



Département d'électronique



Cours : Capteurs en instrumentation industrielle

Enseignante : Dr.DAAS

Année universitaire : 2024/2025



PLAN

Chapitre 1 : Notions sur les Capteurs

Chapitre 2 : Conditionnement des capteurs

Chapitre 3 : Exemples de capteurs industriels

Chapitre 4 : Systèmes de transmission pour capteurs

Chapitre 5 : Introduction aux capteurs intelligents

Chapitre 2 : Conditionnement des capteurs

1. Qu'est se qu'un capteur ?
2. Définitions et caractéristiques générales
3. Caractéristiques d'une chaîne de mesure
4. les différentes familles de capteurs
5. Exemples de capteurs

Qu'est se qu'un capteur ?

Un capteur est un dispositif sensible à certains phénomènes physiques qu'il capte ou détecte. Il transforme une information analogique en information numérique.



CAPTEUR DE FLAMME



PRESSION/ALTITUDE



CAPTEUR DE SON



THERMOMÈTRE INFRAROUGE



CAPTEUR LUMIÈRE RGB



CELLULE PHOTOÉLECTRIQUE



CAPTEUR D'HUMIDITÉ DES SOLS



CAPTEUR UV



CAPTEURS DE GAZ



THERMISTOR



CAPTEUR DE PLUIE



COMPTEUR GEGER



Capteur de niveau de liquide



Bouton poussoir



Bouton d'arrêt d'urgence



Détecteur de choc



Capteur d'humidité



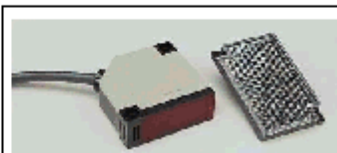
Capteur de fin de course



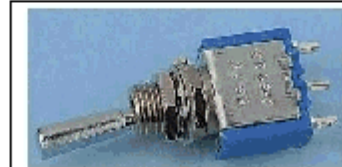
Capteur de proximité à ultrasons



Détecteur de gaz



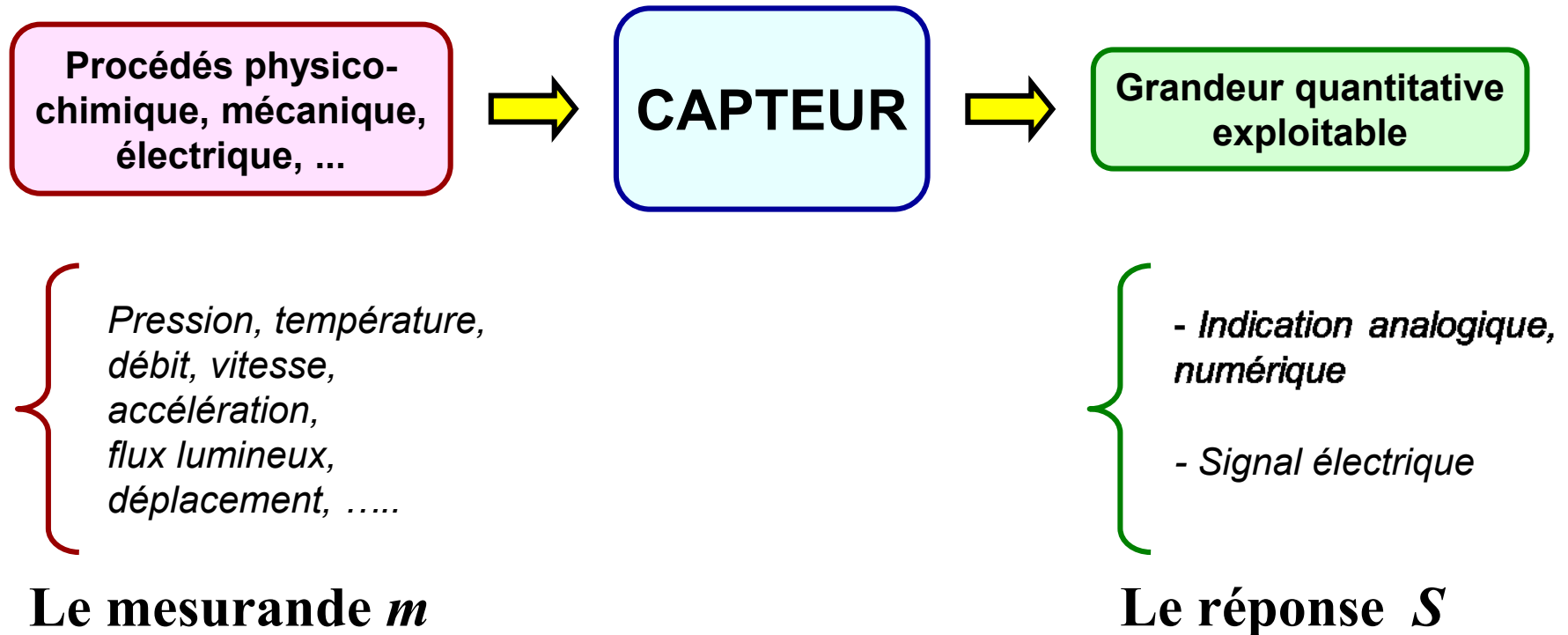
Cellule photoélectrique



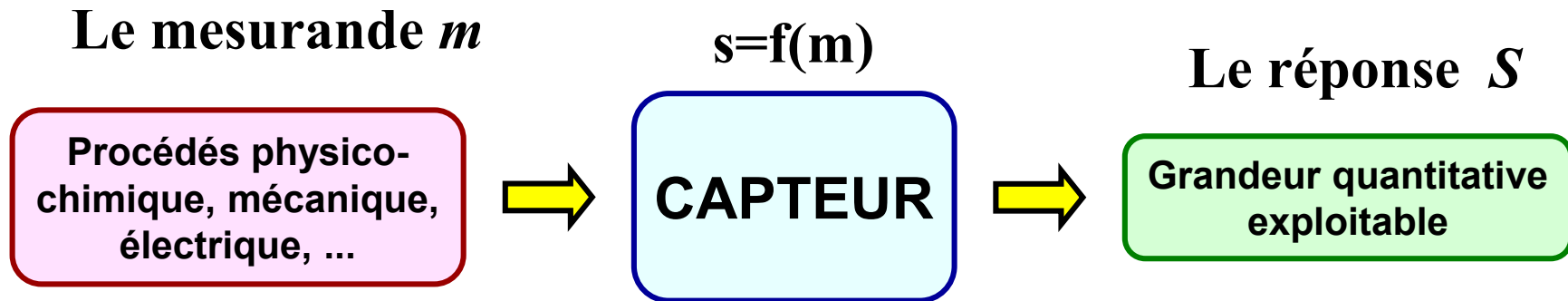
Interrupteur miniature

Qu'est se qu'un capteur ?

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.



Définitions et caractéristiques générales



Mesurande m : c'est la grandeur physique en général non électrique que l'on veut mesurer (déplacement, température, pression, etc...). C'est la grandeur d'entrée du capteur ou l'excitation.

Réponse ou grandeur de sortie s : c'est l'information délivrée par le capteur et qui dépend de m . Toute valeur de s doit permettre de remonter à chaque instant à une seule valeur de m et inversement (relation biunivoque) $\Rightarrow s = F(m)$.

L'expression théorique reliant s à m est définie par les lois physiques mises en jeu dans le fonctionnement du capteur par ses caractéristiques propres (forme, matériau, ...) et par les caractéristiques de son environnement.



Définitions et caractéristiques générales

Quelles sont les caractéristiques d'un capteur ?

Etendue de mesure : Valeurs extrêmes pouvant être mesurée par le capteur.

Résolution : Plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur.

Sensibilité : Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.

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

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

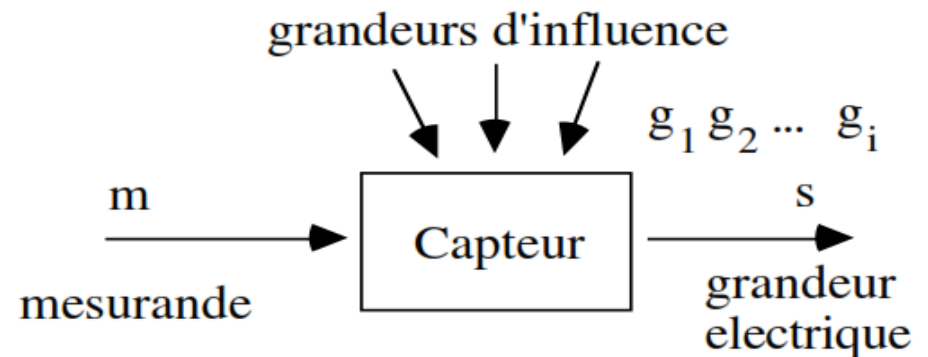
Linéarité : représente l'écart de sensibilité sur l'étendue de mesure

Définitions et caractéristiques générales

Grandeurs d'influence

Principales grandeurs d'influences:

- Température
- Pression, accélération, vibration
- Humidité
- Champ magnétique
- Tension d'alimentation



$$s = f(m; g_1, g_2 \dots g_i)$$



Définitions et caractéristiques générales

Les erreurs

Le capteur et toute la chaîne de traitement de la mesure introduisent des erreurs : bruit, décalage, référence, linéarité...

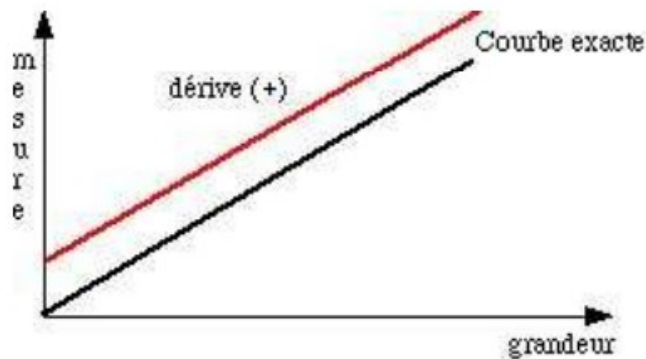
L'erreur globale de mesure ne peut être qu'estimée. Une conception rigoureuse de la chaîne de mesure permet de réduire les erreurs et donc l'incertitude sur le résultat.

Étalonnage

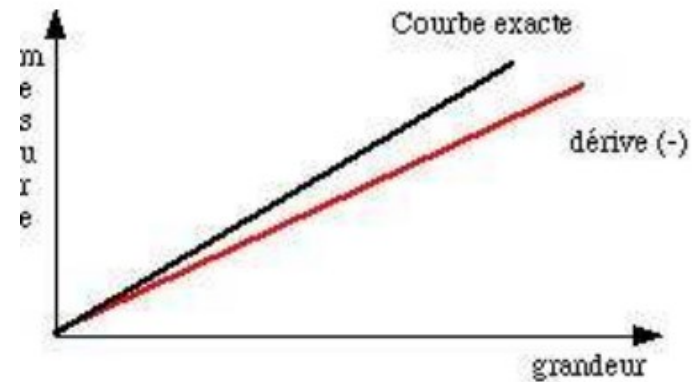
L'étalonnage permet d'ajuster et de déterminer, sous forme graphique ou algébrique, la relation entre le mesurande et la grandeur électrique de sortie.

Définitions et caractéristiques générales

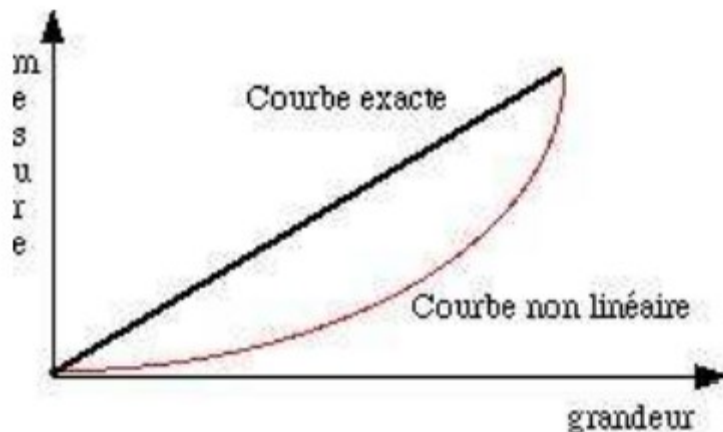
Les types d'erreurs classiques



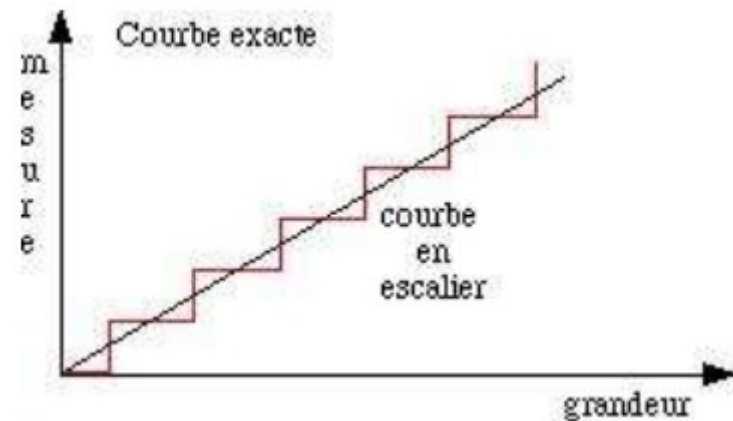
L'erreur de zéro (offset)



L'erreur d'échelle (gain)



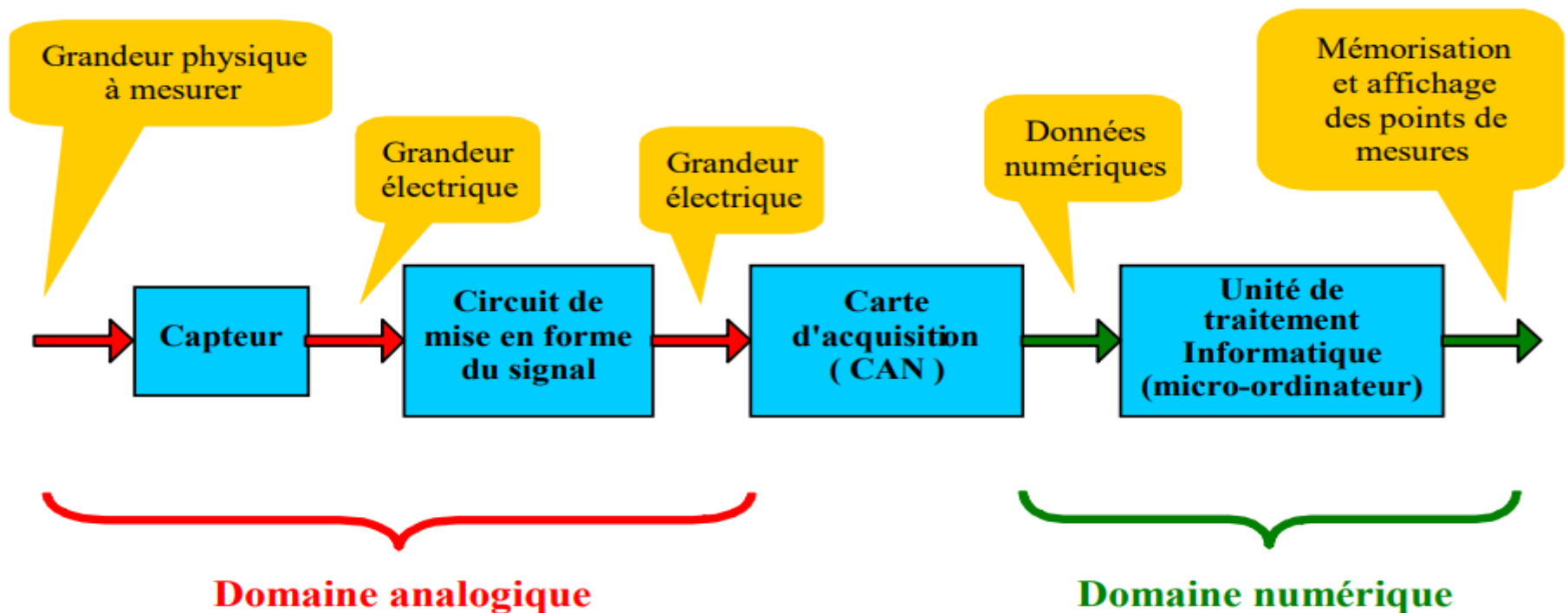
L'erreur de linéarité



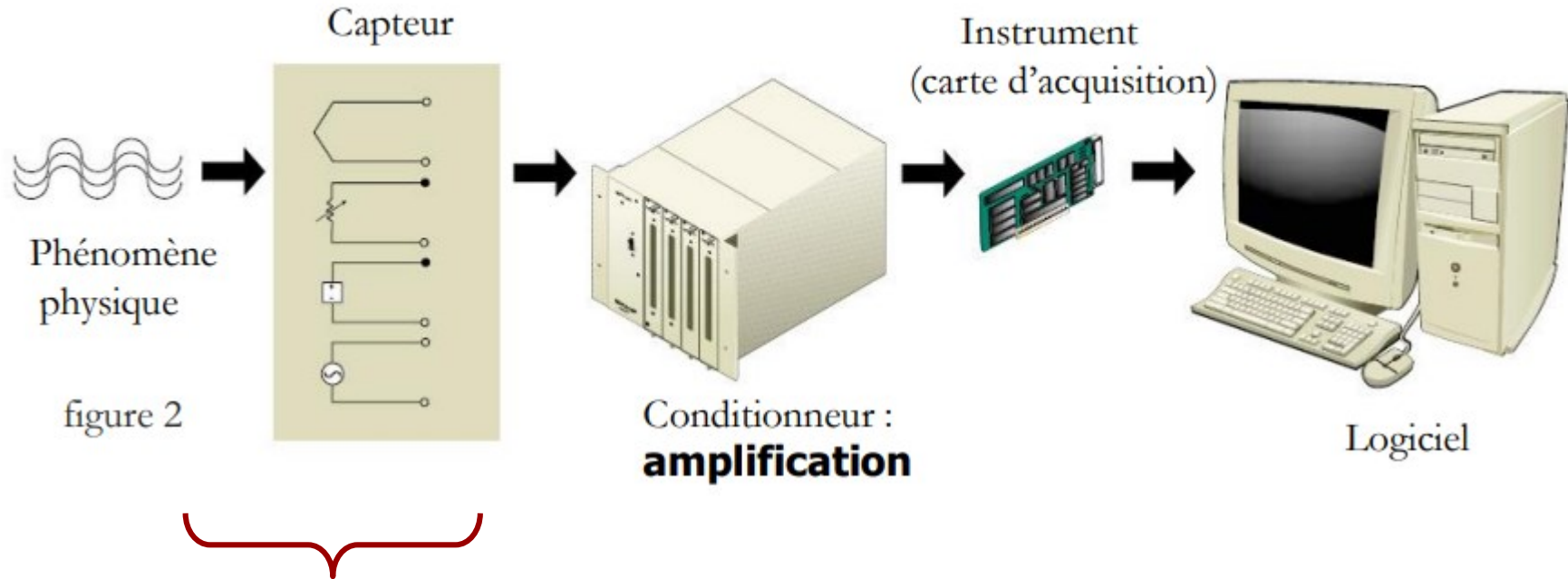
L'erreur de quantification

Caractéristiques d'une chaîne de mesure

La structure de base d'une chaîne de mesure comprend au minimum quatre étages :

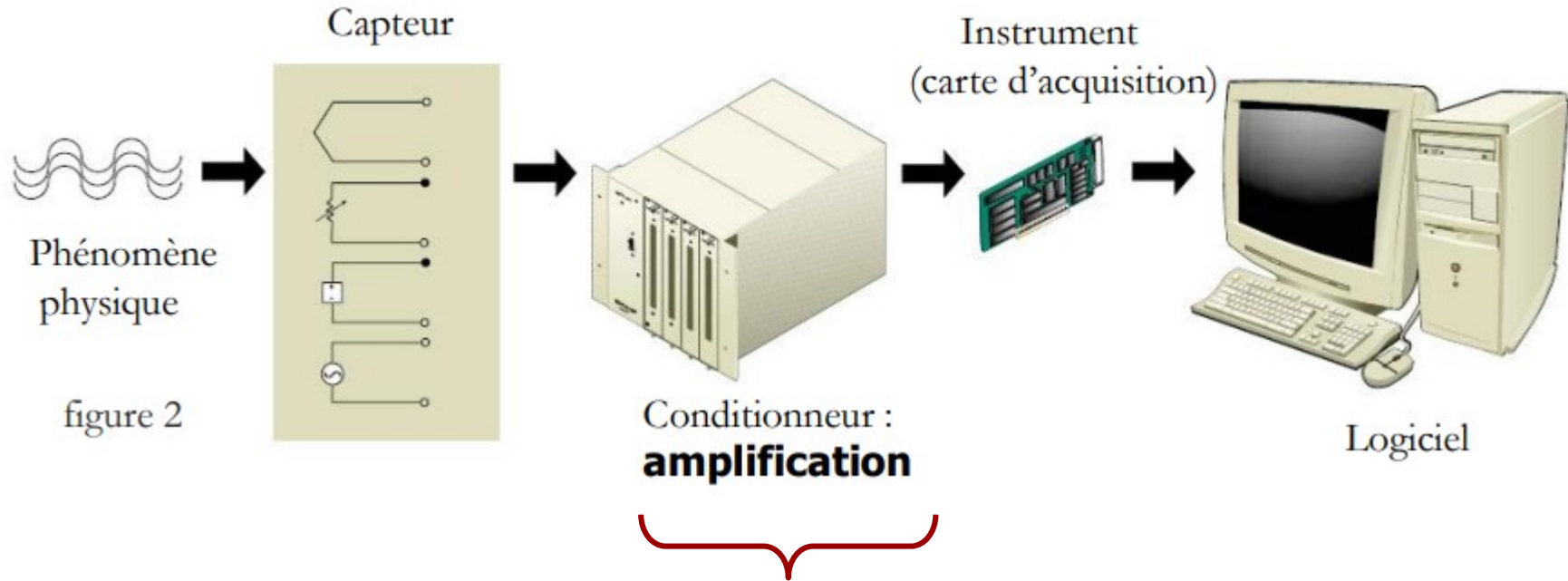


Caractéristiques d'une chaîne de mesure



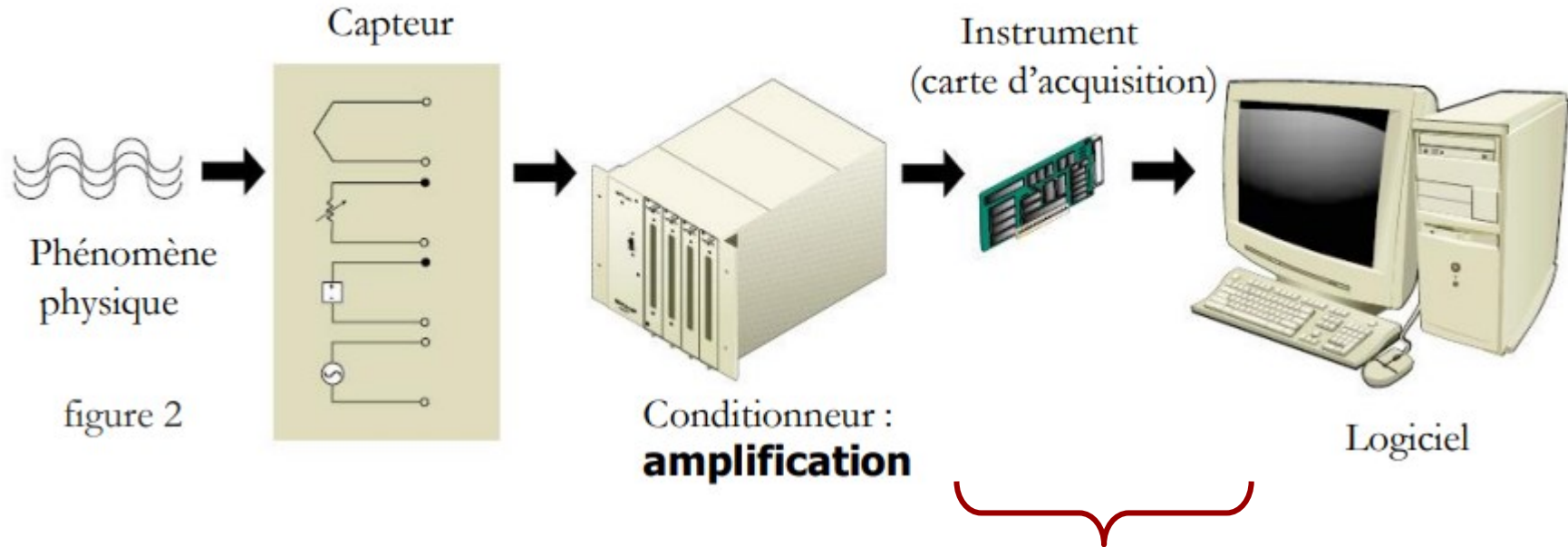
- Un capteur sensible aux variations d'une grandeur physique et qui, à partir de ces variations, délivre un signal électrique.

Caractéristiques d'une chaîne de mesure



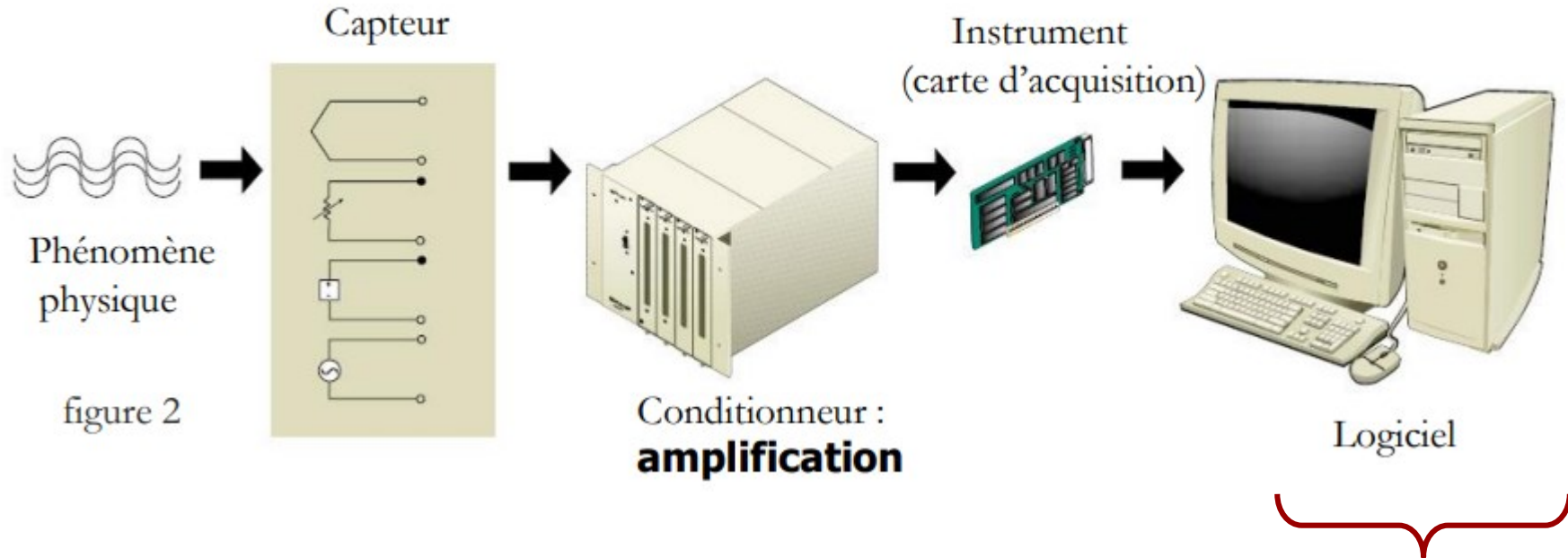
- Un conditionneur de signal dont le rôle principal est l'amplification du signal délivré par le capteur pour lui donner un niveau compatible avec l'unité de numérisation; cet étage peut parfois intégrer un filtre qui réduit les perturbations présentes sur le signal.

Caractéristiques d'une chaîne de mesure



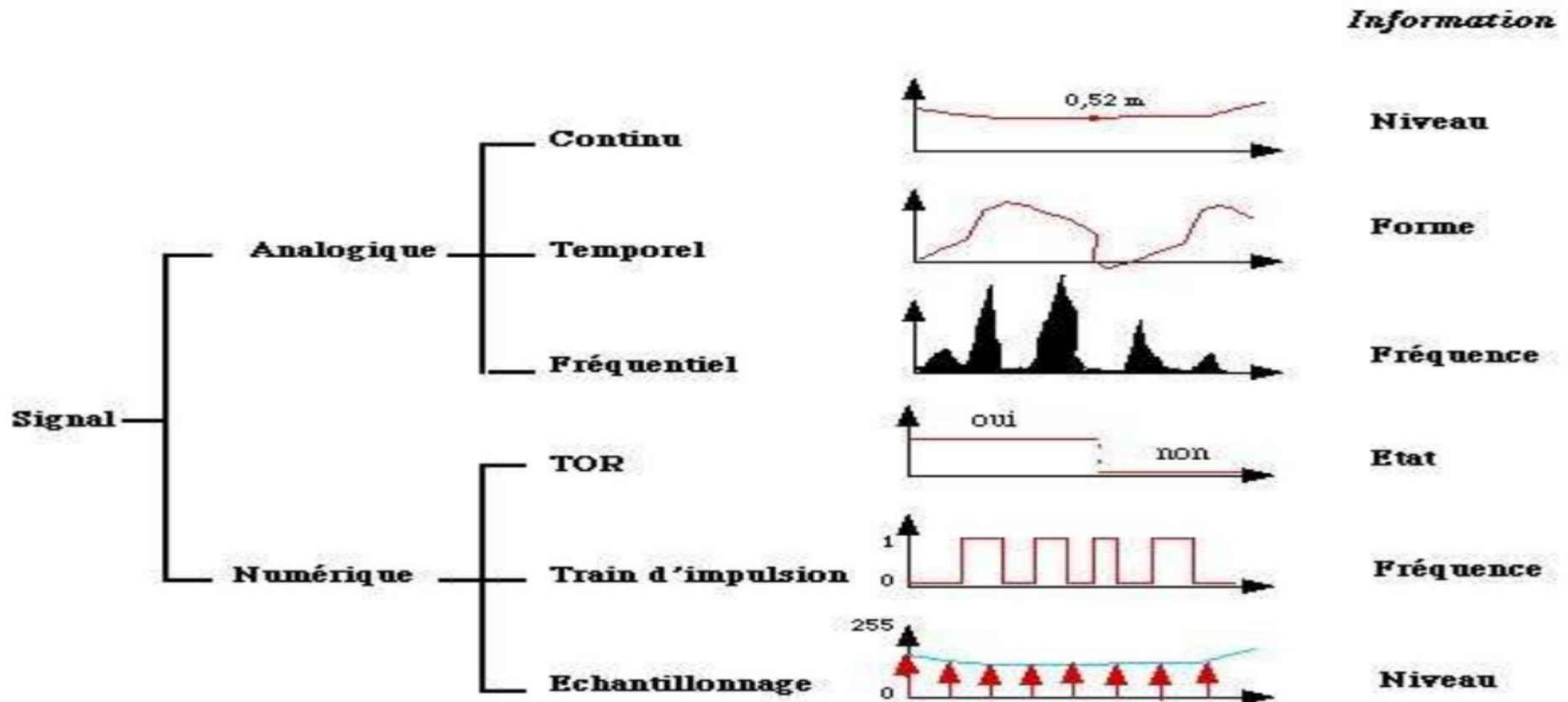
- Une unité de numérisation qui va échantillonner le signal à intervalles réguliers et affecter un nombre (image de la tension) à chaque point d'échantillonnage.

Caractéristiques d'une chaîne de mesure



- L'unité de traitement informatique peut exploiter les mesures qui sont maintenant une suite de nombres (enregistrement, affichage de courbes, traitements Mathématiques, transmissions des données ...)

Classification des signaux



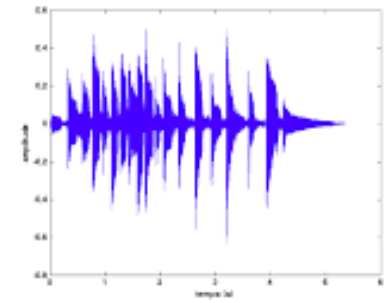
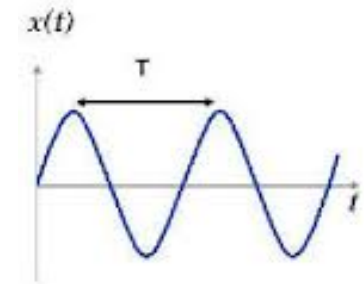
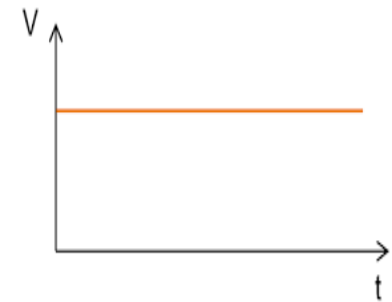
Classification des signaux

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 : C'est un signal qui varie 'lentement' dans le temps : température, débit, niveau.

Temporel : C'est la forme de ce signal qui est importante : pression cardiaque, chromatographie, impact.

Fréquentiel : C'est le spectre fréquentiel qui transporte l'information désirée : analyse vocale, sonar, spectrographie.



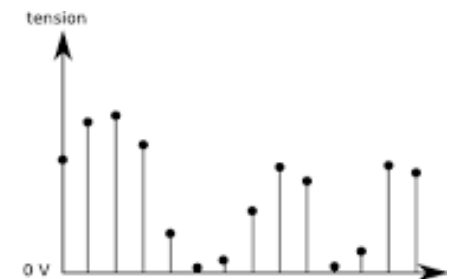
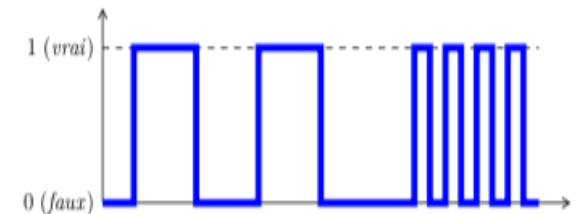
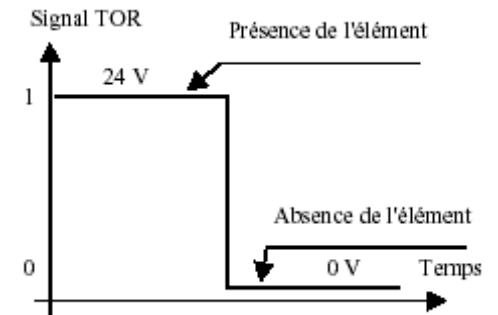
Classification des signaux

Un signal est dit **numérique** si l'amplitude de la grandeur physique le représentant ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs.

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

Train d'impulsion : Chaque impulsion est l'image d'un changement d'état. Exemple : un codeur incrémental donne un nombre fini et connu d'impulsion par tour.

Echantillonnage : C'est l'image numérique d'un signal analogique. Exemple : température, débit, niveau, son (pression)...

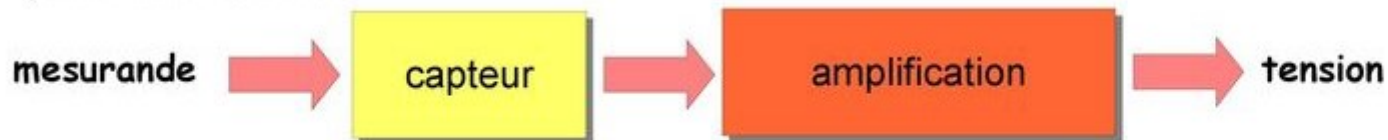


LES DIFFÉRENTES FAMILLES DE CAPTEURS

Si l'on s'intéresse aux phénomènes physiques mis en jeu dans les capteurs, on peut classer ces derniers en deux catégories.

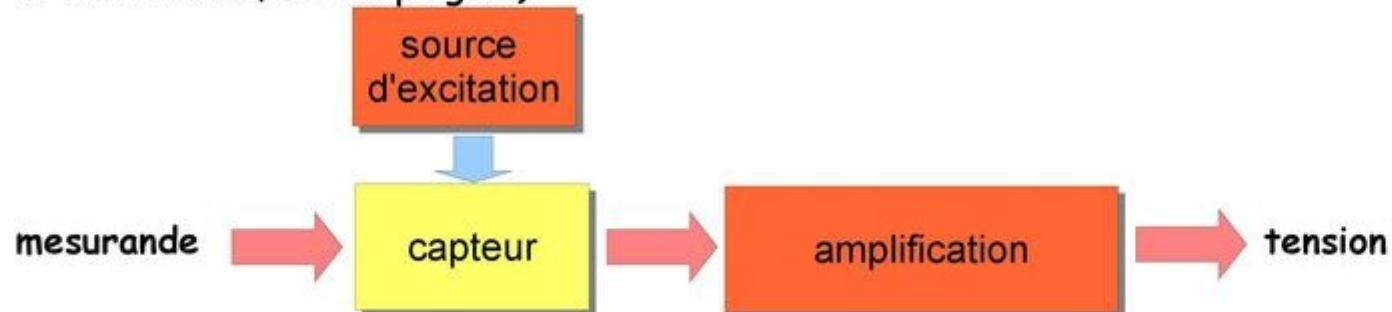
Capteurs actifs

La mesure est une conversion de la grandeur en **tension** sans perturbation du phénomène source.



Capteurs passifs

- Les capteurs passifs demandent une **source d'excitation** (continue ou alternative) pour mettre en évidence la propriété électrique (variation de résistance, de capacité, d'inductance, de couplage...)





LES DIFFÉRENTES FAMILLES DE CAPTEURS

Capteurs actifs

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.

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 DIFFÉRENTES FAMILLES DE CAPTEURS

Capteurs passifs

Il s'agit d'impédances (étant alors une résistance, une inductance ou une capacité) dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande.

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

Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs thermiques

Capteurs de température

modèle portable



Canne de mesure industrielle



Thermistance électronique

Pyromètre Sans contact



Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

Capteurs de pression



Affichage mécanique



Capteurs électroniques



Capteurs industriels

Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

Capteurs de vitesse

Sans contact



Avec entraînement



Dynamo Tachymétrique

Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

Capteurs de force/couple

Pesage en extension



Pesage en compression



Balance



Couple



Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

Capteurs de position

Faible distance



capteurs de proximité

Forte distance



règle de mesure

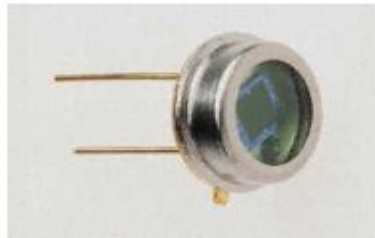
Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs de rayonnement (radiatives)

Capteurs de lumière



Photodiodes



Photorésistance



Phototransistor



Luxmètre

Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs chimiques

Capteurs de gaz



Fixe



Analyseur de poche



Sonde Lambda



Capteur résistif
de CO

Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs chimiques

Capteurs d'humidité

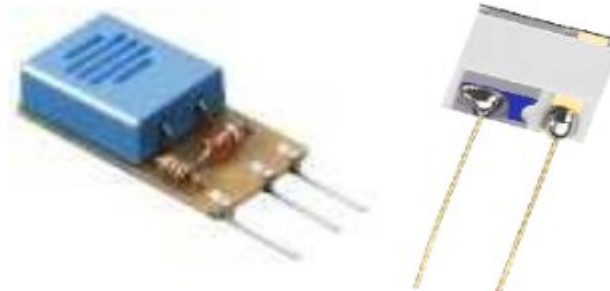


Capteur industriel de point de rosée

Capteur à oxyde d'aluminium



Capteurs capacitifs



Capteur résistif



Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs de rayonnement (radiatives)

Capteurs de radiations



Compteur Geiger



Dosimètre électronique



Caméra infrarouge

Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs mécaniques

Capteurs de débit

Gaz



Capteur automobile



Portable



Capteur industriel



Laboratoire

Liquides



Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs chimiques

Capteurs de pH



laboratoire



Sonde pH industrielle



Portable

Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs électriques

Mesure de champ magnétique



Capteur de champs
basse fréquence



« boussole des tangentes »



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

Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs électriques

Mesure de tension/courant

modèles de poche



Modèle de laboratoire



Haute tension



Forts courants



Boucle de Rogowski



Sans contact

Exemples de capteurs

Types de mesurande : grandeurs biologique

Capteur de pouls



capteur de rythme cardiaque



capteur de tension arterielle



capteur de glycémie



Capteurs actifs

La réponse en sortie d'un capteur actif peut être un courant, une tension ou une charge.

<i>Mesurande</i>	<i>Effet utilisé</i>	<i>Grandeurs de sortie</i>
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Pyroélectricité	Charge
	Photoémission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photoélectromagnétique	Tension
Force Pression Accélération	Piézo-électricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

Capteurs actifs

2. CAPTEURS A EFFET PIEZOELECTRIQUE:

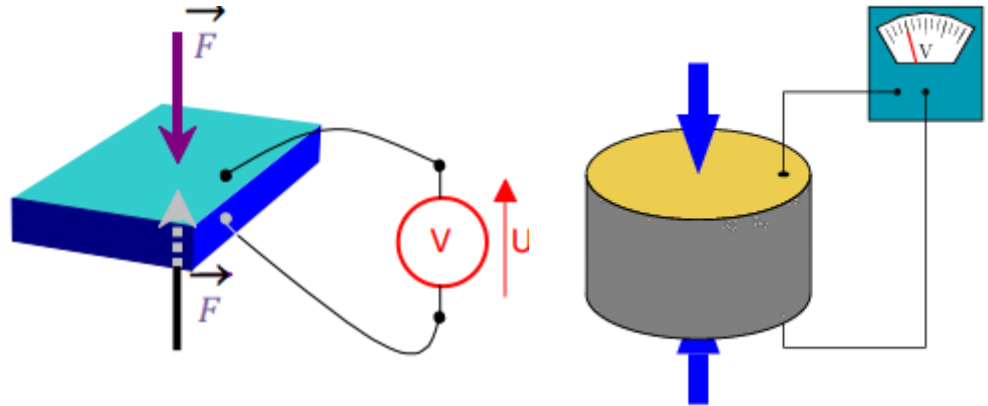
L'effet piézoélectrique

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

Les matériaux piézoélectriques sont très nombreux. Le plus connu est sans doute le quartz

On peut citer principalement :

Le QUARTZ	La TOPAZE	La TOURMALITE	La BERLINITE
			



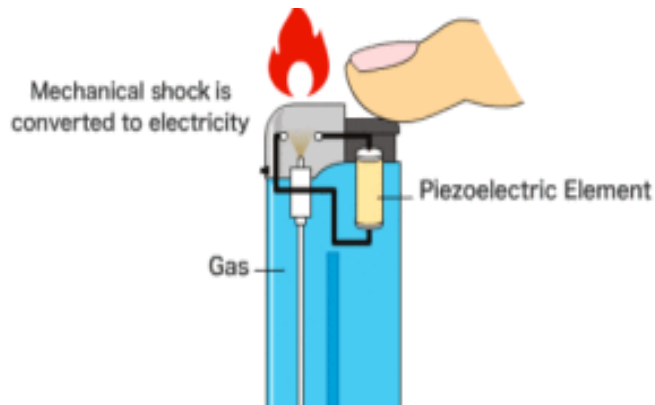
Capteurs actifs

L'effet piézoélectrique

L'effet piézo-électrique trouve un très grand nombre d'applications dans la vie quotidienne et dans l'industrie :

- Une application parmi les plus familières est le **briquet**.

Dans un briquet, la force exercée sur le cristal piézo-électrique produit une tension électrique qui se décharge brutalement sous forme d'étincelles.



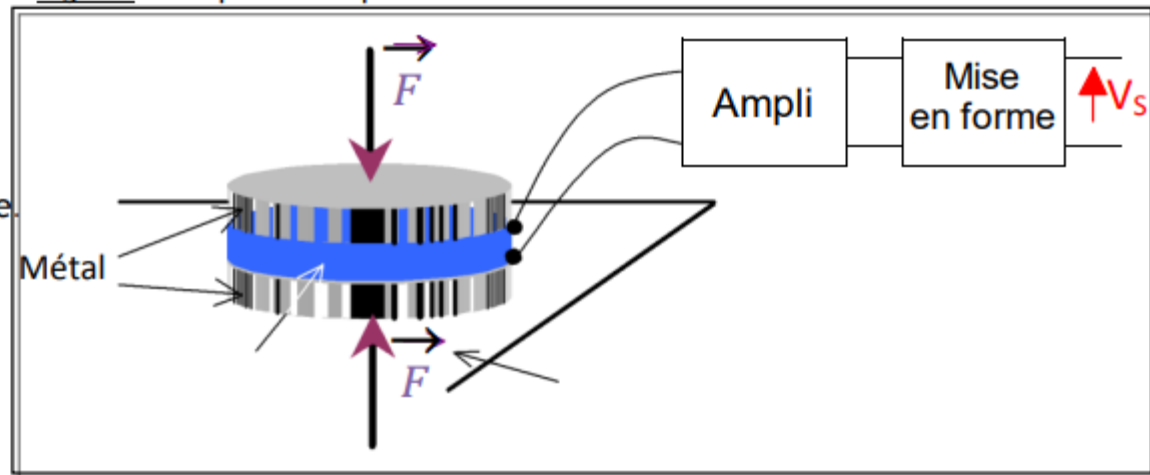
- La piézo-électricité est également utilisée en **acoustique** pour transformer des ondes acoustiques en signal électrique : **microphones, haut-parleurs...**

Capteurs actifs

2-2- Capteur de force:

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

Fig. 2 : Principe d'un capteur de force



Capteurs actifs

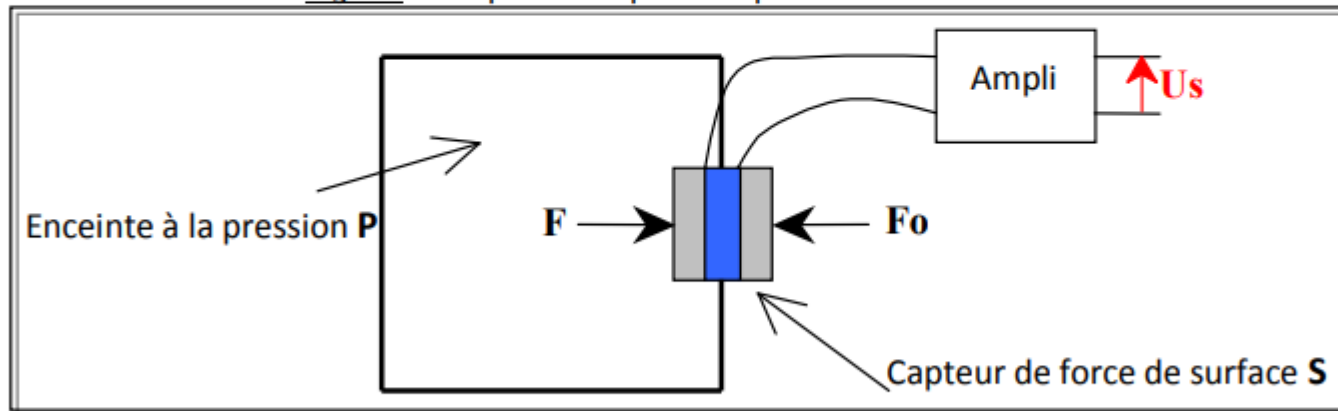
2-3- Capteur de pression:

Définition : 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 :

$$P = \frac{F}{S} \text{ Sachant que : } 1 \text{ Pascal (Pa)} = \frac{1 \text{ Newton}}{1 \text{ m}^2}$$

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).

Fig. 3 : Principe d'un capteur de pression



On a $F = P.S$; $F_0 = P_0.S$ et $u_s = k.(F+F_0)$ (capteur de force, $k = \text{constante}$).

Donc $u_s = k.S (P + P_0) = k' (P + P_0) \Rightarrow u_s = k' (P + P_0)$.

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 .

Capteurs actifs

- Le **Capteur de pression piézoélectrique** est une application industrielle : ils sont notamment utilisés pour l'**automobile** (mesure de la pression des pneus...), l'**aéronautique** (mesure de la pression dans les tuyères...), ainsi que pour les mesures de niveau.

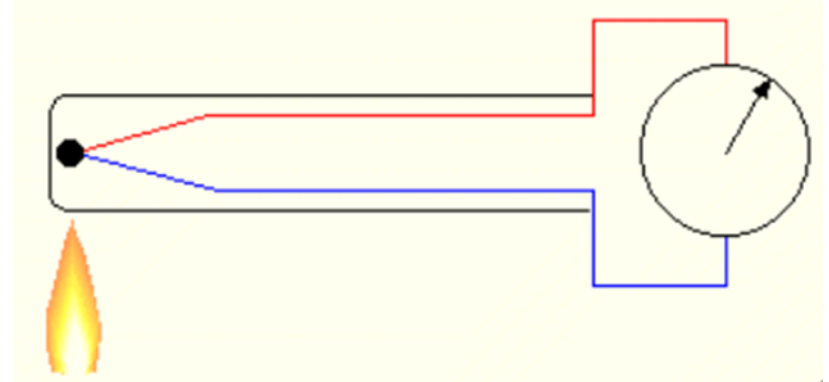
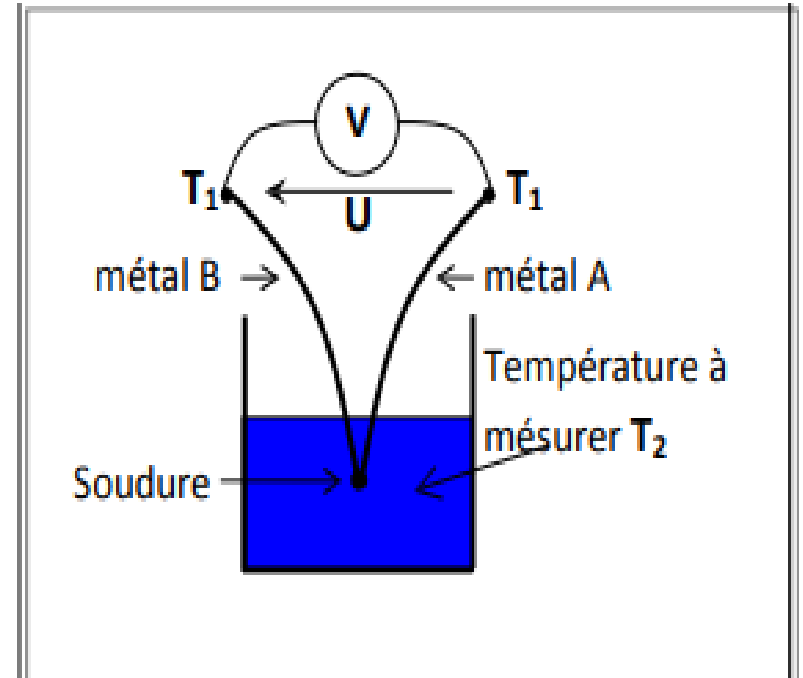


Capteurs actifs

Effet thermoélectrique

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

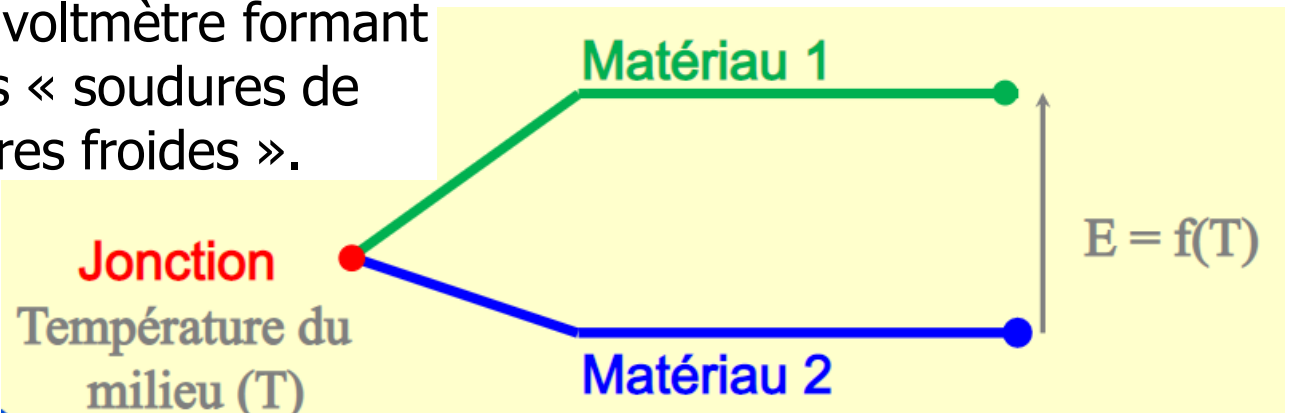
Application: Mesure des hautes températures : 900 à 1300 °C.



Capteurs actifs

Effet thermoélectrique

Un thermocouple est constitué de deux fils de métaux différents, soudés à l'une de leurs extrémités. Cette jonction porte le nom usuel de « soudure chaude » et sera installée dans le milieu dont la température est à mesurer. Les deux autres extrémités sont reliées aux bornes d'un voltmètre. Les deux jonctions formées aux bornes du voltmètre formant deux jonctions appelées « soudures de référence » ou « soudures froides ».



Capteurs actifs

3. CAPTEURS A 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-contre :

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

R_H : constante de Hall (dépend du semi-conducteur)

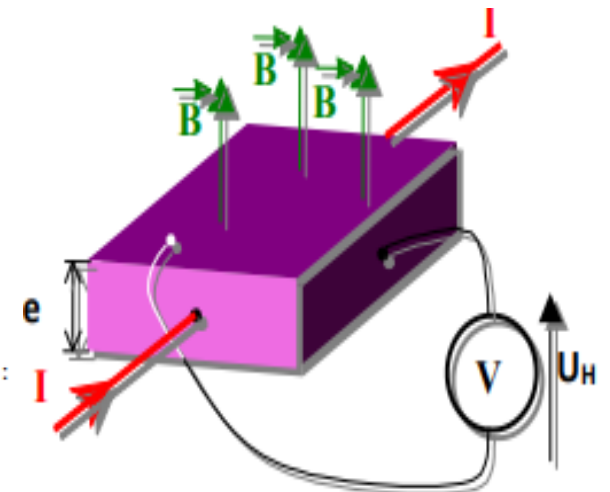
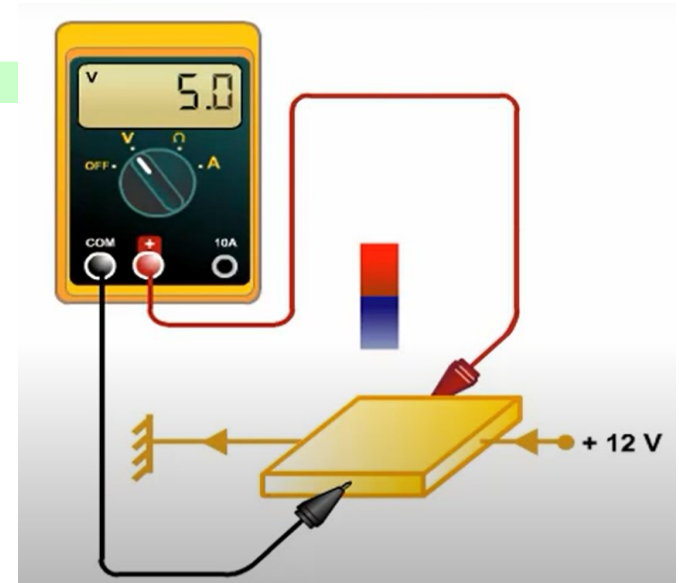
I : intensité de la source de courant (A)

B : intensité du champ magnétique (T)

e : épaisseur du barreau de silicium.

Si on maintient le courant I constant, on a donc une tension U_H proportionnelle au champ magnétique B :

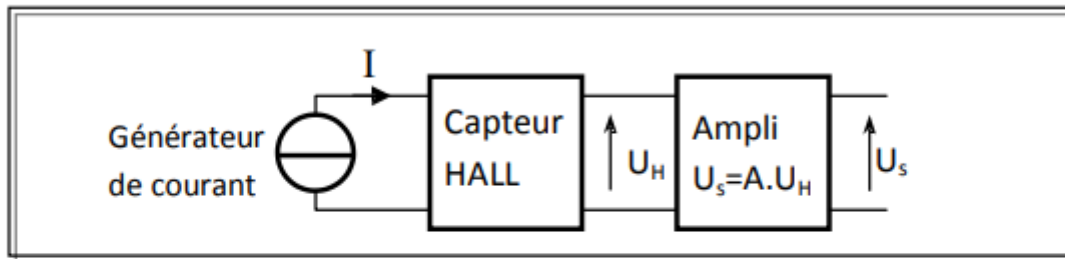
$U_H = k \cdot B$ avec k constante égale à $R_H \frac{I}{e}$



Capteurs actifs

3-2- Capteur de champ magnétique:

Fig. 6 : Principe d'un capteur de champ magnétique



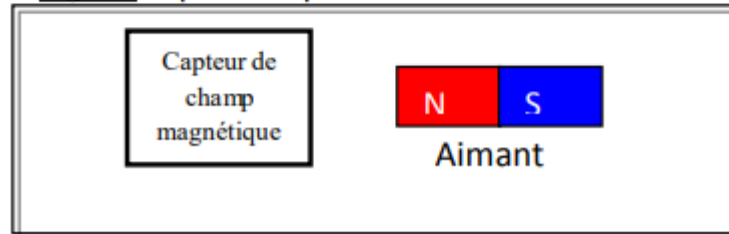
La sensibilité de ce capteur pourra être ajustée en agissant sur I et sur A.

3-3- Autres applications:

3.3.1 Capteur de proximité:

Le capteur détecte l'approche de l'aimant placé au préalable sur un objet.

Fig. 7 : Capteur de proximité



Capteurs actifs

3.3.2 Mesure de l'intensité d'un courant électrique sans "ouvrir" le circuit:

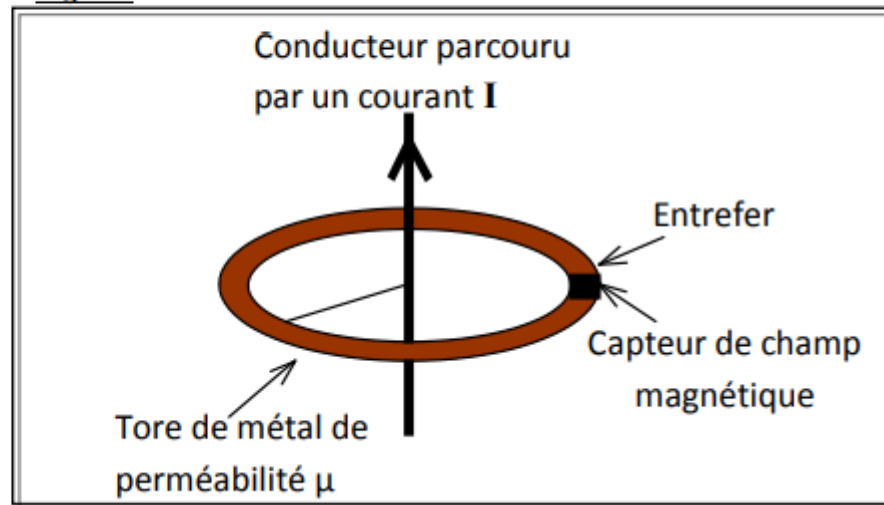
Le courant I crée un champ magnétique

proportionnel à ce courant : $B = \frac{\mu}{2\pi r} I$

Le capteur donne une tension $U_s = k \cdot B = k' \cdot I$
avec k et k' constantes.

C'est le principe des pinces ampèremétriques
(mesure de forts courants de 1000A et plus).

Fig. 8 : Mesure de courant en boucle fermée



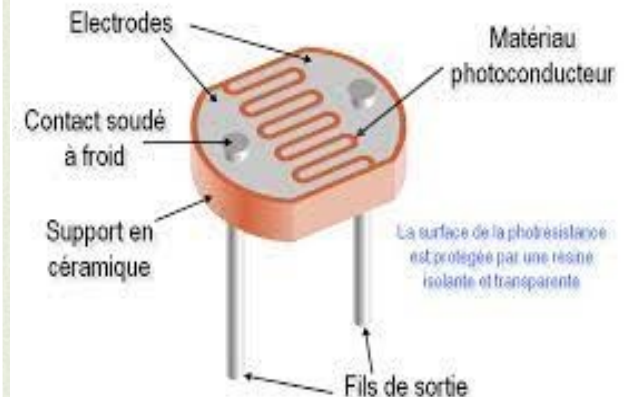
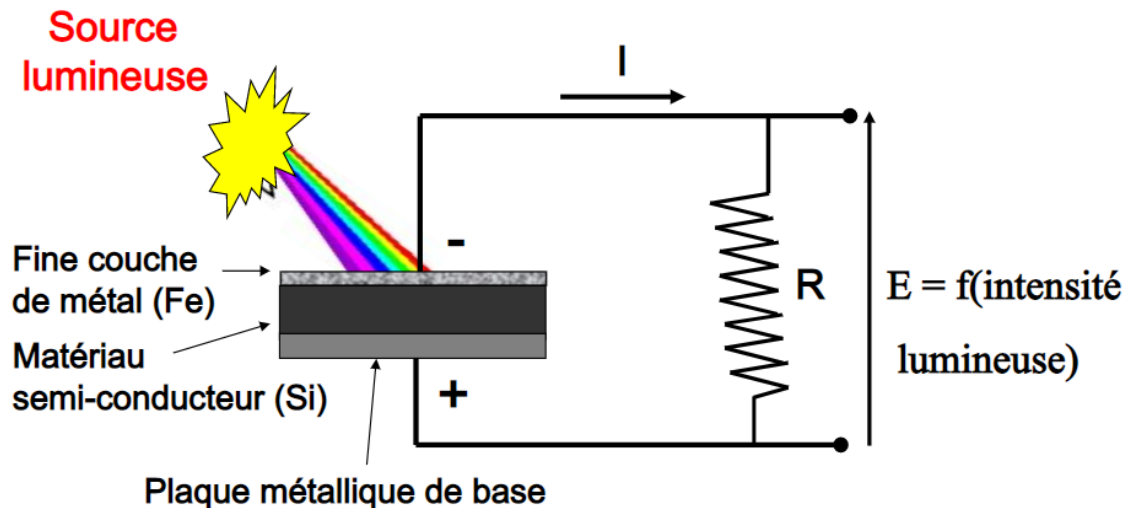
Capteurs actifs

4. CAPTEURS A EFFET PHOTOELECTRIQUE:

4-1- 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.

Quand la lumière impressionne la limite entre le semi-conducteur et la fine couche de métal, un courant est généré sans exiger de f.e.m. extérieure.



Capteurs actifs

Utilisations :

Transmission de données

- ⇒ Télécommande IR
- ⇒ Transmission de données par fibre optique
- ⇒ Détection de passage

Roue codeuse

- ⇒ Mesures d'angle et de vitesse
- ⇒ Comptage d'impulsions (souris de PC)

Fig. 10 : Emetteur/Récepteur infrarouge

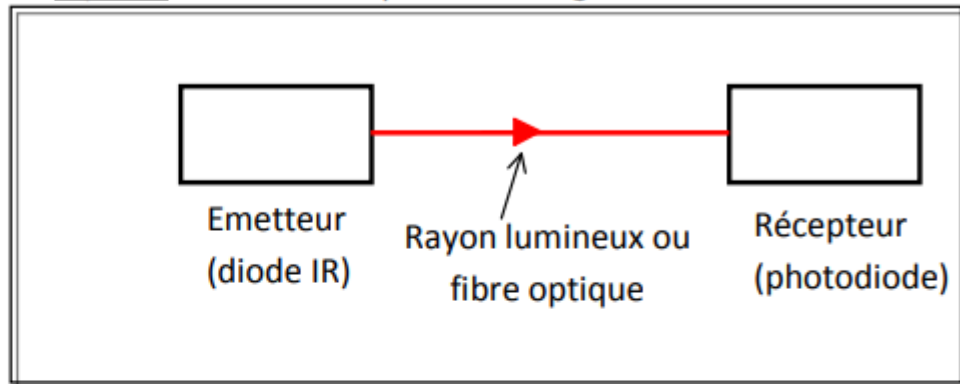
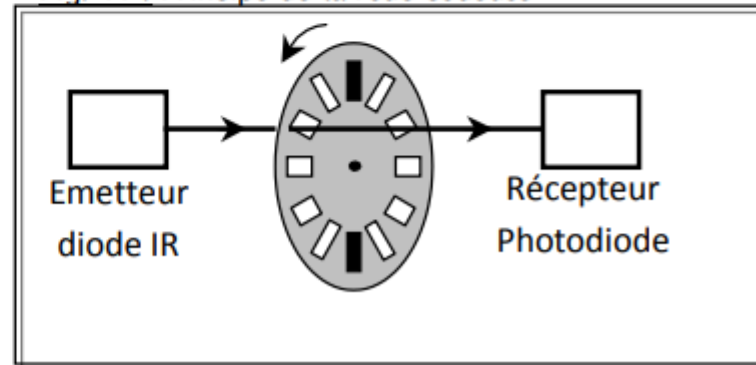


Fig. 11 : Principe de la roue codeuse



Capteurs passifs

Il s'agit généralement d'impédances dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur à mesurer.

Ces paramètres déterminants sont liés:


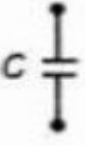
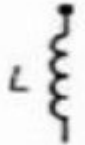

• **Liés à la géométrie de l'impédance (ses dimensions):**

- Cas d'un grand nombre de capteurs de position ou de déplacement (potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile),
- Cas des capteurs de déformation (jauges extensométriques).

• **Liés aux propriétés électriques des matériaux:** résistivité ρ , perméabilité μ et constante diélectrique ϵ .

Ces propriétés électriques peuvent être sensibles à des grandeurs physiques variées: température, éclairement, humidité...

Capteurs passifs

Grandeur de traduction	Transformations possibles
	Résistance R : $R = f(\rho, \ell, s)$ ρ résistivité, ℓ longueur, s section
	Capacité C : $C = f(S, e, \epsilon)$ S surface des armatures, e distance entre armatures, ϵ permittivité
	Inductance L : $L = f(\ell, S, \mu, n)$ ℓ longueur, S surface d'une spire, n nombre de spires, μ perméabilité
	Inductance mutuelle : $M = f(L_1, L_2)$

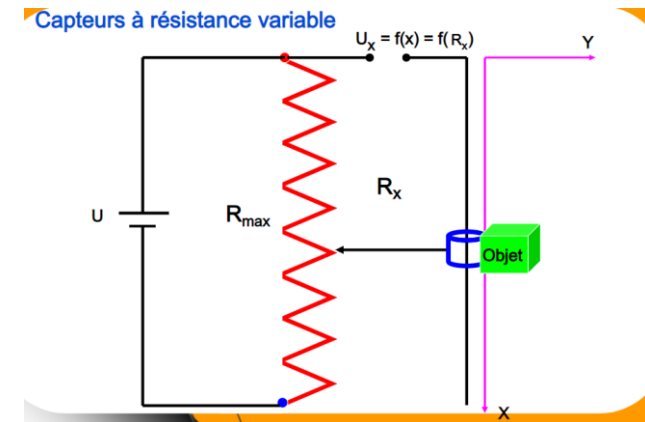
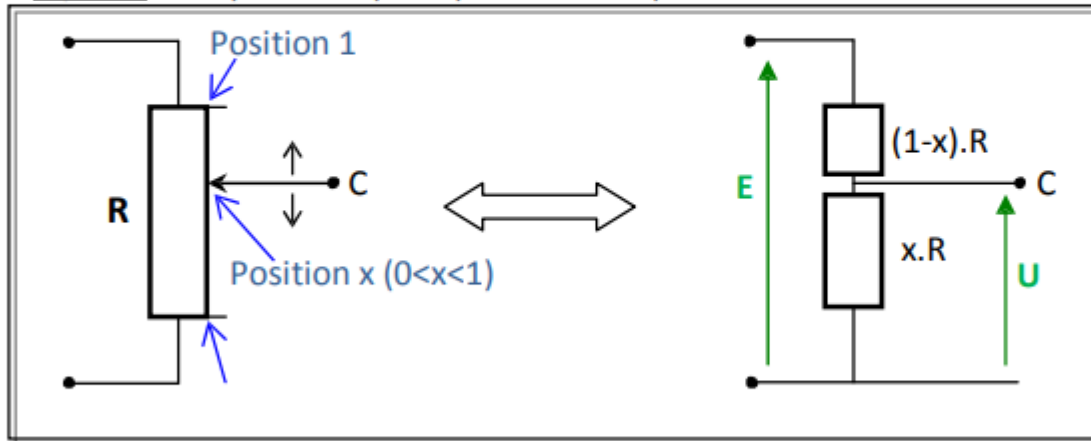
Capteurs passifs

5-1- Capteurs potentiométriques de déplacement:

5.1.1 Principe:

Pour mesurer la position d'un objet, il suffit de le relier mécaniquement au curseur C d'un potentiomètre (schéma ci-dessous).

Fig. 12 : Principe d'un capteur potentiométrique

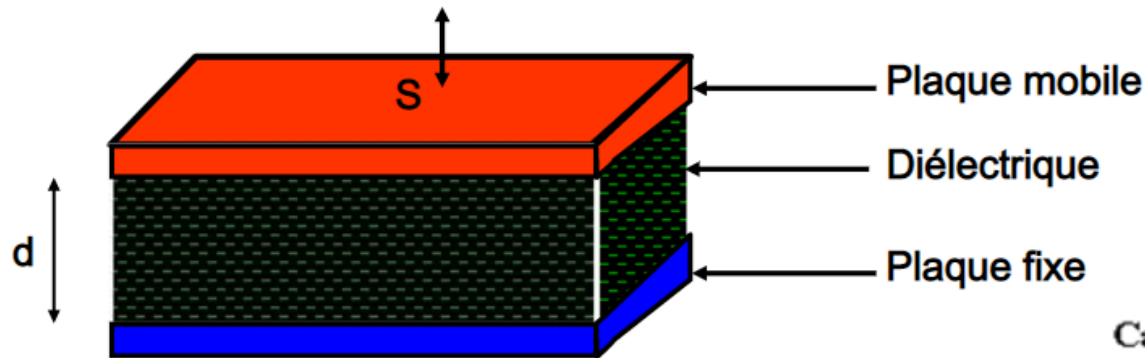


On applique une tension continue E entre les extrémités A et B du potentiomètre. La tension U en sortie aura l'expression suivante : $U = E \cdot \frac{x.R}{R}$

La tension U en sortie est donc proportionnelle à la position x du curseur.

Capteurs passifs

Capteur à variation de capacité



$$C = 0,225.\varepsilon.S/d \text{ (F)}$$

avec:

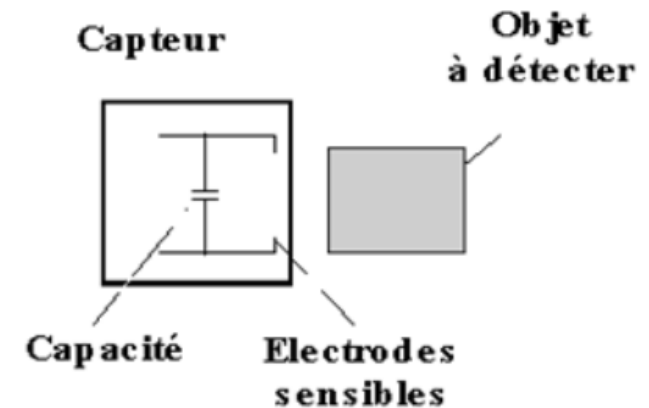
ε = Constante diélectrique;

d = distance entre les plaques (armatures);

S = surface

L'impédance de sortie d'une capacité est donnée par:

$$Z = 1/2.\pi.f.C \text{ (\Omega)}$$



Capteurs passifs

