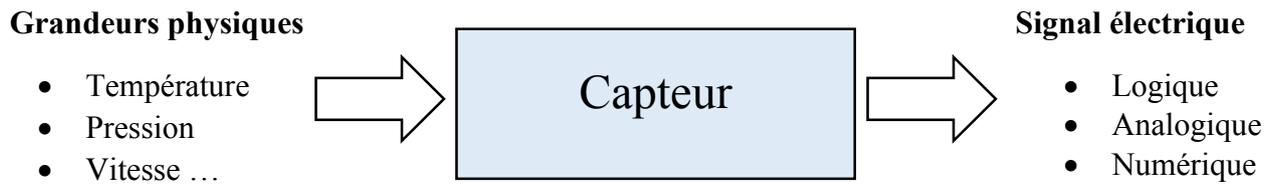
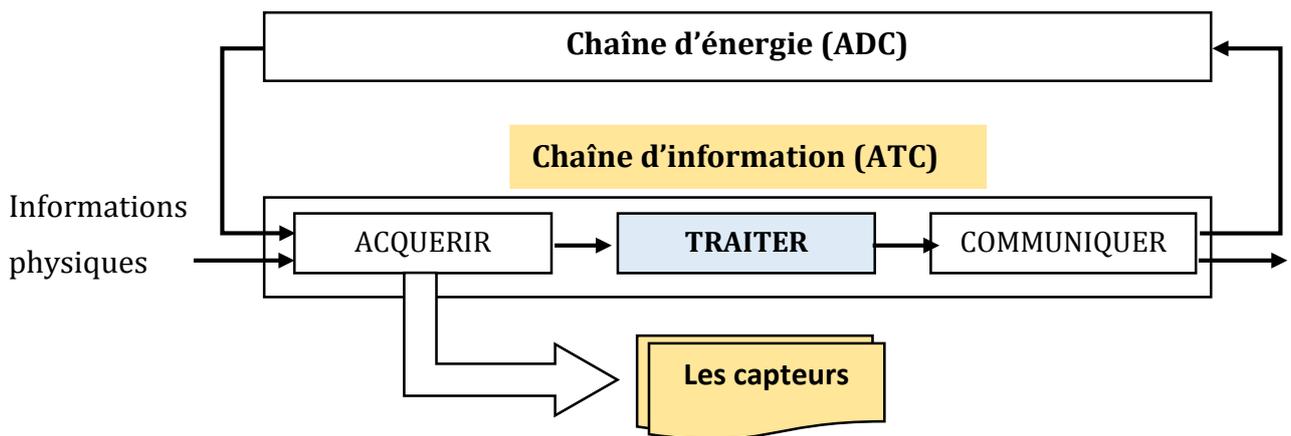


Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs ...), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, ...). Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

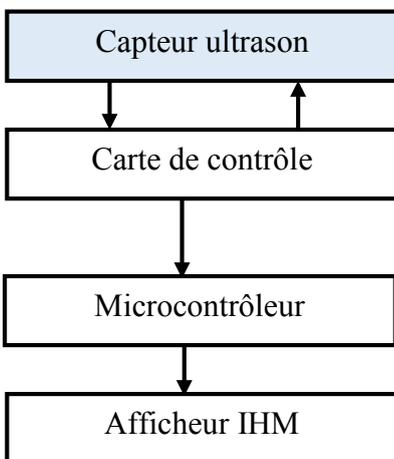
Le capteur est l'élément indispensable à la détection de ces grandeurs physiques. Un capteur est un organe de prélèvement d'informations qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.



Dans l'architecture fonctionnelle générique d'un système pluritechnologique, les capteurs assurent la fonction « ACQUERIR » de la chaîne d'Information.



Exemple : radar de cible

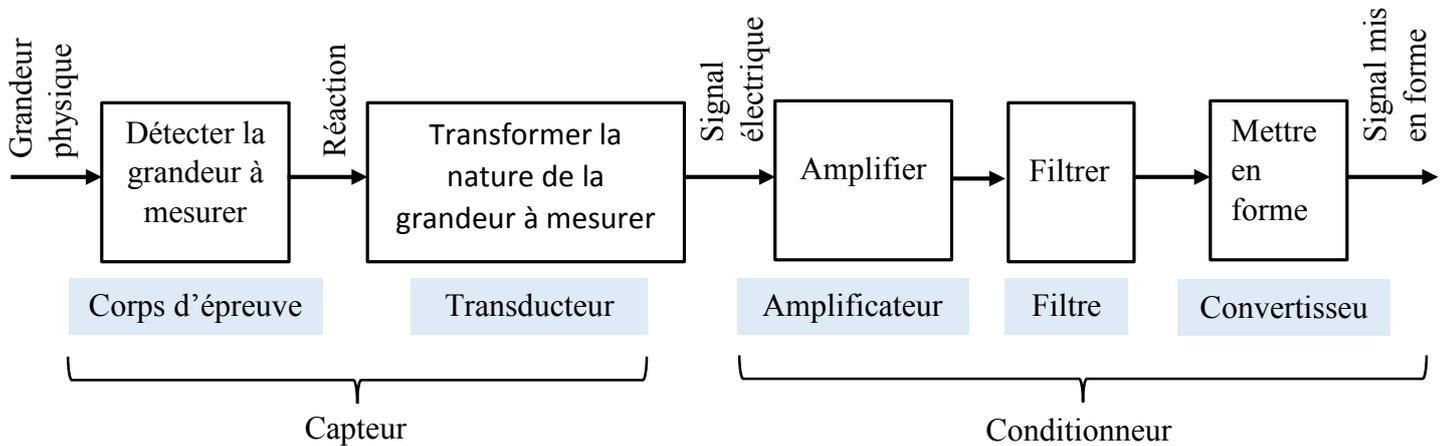


I. Structure et fonctions principales d'un capteur

Un capteur peut être défini comme un transducteur convertissant une grandeur physique en un signal électrique.

Cette transformation peut être directe ou fait appel à plusieurs conversions physiques avant d'arriver au signal de sortie.

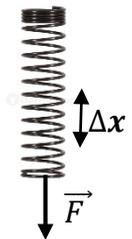
La structure d'un capteur est généralement la suivante :



Corps d'épreuve : C'est un **élément mécanique** qui réagit à la grandeur physique à mesurer. Il transforme la **grandeur mesurée** en une autre **grandeur physique dite mesurable**.

Exemple : Mesure d'une force à l'aide d'un ressort

- Corps d'épreuve : ressort de raideur k
- Réaction : déplacement x
- $F = k \cdot x \rightarrow k$ connu et x mesuré permet de déterminer F



Transducteur : un **élément en interaction** avec le **corps d'épreuve** permettant de **traduire ses réactions** en un **autre phénomène physique** (au final on obtient en général un signal électrique).

Exemple : Mesure d'une force à l'aide d'un ressort

Transducteur : potentiomètre linéaire de gain G ($U_s = G \cdot x$)



Conditionneur :

- Amplification
- Filtrage
- Conversion du signal



II. Grandeurs physiques dans la chaîne d'acquisition

Différentes grandeurs physiques interviennent entre les fonctions de la chaîne d'acquisition. Afin d'identifier les performances des systèmes d'acquisition il est nécessaire de caractériser les signaux d'entrée et de sortie de ces différentes parties.

1. Grandeur physique à mesurer

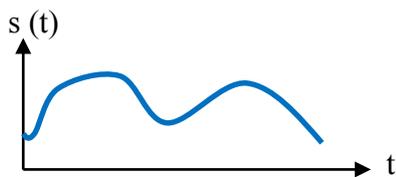
- **Cinématique** : position, vitesse (tachymètre), accélération, angle (gyromètre)
- **Effort** : force, pression, couple
- **Fluide** : pression, débit,
- **Thermique** : température...

2. Grandeur physique sortant du corps d'épreuve

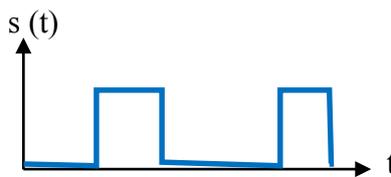
- Variation de résistance,
- Variation de longueur,
- Tension électrique.

3. Grandeur physique du signal de sortie

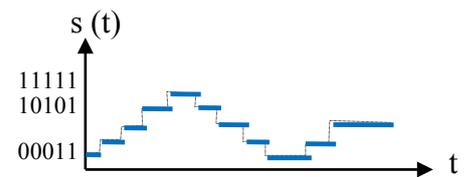
- **Analogique** : le signal délivré varie de façon continue au cours du temps
- **Logique** (détecteur tout ou rien ou utilisation d'un seuil).
- **Numérique** : le signal de sortie est numérique (la grandeur évolue de façon discontinue par escaliers)



Sortie de capteur analogique



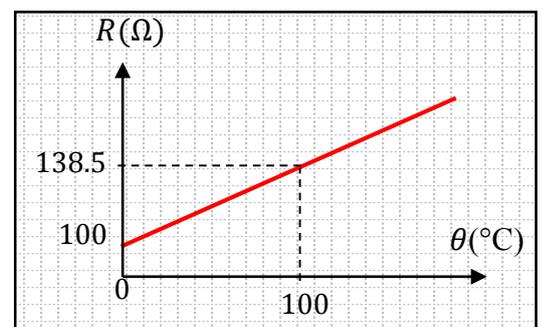
Sortie de capteur logique



Sortie de capteur numérique

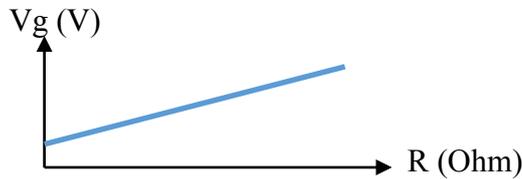
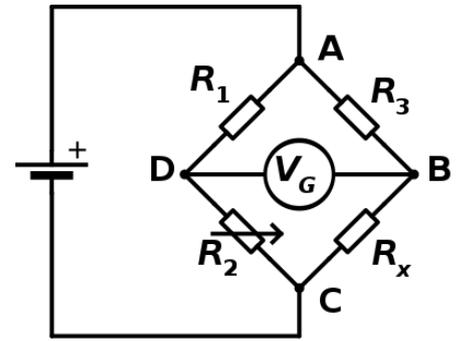
Exemple : Sonde de température pt100

- **Grandeur physique à mesurer** : Température
- **Corps d'épreuve** : sonde
- **Réaction du corps d'épreuve** : variation de résistance R_x



La variation de résistance n'est pas directement exploitable par le système de traitement de l'information. Il faut la convertir en un signal électrique du type courant ou tension.

- **Transducteur** : Pont de Wheatstone
- **Signal de sortie du transducteur** : V_g ($R_2 \ll R_1$)



Caractéristique de pont de Wheatstone

III. Caractéristiques d'un capteur

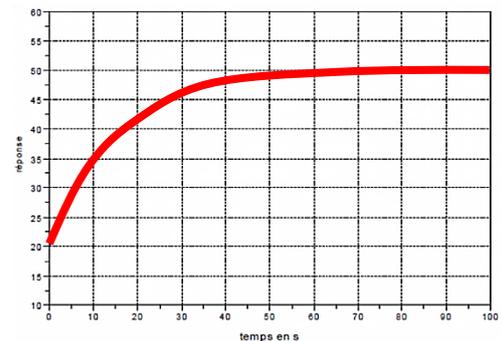
On choisit un système d'acquisition en fonction d'un cahier des charges qui correspond au phénomène que l'on observe par la mesure de grandeur physique. Les caractéristiques métrologiques disponibles dans les documents constructeurs font généralement référence à des étalonnages réalisés en laboratoire

1. Temps de réponse

Le temps de réponse $tr(E)$ est défini comme la durée minimale d'attente après l'application d'un échelon à l'entrée, pour que l'écart relatif de la sortie par rapport à sa valeur finale.

Q1 : déterminer le temps de réponse de ce capteur ?

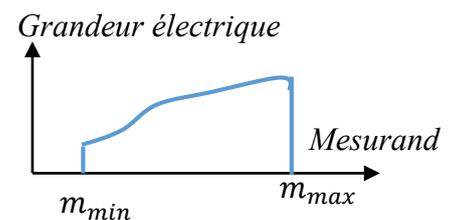
.....



2. Etendue de mesure

C'est la plage de valeurs de la grandeur physique mesurée pour lesquelles le capteur répond aux spécifications du constructeur :

$$E.M = m_{max} - m_{min}$$



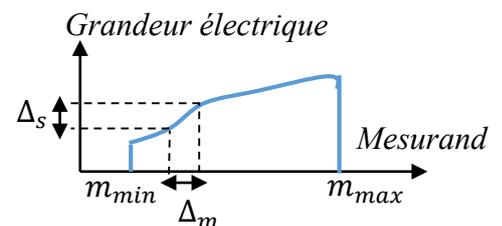
Q2 : déterminer l'étendue de mesure pour un capteur de température pt100 ?

.....

3. Sensibilité

La sensibilité $S(m)$ d'un système d'acquisition, pour une valeur donnée de la grandeur physique mesurée, est égale au rapport de la variation du signal électrique sur la variation du signal physique :

$$S(m) = \frac{ds}{dm} = \left(\frac{\Delta s}{\Delta m}\right)_m$$



Remarque : la sensibilité d'un capteur linéaire est constante.

4. Résolution

La résolution est la plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible de l'indication délivrée par le système d'acquisition (passage d'une valeur numérique à une autre notamment).

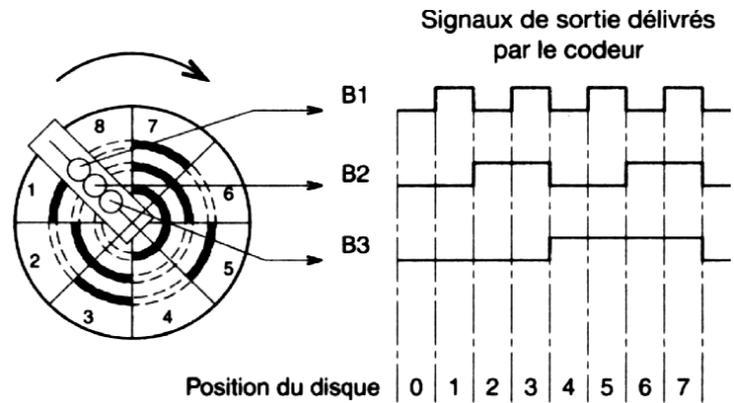
$$\text{Résolution} = \frac{E.M}{\text{Nombre de point}}$$

Exemple : codeur absolu 3 bits

Le disque fournit un code binaire par piste :

3 pistes → $2^3 = 8$ positions

Donc : $R = \frac{1}{8}$ tours



5. Précision de la mesure

Elle caractérise l'aptitude d'un capteur à donner une mesure M proche de la valeur vrai m de la grandeur mesurée.

L'incertitude de mesure δM est telle que : $m = M \pm \delta M$

L'erreur relative de précision est : $\epsilon r = \frac{\delta M}{m_{max} - m_{min}}$

Justesse de la mesure

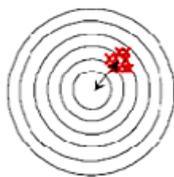
Un capteur est juste si ses valeurs ne changent pas quand on les compare à des valeurs étalon, ou à des valeurs données par d'autres capteurs normalisés.

Fidélité :

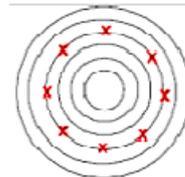
Un capteur est fidèle si ses valeurs ne changent pas au cours du temps (mesures reproductibles)



Juste, fidèle.



Non juste, fidèle.



Juste, non fidèle.



Ni juste, ni fidèle.

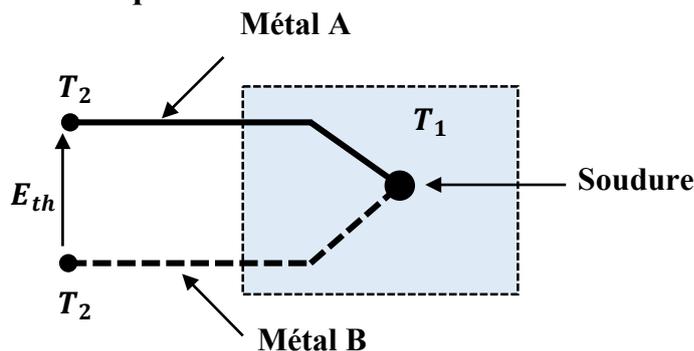
IV. Technologie des capteurs

1- 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.

Effet thermique

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** (tension) d'origine thermique.



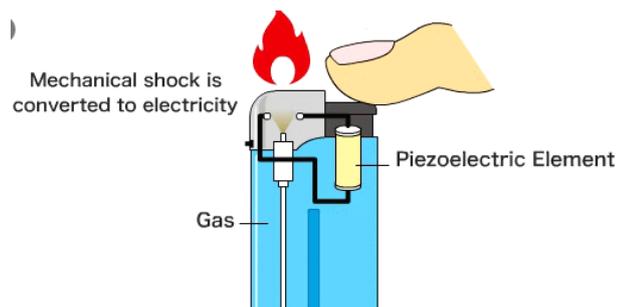
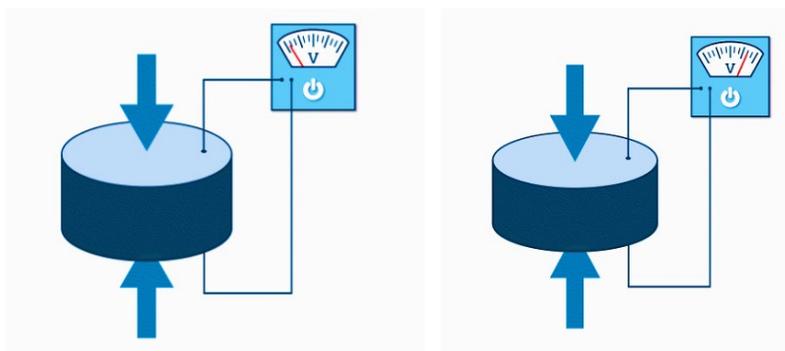
$$E_{th} = S_{AB} (T_1 - T_2)$$

S_{AB} : le coefficient de Seebeck ($V/^\circ C$)

La fém. E est de l'ordre de quelques dizaines de mV

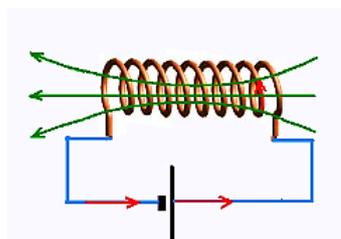
Effet piézoélectrique

L'application d'une contrainte mécanique sur certains matériaux dits piézo-électriques (le quartz par exemple) entraîne par déformation du cristal l'apparition d'une tension aux bornes du quartz.



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 ou de la vitesse d'une génératrice à courant continue : tachymètre).



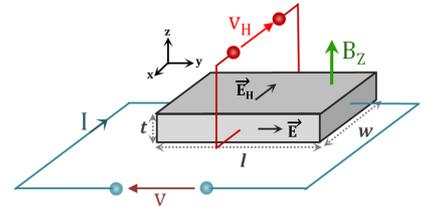
Tachymètre

Effet Hall

Un courant électrique I_0 traversant une plaque métallique baignant dans un champ magnétique B , engendre une tension V_H perpendiculaire à B .

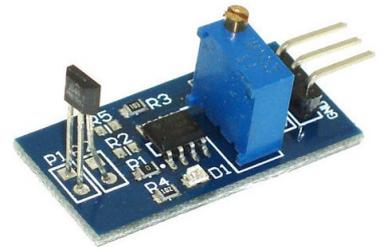
$$V_H = k \cdot B \cdot I$$

Ce principe est notamment utilisé pour la mesure du courant électrique dans un circuit à partir du flux magnétique qu'il génère dans une boucle conductrice.



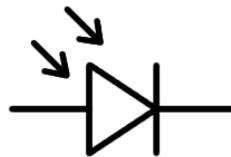
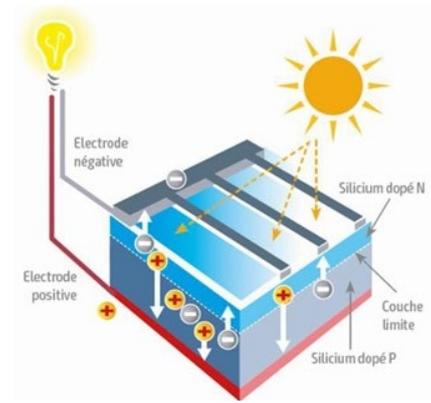
Exemple : module Arduino « Capteur à effet hall CH3144 »

Module basé sur le capteur à effet hall A3144 et un amplificateur LM393 permettant de capter un champ magnétique. La sensibilité est réglable via un potentiomètre.



Effet photo-électrique

La libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique.

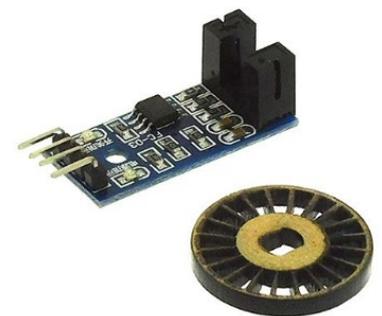


Photodiode

○ **Capteur de vitesse Arduino (coupleur)**

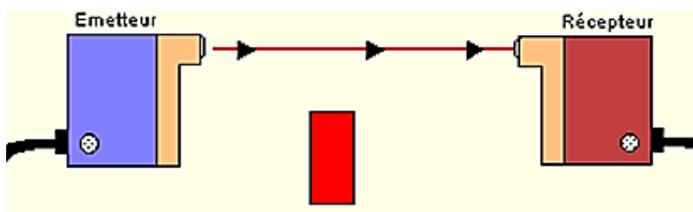
Module capteur de vitesse basé sur un LM393, un capteur optique à fourche et un disque perforé.

Ce module communique avec un microcontrôleur via une sortie digitale



Remarque: le disque se monte sur un motoréducteur à deux sorties sur axe de Ø5 mm.

○ **Détecteur photoélectrique**



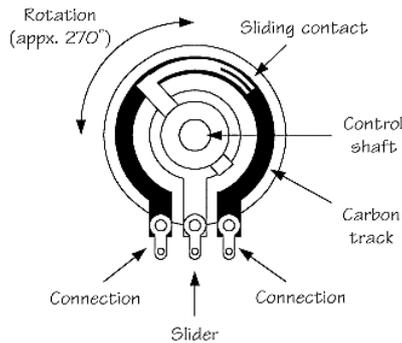
2- Les capteurs passifs

Il s'agit généralement d'impédance qui varie en fonction de la grandeur à mesurer.

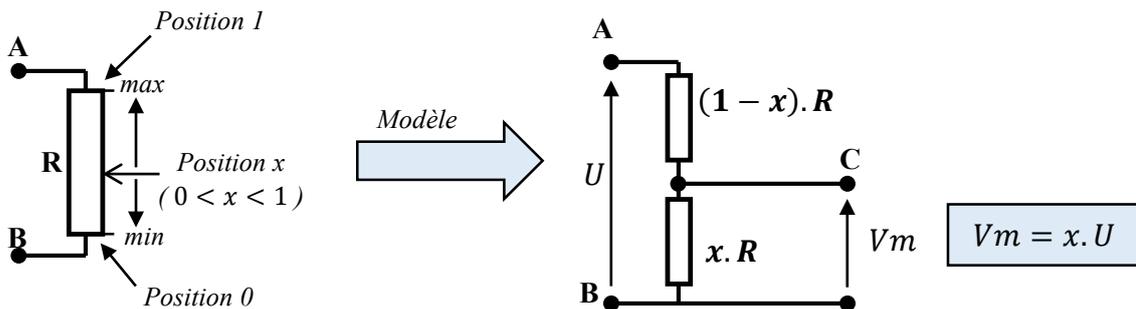
Déplacement d'un curseur

Principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteurs de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile.

- Déplacement rotatif et linéaire

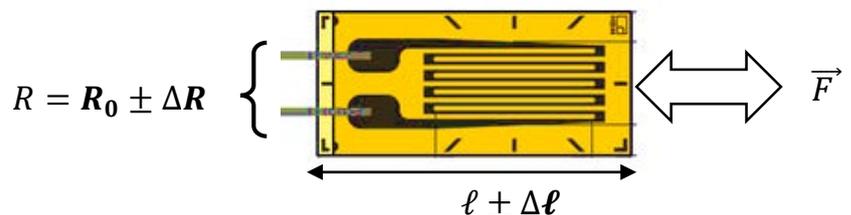
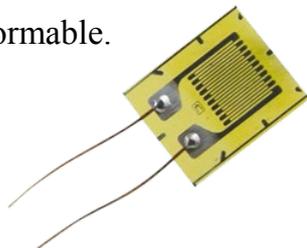


Le principe :



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.



Lors de l'allongement des longueurs ℓ du fil, la section des conducteurs diminue ce qui augmente la résistance du fil ($R = \rho \frac{\ell}{s}$). Cette variation est très faible et sera amplifiée.

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \frac{\Delta \ell}{\ell}$$

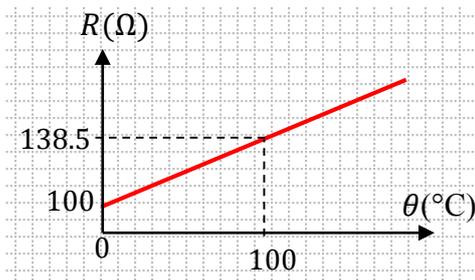
- R_0 : la résistance de la jauge au repos
- K : le facteur de jauge

Effet thermique

La température et ses dérives font varier la valeur de la résistance fabriquée par certains matériaux semi-conducteurs sensibles à l'effet thermique.

○ **Capteur Pt100**

La sonde Pt 100 est un capteur de température qui est utilisé dans le domaine industriel (agroalimentaire, chimie, raffinerie...). Ce capteur est constitué d'une résistance en Platine. La valeur initiale du Pt100 est de 100 ohms correspondant à une température de 0°C.



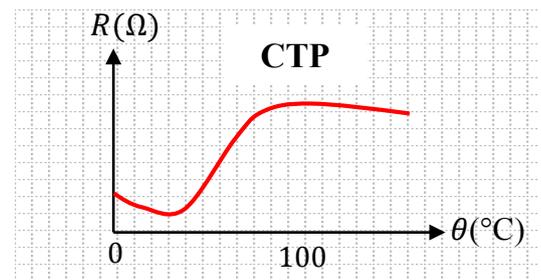
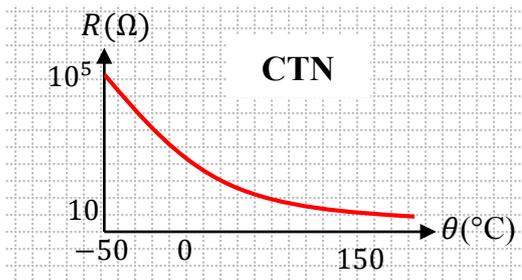
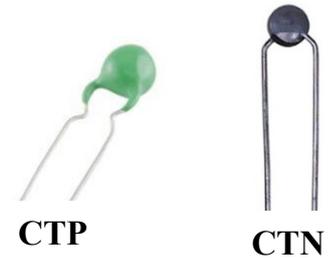
Si R_0 est la résistance d'une pièce de platine à 0 °C, alors à la température θ (en degrés Celsius), un modèle linéaire de la résistance de cette pièce donne :

$$R\theta = R_0 \cdot (1 + \alpha\theta) \text{ avec } \alpha = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

À 0 °C $R\theta = R_0 = 100\Omega$ d'où le nom PT100 (il existe des PT25, PT1000...)

○ **Thermistance CPT-CTN**

Elles utilisent des matériaux semi-conducteurs dont le coefficient de température est positif (CTP) ou négatif (CTN), c'est à dire que leur résistance augmente ou diminue lorsque la température augmente.

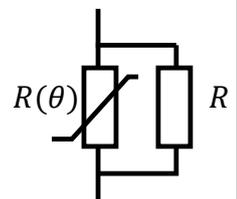


Formule CTN :

$$R = R_0 \cdot e^{B \left(\frac{1}{T+273.75} + \frac{1}{25+273.75} \right)}$$

- R_0 : valeur de référence donnée par le constructeur (à 25°C)
- T : température en °C
- Rappelons que : $T(^{\circ}\text{C}) = t(^{\circ}\text{K}) - 273,15$.

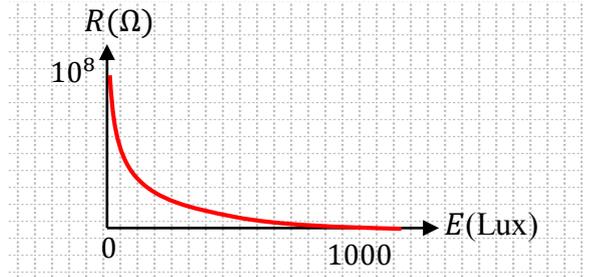
! N.B : La caractéristique de ces capteurs n'est pas linéaire, donc on le monte en parallèle avec une résistance R pour rendre la caractéristique linéaire dans une plage réduite de température.



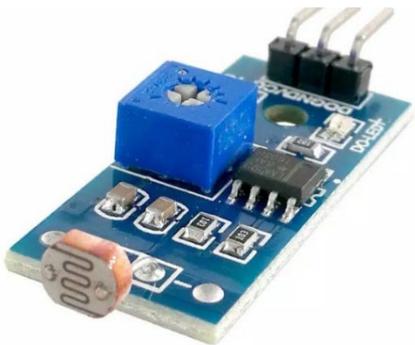
Photorésistance

Une photorésistance est une résistance R dont la valeur varie en fonction du flux lumineux E reçu.

On utilisera de préférence une partie sensiblement linéaire de la caractéristique.

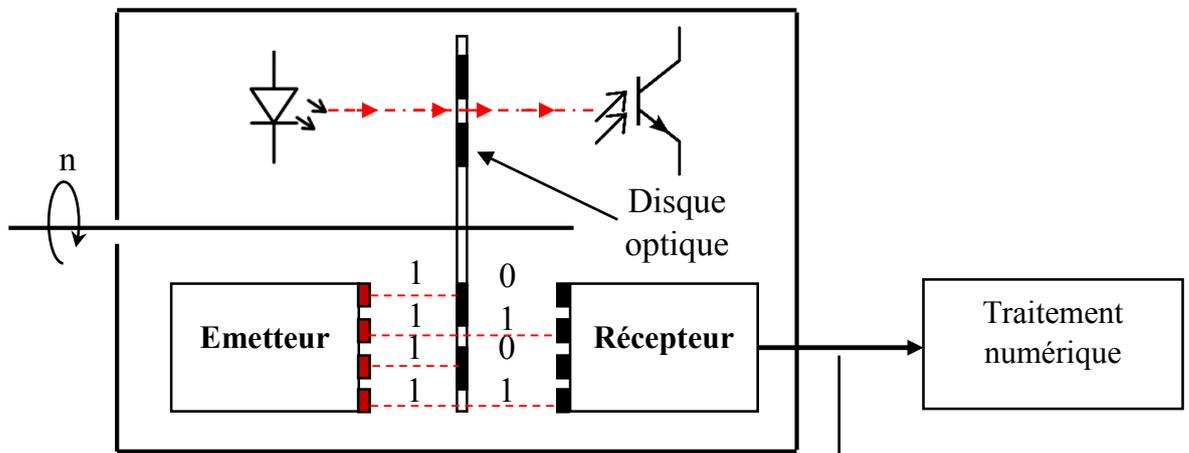


- Module Arduino à LDR



Les codeurs optiques

Les disques optiques constitués de pistes laissant passer ou non la lumière d'une diode à destination d'un transistor jouant le rôle d'interrupteur.



L'information

Train d'impulsions

Information numérique sur m bits

Codeur incrémental

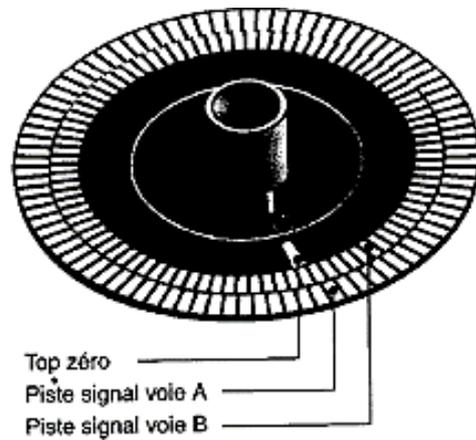
Codeur absolu

o **Codeur incrémental**

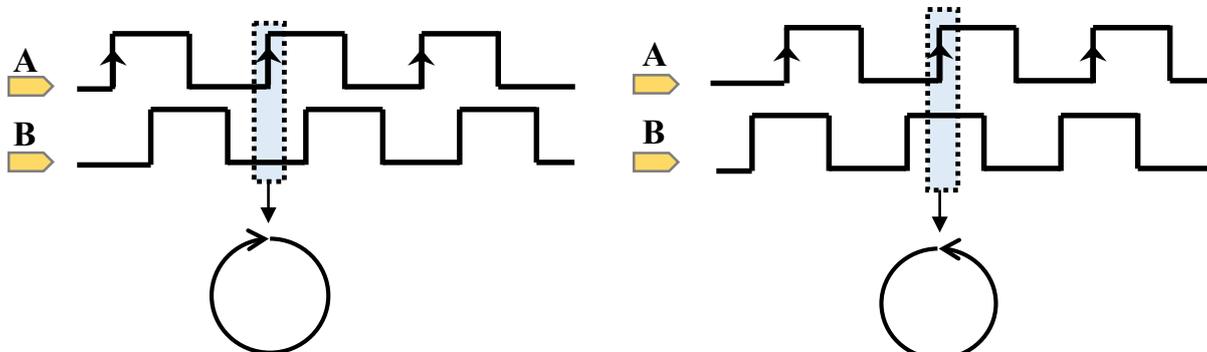
Les codeurs incrémentaux, permettent de coder la position angulaire sur un seul tour

Une piste (**top zéro**) permet d'initialiser le compteur angulaire.

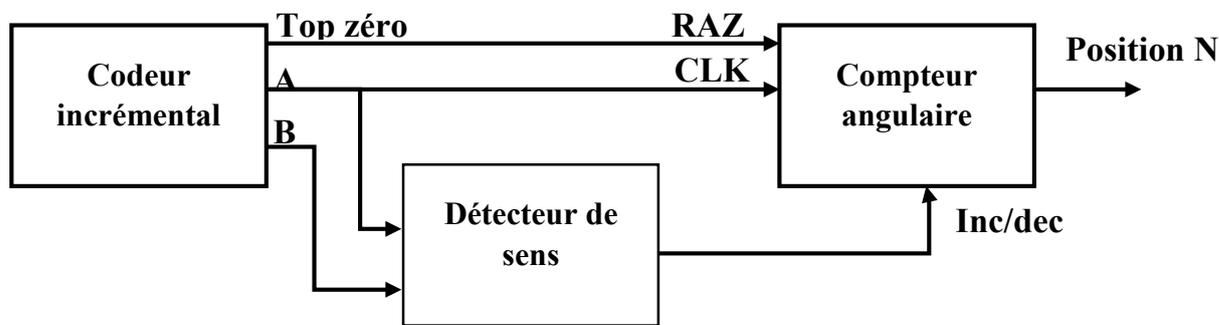
Deux pistes A et B sont nécessaires pour déterminer le sens de rotation :



- Sens 1 : sur **front montant de A**, le signal **B=0 (niveau bas)**
- Sens 2 : sur **front montant d'A**, le signal **B=1 (niveau haut)**

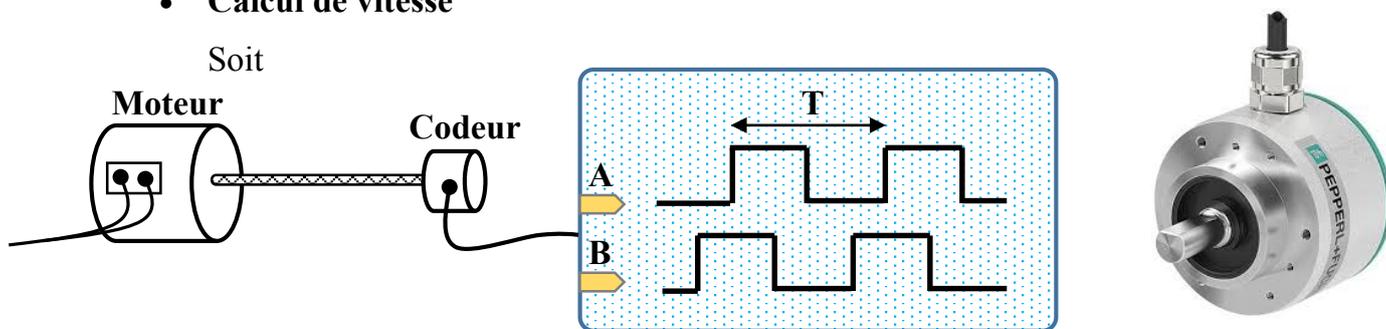


Selon le sens de rotation on incrémente ou on décrémente le compteur angulaire.



• **Calcul de vitesse**

Soit



La relation qui permet de chercher la vitesse de rotation est :

$$F (hz) = R(pts/tr) \cdot n(tr/s)$$

- o **R** : résolution de codeur en pts/tour
- o **F** : la fréquence mesurée dans la voie A ou B
- o **n** : la vitesse de rotation en tours pas seconde

○ Les codeurs absolus

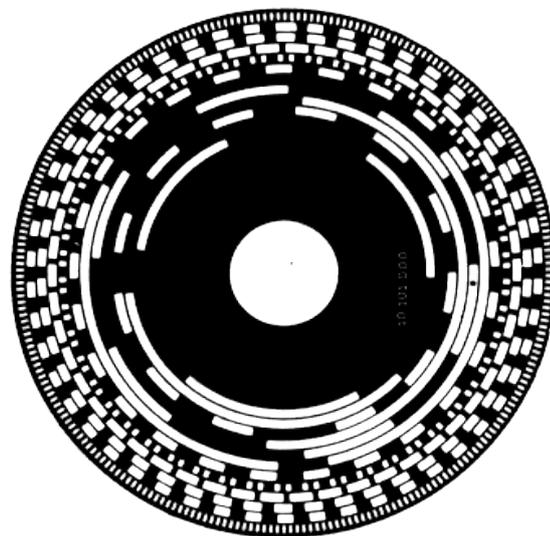
Les codeurs absolus permettent d'associer à une position angulaire un code binaire unique.

Ils sont plus chers car il nécessite de nombreuses pistes

:

Exemple : codeur XCC MG6G0604N Schneider Electric

- Codeur absolu multi tours
- Diamètre de disque optique : 65 mm
- Nombre de pistes : 10 pistes (10 bits)
- Nombre de position : $2^{10} = 1024$ positions



Références :

- Cours ACQ Acquisition de l'information « Florestan MATHURIN professeur agrégé au Lycée Jules Ferry »
- Génie électrique cours complet illustré « Christophe François »
- Instrumentation et régulation en 30 fiche « Patrick Prouvost »