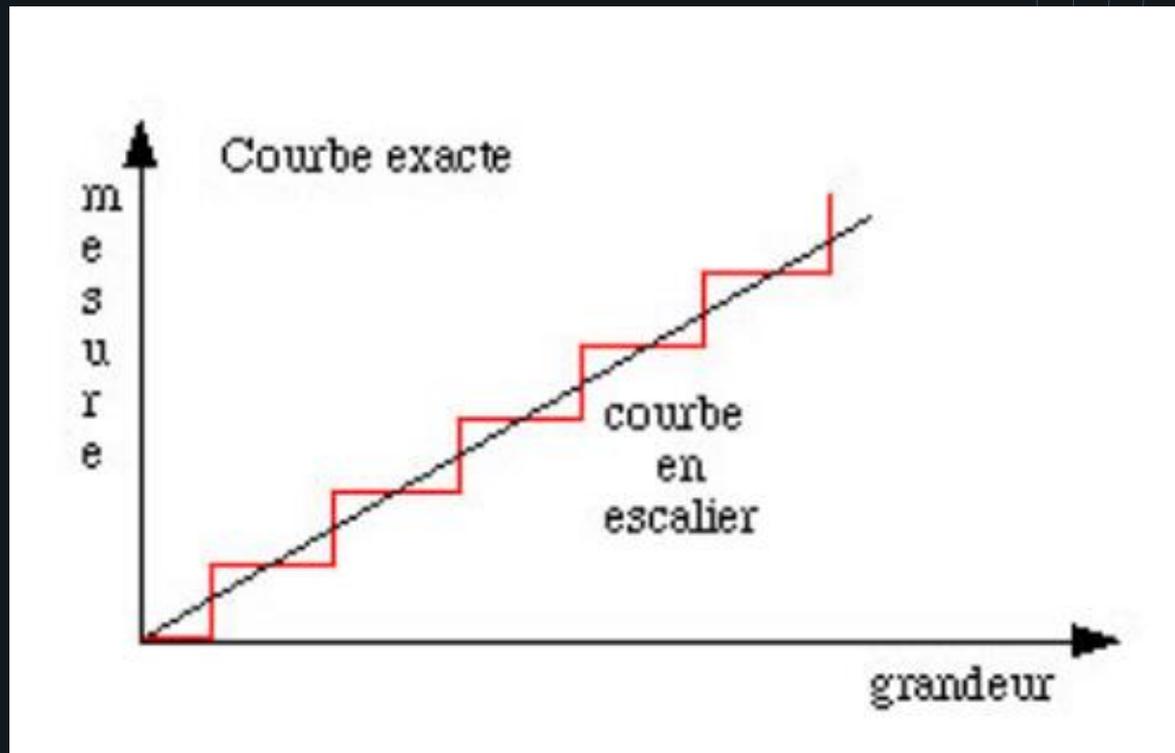


Caractéristiques métrologiques d'un capteur

9. Erreur de mesure

•L'erreur de mobilité

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



3

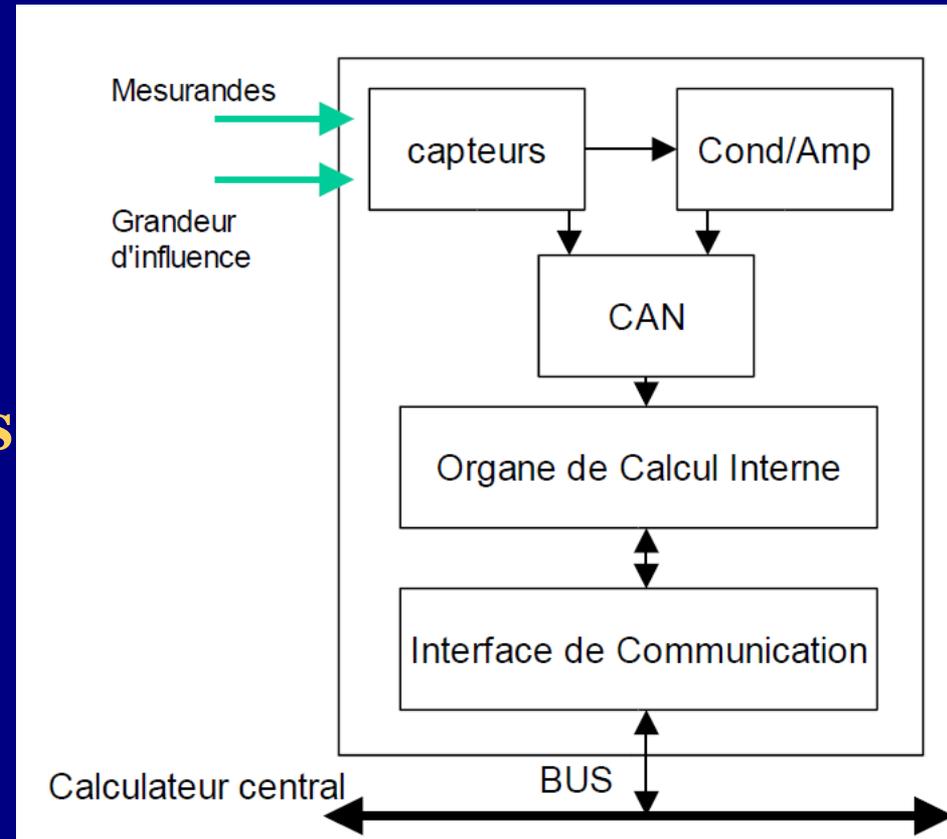
Capteurs Intelligents

Capteurs Intelligents

Définition

Un système composé de plusieurs sous-systèmes dont les fonctions sont clairement distinctes dont les principaux sont :

- un ou plusieurs capteurs
- les conditionneurs associés
- organe de calcul interne
- interface de communication



Capteurs Intelligents

Différence Capteur intelligent / capteur classique

- Capacité de calcul interne
- Interface de communication bidirectionnelle



sense motion, ambient light, temperature, relative humidity, and device motion.

Capteurs Intelligents

Fonctionnalités d'un capteur intelligent

Capteur intelligent =

capteur fournissant une mesure + d'autres services

Fonctionnalités nécessaires à **une instrumentation industrielle**

Métrologie

**Auto-adaptabilité, remplacement des données manquantes, validation de mesure
traitement du signal**

Maintenance

Auto-surveillance, auto-diagnostic, contrôle à distance

Mise en service

Configuration à distance

Capteurs Intelligents

Auto-adaptabilité: Capacité du capteur intelligent à s'adapter au signal mesuré. **Exemple** (Amplificateur à gain variable, Filtre à fréquence de coupure variable)

Remplacement des données manquantes: Défaillance ponctuelle du capteur => données non disponible à un temps t.

Technique permettant d'estimer les données manquantes à partir des données disponibles

validation de mesure: Précision >>> prise en compte et compensation des grandeurs d'influence (température, pression ...)

Validation des mesures >>> évaluation de la qualité de la mesure, détection de mesures aberrantes

traitement du signal: Mise en place à proximité de la source de données d'un système de traitement de l'information >>> Filtrage des résultats pour n'obtenir que l'information utile

Configuration à distance: Communication bidirectionnelle + traitement numérique des données >>> flexibilité instrumentale

Transmission d'un fichier d'initialisation ou d'un programme de traitement approprié

Exemple:

« Transmission d'un fichier d'initialisation ou d'un programme de traitement approprié »

Capteurs Intelligents

Exploitation, détection de défaut, recherche de diagnostic

Après configuration, le système est autonome. Transmission de l'information utile

Surveillance de processus

Détection d'anomalie >>> déclenchement d'une alarme

Détection de défaut, recherche de diagnostic

Etude des relations de cause à effet, entre l'anomalie et sa cause

Analyse statistique : test d'hypothèses, calcul d'estimée et comparaison avec des données réelles

Auto-diagnostic

Capacité d'un capteur à effectuer l'évaluation de son état de fonctionnement et de diagnostiquer l'élément éventuellement en dysfonctionnement.

4

Capteurs Optiques

CAPTEURS OPTIQUES

Introduction

Un capteur optique est un dispositif capable de détecter l'intensité lumineuse ou la longueur d'onde des photons et de la transformer en une grandeur mesurable.

Les capteurs optiques sont les capteurs qui convertissent le signal des ondes lumineuses (du ultraviolet au infrarouge) en signal électrique.

CAPTEURS OPTIQUES

Introduction

On les utilise pour détecter un grand nombre de phénomènes:

- ❖ l'intensité lumineuse
- ❖ la chaleur
- ❖ la présence
- ❖ la couleur (donc certains gaz ou produits chimiques)

Principes

Le photon

Un photon est un grain d'énergie de valeur $E = h \cdot \nu$

$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J/s}$ Constante de Planck

ν la fréquence de radiation de ce photon.

La longueur d'onde

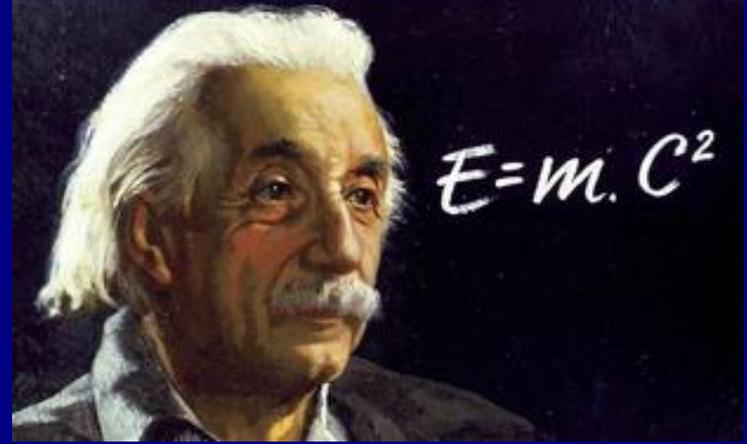
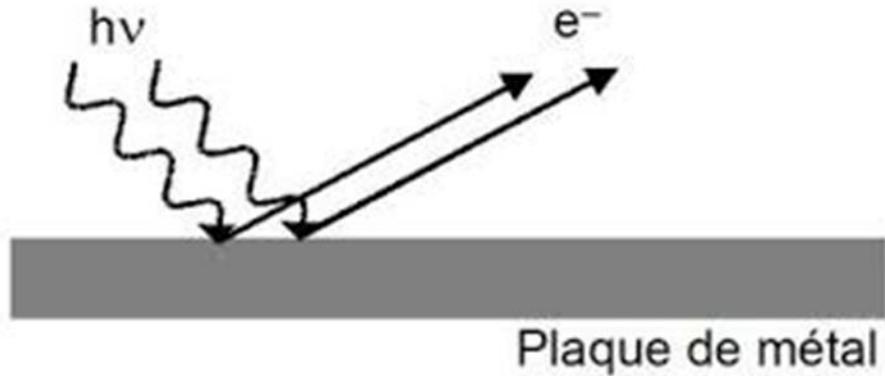
Tout phénomène vibratoire est caractérisé par une longueur d'onde, définie par:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

$c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ la vitesse de la lumière

ν la fréquence de vibration. Chaque couleur est caractérisée par une longueur d'onde.

L'effet photoélectrique



Albert EINSTEIN a montré que l'impact d'un photon de fréquence ν sur un métal suffisait à en extraire un électron si l'énergie du photon $E=h.\nu$ dépassait l'énergie d'extraction W nécessaire pour dégager l'électron du métal.

C'est le phénomène photoélectrique mis en œuvre dans la plupart des capteurs.

L'effet photoélectrique

Réciproquement, si un électron libre e percute un électron e' et si l'énergie apportée est suffisante, ce dernier se déplace sur une orbite d'atome de plus grand diamètre.

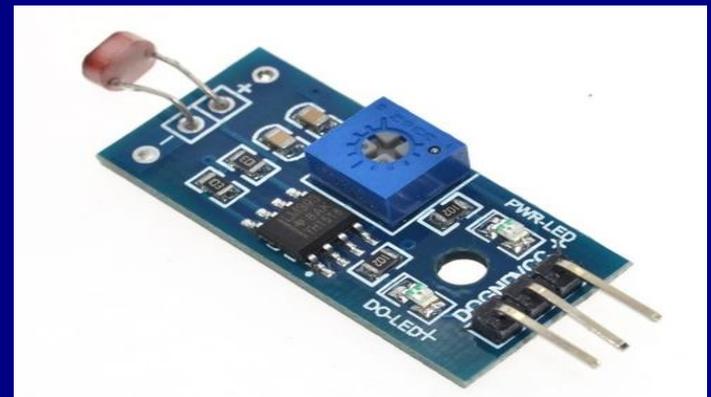
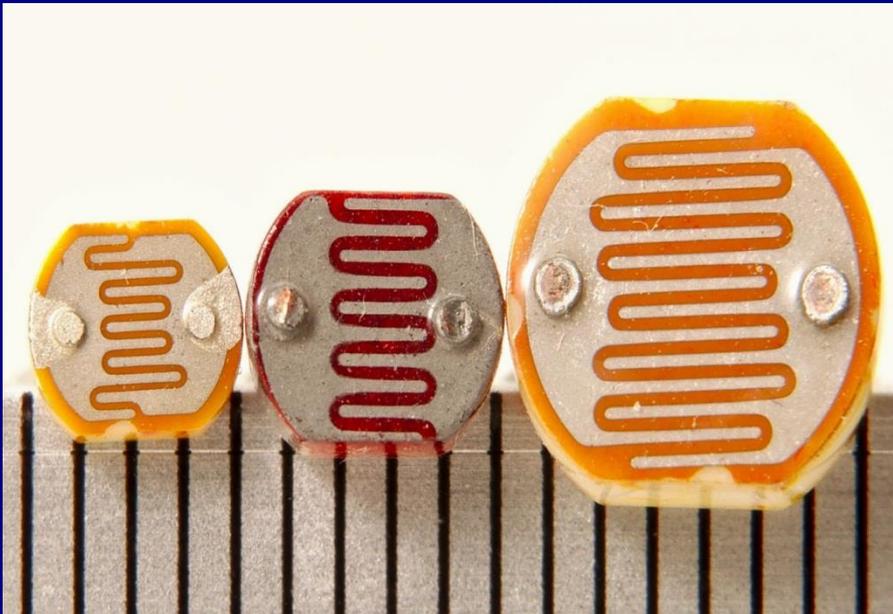
En retrouvant sa position d'origine, il restitue l'énergie reçue sous forme de photons.

C'est le principe mis en œuvre dans les émetteurs photoélectriques (diodes électroluminescentes).

Photorésistances

Certains semi-conducteurs ont la caractéristique d'avoir leur résistance varier lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Cette caractéristique a été mise à profit pour donner naissance aux photorésistances >>>

les seuls capteurs optiques passifs utilisés.



Photorésistances

Selon les semi-conducteurs utilisés (CdS « **Cadmium sulfide** » ou CdSe « **Cadmium selenide** ») la sensibilité spectrale n'est pas la même.

Le choix du capteur sera donc conditionné par la longueur d'onde de la lumière qu'il devra détecter, et aussi par la valeur résistive en fonction de la quantité de lumière.

L'application des photorésistances est multiple:

souvent dans des structures ne nécessitant pas **une grande précision** et où **l'encombrement** n'est pas un critère essentiel.

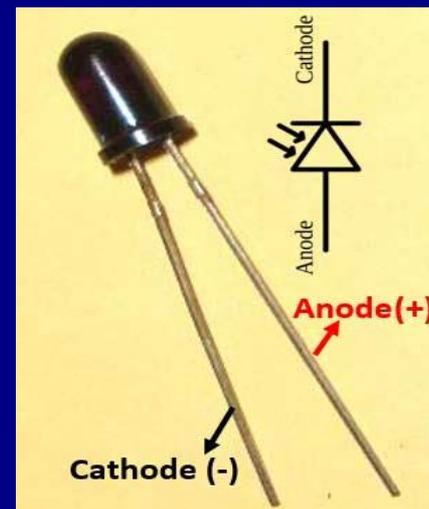
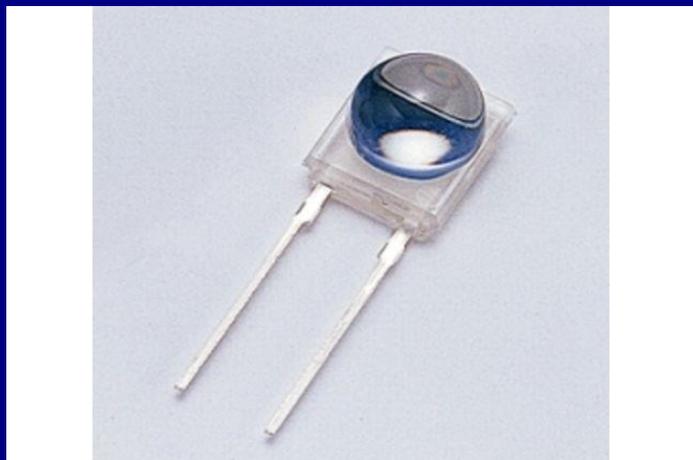
Les photodiodes

Les photodiodes sont des diodes qui exploitent l'effet photoélectrique.

Sous éclairement, les photons libèrent les paires électrons-trous. Leurs polarisation en inverse produit un courant qui augmente proportionnellement à l'intensité lumineuse.

La sensibilité spectrale des photodiodes dépend du type de diode utilisée. Cependant, ces capteurs disposent d'une très bonne **répétabilité**, ils sont très utilisés pour leur **grande stabilité**, leur **cout réduit** et leur faible encombrement.

Leur inconvénient majeur, est **le faible courant de sortie**.



Les phototransistors

Le faible courant transmis par les photodiodes a conduit à la construction des phototransistors, qui ont les mêmes caractéristiques que les capteurs précédents, mais avec un courant de sortie beaucoup plus important.

Leur sensibilité peut être encore plus affinée, en ajoutant une troisième patte au phototransistor.

Phototransistors

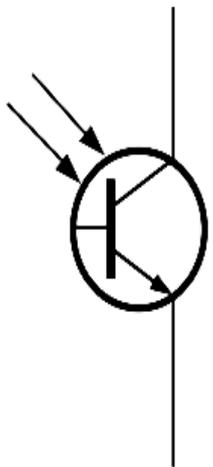


Fig a : Schematic Symbol

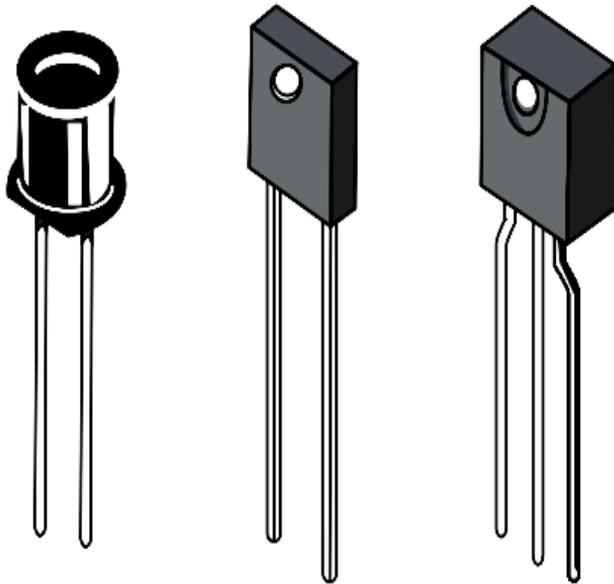


Fig b : Typical Packages



5

Capteurs de Température

Introduction à la thermométrie

Définition de la température

La température est une grandeur physique liée à la sensation de chaud et froid d'un corps par rapport à un autre corps. Par définition, une température est une mesure numérique d'une chaleur, sa détermination se fait par détection de rayonnement thermique, la vitesse des particules, l'énergie cinétique, ou par le comportement de la masse d'un matériau thermométrique.

Introduction à la thermométrie

Les échelles de température

Echelle Absolue

Cette échelle (kelvin (K)) est celle du système internationale. La température absolue est définie à partir du point triple de l'eau, température à laquelle, la glace, l'eau liquide et la vapeur d'eau sont en équilibre thermique, la pression en ce point étant connue. Cette température est fixée par définition à 273,15 K. Le zéro absolu, 0 K, est le zéro de cette échelle.

Echelle Celsius

Elle est définie à partir de l'échelle Kelvin par :

$$\theta[^\circ\text{C}] = T[\text{K}] - 273.15$$

- ❑ Fusion de la glace à 0 °C.
- ❑ Ébullition de l'eau distillée à 100 °C.

Introduction à la thermométrie

Les échelles de température

Echelle Fahrenheit

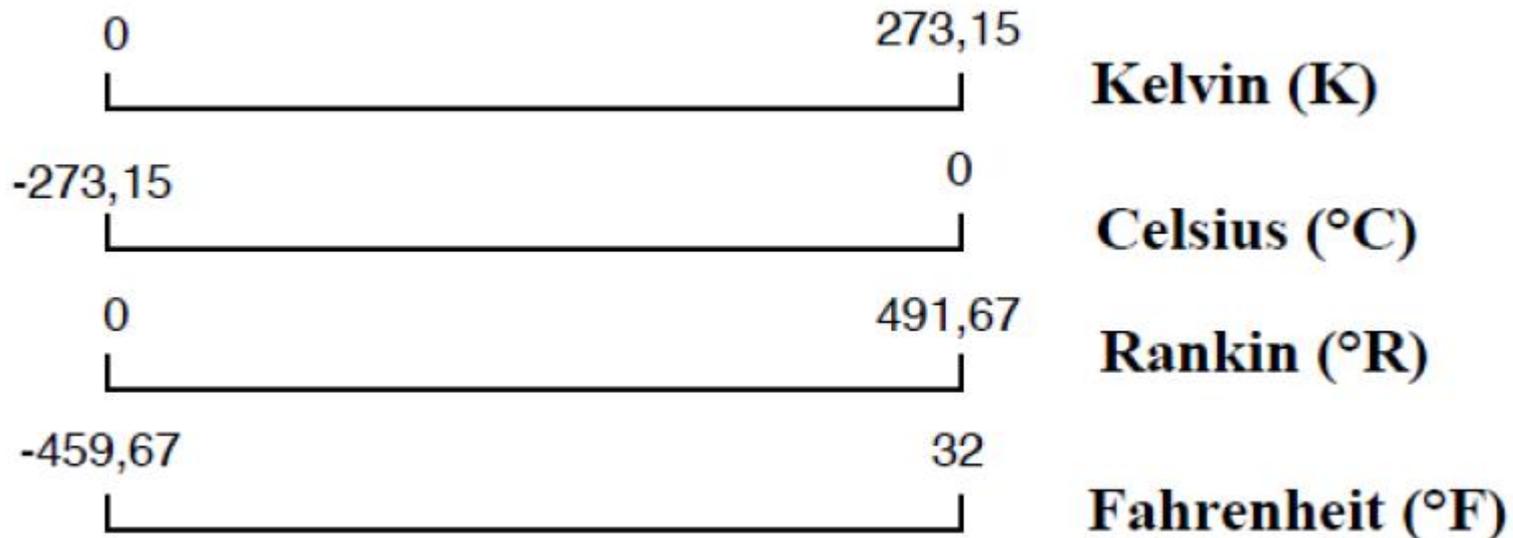
utilisée par les pays anglo-saxons

$$1[^\circ F] = \frac{9}{5}\theta[^\circ C] + 32$$

Echelle Rankine

L'échelle Rankine, est définie par

$$[^\circ R] = 1,8 \cdot T[K]$$



Thermomètres électriques

Les capteurs électriques de température ont l'avantage d'une plus grande souplesse d'emploi tout en gardant une précision suffisante pour l'utilisation industrielle. On distingue deux catégories :

- Les capteurs passifs, à résistance ou à thermistance.
- Les capteurs actifs, à couple thermoélectrique



Thermomètres à résistance

Le fonctionnement de ces capteurs passifs, se base sur l'influence de la température sur la résistance électrique d'un conducteur. La relation entre la résistance électrique et la température est de la forme:

$$R = R_0(1 + a.\theta + b.\theta^2 + c.\theta^3)$$

θ : la température en °C,

R_0 la résistance à 0°C,

a, b et c sont des coefficients positifs spécifiques au métal.

Différents métaux peuvent être utilisés comme le nickel et le cuivre mais c'est le platine est le plus utilisé, car il offre la plus grande étendue de mesure (- 250 à 1100 °C).

Thermomètres à résistance

Exemple : La sonde Pt100 est une sonde platine qui a une résistance de 100Ω pour une température de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$R_s = R_0 + K * t$$

($138,5\Omega$ pour $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) $R_0 = 100\Omega$ pour $t = 0^{\circ}\text{C}$ $K = 0.4$



Sonde PT100

Thermomètres à résistance

Avantages et inconvénients

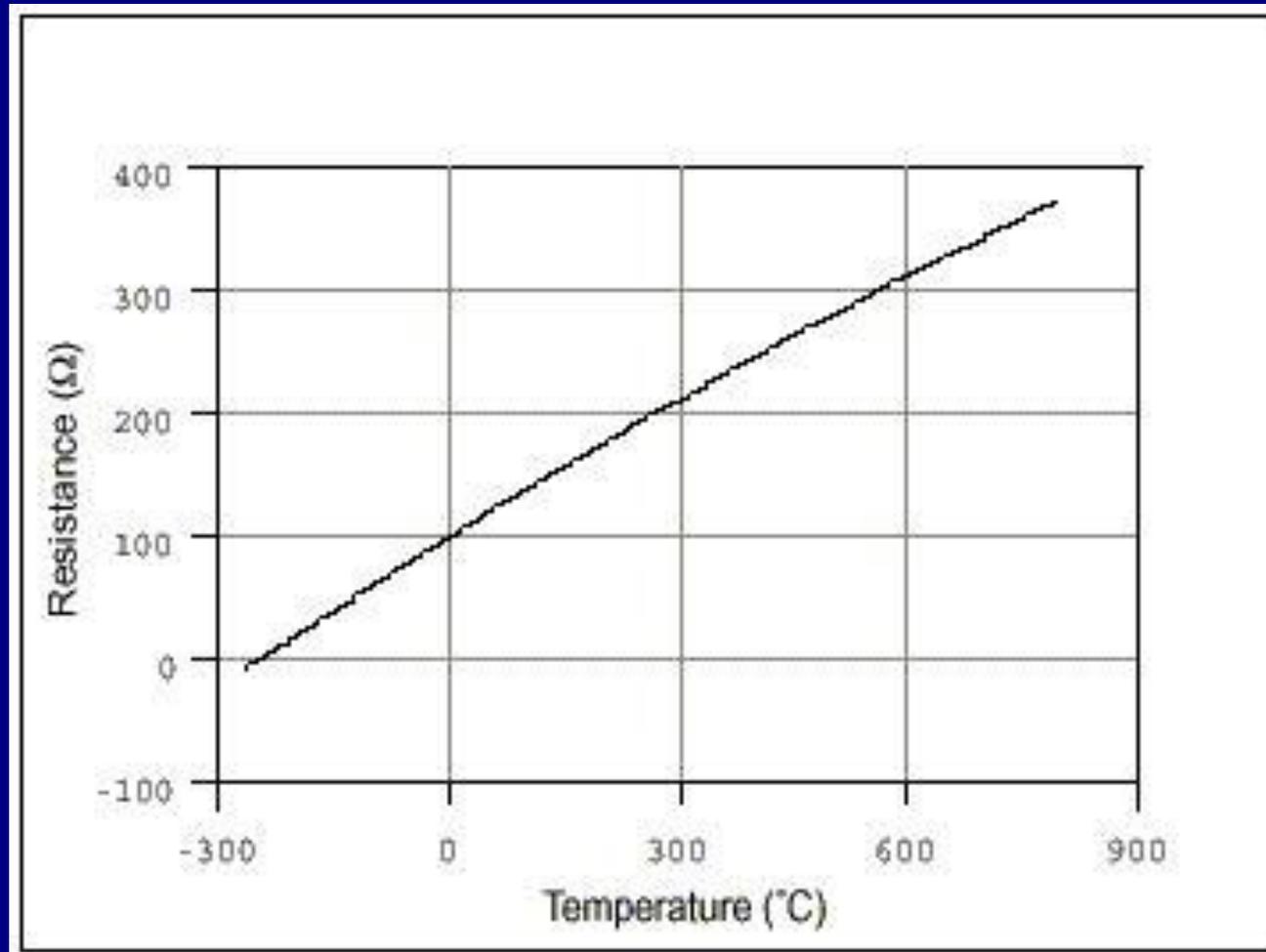
Populaires pour leur **stabilité**, les capteurs de température à résistance (Resistance Temperature Detectors) RTD présentent le signal le plus linéaire de tous les capteurs électroniques en matière de température. Toutefois, ils coûtent, généralement, plus cher que leurs équivalents, à cause de leur construction plus délicate et le recours au platine.

Les RTD se caractérisent aussi par un **temps de réponse lent** et par une **faible sensibilité**.

En outre, parce qu'ils nécessitent une excitation en courant, ils sont sujets à une élévation de température.

Les RTD peuvent mesurer des températures pouvant atteindre 850°C ou plus.

Thermomètres à résistance



Courbe résistance/température pour PT100

Thermomètres à thermistance

Ceux sont des oxydes métalliques, semi-conducteurs, présentant une bonne sensibilité, qui est **dix fois supérieure** à celle de résistances de platine, grâce à une rapide et importante variation de la résistance en fonction de la température sous la forme :

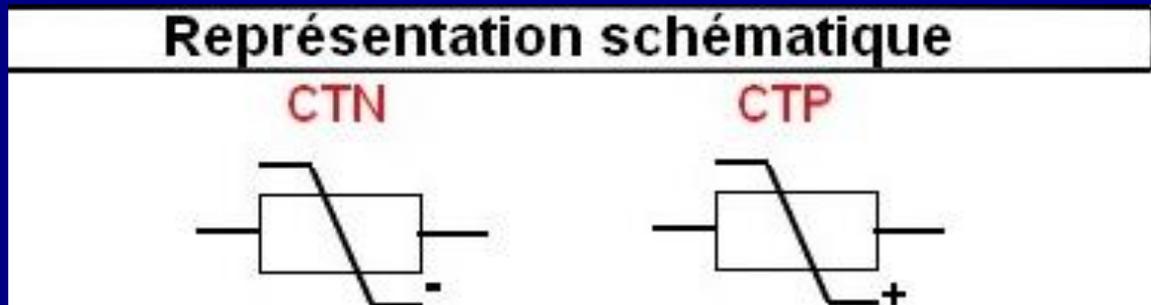
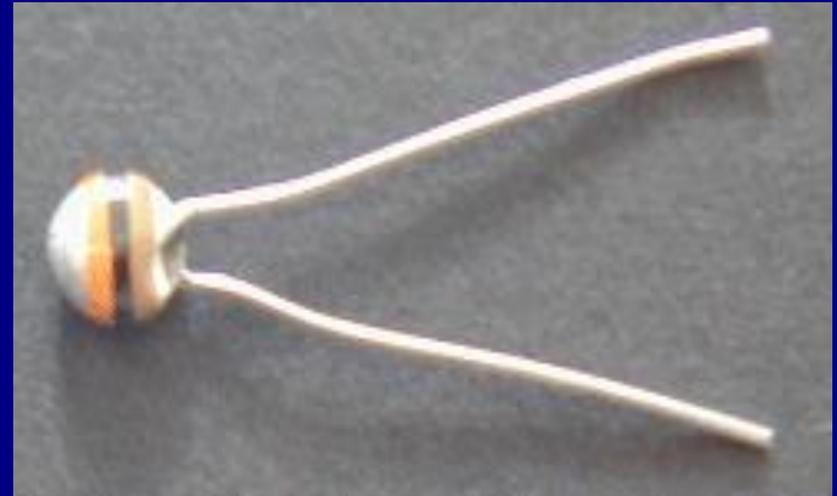
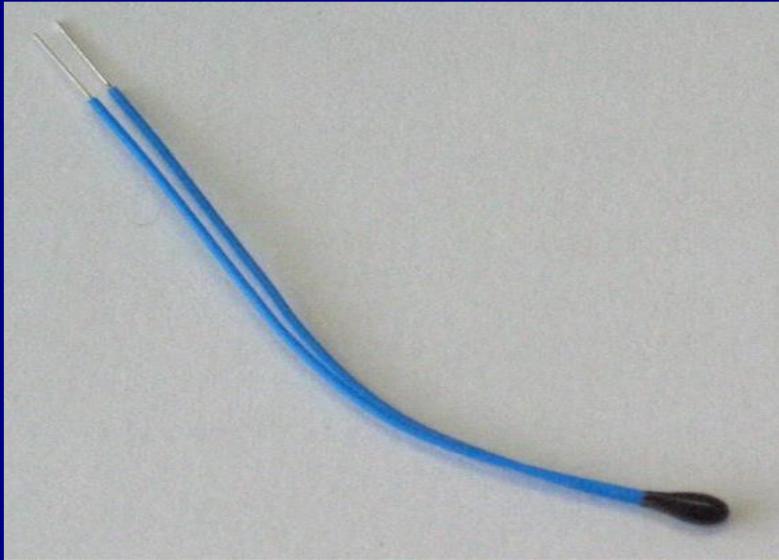
$$R = a \cdot \exp\left(\frac{b}{\theta}\right)$$

θ : la température en °C,

A et b sont des coefficients spécifiques au métal.

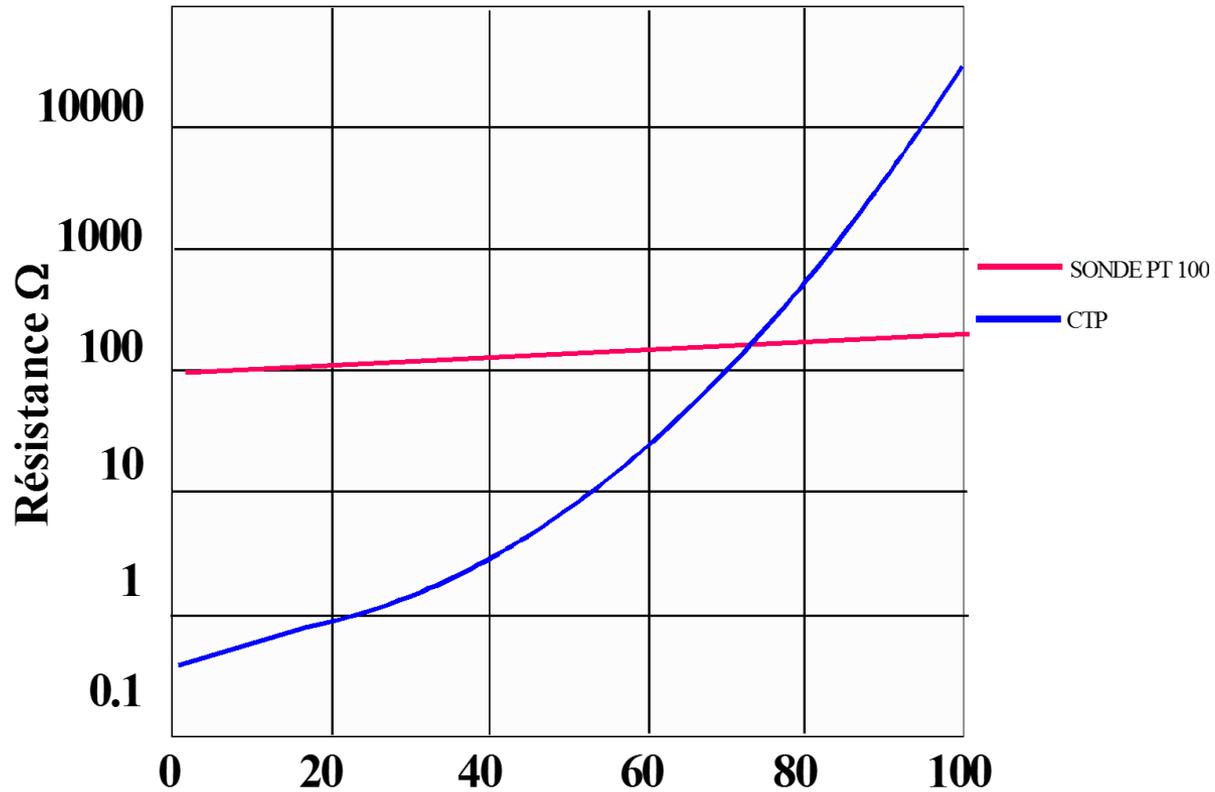
La résistance électrique d'une thermistance est très sensible à l'action de la température. Il existe deux types de thermistance, les CTN (Coefficient de Température Négatif,) et les CTP (Coefficient de Température Positif).

Thermomètres à thermistance



Son symbole est : NTC en anglais et CTN en français

Thermomètres à thermistance



Thermomètres à thermistance

Avantages et inconvénients

En règle générale, les thermistances ont une **sensibilité de mesure très élevée** ($\sim 200 \Omega/^\circ\text{C}$), ce qui les rend **très sensibles aux variations de températures**.

Bien qu'elles présentent un taux de réponse de l'ordre de la seconde, les thermistances ne peuvent être utilisées que dans une gamme de températures ne dépassant pas 300°C .

Cette caractéristique, associée à leur résistance nominale élevée, contribue à garantir des mesures précises dans les applications à basse température.

Un autre avantage des thermistances est leur faible encombrement : elles sont fabriquées sous forme de petits cylindres, dont la variation de la résistance dépend du matériau utilisé.

Les thermistances ne présentent pas de **polarisation** et peuvent être utilisées en **continu** ou en **alternatif**. Cependant, la loi de variation de la résistance avec la température est **non linéaire**.

Capteur à Thermocouples

Le fonctionnement d'un couple s'appuie sur trois effets:

-l'effet PELTIER : à la jonction de deux conducteurs A et B différents, à la même température, s'établit une d.d.p qui ne dépend que de A, B et de T, c'est **la f.e.m Peltier**.

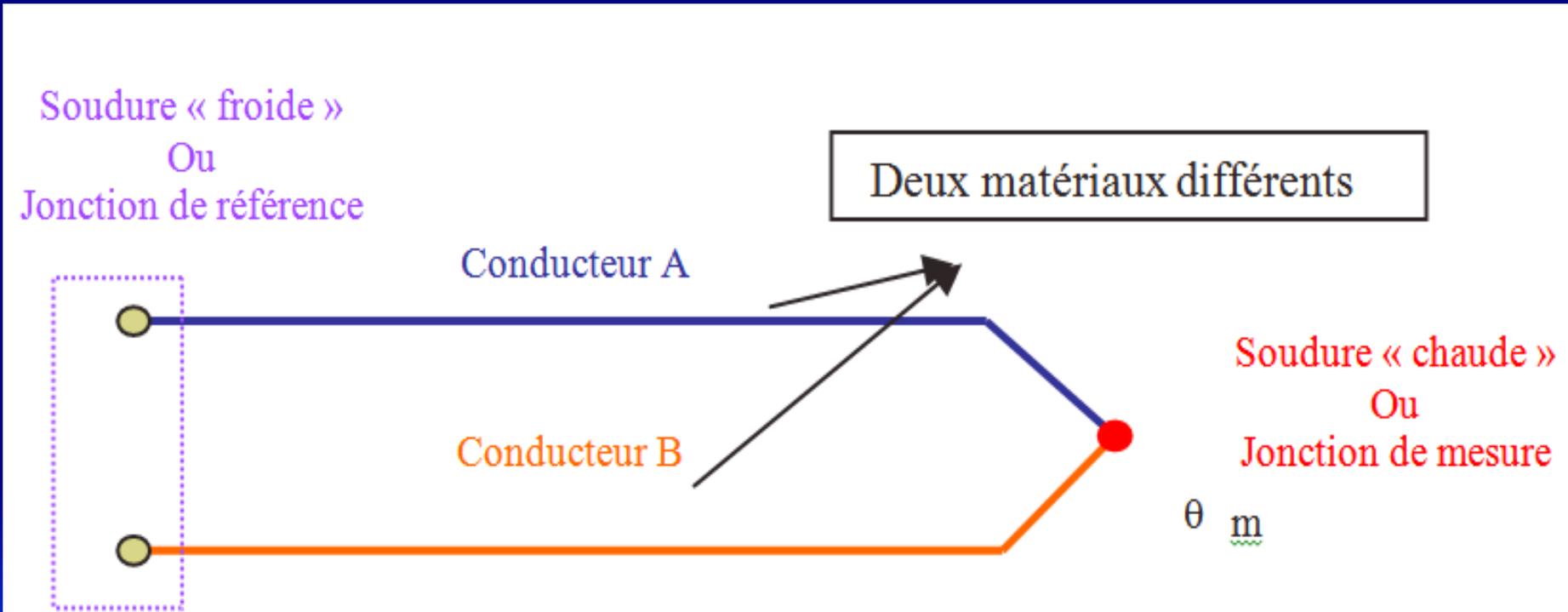
-l'effet THOMSON : entre deux points M et N, à températures différentes, à l'intérieur d'un conducteur homogène s'établit une f.e.m qui dépend du conducteur et des températures de M et N, c'est **la f.e.m Thomson**.

-l'effet SEEBECK : Un circuit constitué de deux conducteurs A et B dont la jonction est à une température T_{jonct} constitue un couple thermoélectrique qui est le siège d'une f.e.m résultant des effets Peltier et Thomson.

Capteur à Thermocouples

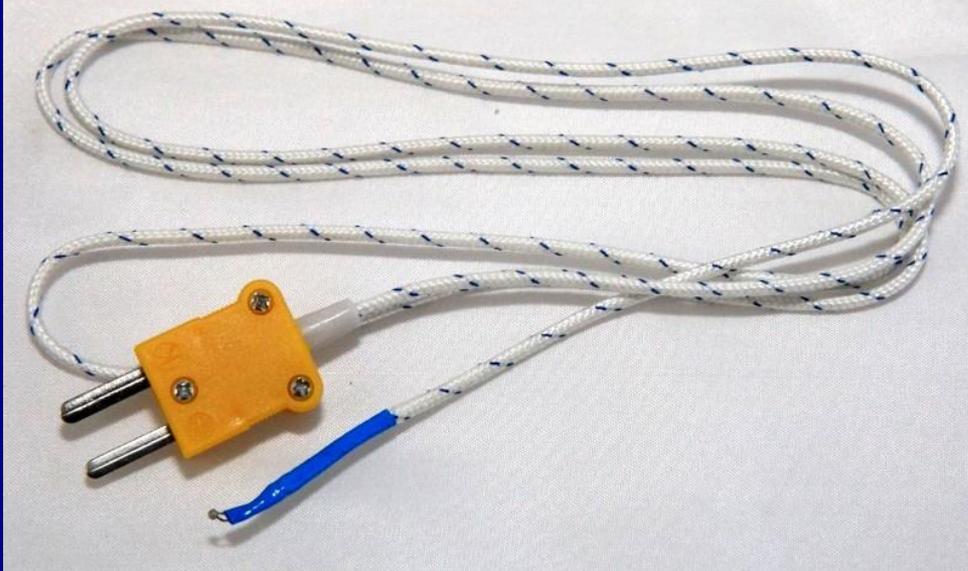
Exemple : le thermocouple

Un thermocouple est constitué de deux conducteurs en métaux de caractéristiques thermoélectriques différents. Ces deux conducteurs placés dans un gradient de température, vont générer une F_{em} (V) en rapport avec la température (effet Seebeck)



Capteur à Thermocouples

Exemple : le thermocouple



Capteur à Thermocouples

Caractéristiques

- Les thermocouples permettent de mesurer de hautes températures.
- Les températures mesurées ponctuelles.
- Très grande rapidité.
- Pas d'auto échauffement.
- Peuvent mesurer des températures de surfaces à l'aide des peintures métalliques.

Capteur à Thermocouples

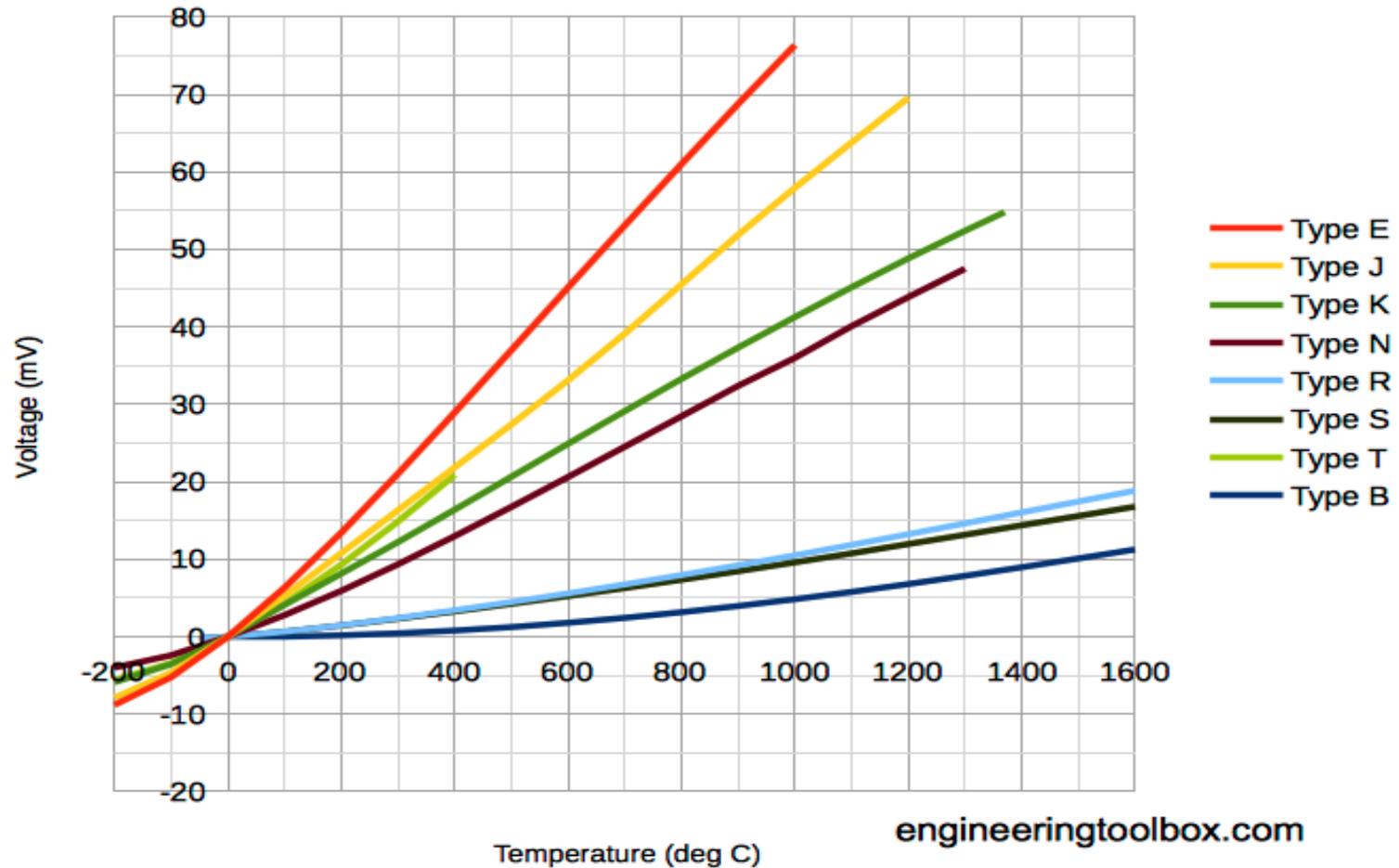
Table 3. Thermocouple Characteristics¹

Type	Metals (+)/(-)	Temp (°C) (approximate)	Scale Factor@ 25 °C	Accuracy* (Greater of)	Notes
J	Iron/Constantan	-210 to 760°C	52 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	1.1 °C or 0.4%	Wide range, general purpose
K	Chromel/Alumel	-270 to 1370°C	41 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	1.1 °C or 0.4%	Wide range, general purpose
T	Copper/Constantan	-270 to 400°C	40 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	0.5 °C or 0.4%	High accuracy, narrow range
E	Chromel/Constantan	-200 to 1000°C	61 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	1.0 °C or 0.4%	High output per degree
R	Pt/Pt with 13% Rh	0 to 1700°C	6 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	0.6 °C or 0.1%	High Temp
S	Pt/Pt with 10% Rh	0 to 1700°C	6 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	0.6 °C or 0.1%	High Temp
N	Ni Cr Si/Ni Si Mg	-270 to 1300°C	52 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	1.1 °C or 0.4%	Stable at high temps

Capteur à Thermocouples

Thermocouples

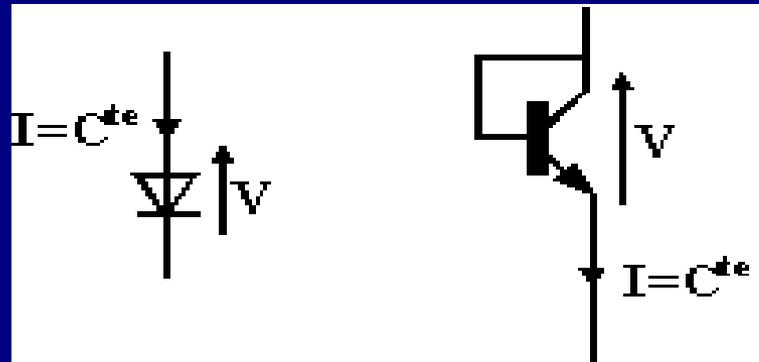
Voltage vs. Temperature



Thermométrie par diode et transistor

Thermomètres à semi-conducteurs

Les composants utilisés, diodes ou transistors au silicium montés en diode (base et collecteur reliés), sont alimentés dans le sens direct à courant constant : la tension à leurs bornes qui est en fonction de la température peut donc être la grandeur électrique de sortie du capteur de température qu'il constitue :



La sensibilité thermique S d'une diode ou d'un transistor monté en diode est voisine de $2,5\text{mV}/^\circ\text{C}$. Cette sensibilité dépend du courant inverse, ce dernier peut varier de façon importante d'un composant à l'autre. Domaine d'utilisation -50°C à 150°C .

Thermométrie par diode et transistor

Avantages et inconvénients

Avantages :

- **Bonne sensibilité thermique**
- **Excellente stabilité thermique dans leur domaine**
- **Linéarité.**

Inconvénients :

- **Plage de température -50°C à 150°C**

CAPTEUR ET INSTRUMENTATION

Capteurs de Pression

Définition de la pression

La pression est une grandeur dérivée du système international.
Elle est définie comme le quotient d'une force par une surface :

$$P [P_a] = \frac{F [N]}{S [m^2]}$$

Différentes unités de pression

D'après la relation précédente, 1Pa est l'unité internationale de la pression absolue s'exerçant sur une surface de 1m² par une force perpendiculaire de 1N.

Définition de la pression

Les différentes unités de pression

	pascal (Pa)	bar (b)	atmosphère
1 pascal	1	10^{-5}	$9,869 \cdot 10^{-6}$
1 bar	10^5	1	0,987167
1 kgf/cm ²	98039	0,9803	0,968
1 atmosphère	101 325	1,0133	1
1 cm d'eau	98,04	$980 \cdot 10^{-6}$	$968 \cdot 10^{-6}$
1 mm de Hg	133	$1,333 \cdot 10^{-3}$	$1,316 \cdot 10^{-3}$
1 mb	102	10^{-3}	$987 \cdot 10^{-6}$
1 inch Hg	$3,386 \cdot 10^3$	$33,86 \cdot 10^{-3}$	$33,42 \cdot 10^{-3}$
1 psi	6892	$68,9 \cdot 10^{-3}$	$68 \cdot 10^{-3}$
1 torr	133	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$1,316 \cdot 10^{-3}$

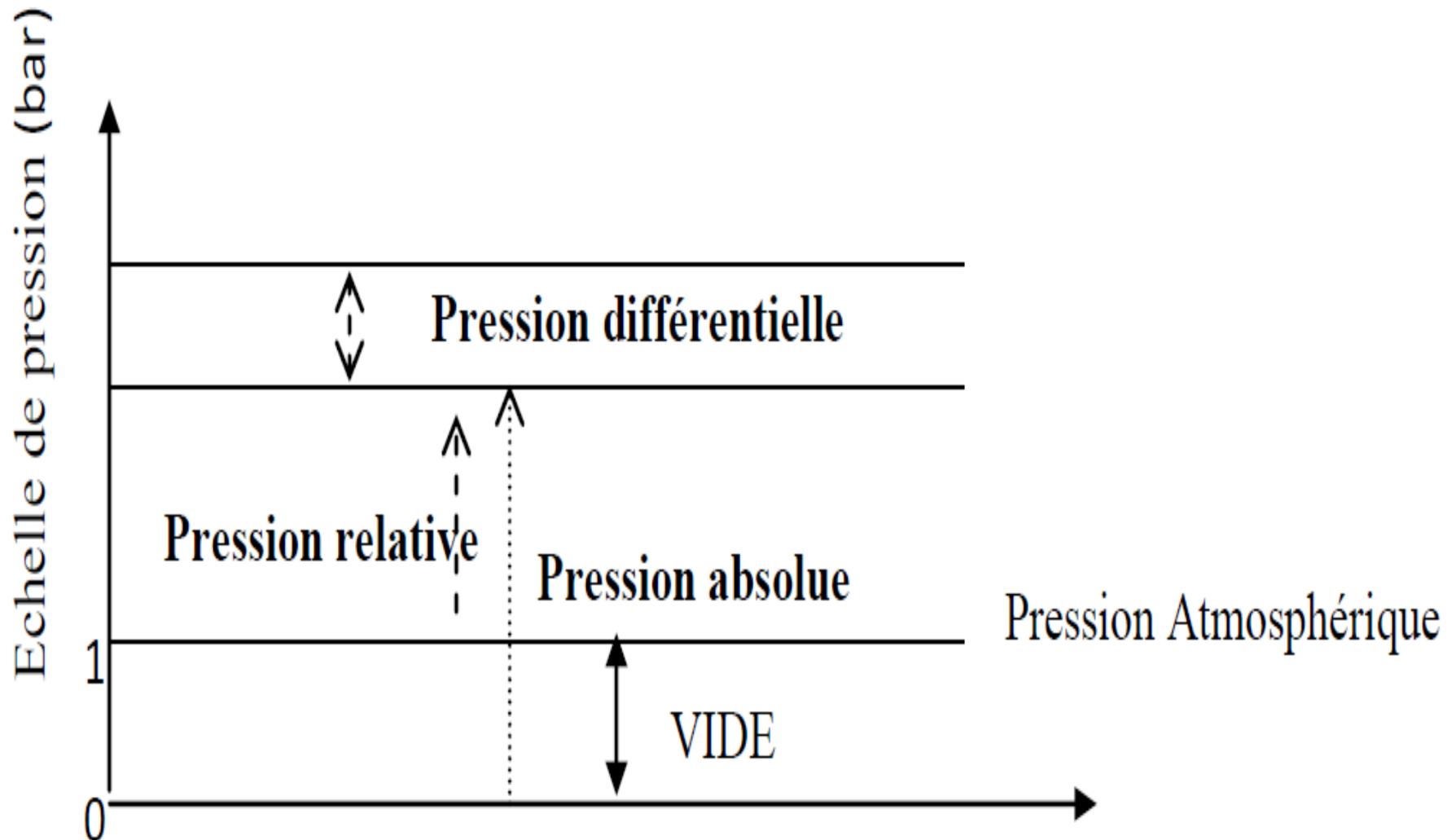
Différentes pressions

- **La pression atmosphérique** : La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer, à 15 °C, est de 1013 mbar. Elle peut varier en fonction de l'altitude.
- **La pression absolue** : C'est la pression réelle, dont on tient compte dans les calculs.
- **La pression relative** : C'est la différence de pression par rapport à la pression atmosphérique.
- **La pression différentielle** : C'est une différence entre deux pressions, dont l'une sert de référence. Une pression différentielle peut prendre une valeur négative.

Différentes pressions

- **Le vide** : C'est une pression inférieure à la pression atmosphérique. Le vide parfait correspond théoriquement à une pression absolue nulle. Il ne peut être atteint. Quand on s'en approche, on parle alors de vide poussé.
- **Pression de service** : C'est la force par unité de surface exercée sur une surface par un fluide s'écoulant parallèlement à la paroi d'une conduite.

Différentes pressions



Capteurs passifs

Capteurs résistifs

Ce type de capteurs se base sur la variation de la résistance sous l'effet d'une pression exercée :

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

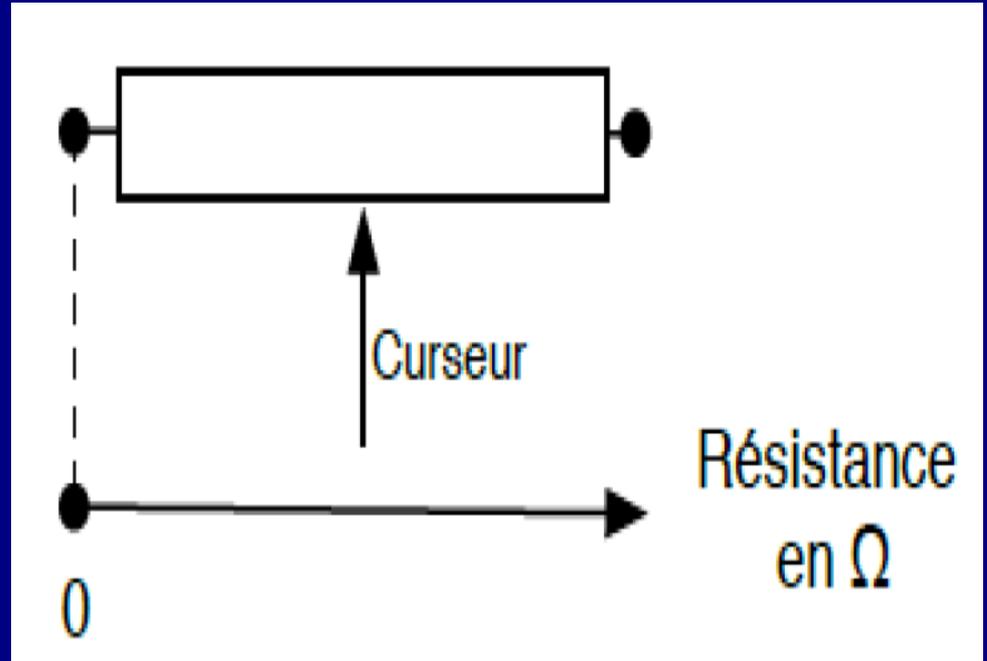
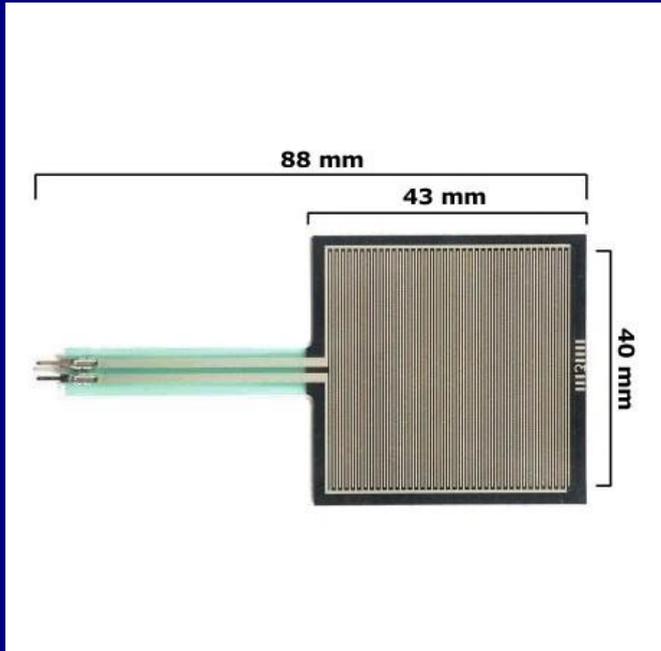
Avec :

ρ : Résistivité du matériau.

L : Longueur du conducteur.

S : Section du conducteur.

Capteurs résistifs



Capteur résistif rectiligne



Capteurs résistifs

❖ **Avantages :**

- ❑ **Signal de sortie élevé.**
- ❑ **Utilisable sans conditionneur.**
- ❑ **Possibilité d'adapter à une variation non linéaire.**

❖ **Inconvénients :**

- ❑ **Durée de vie ;**
- ❑ **Sensibilité aux vibrations.**

Capteurs capacitifs

Un condensateur est composé de deux conducteurs séparés par un isolant. La capacité d'un condensateur est:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{e}$$

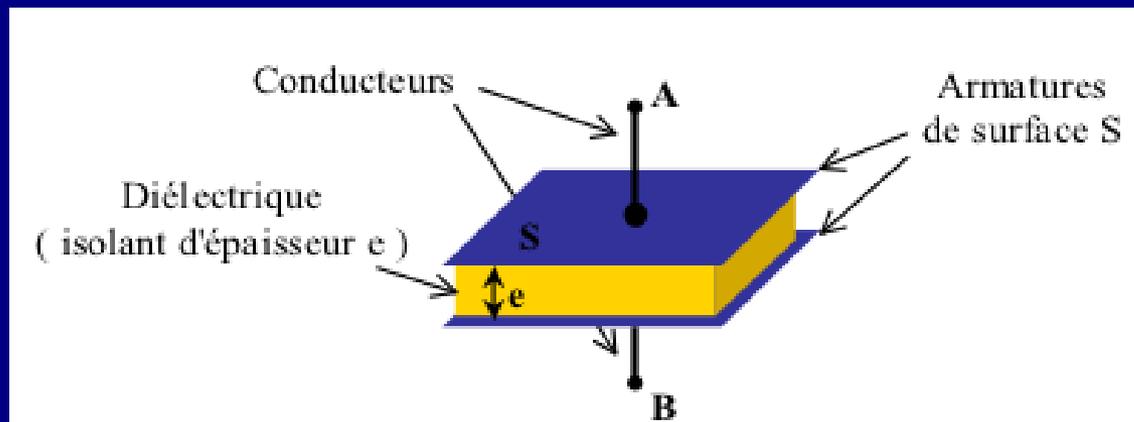
Avec :

ϵ_0 : permittivité du vide = $8,85 \cdot 10^{-12}$;

ϵ_r : permittivité relative de l'isolant ;

S : surface en regard en m^2 ;

e : épaisseur de l'isolant en m



Capteurs capacitifs

Le capteur capacitif se base sur la variation de la capacité due à la variation de l'épaisseur sous l'effet d'une différence de pression.

□ Avantages

faible masse ;

peu sensible aux accélérations.

□ Inconvénients

sensibilité à la température (sauf montage différentiel).

sortie haute impédance.

Capteurs inductifs

Un bobinage de fils conducteurs, parcouru par un courant électrique, crée un champ magnétique B . On peut canaliser les lignes de champs en ajoutant un circuit magnétique.

On peut écrire :

$$N \cdot I = R \cdot \phi$$

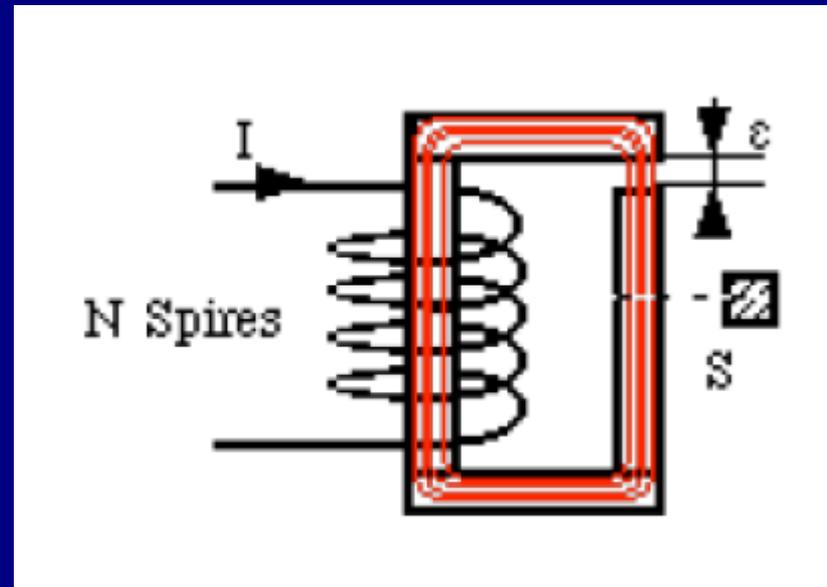
Avec :

N : nombre de spires ;

I : courant en A ;

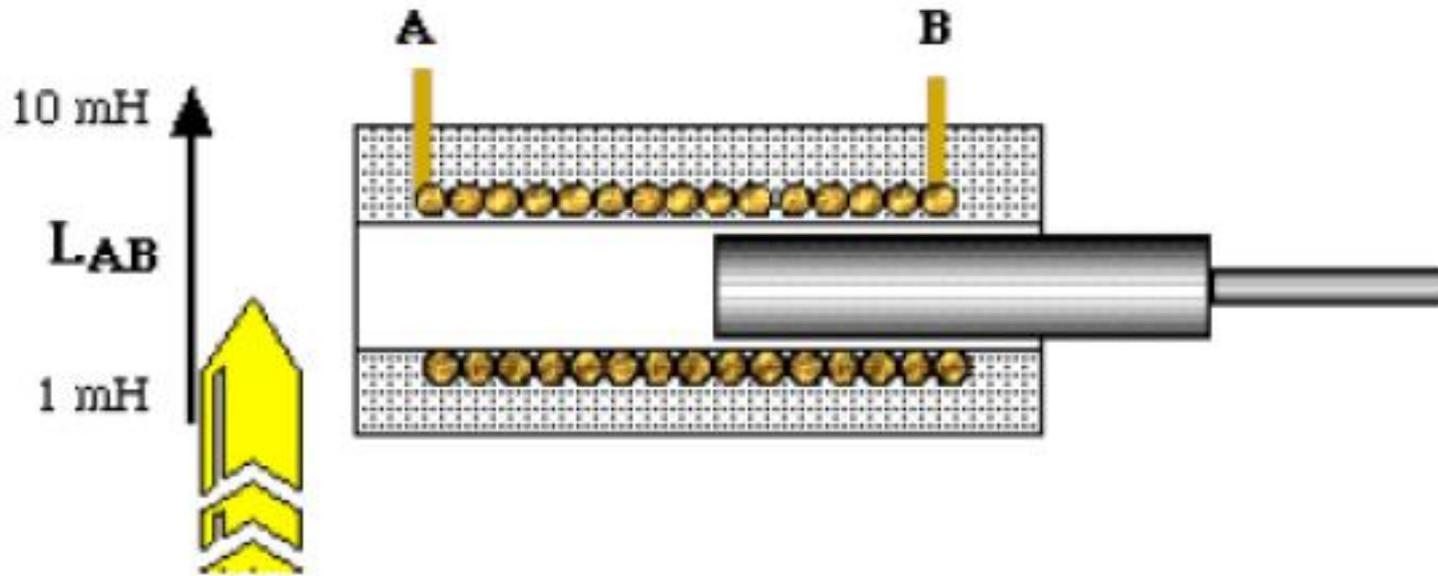
R : reluctance du circuit magnétique en H^{-1} ;

ϕ : flux traversant les spires en Wb.



Capteurs inductifs

Le principe de fonctionnement d'un capteur inductif de pression se base sur le déplacement d'un noyau magnétique à l'intérieur d'une bobine, du à la pression exercée. Ce déplacement entraîne une variation de l'inductance de la bobine.



Capteurs inductifs

□ **Avantages :**

Faible hystérésis ;

Très bonne résolution ;

Signal de sortie élevé.

□ **Inconvénients :**

Sensible aux chocs et aux vibrations.

Capteurs actifs

L'effet piézoélectrique

La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et inversement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique. Le premier est appelé **effet piézoélectrique direct** ; le second **effet piézoélectrique inverse**. Cette propriété trouve un très grand nombre d'applications dans l'industrie. De manière plus générale, l'effet direct peut être mis à profit dans la réalisation de capteurs de pression tandis que l'effet inverse permet de réaliser des actionneurs de précision (injecteurs à commande piézoélectrique en automobile, nanomanipulateur...)

Capteurs actifs

Effet piézoélectrique direct

contrainte mécanique



Elément
piézoélectrique

tension électrique



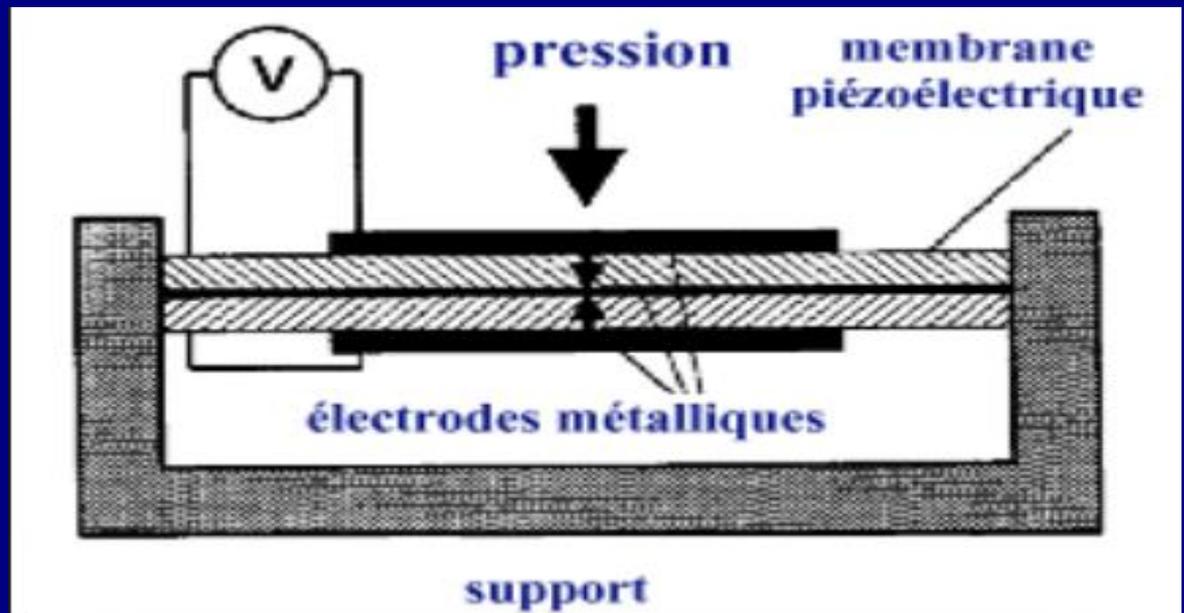
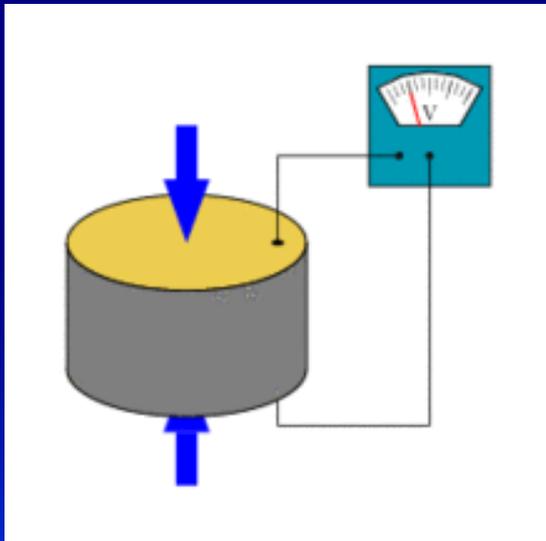
Effet piézoélectrique inverse

tension électrique

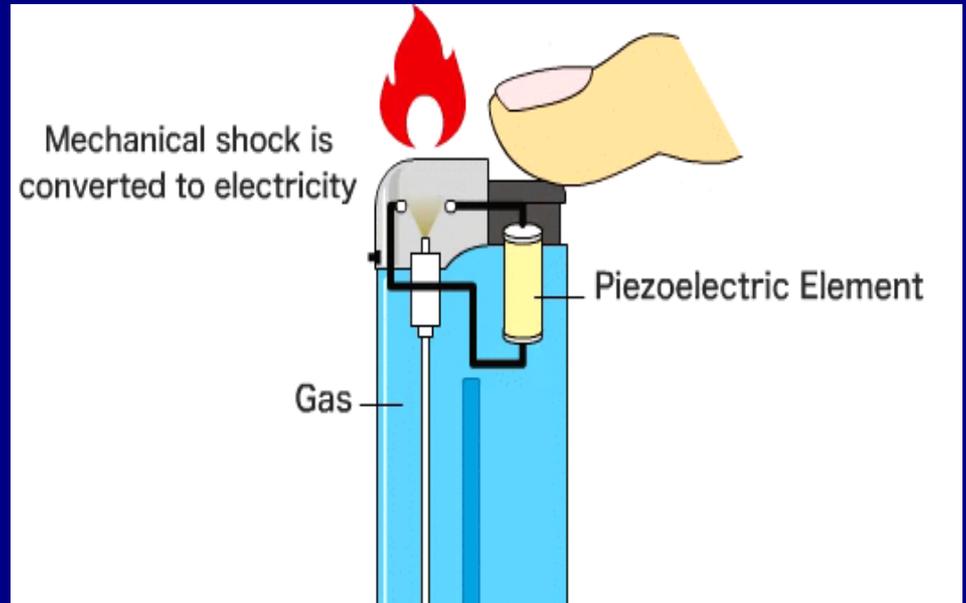
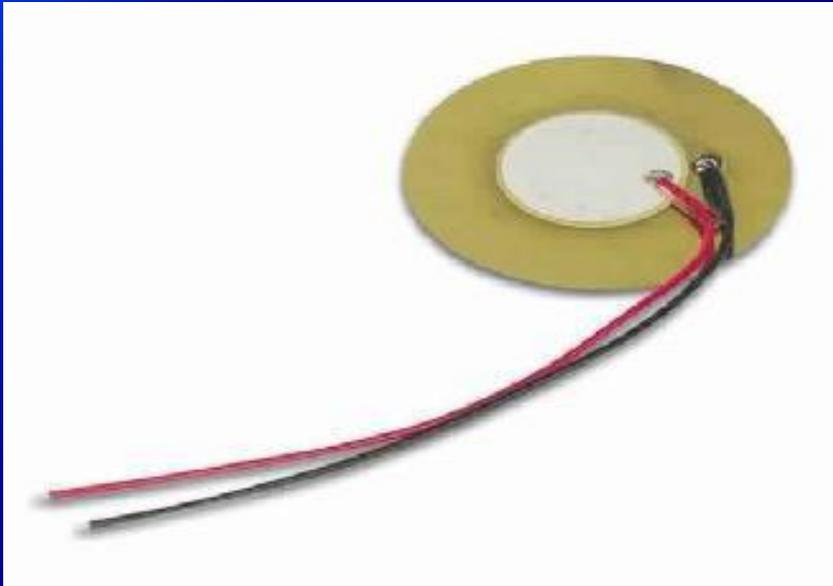


Elément
piézoélectrique

contrainte mécanique



Capteurs actifs



Les matériaux piézoélectriques peuvent être soit des cristaux ou matières minérales naturelles, soit des créations de l'homme.

- ❑ **Cristaux naturels Berlinite, Quartz**
- ❑ **D'autres matériaux L'os, L'émail dentaire.**
- ❑ **Céramiques et cristaux fabriquées par l'homme Phosphate de gallium,**

Capteurs actifs

□ **Avantages:**

**excellente réponse en fréquence ;
miniaturisation.**

□ **Inconvénients :**

**Sensibilité à la température ;
nécessite un câble de liaison de faible bruit.**

CAPTEUR ET INSTRUMENTATION

Capteurs de déplacement
et vitesse

Capteurs de déplacement

Introduction

Les capteurs de déplacement et position sont d'un emploi très général, d'une part, parce que le contrôle des positions et déplacements est un élément important pour le fonctionnement correct des machines et d'autre part, parce qu'un **certain nombre de grandeurs physiques sont mesurables par les déplacements** qu'elles imposent à des corps : forces, pressions, accélération.

Les capteurs pneumatiques

Les capteurs à ultrasons

Les capteurs mécaniques

Les capteurs optiques

Les capteurs résistifs

Les codeurs

Les capteurs inductifs

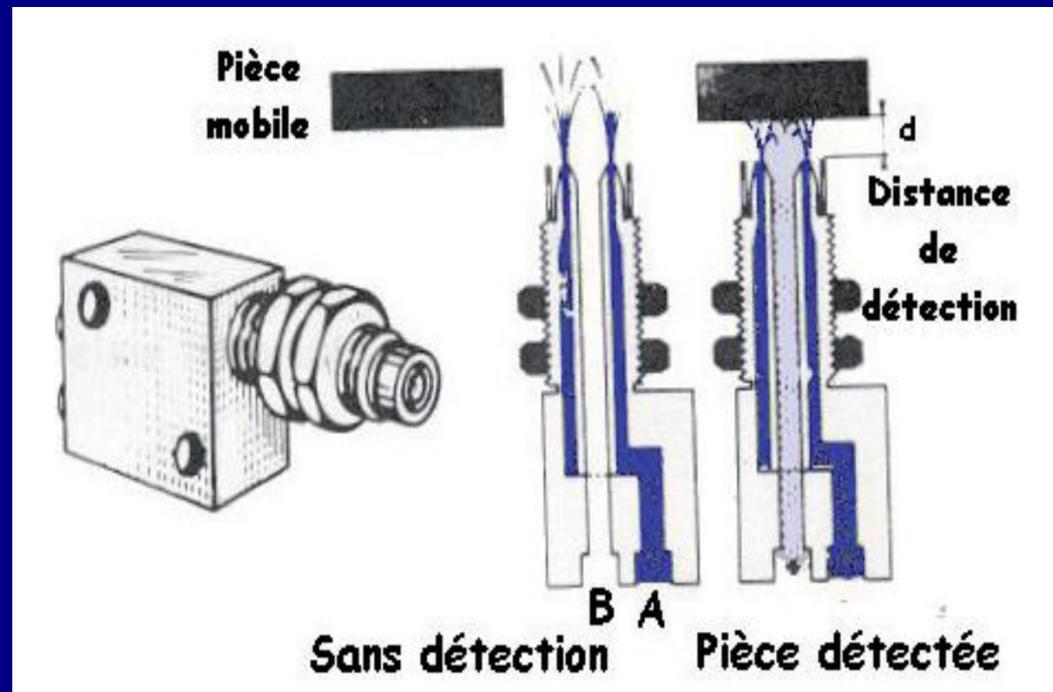
Les capteurs capacitifs

Les capteurs pneumatiques

Principe

D'utilisation limitée, les capteurs pneumatiques sont habituellement associés à des détecteurs électriques. Appelés généralement "capteurs à fuites", ils sont utilisés surtout pour détecter des pièces à faible distance, sans contact et donc sans usure. L'orifice A est relié à la distribution pneumatique tandis que l'orifice B est associé à un capteur électrique.

En absence de pièce, l'air sous pression s'évacue et aucune pression résiduelle ne revient par B. En présence de pièce, une pression résiduelle revient par B actionnant un micro rupteur.



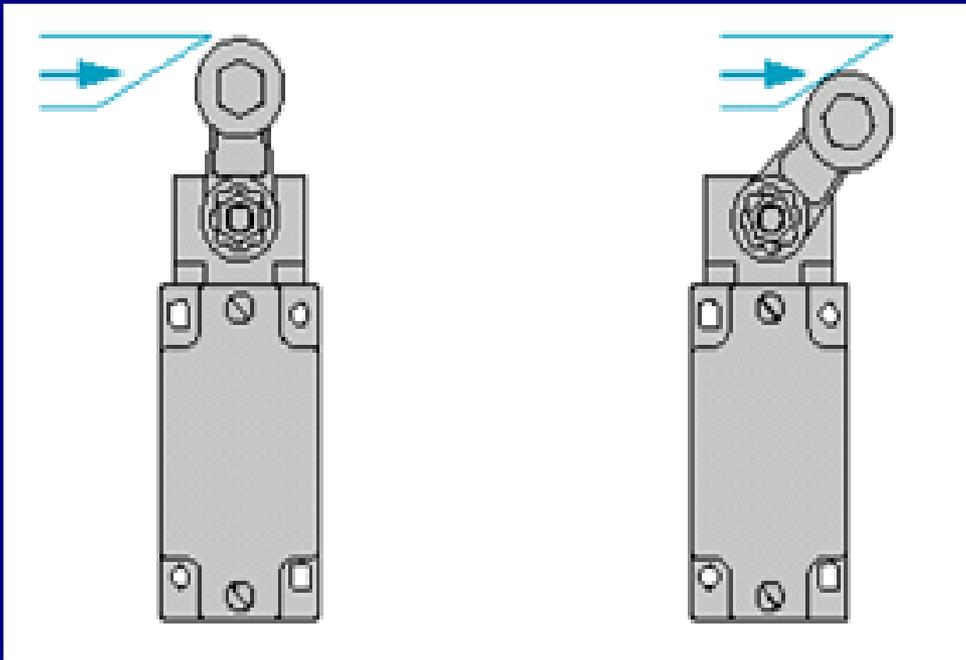
Les capteurs pneumatiques

Caractéristiques

- **Précision de la détection**
- **Choix en fonction de la distance à détecter, de la pression maximale et minimale et de l'encombrement**
- **Indice de protection**
- **Ils nécessitent un réglage**
- **Ils nécessitent une source d'énergie pneumatique**
- **Ils sont bruyants**

Les capteurs mécaniques

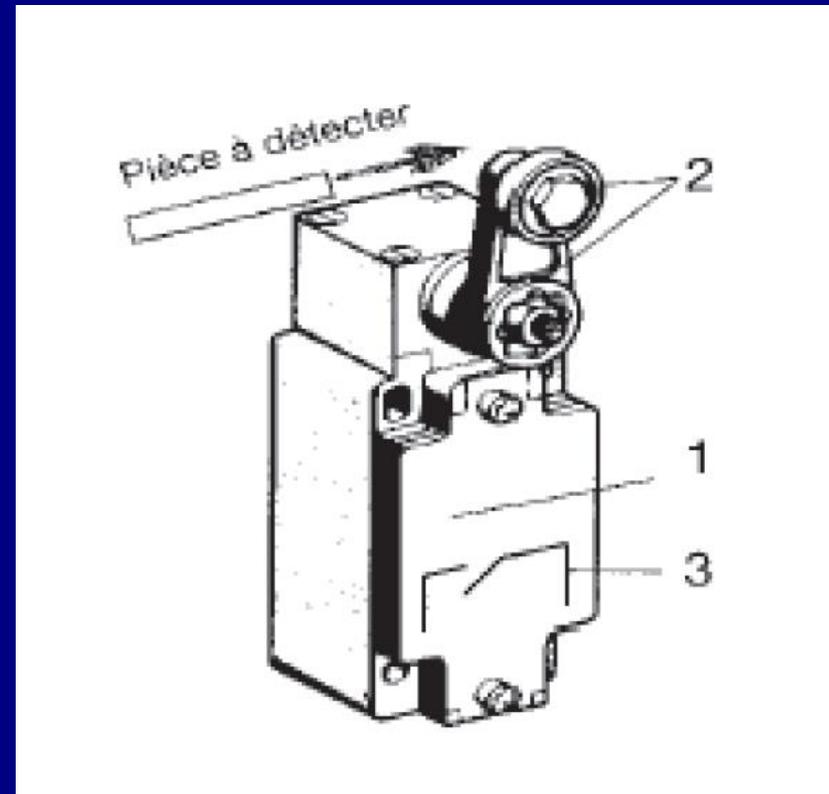
En perte de vitesse, les capteurs mécaniques à contact sont les seuls encore largement utilisés. L'action mécanique sur la partie mobile du capteur permet d'établir ou d'interrompre un contact électrique.



Les capteurs mécaniques

Caractéristiques

- Pouvoir de coupure et type de contact (3)
- Taux moyen de bon fonctionnement
- Encombrement
- Indice de protection
- Type de palpeur (2)

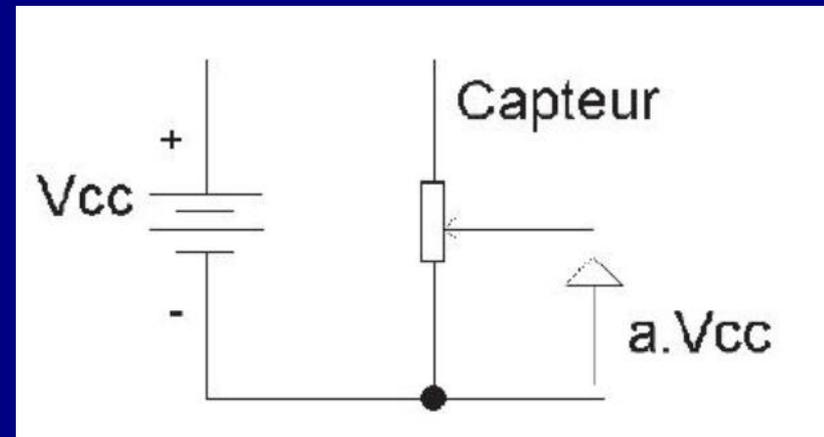
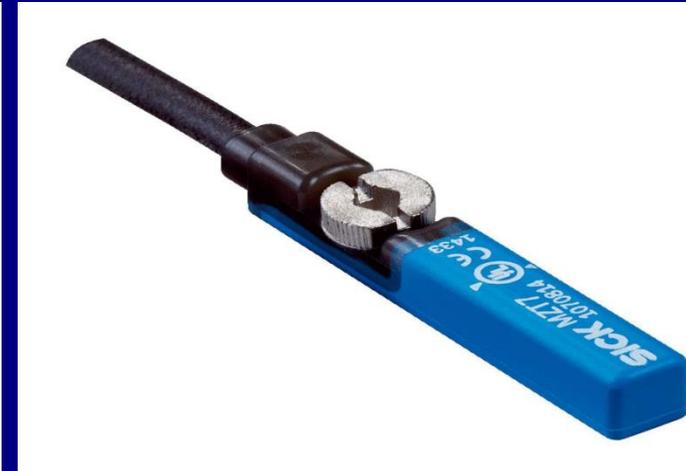
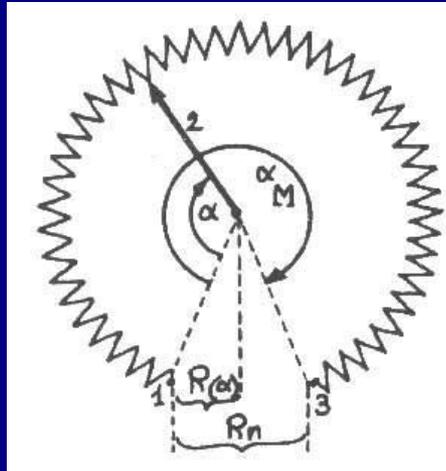


Les capteurs résistifs

Essentiellement utilisés pour mesurer des déplacements ou des rotations. Ils utilisent le principe du montage potentiométrique permettant d'obtenir une relation directe entre déplacement et tension.

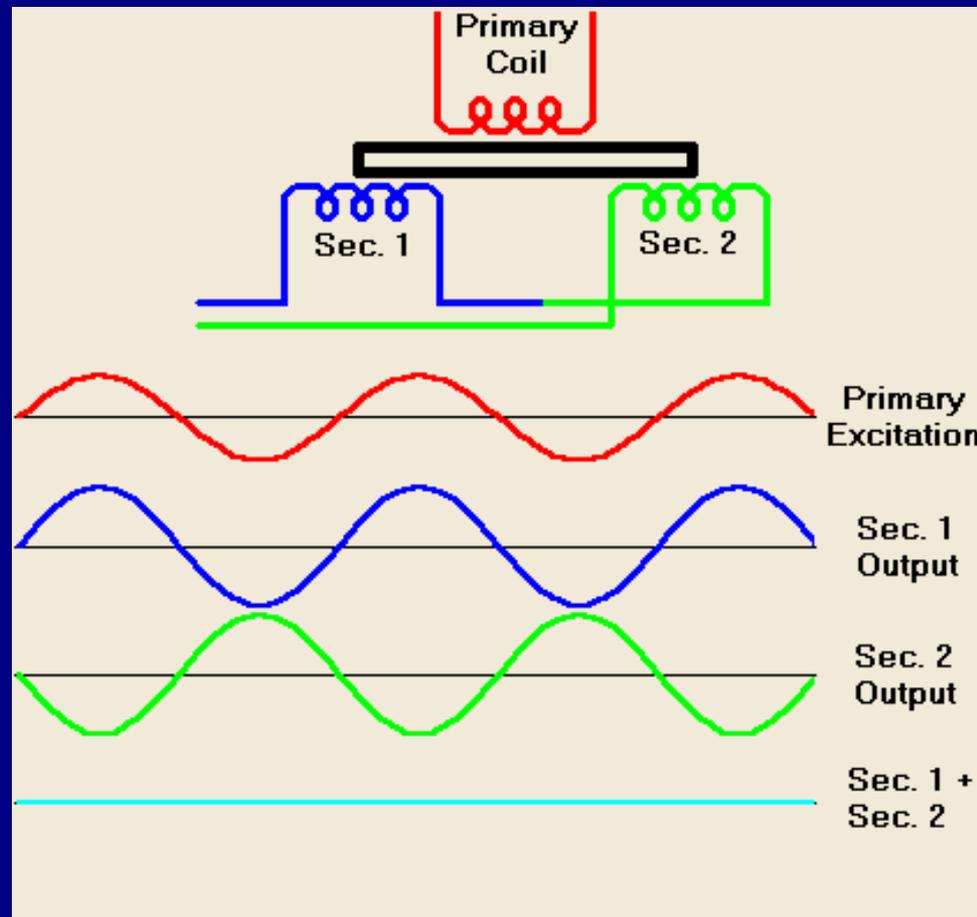
Caractéristiques :

- Longueur ou angle de la course
- Résistance totale
- Linéarité
- Force de déplacement
- Durée de vie
- Répétabilité



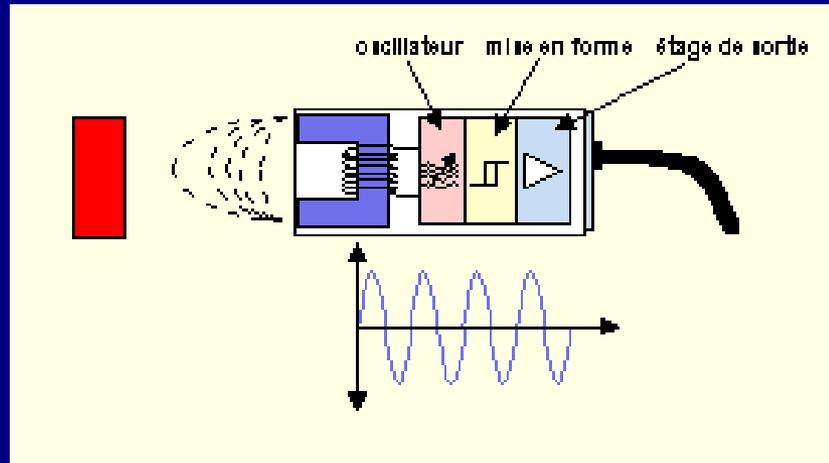
Les capteurs inductifs

Les capteurs inductifs sont parmi les plus utilisés sur les systèmes automatisés. Plusieurs types de capteurs cohabitent mais ils reposent tous sur un phénomène magnétique.



Les détecteurs inductifs

Ces capteurs se composent d'un oscillateur ayant pour fonction de générer un champ magnétique de fréquence 100 à 600Hz. Lorsqu'une pièce métallique pénètre dans ce champ, elle est le siège de courants induits circulaires qui se développent à sa périphérie. Ces courants constituent une surcharge pour le système oscillateur et entraînent de ce fait une réduction de l'amplitude des oscillations au fur et à mesure de l'approche de l'objet métallique, jusqu'à blocage complet. La détection est effective lorsque la réduction de l'amplitude des oscillations est suffisante pour provoquer un changement d'état de la sortie du détecteur.



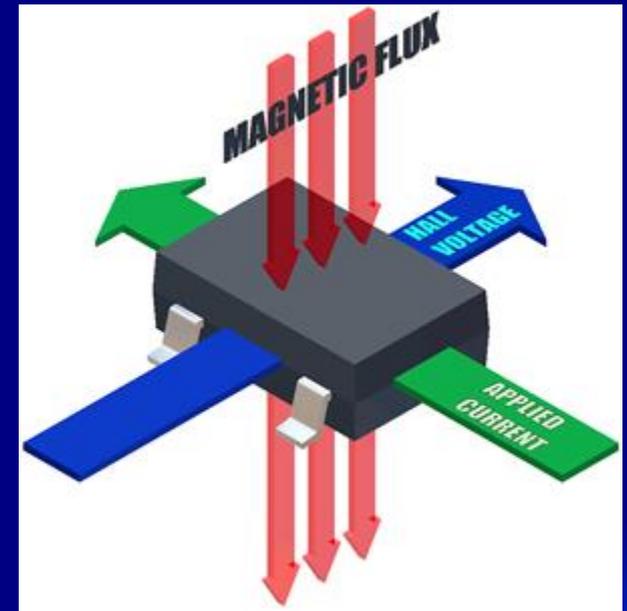
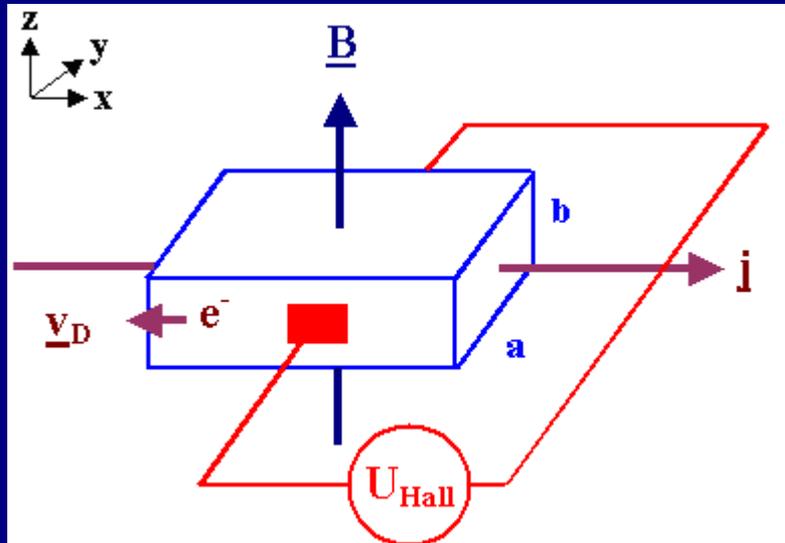
Les détecteurs inductifs

Caractéristiques :

- Tension d'alimentation**
- Consommation**
- Courant de sortie**
- Portée nominale de détection**
- Ils ne peuvent détecter que des matériaux métalliques**

Capteur à effet Hall

Lorsqu'un matériau semi conducteur est parcouru par un courant I_c et soumis aux grandes faces à un champ d'induction magnétique B , on constate, entre les deux faces parallèles à la direction du courant, l'existence d'une tension appelée tension de Hall (V_h). L'amplitude de cette tension dépend à la fois du courant, du champ B , d'une constante dépendant des caractéristiques du semi-conducteur et de l'angle entre le champs B et la normale de la surface. Un capteur à effet Hall est basé sur ce fonctionnement.



Capteur à effet Hall

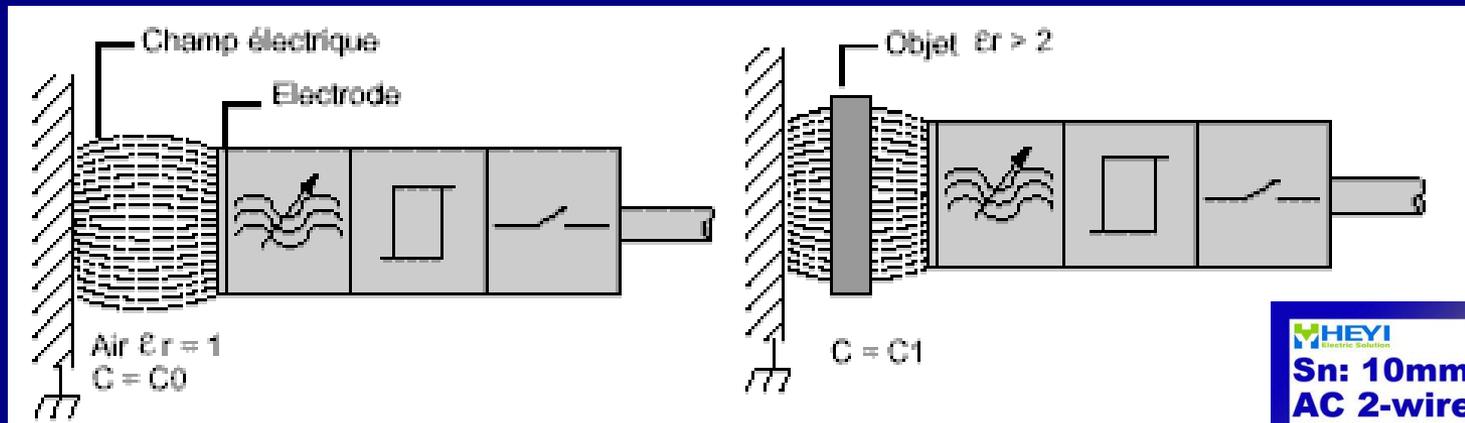
Les capteurs à effet hall sont beaucoup utilisés en raison de leur mise en oeuvre aisée, de leur petite dimension et de leur précision.

Caractéristiques :

- Tension d'alimentation
- Courant de sortie
- Polarité de l'aimant (s'il est associé à un aimant)
- Sensibilité (en V/G)
- Gamme de mesure (en Gauss) ($1\text{T} = 10\ 000\ \text{G}$)

Les capteurs capacitifs

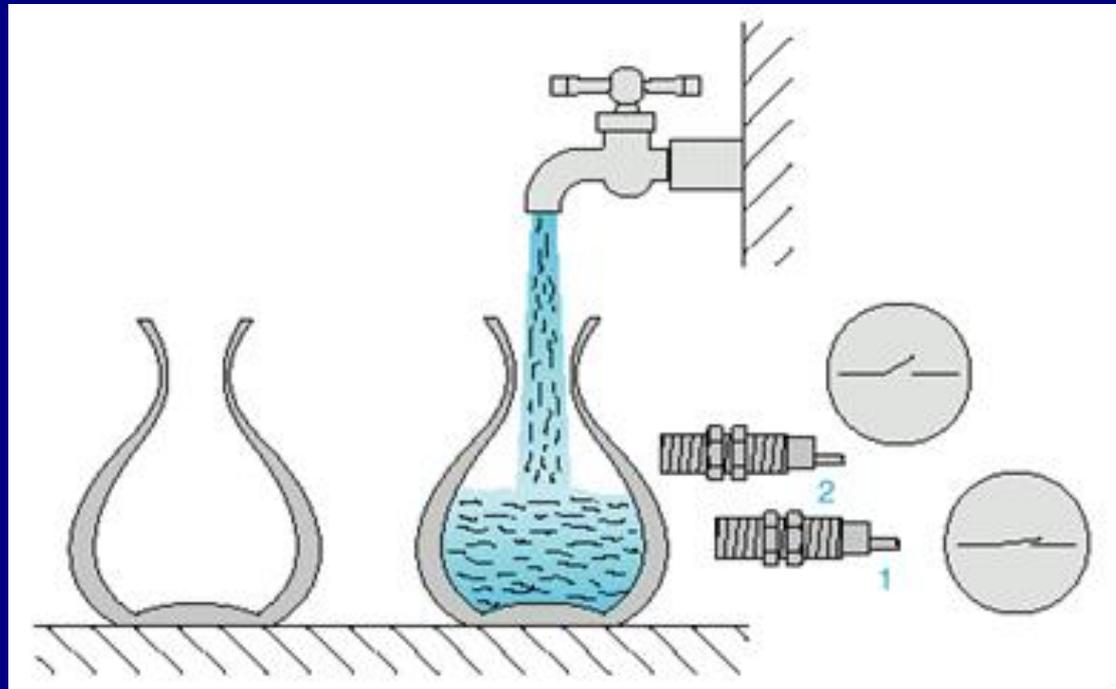
Un capteur capacitif permet de détecter la présence d'un objet métallique ou non. Lorsqu'un objet de nature quelconque ($\epsilon_r > 2$) se trouve en regard de la face sensible du détecteur, ceci se traduit par une variation du couplage capacitif ($C1$). Cette variation de capacité ($C1 > C0$) provoque le démarrage de l'oscillateur. Après mise en forme, un signal de sortie est délivré.



Les capteurs capacitifs

Avantages:

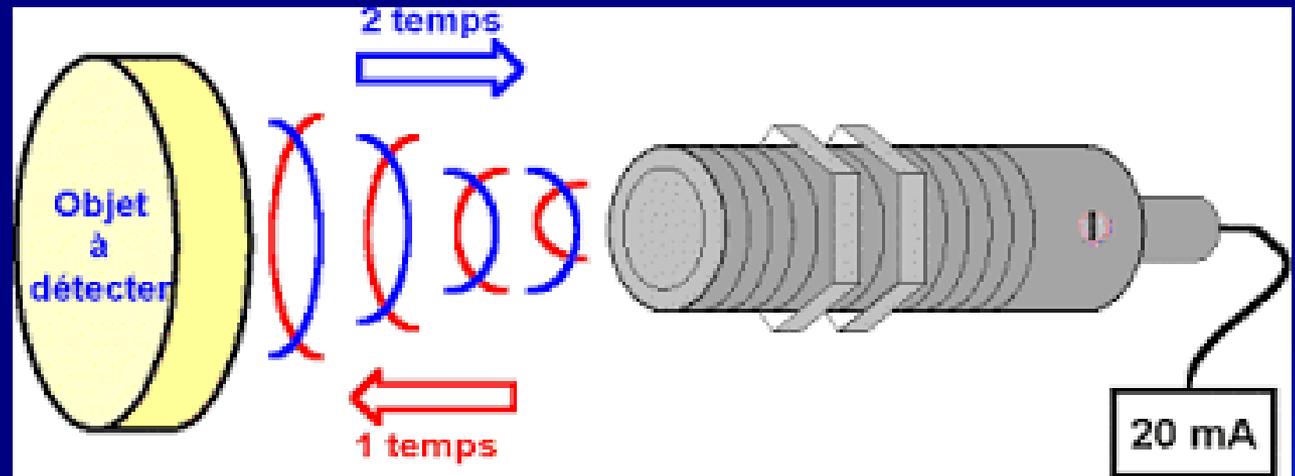
- Pas de contact physique avec l'objet à détecter.
- Cadences de fonctionnement élevées.
- Portée nominale 2 à 5 mm
- Détection d'objets de toutes natures, conducteurs ou non conducteurs, tels que : métaux, minerais, bois, plastique, verre, carton, cuir, céramique, fluides, etc...



Les capteurs à ultrasons

L'ultrason est une onde acoustique dont la fréquence est trop élevée pour être audible par l'être humain. Il peut dans certaines applications, remplacer avantageusement le capteur inductif ou capacitif et il peut détecter des objets jusqu'à plusieurs mètres.

L'émetteur et le récepteur sont situés dans le même boîtier. L'émetteur envoie un train d'ondes qui va se réfléchir sur l'objet à détecter et ensuite revenir à la source. Le temps mis pour parcourir un aller-retour permet de déterminer la distance de l'objet par rapport à la source. Plus l'objet sera loin plus il faudra longtemps pour que le signal revienne.



Les capteurs à ultrasons

Caractéristiques

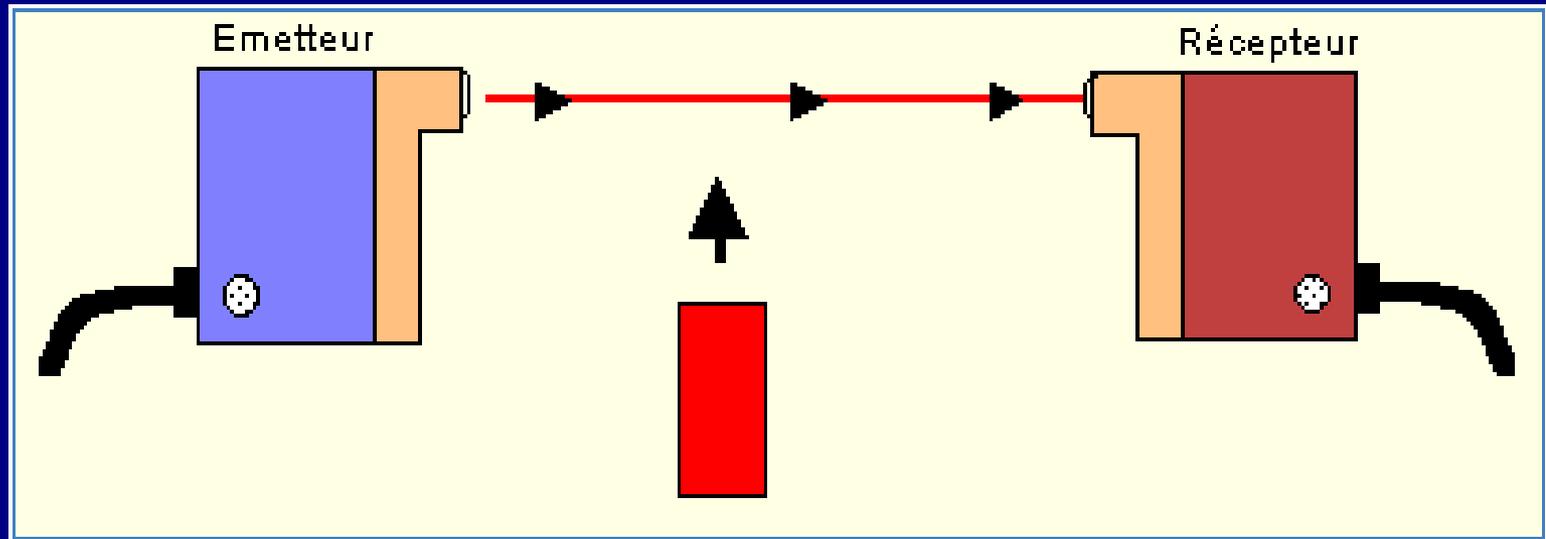
- **Le capteur permet de détecter tout type de matériau sauf les objets absorbants les ondes sonores tel que la ouate, le feutre,...**
- **Le signal est transmis grâce à la présence de l'air, il faut donc éviter les courants d'air qui détourneraient le signal de leurs destinations.**
- **Aucun fonctionnement possible dans le vide.**
- **Le signal n'est pas influencé par la poussière et les environnements brumeux.**
- **Il faut éviter de détecter des objets dont l'angle d'inclinaison est trop grand car le signal risque de ne plus revenir, ce qui rendrait toute détection impossible.**

Les capteurs optiques

Ces capteurs reposent sur l'émission et la réception d'un faisceau lumineux.

□ **Systeme barrage** : Emetteur et récepteur sont séparés. Particulièrement adapté pour la détection des matériaux opaques, les environnements pollués (pluie, poussière...) et les longues distances.

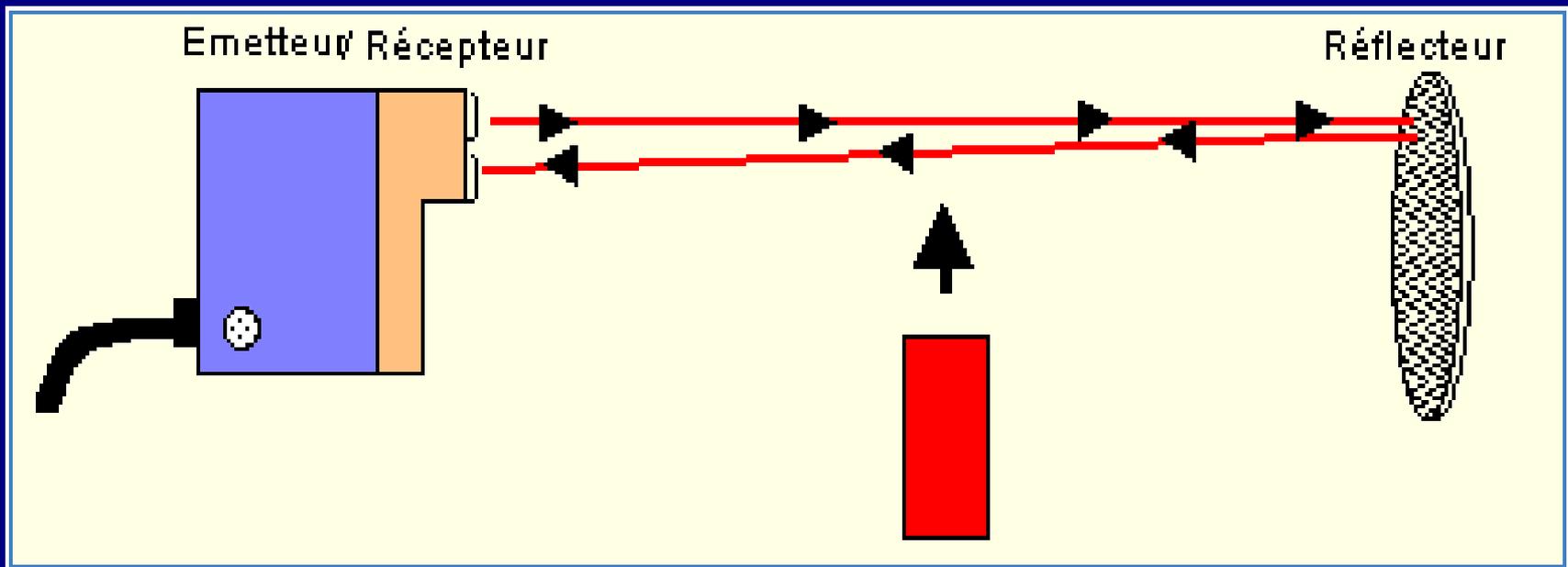
Contrainte : détection de matériaux non transparents et nécessite d'un alignement rigoureux.



Les capteurs optiques

□ **Système reflex** : Emetteur et récepteur sont dans le même boîtier. L'objet empêche le retour du faisceau lumineux. Adapté pour les applications où la détection n'est possible que d'un coté et les environnements relativement propres.

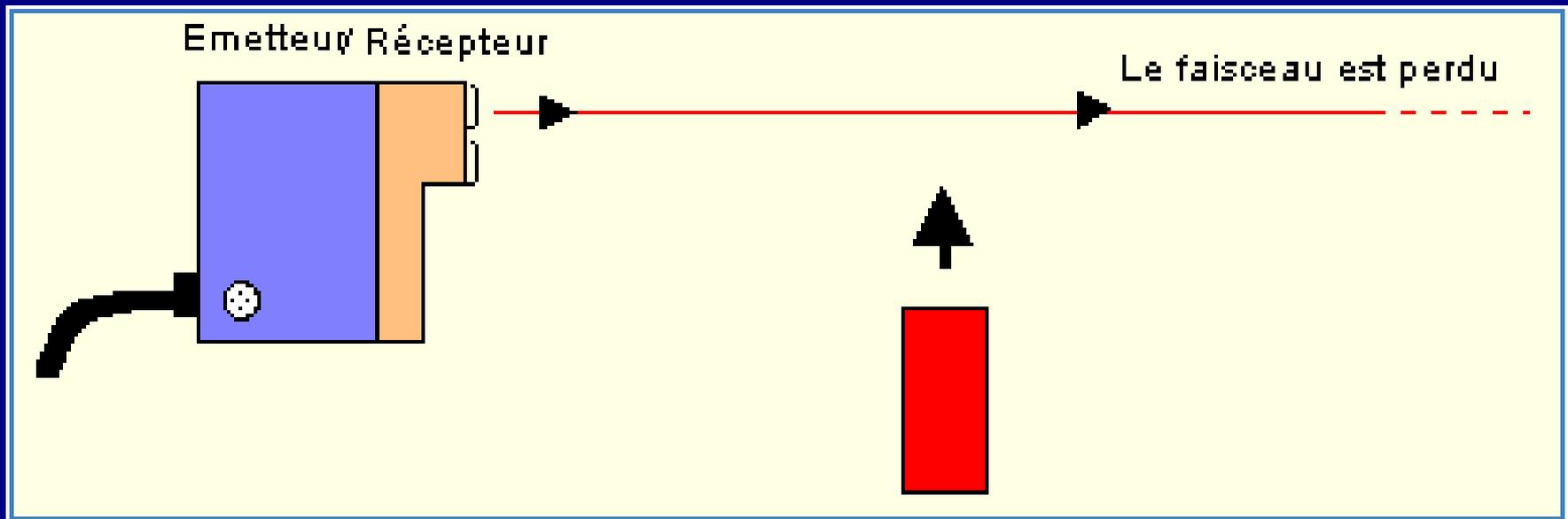
Contrainte : Ne convient pas pour les objets réfléchissants.



Les capteurs optiques

□ **système de proximité** : Emetteur et récepteur sont dans le même boîtier. L'objet permet le retour du faisceau lumineux. Adapté pour les applications où la détection n'est possible que d'un coté et les objets transparents et translucides.

Contrainte : les portées dépendent de la capacité des objets à réfléchir la lumière et à éviter dans les environnements pollués.



Les codeurs

Les codeurs sont des capteurs rotatifs, placés sur l'axe d'une pièce tournante qui restituent un code numérique en fonction de la position. Essentiellement deux types de codeurs sont disponibles.

Les codeurs absolus

Grâce à un circuit perforé associé à des capteurs optiques, il restitue, en parallèle ou en série, un code numérique qui spécifie l'angle de rotation de l'axe. Le nombre de bits détermine la précision de la mesure.

Par exemple : codeur 10bits donne 1024 positions soit une précision de $360^\circ/1024=0,35^\circ$



Les codeurs

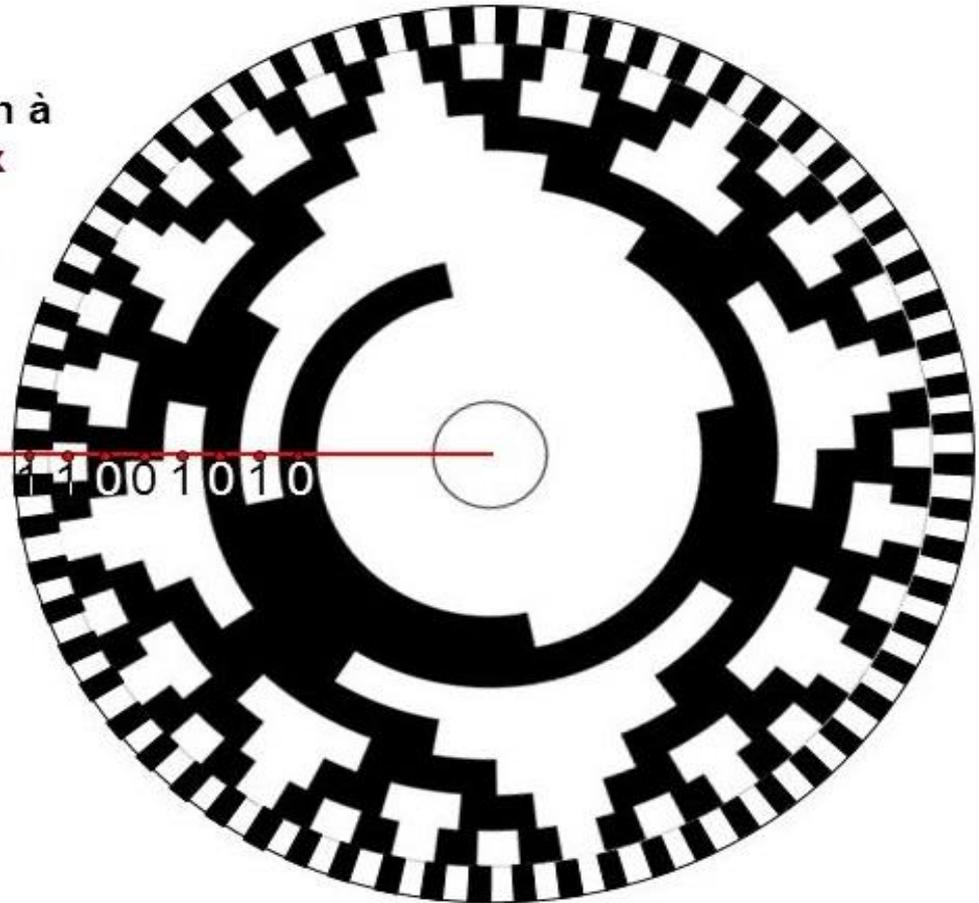
Les codeurs absolus

Lors du passage d'une position à la suivante, il n'y a **jamais deux bits à changer simultanément**. On utilise pour cela le **codage binaire réfléchi**.

Le bit de poids faible est sur la piste extérieure.

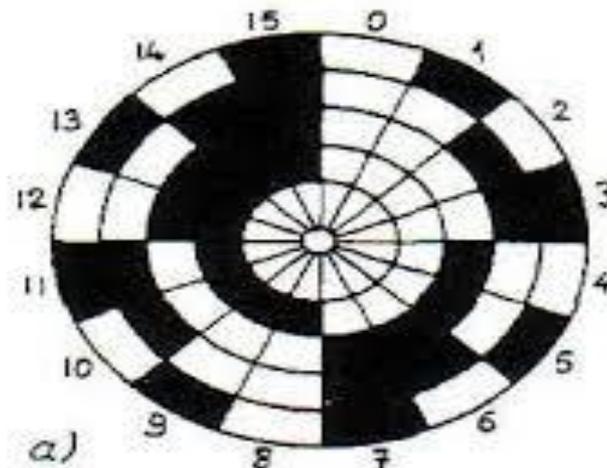
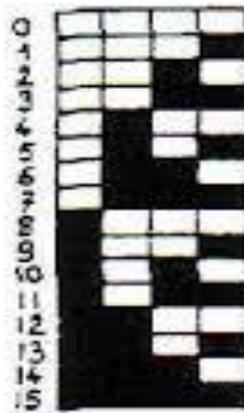
Le nombre lu sera :

0 1 0 1 0 0 1 1



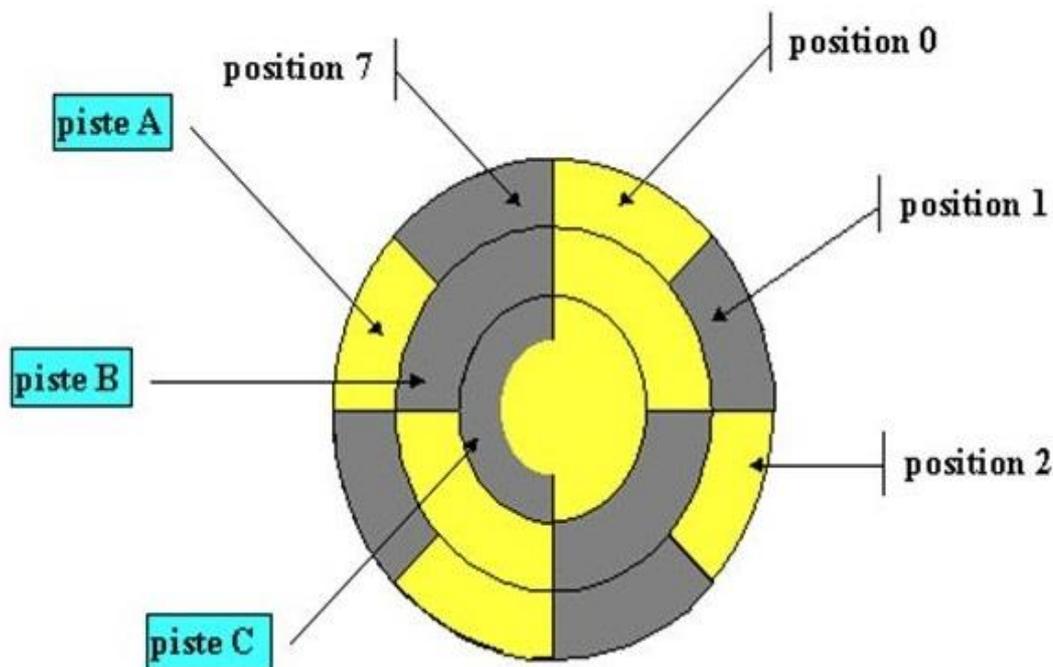
Les codeurs

Les codeurs absolus



Binaire naturel

Codeur absolu 3 pistes



Codeur absolu 12 pistes

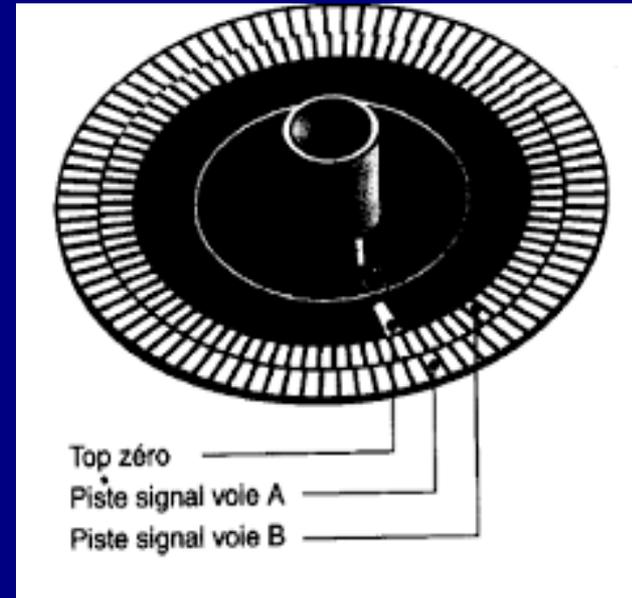


Les codeurs

Les codeurs incrémentaux

Ces codeurs fournissent 3 signaux logiques qui caractérisent la rotation angulaire :

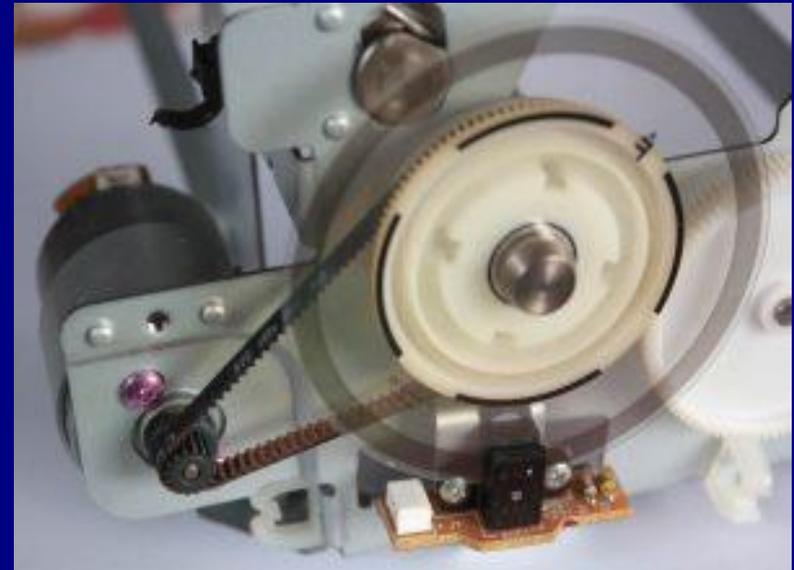
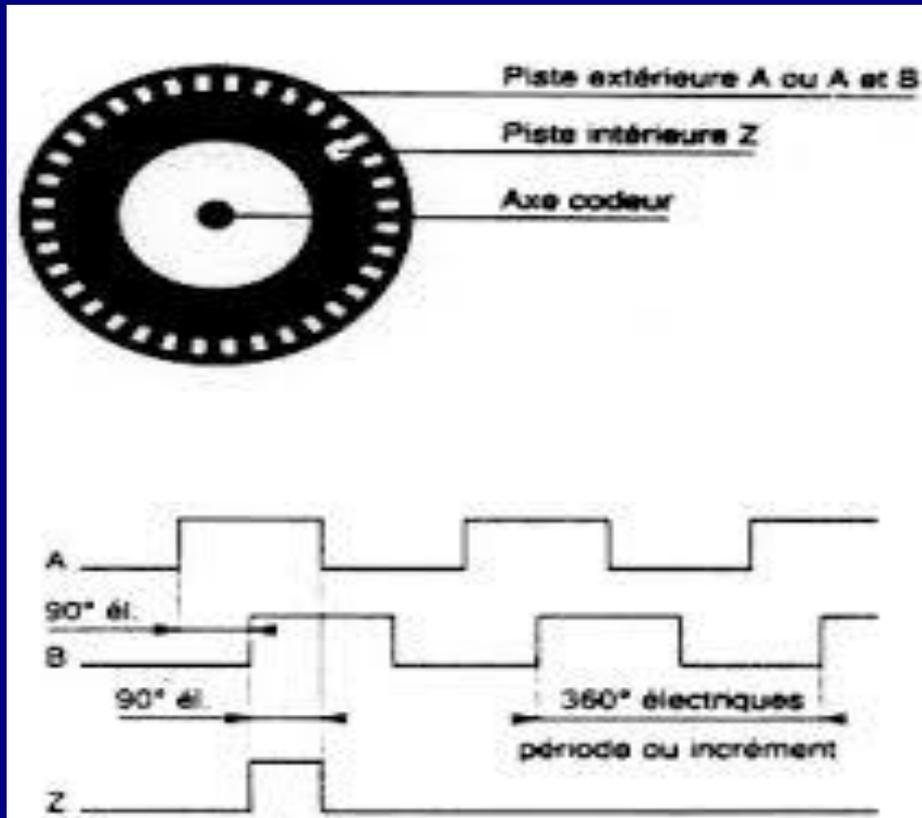
- **A** : signal impulsionnel de n impulsions par tour (ou n caractérise la précision)
- **B** : signal impulsionnel de n impulsions par tour déphasé de 90° par rapport à A
- **top (ou z)** : signal actif une fois par tour lors du passage par le 0° . Ce signal dure $1/4$ de période du signal A



Les codeurs

Les codeurs incrémentaux

Le déphasage entre A et B permet de déterminer le sens de rotation. Dans un sens, lors du front montant de A, B est à "0", dans l'autre sens pendant le front montant de A, B est à "1".



Capteurs de vitesse

Les capteurs de vitesse portent également le nom plus industriel de tachymètres.

Le type de déplacement est soit rectiligne, soit angulaire ; la sortie est analogique ou numérique.

Tachymètres linéaires à fil

Ce type de capteur se présente sous l'aspect d'un boîtier d'où sort l'extrémité d'un fil ou câble que l'on doit fixer à l'objet dont on veut mesurer la vitesse.

Ce câble s'enroule sur un tambour, muni d'un ressort de rappel, à l'intérieur du boîtier. Le tambour entraîne en rotation une génératrice tachymétrique. On mesure alors une vitesse angulaire.

Capteurs de vitesse

Tachymètres linéaires à fil



Capteurs de vitesse

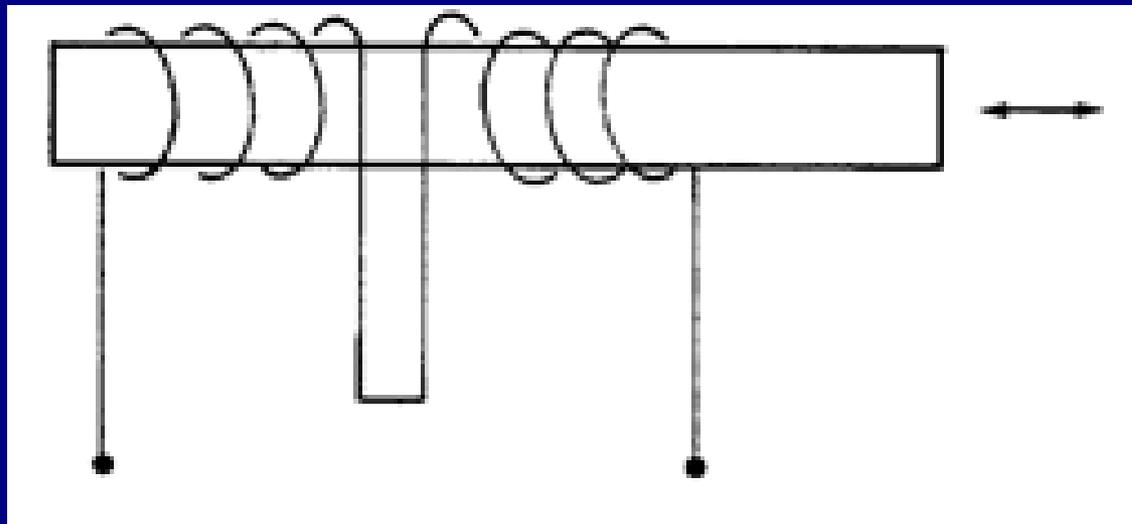
Caractéristiques :

- Pas de source de tension extérieure
- Bonne fiabilité
- Précision moyenne
- Course moyenne

Capteurs de vitesse

Tachymètres électromagnétiques

Ce type de capteur comporte un noyau magnétique (aimant permanent) mobile dans une bobine fixe. L'aimant, entraîné par l'objet à mesurer, induit dans la bobine une tension proportionnelle à la vitesse de celui-ci.



Ils sont basés sur la loi de Faraday

Ils peuvent être à courant continu (les plus courants) ou à courant alternatif (synchrone ou asynchrone).

Capteurs de vitesse

Loi de Faraday

- La loi de Faraday:

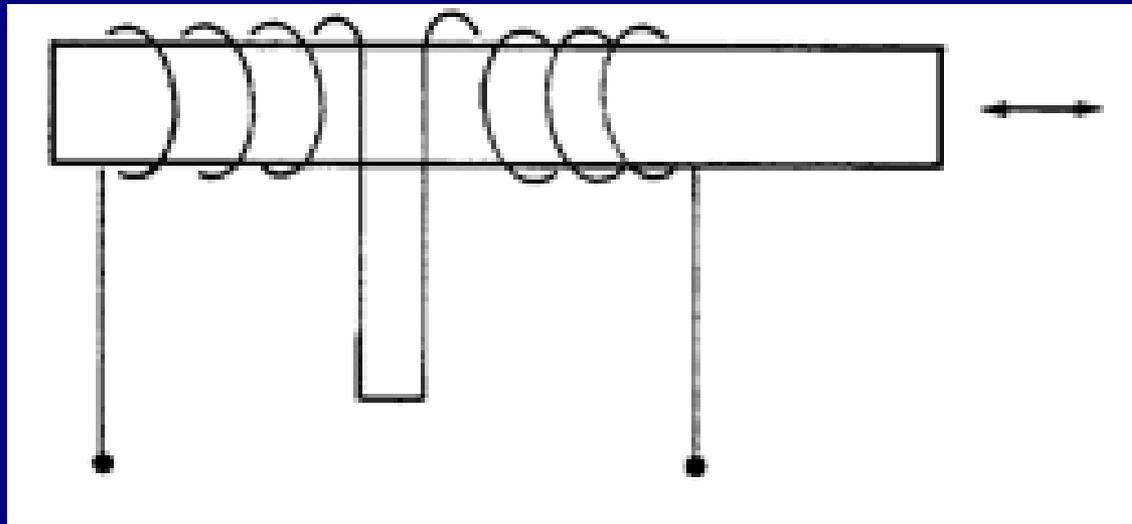
« La force électromotrice induite dans un circuit fermé est proportionnelle au taux de variation du flux du champ magnétique traversant la surface délimitée par le circuit par rapport au temps »

$$\mathbf{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} [V]$$

Capteurs de vitesse

Tachymètres électromagnétiques

Ce type de capteur comporte un noyau magnétique (aimant permanent) mobile dans une bobine fixe. L'aimant, entraîné par l'objet à mesurer, induit dans la bobine une tension proportionnelle à la vitesse de celui-ci.



Ils sont basés sur la loi de Faraday

Ils peuvent être à courant continu (les plus courants) ou à courant alternatif (synchrone ou asynchrone).

Capteurs de vitesse

Génératrice tachymétrie à courant continu

Le principe de fonctionnement est le même que celui d'une machine à courant continu.

L'inducteur est le plus souvent un aimant permanent (pas d'alimentation) et l'induit (siège de la force électromotrice est un bobinage).

L'expression de la force électromotrice E en fonction de la vitesse N est :

$$E = k.N$$

Ce procédé de mesure permet de détecter le sens de rotation. Si le courant prélevé est très faible, il n'y a pas de réaction magnétique d'induit et c'est une fonction quasi linéaire de la vitesse.

Capteurs de vitesse

Caractéristiques :

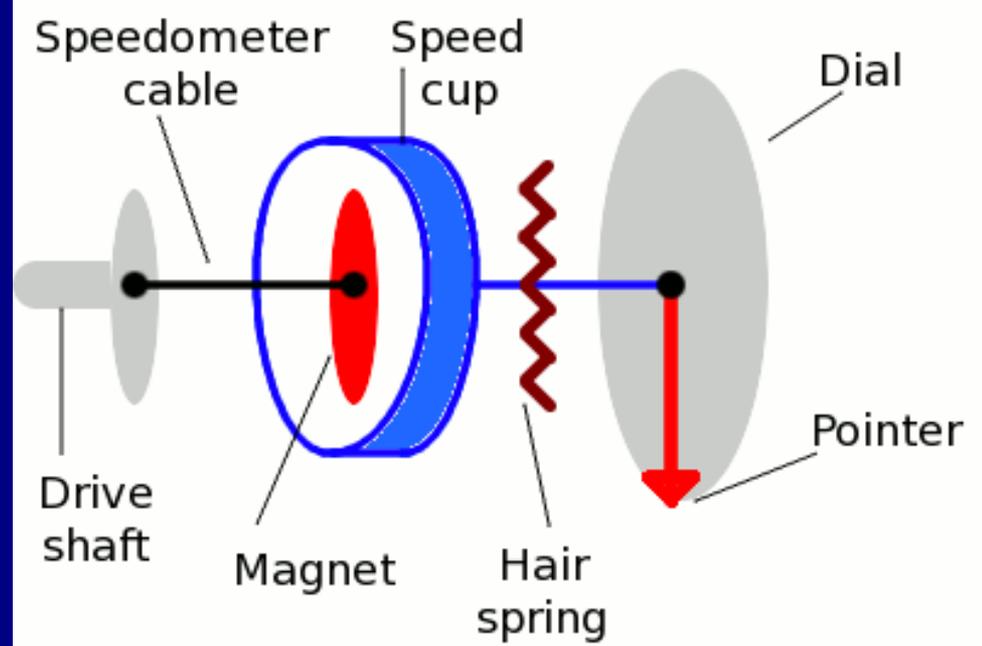
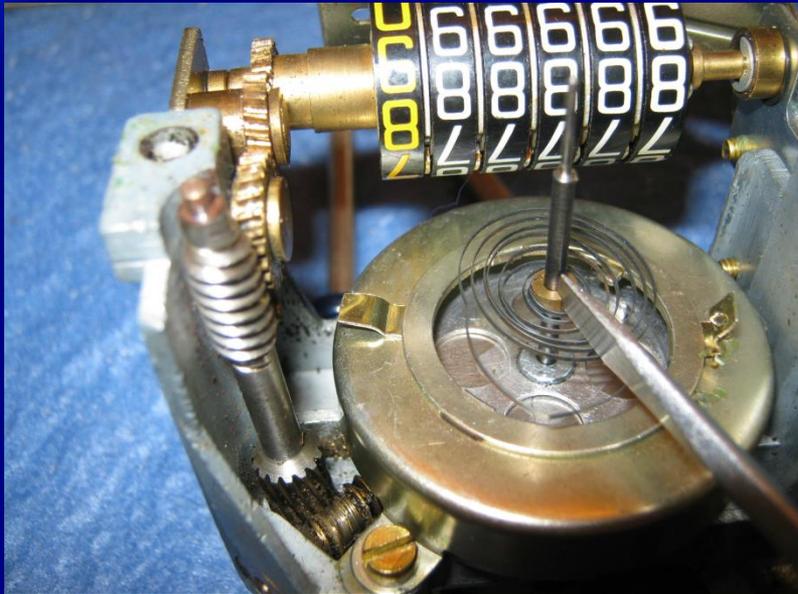
- Large gamme d'étendue de mesure
- Donne le sens de rotation
- Niveau de signal élevé
- Bonne linéarité
- Bonne précision
- Haute fiabilité
- Usure au collecteur
- Pièce a vie limitée
- Risque de parasites de commutation

Capteurs de vitesse

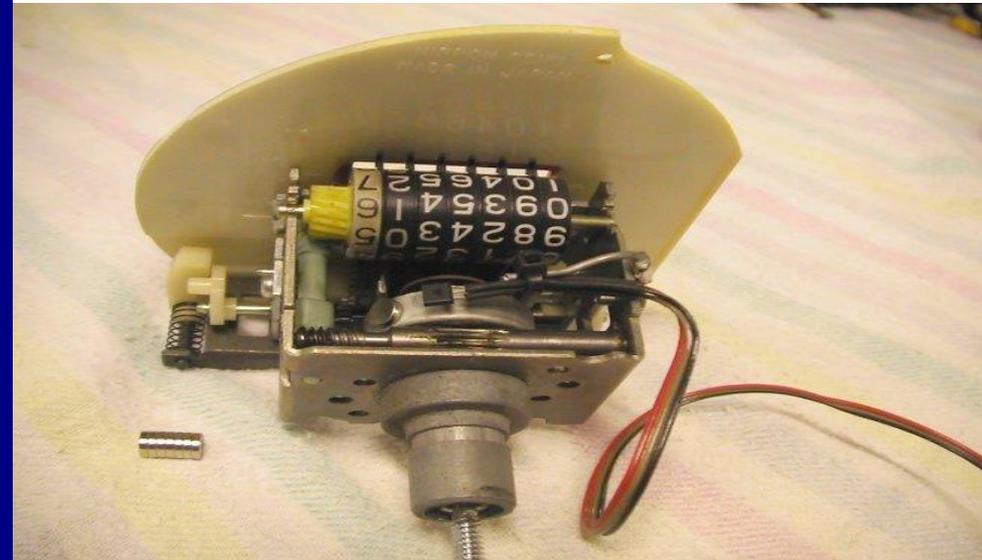
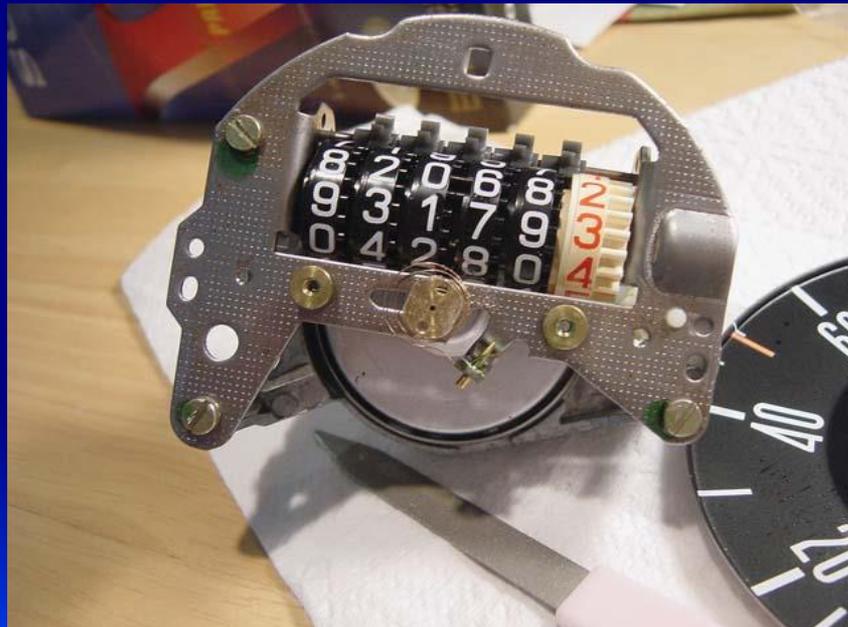
Génératrice tachymétrique à courant alternatif

Le tachymètre de courant alternatif peut être construit avec un enroulement fixe et un champ tournant des aimants permanents. Ils génèrent la tension et fréquence qui sont proportionnelles à la vitesse de rotation. Le principal intérêt est de ne pas avoir de collecteur et de balais. L'entretien est donc moindre et la durée de vie plus importante. Les deux types de machines sont utilisés (synchrone et asynchrone). Dans les deux cas, on ne connaît pas le sens de rotation sauf en triphasé où on peut le retrouver par l'ordre de succession des phases.

Capteurs de vitesse



www.explainthatstuff.com



Capteurs de vitesse

Pour les génératrices synchrones la valeur de la vitesse peut être obtenue à partir de :

- **l'amplitude du signal prélevé sur la machine après redressement et filtrage.**
- **la fréquence des signaux prélevés sur la machine.**

Pour les génératrices asynchrones, il faut une excitation extérieure sinusoïdale de fréquence fixe. La valeur de la vitesse est obtenue après redressement et filtrage.

Caractéristiques :

- **Caractéristiques générales moyennes** □ **Bonne durée de vie**
- **Signal de sortie de plusieurs types** □ **Gamme d'étendue de mesure limitée** □ **Linéarité moyenne** □ **Circuits associés complexes**
- **Pas d'informations sur le sens de rotation**

CAPTEUR ET INSTRUMENTATION

Capteurs de de débit

Capteurs de débit

Le débit (en anglais flow)

C'est la quantité de fluide qui s'écoule ou qui est fournie par unité de temps.

Exemple : Le débit d'un cours d'eau, d'une pompe...

Il existe deux types de débits, le **débit massique** et le **débit volumique**.

Le débit massique (Q_m) et le débit volumique (Q_v) sont liés par la relation :

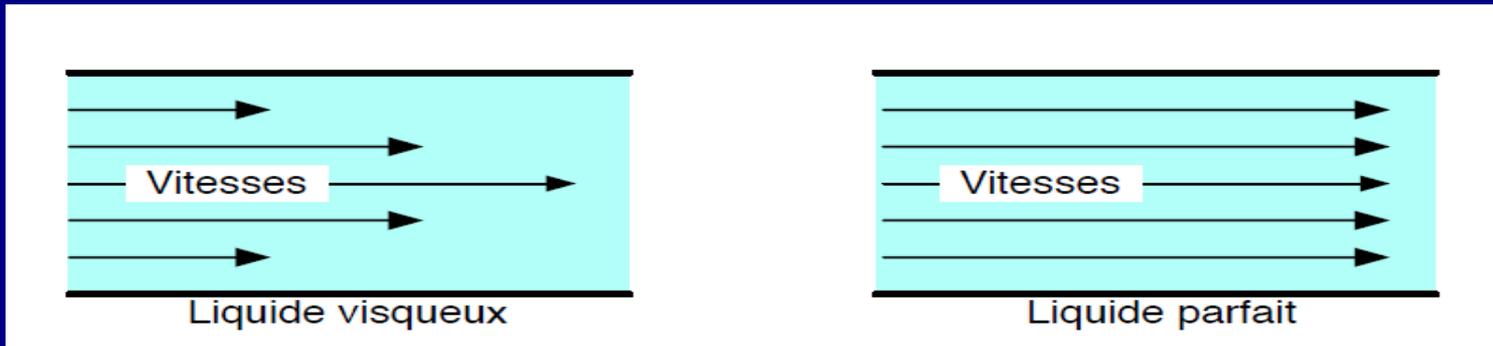
$$Q_m(\text{kg/s}) = \rho(\text{kg/m}^3) \times Q_v(\text{m}^3/\text{s})$$

Capteurs de débit

Régimes d'écoulement des fluides

En dynamique des fluides, il existe deux sortes de fluides :

- Le fluide parfait qui ne présente pas de résistance à l'écoulement.
- Le fluide réel qui est visqueux et présente donc une résistance à l'écoulement.

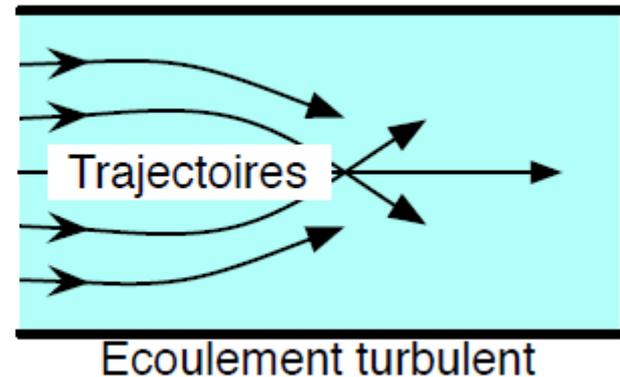
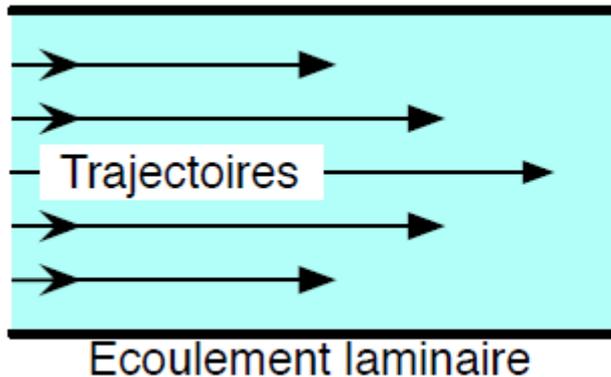


Capteurs de débit

Régimes d'écoulement des fluides

Il existe deux régimes d'écoulement pour un liquide :

- **L'écoulement laminaire** qui est un régime d'écoulement où le fluide se rapproche du fluide idéal.
- **L'écoulement turbulent** où l'effet de la viscosité se fait sentir.



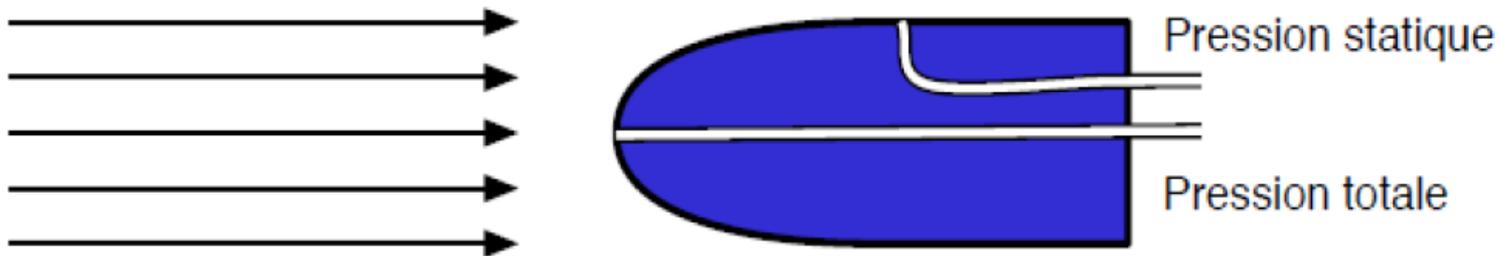
Capteurs de débit volumique

Débitmètre à tube de Pitot

Dans un tube de Pitot, la mesure des pressions statique et totale permet de déterminer la vitesse et par conséquent le débit :

$$V[m/s] = \sqrt{\frac{2(P_{totale} - P_{statique})[\rho_a]}{\rho[kg/m^3]}}$$

Masse volumique du fluide.



Capteurs de débit volumique

Rotamètre

Un rotamètre est constitué d'un flotteur localisé dans une colonne en verre graduée. En l'absence de débit, le flotteur coule au fond de la colonne de verre. La force de gravité agissant sur le flotteur excède la force d'Archimède.

La relation entre le débit Q et la surface A , qui est la surface entre la paroi intérieure de la colonne et le flotteur, est exprimée par :

$$Q = K.S \sqrt{2g \frac{V_f}{S_f} \left(\frac{\rho_f}{\rho} - 1 \right)}$$

Avec :

- S_f : La surface du flotteur face au débit.
- V_f : Volume du flotteur.
- ρ_f : La masse volumique du flotteur



Capteurs de débit volumique

Caractéristiques :

□ La gamme de mesure va :

De 0,5 litre/h à 200 000 litres/h pour les gaz De 0,2 litre/h à 20 000 litres/h pour les liquides.

□ La précision est de 3 à 10% de l'étendue de la mesure.

□ La température du fluide peut approcher 400°C

□ Sous 25 bars. Le rotamètre introduit des pertes de charge.

Capteurs de débit volumique

Débitmètre à coupelle, à hélice ou à turbine

Ce type de capteur permet de mesurer le débit par mesure de vitesse de rotation du corps d'épreuve (coupelle, hélice ou turbine) et cela par un dispositif tachymétrique : Dynamotachymétrique, Capteur optique ou Capteur inductif.

Des précisions de l'ordre de 1% peuvent être atteintes. Cependant, la réponse peut être faussée par les turbulences ou par les variations de vitesses. Leur domaine d'utilisation est de 0,1 à 30 m/s pour les gaz et de 0,05 à 10 m/s pour les liquides..



Capteurs de débit volumique

Débitmètre à palette

Le fonctionnement de ce capteur est basé sur l'utilisation d'une palette qui est soumise à la force aérodynamique ou hydrodynamique de l'écoulement et à son poids.

La position d'équilibre est mesurée par un montage potentiométrique.



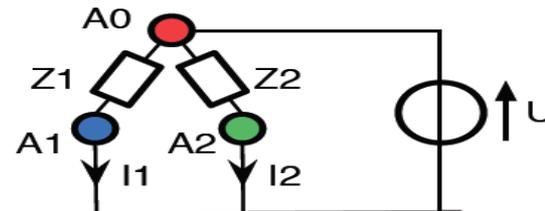
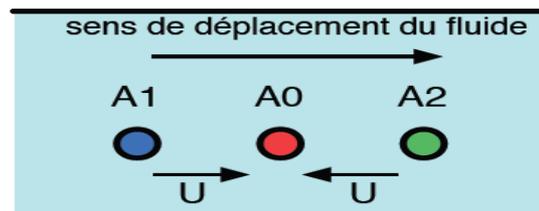
Capteurs de débit volumique

Débitmètre ionique

Trois conducteurs électriques sont placés perpendiculairement au déplacement du fluide. Le fils central est soumis à un potentiel élevé, les deux autres sont reliés à la masse. Ce champ électrique crée une ionisation du fluide.

Les courants électriques I_1 et I_2 sont identiques si la vitesse du fluide est nulle. Dans le cas contraire (fluide en mouvement), le système devient asymétrique. La différence des courants $I_2 - I_1$ est proportionnelle à la vitesse V .

Ce type de capteur est bien adapté aux faibles vitesses et permet la mesure du sens d'écoulement.



Capteurs de débit volumique

Débitmètres ultrasoniques

Un émetteur émet des ondes ultrasonores. La mesure du temps mis par les ondes pour parcourir la distance **L** entre l'émetteur et le récepteur permet de déterminer la vitesse du fluide :

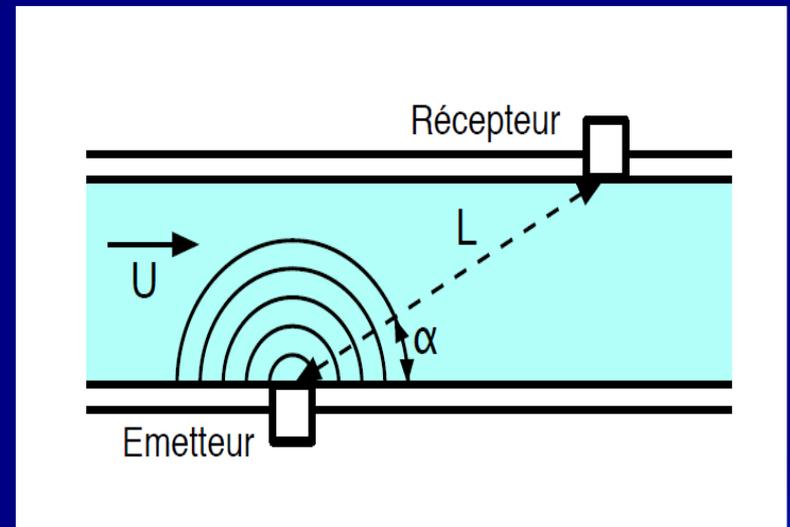
$$t = \frac{L}{c + U \cos \alpha}$$

Avec :

c : La vitesse du son dans le fluide

U : La vitesse du fluide.

α : L'angle entre **U** et la direction définie par le couple émetteur/récepteur.



Capteurs de débit volumique

Débitmètres ultrasoniques

□ Caractéristiques

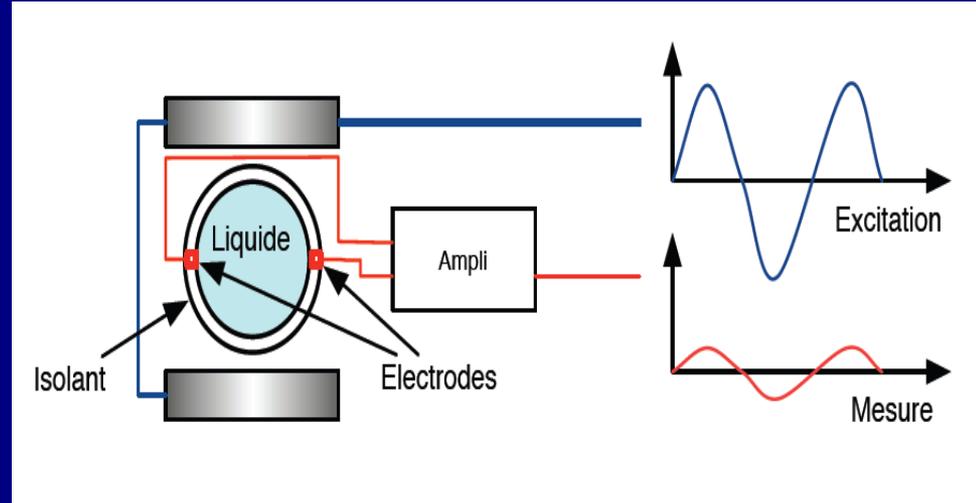
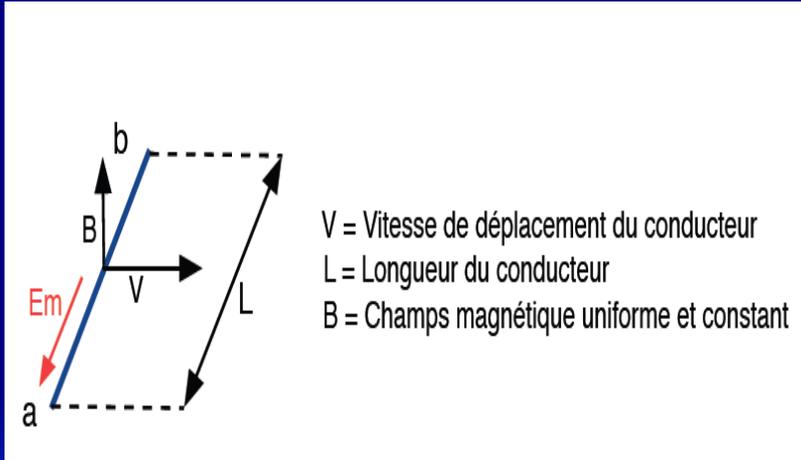
- * Echelle linéaire et réponse instantanée ;
- * Insensible à l'agressivité du fluide.
- * Mesure des débits entre 0,1 m³ /h et 105 m³/h.,
- * Débits de 0.03 à 30 m/s.
- * Précision de l'ordre de 1 % .
- * Mesure dans des conduites de de quelque mm de diamètre à plusieurs mètres.
- * Mesure dans les deux sens.

Capteurs de débit massique

Capteur électromagnétique

Le principe du débitmètre électromagnétique est basé sur la loi de Lenz : Un conducteur en mouvement dans un champ magnétique constant est soumis à une force électromotrice proportionnelle à la vitesse de déplacement du conducteur :

$$\vec{E} = \vec{V} \wedge \vec{B}$$



Capteurs de débit massique

On utilise les montages classiques de démodulation, comme par exemple le redressement mono-alternance.

Caractéristiques métrologiques.

Les liquides doivent avoir une **conductivité minimale de l'ordre de quelques S/cm** (l'eau potable a une conductivité comprise entre 200 et 1000 S/cm), pour que la résistance interne du générateur soit inférieure à la résistance d'entrée de l'appareillage électronique.

- acides, bases, pâtes,
- eau potable, eaux usées,
- lait, eau minérale, yaourt.

Etendue de la mesure

L'étendue de mesure est fonction du diamètre de la conduite, la vitesse d'écoulement pouvant varier de 1 à 10 m/s ; Précision : Classe 1 ; Constante de temps : De l'ordre de 1 s.