

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Mohamed Boudiaf de M'sila**



**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Electrique**

**Support de Cours pour la Matière:**

**Capteurs et Métrologie**

**Destiné aux étudiants de 3<sup>ème</sup> Année**  
***Licence en Electrotechnique***

Préparé par :

**Docteur: BENYETTOU Loufi**

**Année Universitaire 2016/2017**

## مستخلص من محضر اجتماع اللجنة العلمية لقسم الهندسة الكهربائية المنعقد بتاريخ 2016/11/02

بناء على تقارير لجنة الخبراء المكونة من الأستاذة بن عالية ليلي أستاذ محاضر قسم أ بجامعة باتنة، الأستاذ زغلاش سمير أستاذ محاضر قسم أ بجامعة المسيلة و الأستاذ غماري زين محاضر قسم أ بجامعة المسيلة الخاصة بمطبوعة الدروس المنجزة من طرف الأستاذ بن يطو لطفي أستاذ محاضر قسم ب بالقسم تد عنوان " **Capteurs et métrologies** " و التي كانت كلها ايجابية, فان اللجنة لا ترى مانعا ان تتد سندا في تدريس طلبة الليسانس كهروتقني او ان تعتمد في اي تقييم للمسار العلمي للأستاذ المعني.

رئيس اللجنة العلمية للقسم



# Sommaire

<b>1. Notions fondamentales de la mesure.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction.....	1
1.2 Métrologie.....	1
1.2.1 Définition.....	1
1.2.2 Quelques termes de métrologie .....	1
1.2.3 Les types d'erreurs classiques.....	2
<b>2. Généralités sur les capteurs.....</b>	<b>3</b>
2.1 Définition d'un Capteur .....	3
2.2 Constitution d'un capteur.....	6
2.3 Grandeur d'influence.....	7
<b>3. Classification des capteurs.....</b>	<b>7</b>
<b>4. Les Capteurs de température.....</b>	<b>11</b>
4.1 Les capteurs de température à résistance.....	11
4.2 Les Thermistances.....	11
4.3 Thermocouples.....	12
<b>5. Capteurs de proximité inductifs ou magnétiques.....</b>	<b>13</b>
5.1 Le détecteur de proximité inductif (D.P.I.).....	13
5.2 Le détecteur de Proximité Capacitifs D.P.C.....	13
<b>6. Capteurs de proximité opto-électronique (ou photo électrique).....</b>	<b>14</b>
<b>7. Les Capteurs de Vitesse.....</b>	<b>15</b>
<b>8. Conditionneurs des capteurs passifs .....</b>	<b>15</b>
8.1 Principaux type de conditionneurs .....	15
8.1.2 Montage potentiométrique .....	16
8.1.3 Montage en pont .....	22
8.2. Conditionnement des signaux mesurés.....	25
8.2.1 Adaptation d'impédance .....	25
8.2.2 Utilisation des amplificateurs opérationnels .....	26
8.2.3 Utilisation des amplificateurs d'instrumentation.....	28
<b>9. Chaîne d'acquisition de données.....</b>	<b>29</b>
9.1. Structure.....	29
9.2 . Chaîne de Restitution.....	31
9.3 . Acquisition de plusieurs grandeurs.....	31
9.3.1 Acquisition séquentielle décalée.....	32
9.3.2 Acquisition séquentielle simultanée.....	32
9.3.3 Acquisition parallèle.....	32
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>33</b>

# 1. Notions fondamentales de la mesure

## 1.1 Introduction

La mesure est un processus de connaissance qui grâce à l'expérience physique nous donne une information quantitative (valeur) du rapport entre la grandeur mesurable et une grandeur de même nature prise comme unité.

## 1.2 Métrologie

### 1.2.1 Définition

La métrologie au sens étymologique du terme se traduit par Science de la mesure. Dans le langage courant des « métrologues », on entend souvent dire mesurer c'est comparer !

Les résultats des mesures servent à prendre des décisions :

- Acceptation d'un produit (mesure des caractéristiques, des performances, conformité à une exigence),
- Réglage d'un instrument de mesure, validation d'un procédé,
- Réglage d'un paramètre dans le cadre d'un contrôle d'un procédé de fabrication,
- Validation d'une hypothèse,
- Définition des conditions de sécurité d'un produit ou d'un système.

Un résultat de mesure est écrit sous la forme :  $X = \{X\} [X]$

Où X est le nom de la grandeur physique, [X] représente l'unité et {X} est la valeur numérique de la grandeur exprimée dans l'unité choisie.

### 1.2.2 Quelques termes de métrologie

- **Grandeur (mesurable) :** définie comme attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, qui est susceptible d'être distinguée qualitativement et déterminée quantitativement
- **Unité de mesure :** c'est une grandeur particulière, définie et adoptée par convention, à laquelle on compare les autres grandeurs de même nature pour les exprimer quantitativement.
- **Mesurage :** c'est l'ensemble des opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.
- **Mesurande :** grandeur particulière soumise à mesurage.
- **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.

**L'incertitude (dx) :** Le résultat de la mesure  $x$  d'une grandeur  $X$  n'est pas complètement défini par un seul nombre. Il faut au moins la caractériser par un couple  $(x, dx)$  et une unité de mesure.  $dx$  est l'incertitude sur  $x$ . Les incertitudes proviennent des différentes erreurs liées à la mesure.

Ainsi, on a :  $x-dx < X < x+dx$

**Exemple :** 3 cm  $\pm$ 10%, ou 3 cm  $\pm$  3 mm.

- **Erreur absolue (e) :** Résultat d'un mesurage moins la valeur vraie du mesurande. Une erreur absolue s'exprime dans l'unité de la mesure.

$$e = x - X$$

**Exemple :** Une erreur de 10 cm sur une mesure de distance.

- **Erreur relative (er) :** Rapport de l'erreur de mesure à une valeur vraie de mesurande.

Une erreur relative s'exprime généralement en pourcentage de la grandeur mesurée.

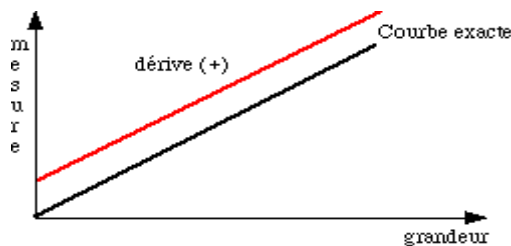
$$er = e/X ; er\% = 100 er$$

**Exemple :** Une erreur de 10 % sur une mesure de distance (10 % de la distance réelle).

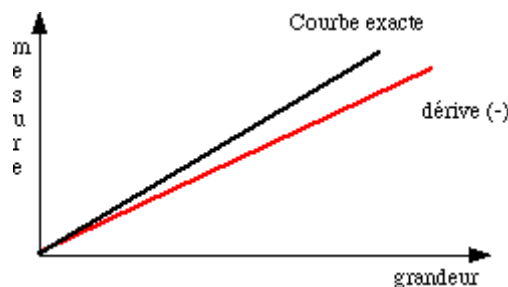
- **Étalon de mesure :** en métrologie, un étalon est un dispositif auquel on doit se fier pour contrôler l'exactitude des résultats fournis par un appareil de mesure.

### 1.2.3 Les types d'erreurs classiques

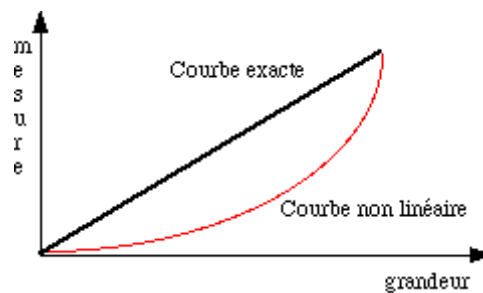
- **L'erreur de zéro (offset) :**



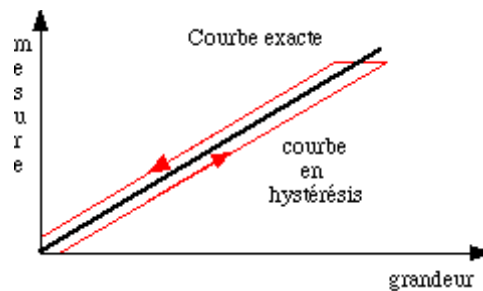
- **L'erreur d'échelle (gain) :** C'est une erreur qui dépend de façon linéaire de la grandeur mesurée.



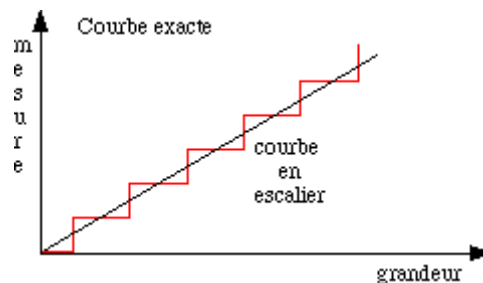
- **L'erreur de linéarité** : La caractéristique n'est pas une droite



- **L'erreur due au phénomène d'hystérésis** : Il y a phénomène d'hystérésis lorsque le résultat de la mesure dépend de la précédente mesure



- **L'erreur de quantification** : La caractéristique est en escalier, cette erreur est souvent due à une numérisation du signal.



## 2. Généralités sur les capteurs

**2.1 Définition d'un Capteur** : c'est un dispositif qui transforme une grandeur physique d'entrée, appelée mesurande [m], en une grandeur de nature électrique (en général) appelée réponse ou grandeur de sortie [s].



- **Mesurande** : température, force, vitesse, déplacement, ... c'est tout simplement la grandeur qu'on cherche à mesurer.

- **Grandeur de sortie** : elle est généralement de type électrique. Elle peut être soit : une charge, une tension, un courant ou une impédance (R, L, C).

La grandeur de sortie est donc un signal électrique qui pourrait être de type analogique ou numérique

- **Exemple** : capteur de pression à jauges de contraintes

*mesurande* : pression

*réponse* : tension

## 2.4 Caractéristiques métrologiques d'un capteur

De manière à classer les capteurs en fonction de leurs performances, on est amené à définir des paramètres qui permettent de les sélectionner en fonction de l'application.

Chaque capteur (ou élément de mesure) présente certaines caractéristiques métrologiques qui définissent ses limites d'utilisation et de précision. Ces limites dépendent non seulement du mesurande, mais aussi des grandeurs d'influence qui viennent perturber l'élément de mesure.

- **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 ».

- **Sensibilité**

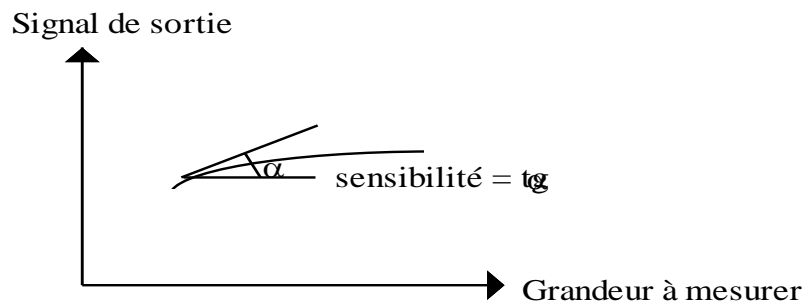
C'est le rapport de la variation du signal de sortie à la variation correspondante de la grandeur à mesurer.

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



- **Précision**

C'est l'aptitude du capteur à donner des indications proche de la valeur vraie de la grandeur mesurée.

- **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.

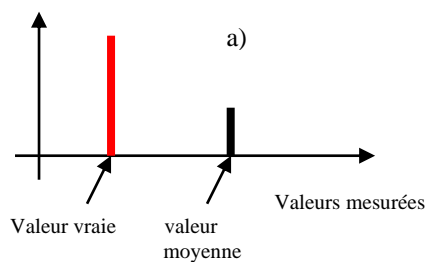
a : capteur ni fidèle, ni juste ( erreurs et incertitudes de mesure importantes )

b : capteur fidèle mais non juste

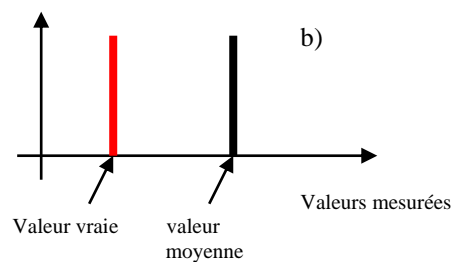
c : capteur juste mais non fidèle

d : capteur juste et fidèle, donc précis ( erreurs et incertitudes de mesure réduites )

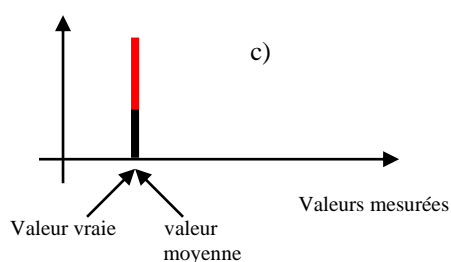
Répartition des mesures



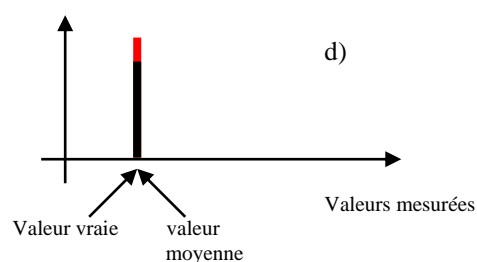
Répartition des mesures



Répartition des mesures



Répartition des mesures



- **Rapidité**

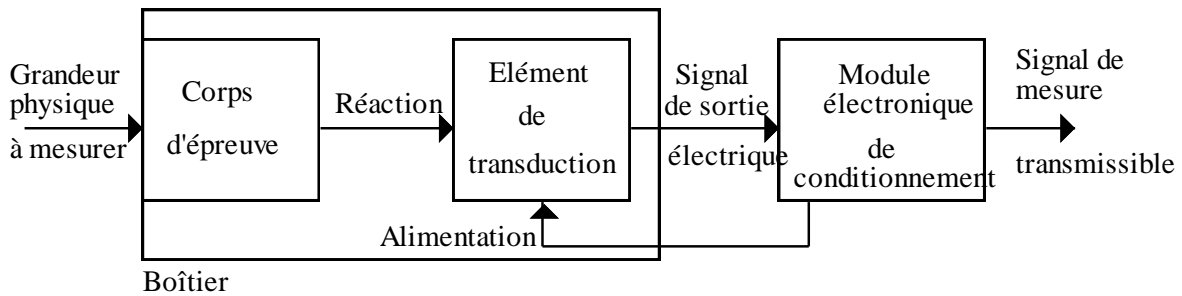
C'est l'aptitude du capteur à suivre dans le temps les variations de la grandeur à mesurer. Il faut donc tenir compte du temps de réponse, de la bande passante et la fréquence de coupure du capteur.

- **Stabilité**

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



## 2.2 Constitution d'un capteur



- **Corps d'épreuve** : élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer (appelée aussi mesurande).

But : transformer la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dite mesurable.

- **Élément de transduction** : élément sensible lié au corps d'épreuve. Il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie.

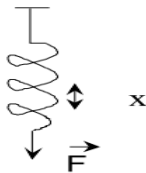
- **Boîtier** : élément mécanique de protection, de maintien et de fixation du capteur.

- **Module électronique de fonctionnement** : il a, selon les cas, les fonctions suivantes :

- alimentation électrique du capteur (si nécessaire)
- mise en forme et amplification du signal de sortie
- filtrage, amplification
- conversion du signal (CAN,...)

### • Exemples

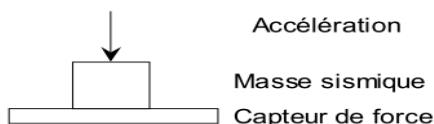
Mesure d'une force à partir d'un capteur de déplacement



Corps d'épreuve : ressort  
 Force : Mesurande primaire  
 Elongation : Mesurande secondaire

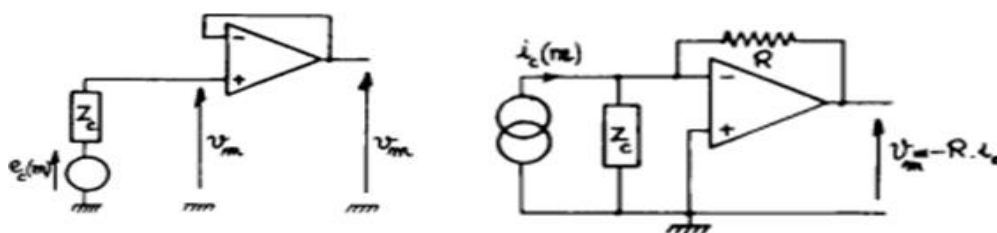
### • Exemples

Mesure d'une accélération à partir d'un capteur de force



Corps d'épreuve : masse sismique  
 accélération : Mesurande primaire  
 Force : Mesurande secondaire

### • Exemples des Conditionneurs



## 2.3 Grandeur d'influence

Les grandeurs d'influence sont des grandeurs étrangères qui, selon leur nature et leur importance, peuvent provoquer des perturbations sur le capteur. C'est donc une cause d'erreurs agissant sur le signal de sortie. Les principales grandeurs d'influence sont :

- la température qui modifie les caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur ;
- La pression, l'accélération et les vibrations susceptibles de créer dans certains éléments constitutifs du capteur des déformations et des contraintes qui altèrent la réponse ;
- L'humidité à laquelle certaines propriétés électriques comme la constante diélectrique ou la résistivité peuvent être sensibles et qui risque de dégrader l'isolation électrique entre composants du capteur ou entre le capteur et son environnement ;
- Les champs magnétiques variables ou statiques ; les premiers créent des f.é.m. d'induction qui se superposent au signal utile, les seconds peuvent modifier une propriété électrique ;
- Tension d'alimentation : lorsque la grandeur de sortie du capteur dépend de celle-ci directement (amplitude ou fréquence)

## 3.3 Classification des capteurs

La classification se fait par :

- 1<sup>er</sup> - de leur principe de fonctionnement :
- 2<sup>ème</sup> - la mesurande qu'ils traduisent (capteur de température, de pression, ...)
- 3<sup>ème</sup> - du signal qu'ils fournissent (capteur analogique, capteur logique, capteurs digitaux)

### 3.3.1 Première Classification




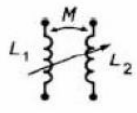
On classe les capteurs en deux grandes familles en fonction de la caractéristique électrique de la grandeur de sortie. On distingue

#### - Capteurs passifs

Le capteur se comporte en sortie comme un dipôle passif qui peut être résistif, capacitif ou inductif. Le tableau ci-dessous résume, en fonction du mesurande, les effets utilisés pour réaliser la mesure.

Mesurande	Effet utilisé (grandeur de sortie)	Matériaux
Température	Résistivité	Platine, Nickel, cuivre, semi-conducteurs.
Très basse température	Cste diélectrique	Verre.
Flux optique	Résistivité	semi-conducteurs
Déformation	Résistivité Permiabilité	Alliages nickel Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Magnétorésistances: Bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

Le tableau ci-contre montre les transformations possibles qu'offrent ces grandeurs.

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

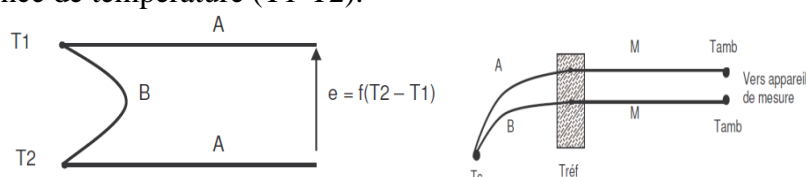
**- Capteurs actifs :**

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 au mesurande : énergie thermique, mécanique ou de rayonnement. Le tableau suivant présente les principes physiques de base des capteurs actifs :

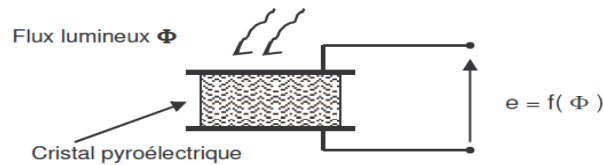
Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Pyroélectricité Photoémission Effet photovoltaïque Effet photoélectromagnétique	Charge Courant Tension Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique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

Précision sur les effets utilisés :

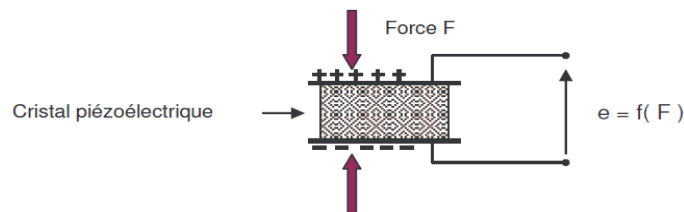
a. **Thermoélectricité** : c'est le principe de tout thermocouple. C'est un circuit constitué de deux conducteurs de nature chimique différente et dont les jonctions sont à des températures différentes  $T_1$  et  $T_2$ . Il apparaît aux bornes de ce circuit une tension (force électromotrice) liée à la différence de température ( $T_1 - T_2$ ).



b. **Pyroélectricité** : certains cristaux présentent une polarisation électrique proportionnelle à leur température. Ainsi, en absorbant un flux de rayonnement, le cristal pyroélectrique va s'échauffer et ainsi sa polarisation va se modifier entraînant une variation de tension détectable.



c. **Piézoélectricité** : l'application d'une force sur ce type de matériau engendre l'apparition de charges électriques créées par la déformation du matériau. C'est un phénomène réversible.



d. **Induction** : la variation d'un flux magnétique engendre l'apparition d'une force électromotrice.

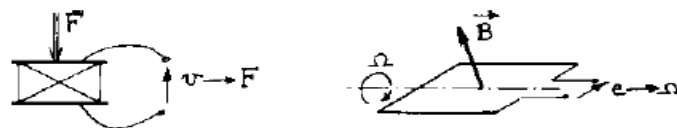
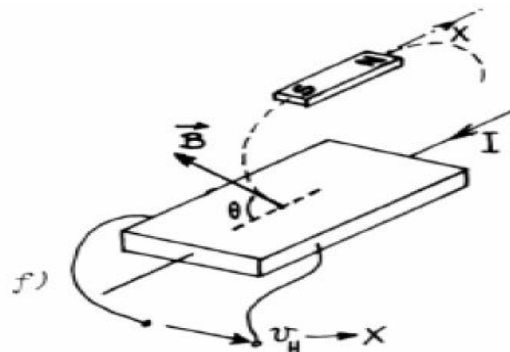


Figure 4 :Piézoélectricité et induction

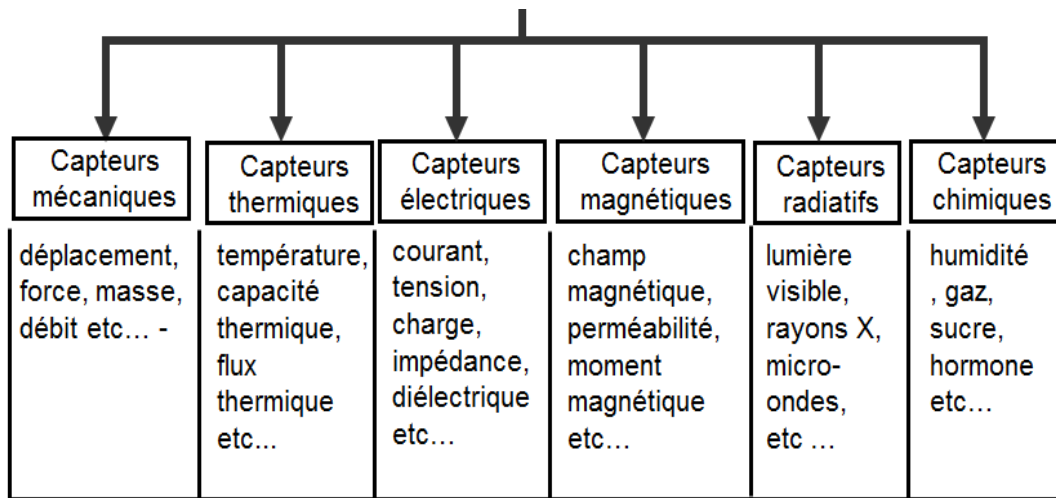
e. **Photoélectricité** : sous l'influence d'un rayonnement lumineux, le matériau libère des charges électriques et celles-ci en fonction du rayonnement.

f. **Effet Hall** : un semi-conducteur de type parallélépipède rectangle, placé dans une induction  $B$  et parcouru par un courant  $I$ , voit l'apparition, dans la direction perpendiculaire au courant et à l'induction, d'une différence de potentiel qui a pour expression :  $V_H = K_H \cdot I \cdot B \cdot \sin \theta$ ; où  $K_H$  dépend du matériau et des dimensions de la plaquette.



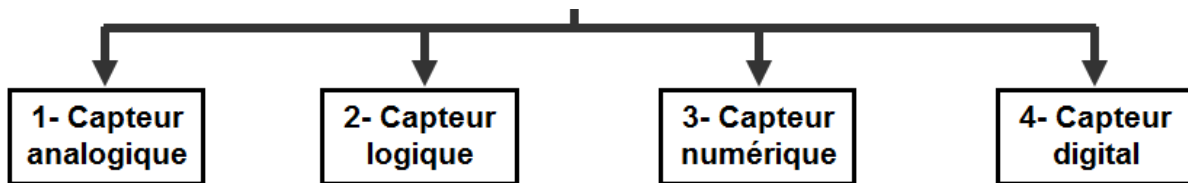
### 3.3.2 Deuxième classification

Classement en fonction du type de grandeurs physiques à mesurer (mesurande)



### 3.3.3 Troisième classification

Classement en fonction du type du signal de sortie du capteur



1- Catégorie la plus répandue. Ils fournissent un signal analogique en fonction d'une grandeur physique, électrique, mécanique,...

2- Ils présentent 2 états (0 et 1) dont le modèle est le contact ouvert ou fermé (fin de course, capteur de niveau...). Appelée «key sensor» en anglais.

3- Fournissent un signal fréquentiel, c'est à dire un certain nombre d'impulsions par unité de temps (n) en fonction de la grandeur mesurée (E). Le capteur type de cette catégorie est le tachymètre à optocoupleur. Facilement incorporable dans une chaîne de mesure et ne nécessitent qu'une électronique associée réduite.

Interviennent dans les éléments de sécurité.

4- Dispositifs donnant directement des informations binaires combinatoires. Les codeurs optiques sont l'exemple parfait. Ils sont intéressants car c'est des dispositifs qui peuvent être directement couplés au système informatique sans la nécessité d'amplification ni de CAN. Peut être influencé par les bruits extérieurs.

## 4. Les Capteurs de température

Il existe deux grandes familles de capteurs utilisés quotidiennement dans l'industrie pour la mesure des températures les couples thermoélectriques, dits **thermocouples** et les capteurs de température à résistances dits **Pt 100** ou sondes platine, les thermistances.

### 4.1 Les capteurs de température à résistance.

Les capteurs de température à résistance fonctionnent sur le principe de la détection des variations de résistance électrique des métaux purs : leur résistance varie de façon linéaire avec la température. Les éléments types utilisés pour réaliser ces capteurs incluent le nickel (Ni) et le cuivre (Cu) mais le platine (Pt) est de loin le plus courant, en raison de l'étendue de sa gamme de températures, de sa précision et de sa stabilité.

Très connus pour leur stabilité, les capteurs de température à résistance présentent le signal le plus linéaire de tous les capteurs électroniques en matière de température, mais ils sont généralement plus onéreux que leurs équivalents à cause de leur construction plus délicate et du platine qu'ils contiennent. Les capteurs de température à résistance se caractérisent aussi par un temps de réponse élevé et par une faible sensibilité. En outre, ils nécessitent une excitation en courant et sont sujets à l'auto-échauffement.

Les sondes capteurs de température à résistance sont habituellement classées par résistance nominale à 0°C. Les valeurs de résistance nominale typiques pour les capteurs de température à résistance à film métallique en platine sont 100  $\Omega$  et 1 000  $\Omega$ . La relation entre résistance et température est presque linéaire.



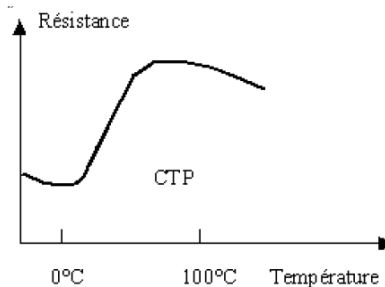
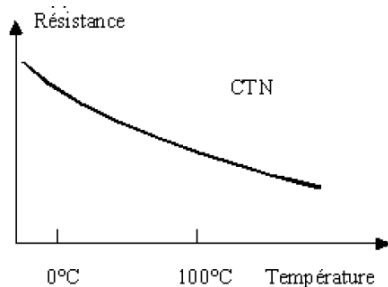
Sonde PT 100

### 4.2 Les Thermistances

Les thermistances n'ayant pas une caractéristique linéaire mais étant très sensibles, ils sont particulièrement adaptés aux problèmes de régulation.

On appelle CTN les thermistances à Coefficient de Température Négatif : leur résistance *diminue* lorsque la température augmente.

On appelle CTP celles à coefficient de température *positif*.



### 4.3 Thermocouples

En physique, les thermocouples sont utilisés pour la mesure de températures. Ils sont bon marché et permettent la mesure dans une grande gamme de températures. Leur principal défaut est leur précision :

il est relativement difficile d'obtenir des mesures avec une erreur inférieure à 0,1-0,2 °C. La mesure de température par des thermocouples est basée sur l'effet Seebeck.

#### - Différents types de thermocouples

##### - Type J

Composition : Fer / Constantan (alliage nickel+cuivre)

Fonctionne bien dans le vide et dans une plage de température de 0 à 750°C.

##### - Type K

Composition : Chromel (alliage nickel + chrome) / Alumel (alliage nickel + aluminium (5%) + silicium)

Il permet une mesure dans une gamme de température large : -200 °C à 1250°C.

##### - Type T

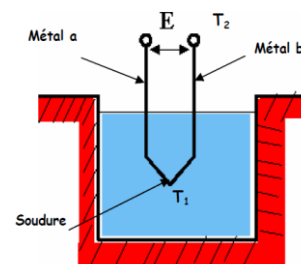
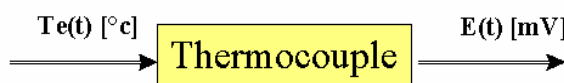
Composition : Cuivre / Constantan (alliage cuivre + nickel)

Ce thermocouple est particulièrement adapté pour une utilisation à basse température (-200 à 350°C) comme pour des applications cryogéniques

#### - Principe de mesure

Les deux métaux a et b, de natures différentes, sont reliés par deux jonctions (formant ainsi un thermocouple) aux températures T1 et T2.

Par effet Seebeck, le thermocouple génère une différence de potentiel qui dépend de la différence de température entre les jonctions,  $E = T_1 - T_2$ .



Pour mesurer une température inconnue, l'une des deux jonctions doit être maintenue à une température connue, par exemple celle de la glace fondante (0 °C). Il est également possible que cette température de référence soit mesurée par un capteur (température ambiante, par exemple). La mesure de température est donc une mesure indirecte, puisque les thermocouples mesurent en fait une différence de potentiel électrique.

## 5. Capteurs de proximité inductifs ou magnétiques

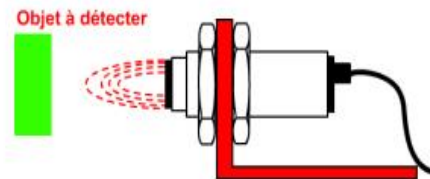
### 5.1 Le détecteur de proximité inductif (D.P.I)

Ce type de capteur permet de détecter sans contact tous les matériaux conducteurs d'électricité.

L'approche d'un matériau conducteur devant la face sensible du capteur provoque la rupture du champ magnétique, ce qui engendre la commutation de l'information électrique envoyée vers la partie commande.

#### Capteur de proximité inductif

##### D.P.I



### 5.2 Le détecteur de Proximité Capacitifs (D.P.C)

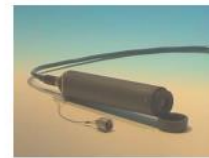
Ils permettent de détecter la présence sans contact physique et à faible distance de tous types d'objets. C'est la grande différence avec le capteur inductif qui ne peut détecter que des matériaux conducteurs de courant.

D'une mise en œuvre très simple, ils sont principalement utilisés pour le contrôle de remplissage de liquides dans des flacons ou des cuves.

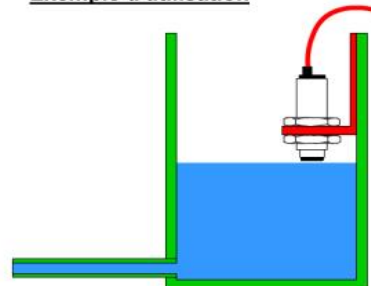
Son principe de fonctionnement est voisin de celui du détecteur inductif. Il produit contrairement au capteur inductif, un champ électrique qui est modifié à l'approche d'un objet quelconque.

Cette modification est détectée et transmise à l'unité de traitement.

#### Capteur de proximité capacitif



##### Exemple d'utilisation



#### - **Avantages :**

Pas de contact physique avec l'objet détecté.

Pas d'usure ; possibilité de détecter des objets fragiles, fraîchement peints...

Détecteur statique, pas de pièces en mouvement.

Durée de vie indépendante du nombre de manoeuvres.

Produit entièrement encapsulé dans la résine.

Très bonne tenue à l'environnement industriel : atmosphère polluante

- **Inconvénients :** ils sont assez chers mais très fiables



## 6. Capteurs de proximité opto-électronique (ou photo électrique)

### - La cellule photoélectrique

Les cellules photoélectriques permettent de détecter sans contact tous les matériaux opaques (non transparents), conducteurs d'électricité ou non. Le signal de sortie est électrique.

Les différents types de montage des cellules photoélectriques sont les suivants :

### - Type barrage

Ici le signal est envoyé lorsque le faisceau est coupé par l'objet à détecter.

### - Type reflex

On dispose un émetteur récepteur et un réflecteur. Lorsque l'objet coupe le faisceau, celui-ci n'est plus renvoyé vers le récepteur. Cela déclenche le signal de sortie.

### - Type reflex

On dispose un émetteur récepteur et un réflecteur. Lorsque l'objet coupe le faisceau, celui-ci n'est plus renvoyé vers le récepteur. Cela déclenche le signal de sortie.

### Type reflex direct

Ici, c'est l'objet qui fait office de réflecteur. Lorsque l'objet passe devant le faisceau, celui-ci est renvoyé vers l'émetteur-récepteur qui va émettre un signal de sortie.

### - Avantages :

Pas de contact physique avec l'objet détecté.

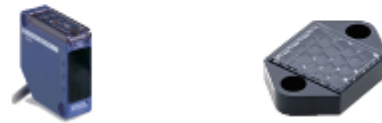
Pas d'usure ; possibilité de détecter des objets fragiles, fraîchement peints...

Détecteur statique, pas de pièces en mouvement.

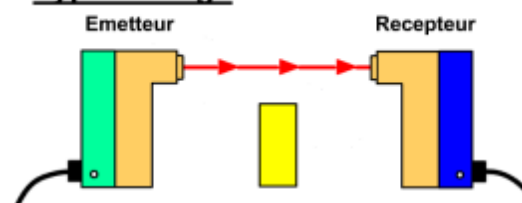
Durée de vie indépendante du nombre de manoeuvres.

- **Inconvénients** : Sensibles à la poussière et aux perturbations.

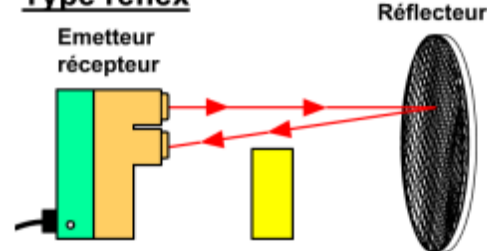
### Capteur à effet photoélectrique



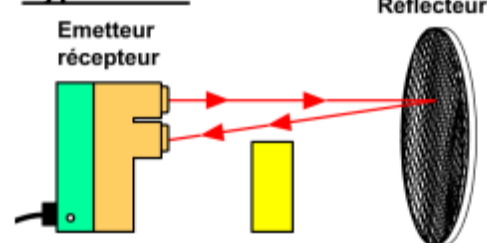
#### Type barrage



#### Type reflex



#### Type reflex



#### Type reflex direct



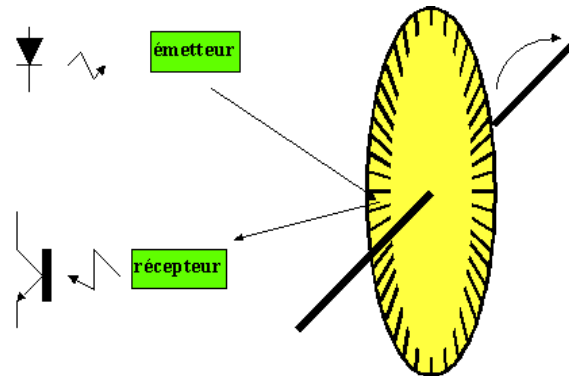
## 7. Les Capteurs de Vitesse

### -Tachymétrie (génératrice tachymétrie)

Elle délivre une tension proportionnelle à sa vitesse de rotation. Son principal domaine d'application se situe dans la régulation de vitesse d'un moteur électrique.

### -Codeur incrémental

Principe: une lumière émise par une diode électroluminescente est réfléchiée par les graduations d'un disque vers un phototransistor qui se sature et se bloque à la cadence du défilement des graduations.



Le codeur incrémental est surtout utilisé dans les systèmes dont le traitement de l'information est entièrement numérique. Ses impulsions sont comptabilisées de façon à donner une information concernant la position (nombre d'impulsions délivrées depuis une position d'origine) ou /et une information concernant la vitesse (nombre d'impulsions par unité de temps). Dans ce dernier cas, il évite l'emploi d'une génératrice tachymétrique (il est cependant peu précis aux très basses fréquences de rotation).

## 8. Conditionneurs des capteurs passifs :

### 8.1 Principaux type de conditionneurs :

Les variations de l'impédance  $Z_c$  d'un capteur passif liées aux évolutions d'un mesurande  $m$  ne peuvent être traduites sous forme d'un signal électrique qu'en associant aux capteurs une source de tension  $e_s$  ou de courant  $i_s$  et généralement d'autres impédance  $Z_k$  constituant alors le conditionneur du capteur. On peut distinguer deux groupe principaux de conditionneurs selon qu'ils transfèrent l'information liée aux variations d'impédance du capteur,

- Soit sur l'amplitude du signal de mesure, c'est le cas des montages potentiométriques et des ponts.
- Soit sur la fréquence du signal de mesure, il s'agit alors d'oscillateurs.

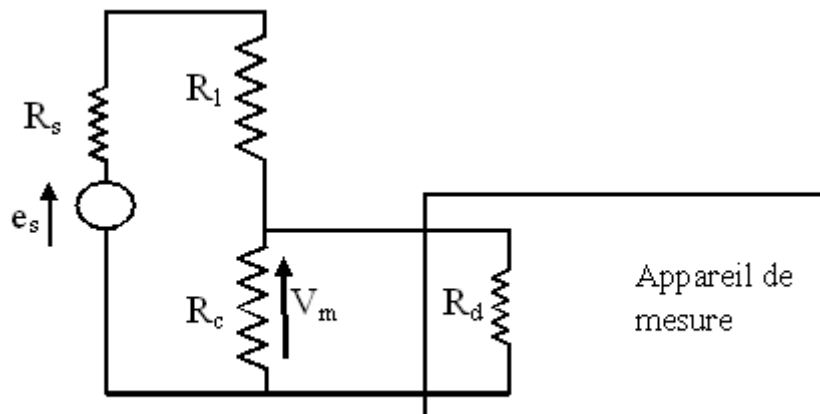
Les montages potentiométrique simples, qu'ils soient alimenté en source de tension ou de courant présentent, certes, l'intérêt de la simplicité mais ils ont un inconvénient majeur, c'est celui d'être sensibles aux parasites. Le pont par contre qui est un double potentiomètre permet une mesure différentielle réduisant de façon importante l'influence des parasites.

Lorsque le capteur et le conditionneur sont purement résistifs on utilise de préférence une source de courant ou tension continus puisqu'alors aucune démodulation n'est nécessaire et que les réactances parasites ne jouent plus aucun rôle. Il faut cependant veiller à ce que le

circuit ne soit le siège d'aucune force électromotrice thermoélectrique et que ses composants ne présentent aucune dérive.

### 8.1.2 Montage potentiométrique :

Le capteur de résistance  $R_c$  en série avec une résistance  $R_1$  est alimenté par une source de résistance interne  $R_s$  et de f.é.m.  $e_s$ , continue ou alternative. La tension  $V_m$  est mesurée aux bornes du capteur par un appareil de résistance d'entrée  $R_d$ .



Montage potentiométrique

Selon les lois d'électroniques, on peut écrire :

$$e_s = (R_s + R_1 + R_c) \cdot I$$

$$V_m = R_c \cdot I$$

$$I = \frac{V_m}{R_c}$$

Donc :

$$e_s = (R_s + R_1 + R_c) \cdot \frac{V_m}{R_c}$$

$$V_m = \frac{R_c}{R_s + R_1 + R_c} \cdot e_s$$

Comme  $R_s$  est négligeable donc on a :

$$V_m = \frac{R_c}{R_1 + R_c} \cdot e_s$$

La relation qui lie la tension de sortie ( $V_m$ ) au paramètre image du mesurande ( $R_c$ ) n'est pas linéaire. La sensibilité du montage n'est donc pas constante. On peut néanmoins faire une Linéarisation pour rendre la sensibilité constante :

▪ **Fonctionnement en petit signaux :**

Avec l'étude en petites variations du mesurande (étude petit signaux), on se place aux petites variations  $\Delta R < R_c + R_1$  :

$$R_c \rightarrow R_{c0} + \Delta R$$

$$V_m \rightarrow V_{m0} + \Delta V_m$$

Alors on obtient :

$$\Delta V_m = V_m - V_{m0}$$

$$V_{m0} = \frac{R_{c0}}{R_1 + R_{c0}} \cdot e_s$$

$$V_m = \frac{R_{c0} + \Delta R}{R_1 + R_{c0} + \Delta R} \cdot e_s$$

$$\Delta V_m = \left[ \frac{R_{c0} + \Delta R}{R_1 + R_{c0} + \Delta R} - \frac{R_{c0}}{R_1 + R_{c0}} \right] \cdot e_s$$

$$\Delta V_m = \left[ \frac{(R_{c0} + \Delta R) \cdot (R_1 + R_{c0}) - R_{c0} \cdot (R_1 + R_{c0} + \Delta R)}{(R_1 + R_{c0} + \Delta R) \cdot (R_1 + R_{c0})} \right] \cdot e_s$$

$$\Delta V_m = \left[ \frac{(R_{c0} \cdot R_1 + \Delta R \cdot R_1 + R_{c0}^2 + \Delta R \cdot R_{c0} - R_{c0} \cdot R_1 - R_{c0}^2 - \Delta R \cdot R_{c0})}{(R_1 + R_{c0})^2 + \Delta R \cdot (R_1 + R_{c0})} \right] \cdot e_s$$

$$\Delta V_m = \frac{\Delta R \cdot R_1}{(R_1 + R_{c0})^2} \cdot e_s$$

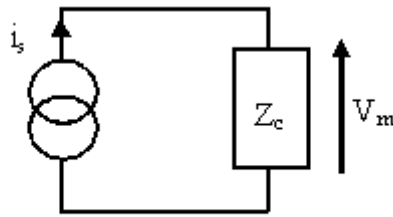
Là, on retrouve une relation linéaire d'où on peut directement extraire la sensibilité du capteur  $\Delta V_m / \Delta R_c$ . Cette sensibilité est maximum pour  $R_1 = R_{c0}$  soit :

$$\Delta V_m = \frac{e_s}{4 \cdot R_1} \cdot \Delta R$$

La sensibilité est donnée par :

$$S = \frac{e_s}{4 \cdot R_1}$$

▪ **Cas d'une alimentation en courant :**



Capteur alimenté en courant

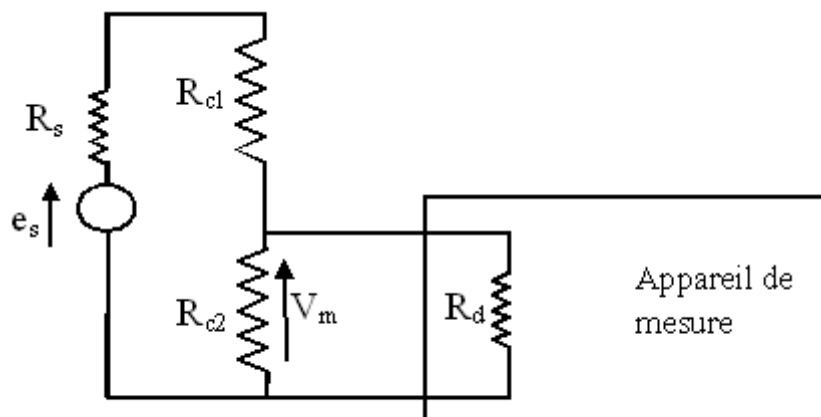
L'utilisation d'une source de courant  $I$  rend le montage directement linéaire si l'on néglige l'impédance interne de la source, c'est à dire :

$$\Delta V_m = I \cdot \Delta R_c$$

▪ **Montage Push-pull :**

On reprend le montage potentiomètre et on remplace la résistance fixe  $R_1$  par un second capteur, identique au premier mais dont les variations sont de signe contraire  $R_1 = R_{c0} - \Delta R_c$ . Cette association de deux capteurs fonctionnant en opposition est dite Push-pull.

On a alors :



Montage potentiométrique

Avec :

$$\begin{cases} R_{c1} = R_c - \Delta R_c \\ R_{c2} = R_c + \Delta R_c \\ e_s = (R_c - \Delta R_c) \cdot I + (R_c + \Delta R_c) \cdot I \\ I = \frac{V_m}{R_c + \Delta R_c} \end{cases}$$

$$e_s = \frac{V_m}{R_c + \Delta R_c} (R_c - \Delta R_c + R_c + \Delta R_c)$$

$$e_s = \frac{V_m}{R_c + \Delta R_c} (2 \cdot R_c)$$

$$V_m = e_s \cdot \frac{R_c + \Delta R_c}{2 \cdot R_c}$$

On calcule  $\Delta V_m$  :

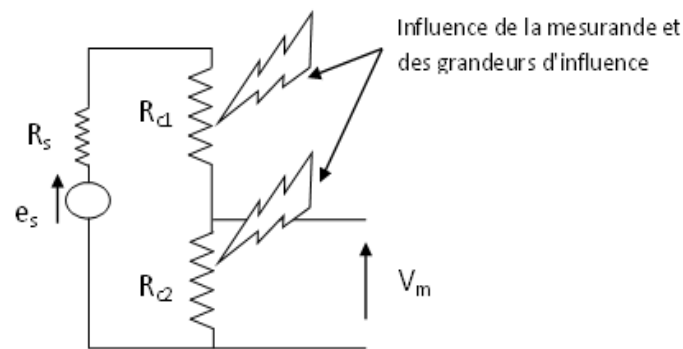
$$\Delta V_m = e_s \cdot \left( \frac{R_c + \Delta R_{c1}}{2 \cdot R_c} - \frac{R_c + \Delta R_{c2}}{2 \cdot R_c} \right)$$

$$\Delta V_m = e_s \cdot \frac{\Delta R_c}{2 \cdot R_c}$$

Avec ce type de montage on arrive à avoir une sensibilité deux fois supérieure à celle obtenue en fonctionnement en petits signaux et cela si seulement  $R_s \ll R_{c0}$  et une variation de tension linéaire avec  $\Delta R_c$ . La sensibilité  $S$  est, donc, donnée par :

$$S = \frac{e_s}{2 \cdot R_c}$$

- Le montage push-bull peut permettre une compensation des grandeurs d'influence :



Montage potentiométrique

La compensation des grandeurs d'influence revient à pouvoir écrire l'expression de la tension  $\Delta V_m$  ou de sa variation en fonction des variations de la résistance provoquées seulement par l'action de la mesurande, sans celle des grandeurs d'influence.

Retrouvant l'expression de  $\Delta V_m$  :

À l'origine des variations on a :

$$m = m_0, \quad g = g_0, \quad R_{c1} = R_{c2} = R_{c0} \text{ et } V_m = V_{m0} = \frac{e_s}{2}$$

Après variation de la mesurande et de la grandeur d'influence, on a :

$$R_{c1} = R_{c0} + \Delta R_{c1} \quad \Delta R_{c1} = S_g \Delta g + S \Delta m_1$$

$$R_{c2} = R_{c0} + \Delta R_{c2} \quad \Delta R_{c2} = S_g \Delta g + S \Delta m_2$$

Selon les démonstrations précédentes, on a :

$$e_s = \frac{V_m}{R_{c0} + \Delta R_{c1}} \cdot (R_{c0} + \Delta R_{c1} + R_{c0} + \Delta R_{c2})$$

$$V_m = e_s \cdot \frac{R_{c0} + \Delta R_{c1}}{2 \cdot R_{c0} + \Delta R_{c1} + \Delta R_{c2}}$$

$$\Delta V_m = \frac{e_s}{2} \cdot \left( \frac{R_{c0} + \Delta R_{c1}}{R_{c0} + (\Delta R_{c1} + \Delta R_{c2})/2} - 1 \right)$$

$$\Delta V_m = \frac{e_s}{2} \cdot \left( \frac{R_{c0} + \Delta R_{c1} - (R_{c0} + (\Delta R_{c1} + \Delta R_{c2})/2)}{R_{c0} + (\Delta R_{c1} + \Delta R_{c2})/2} \right)$$

$$\Delta V_m = \frac{e_s}{2} \cdot \left( \frac{\frac{\Delta R_{c1}}{2} - \frac{\Delta R_{c2}}{2}}{R_{c0} + (\Delta R_{c1} + \Delta R_{c2})/2} \right)$$

$$\Delta V_m = \frac{e_s}{4 \cdot R_{c0}} \cdot \frac{\Delta R_{c1} - \Delta R_{c2}}{1 + (\Delta R_{c1} + \Delta R_{c2})/2 \cdot R_{c0}}$$

A partir de là, on peut distinguer deux cas :

- Le premier capteur n'est pas soumis à la mesurande :  
On peut donc écrire :  $\Delta m_1 = 0$ , donc :  $\Delta R_{c1} = S_g \Delta g$

On considérant  $S \Delta m_2 \ll R_{c0}$  on peut écrire :

$$\Delta V_m = \frac{e_s}{4 \cdot R_{c0}} \cdot \frac{S \Delta m_2}{1 + (S_g \Delta g)/R_{c0}}$$

- Les deux capteurs fonctionnent en push-pull :  
On a donc :

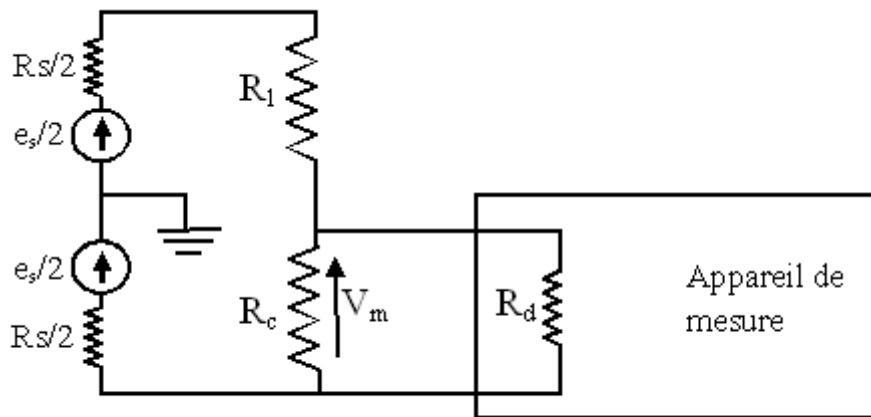
$$\Delta m = \Delta m_2 = -\Delta m_1$$

L'expression de  $\Delta V_m$  s'écrira :

$$\Delta V_m = \frac{e_s}{2 \cdot R_{c0}} \cdot \frac{S \Delta m}{1 + (S_g \Delta g)/R_{c0}}$$

▪ **Elimination de la composante permanente de la tension de mesure :**

Avec la méthode potentiométrique, la variation de tension  $\Delta V_m$ , qui porte l'information est superposée à une tension  $V_{m0}$ , généralement supérieure. Ceci risque de rendre la mesure imprécise dans le cas de phénomènes statiques pour lesquels  $\Delta R_c$  est constant ou lentement variable. L'alimentation symétrique impose aux extrémités potentiomètre des tensions égales et opposées par rapport à la masse.



Montage potentiométrique

Calcul de la valeur mesurée  $V_m$  :

On peut écrire :

$$V_1 = -\frac{e_s}{2} + \left(\frac{R_s}{2} + R_1\right) \cdot I$$

et

$$V_1 = \frac{e_s}{2} - \left(\frac{R_s}{2} + R_1\right) \cdot I$$

$$I = \frac{\frac{e_s}{2} - V_1}{\frac{R_s}{2} + R_c}$$

$$V_1 = -\frac{e_s}{2} + \left(\frac{R_s}{2} + R_1\right) \cdot \left(\frac{\frac{e_s}{2} - V_1}{\frac{R_s}{2} + R_c}\right)$$

$$V_1 = -\frac{e_s}{2} + \frac{e_s}{2} \cdot \frac{\left(\frac{R_s}{2} + R_1\right)}{\frac{R_s}{2} + R_c} - V_1 \cdot \frac{\left(\frac{R_s}{2} + R_1\right)}{\frac{R_s}{2} + R_c}$$



$$V_1 \cdot \left[ 1 + \frac{\left(\frac{R_s}{2} + R_1\right)}{\frac{R_s}{2} + R_c} \right] = \frac{e_s}{2} \left[ \frac{\left(\frac{R_s}{2} + R_1\right)}{\frac{R_s}{2} + R_c} - 1 \right]$$

$$V_1 = \frac{\frac{e_s}{2} \left( \frac{\frac{R_s}{2} + R_1}{\frac{R_s}{2} + R_c} - 1 \right)}{\left( \frac{\frac{R_s}{2} + R_1}{\frac{R_s}{2} + R_c} + 1 \right)}$$

$$V_1 = \frac{\frac{e_s}{2} \left( \frac{\frac{R_s}{2} + R_1 - \frac{R_s}{2} - R_c}{\frac{R_s}{2} + R_c} \right)}{\left( \frac{\frac{R_s}{2} + R_1 + \frac{R_s}{2} + R_c}{\frac{R_s}{2} + R_c} \right)}$$

$$V_1 = \frac{e_s}{2} \left( \frac{R_1 - R_c}{R_1 + R_c + R_s} \right)$$

### 8.1.3 Montage en pont :

L'utilisation d'un montage potentiométrique présente le défaut d'avoir en sortie la présence d'une tension continue, et ceci en l'absence de variations du mesurande. L'emploi d'un montage en pont présente l'avantage de s'affranchir de cette tension continue.

- **Montage quart de pond, avec un capteur et trois résistances fixes :**

En A :

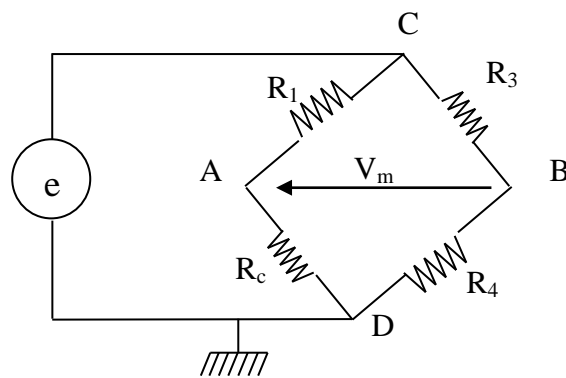
$$\begin{cases} e_s = (R_1 + R_c) \cdot I_1 \\ I_1 = \frac{V_A}{R_c} \end{cases}$$

$$e_s = \frac{(R_c + R_1)}{R_c} V_A$$

$$V_A = \frac{R_c}{R_c + R_1} e_s$$

En B on a :

$$\begin{cases} e_s = (R_3 + R_4) \cdot I_2 \\ I_2 = \frac{V_B}{R_4} \end{cases}$$



Montage en pont

$$e_s = \frac{(R_3 + R_4)}{R_4} V_B$$

$$V_B = \frac{R_4}{R_4 + R_3} e_s$$

$$V_m = \frac{R_c \cdot R_3 - R_4 \cdot R_1}{(R_1 + R_c) \cdot (R_3 + R_4)} \cdot e_s$$

Si on veut avoir une tension nulle en absence de mesurande, il faut avoir :

$$R_c \cdot R_3 = R_4 \cdot R_1$$

Avec une variation de  $\Delta R$  de  $R_c$  on aura  $V_A$  qui prendra la forme suivante :

$$V_A = \frac{R_c + \Delta R_c}{R_1 + R_c + \Delta R_c} \cdot e_s$$

Alors  $V_m$  deviendra :

$$V_m = \left( \frac{R_c + \Delta R_c}{R_1 + R_c + \Delta R_c} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot e_s$$

On remplacera  $\frac{R_4}{R_3 + R_4}$  par  $\frac{R_c}{R_1 + R_c}$  parce que à l'équilibre la tension  $V_m$  est nulle, ce qui fait que ces deux éléments sont égaux. On aura donc :

$$V_m = \left( \frac{R_c + \Delta R_c}{R_1 + R_c + \Delta R_c} - \frac{R_c}{R_1 + R_c} \right) \cdot e_s$$

$$V_m = \frac{R_c \cdot R_1 + R_c^2 + \Delta R_c \cdot R_1 + R_c \cdot \Delta R_c - R_c \cdot R_1 - R_c^2 - R_c \cdot \Delta R_c}{(R_1 + R_c + \Delta R_c) \cdot (R_1 + R_c)} \cdot e_s$$

$$V_m = \frac{\Delta R_c \cdot R_1}{(R_1 + R_c + \Delta R_c) \cdot (R_1 + R_c)} \cdot e_s$$

Comme  $\Delta R_c \ll R_c$ , on écrit :

$$V_m = \frac{\Delta R_c \cdot R_1}{(R_1 + R_c)^2} \cdot e_s$$

Si on a  $R_1 = R_c$ , on aura :

$$V_m = \frac{e_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_c}{R_{c0}}$$

▪ **Montage demi de pond, avec deux capteurs et deux résistances fixes :**

Pour ce type de montage, on choisit les deux résistances du pond  $R_3 = R_4 = R_{c0}$  et les deux résistances restantes seront des capteurs, avec  $R_{c1} = R_{c0} + \Delta R_{c1}$  et  $R_{c2} = R_{c0} + \Delta R_{c2}$

Calculant l'expression de la tension  $V_m$ :

$$V_A = \frac{R_{c2}}{R_{c1} + R_{c2}} \cdot e_s$$

$$V_B = \frac{e_s}{2}$$

$$V_m = \left( \frac{R_{c2}}{R_{c1} + R_{c2}} - \frac{1}{2} \right) \cdot e_s$$

$$V_m = \left( \frac{R_{c0} + \Delta R_{c2}}{R_{c0} + \Delta R_{c1} + R_{c0} + \Delta R_{c2}} - \frac{1}{2} \right) \cdot e_s$$

$$V_m = \left( \frac{2 \cdot R_{c0} + 2 \cdot \Delta R_{c2} - 2 \cdot R_{c0} - \Delta R_{c1} - \Delta R_{c2}}{2 \cdot (2 \cdot R_{c0} + \Delta R_{c1} + \Delta R_{c2})} - \frac{1}{2} \right) \cdot e_s$$

$$V_m = \frac{\Delta R_{c2} - \Delta R_{c1}}{4 \cdot R_{c0} + 2 \cdot \Delta R_{c1} + 2 \cdot \Delta R_{c2}} \cdot e_s$$

$$V_m = \frac{e_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_{c2} - \Delta R_{c1}}{R_{c0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_{c1} + \Delta R_{c2}}{2 \cdot R_{c0}}}$$

– **Montage push-bull :**

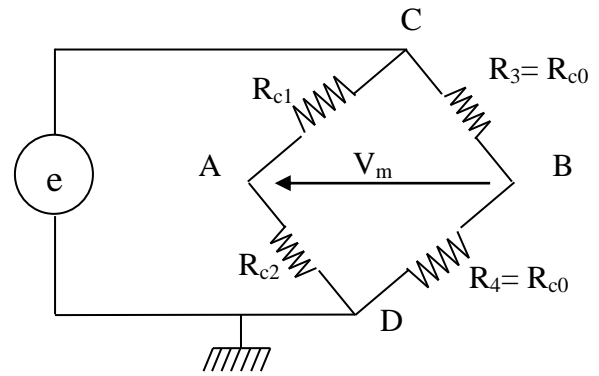
Dans ce cas, dans le montage ci-dessus, les deux capteurs présentent des résistances variables d'une manière identique mais de sens opposé sous l'influence de la mesurande, si les variations provoquées par les grandeurs d'influence sont négligeables devant la résistance des capteurs, on peut écrire :

$$\Delta R_{c2} = -\Delta R_{c1} = \Delta R_c \text{ donc}$$

$$V_m = \frac{e_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_{c2} - \Delta R_{c1}}{R_{c0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_{c1} + \Delta R_{c2}}{2 \cdot R_{c0}}} = \frac{e_s}{4} \cdot \frac{2 \cdot \Delta R_c}{R_{c0}}$$

$$V_m = \frac{e_s}{2} \cdot \frac{\Delta R_c}{R_{c0}}$$

On remarque que  $V_m$  est linéaire et que la sensibilité est améliorée, elle est double de celle du montage quart du pond.



Montage en pond

– **Montage pond entier avec quatre capteurs en push-bull :**

Pour ce cas, on utilise quatre capteurs montés en push-bull. on a donc :

$$\Delta R_{c2} = -\Delta R_{c1} = \Delta R_{c3} = -\Delta R_{c4} = \Delta R_c$$

On a :

$$V_A = \frac{R_{c2}}{R_{c1} + R_{c2}} \cdot e_s$$

$$V_B = \frac{R_{c4}}{R_{c4} + R_{c3}} \cdot e_s$$

$$V_m = \frac{R_{c0} + \Delta R_{c2}}{R_{c0} + \Delta R_{c1} + R_{c0} + \Delta R_{c2}} \cdot e_s - \frac{R_{c0} + \Delta R_{c4}}{R_{c0} + \Delta R_{c4} + R_{c0} + \Delta R_{c3}} \cdot e_s$$

$$V_m = e_s \cdot \left( \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{2 \cdot R_{c0} - \Delta R_c + \Delta R_c} - \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{2 \cdot R_{c0} - \Delta R_c + \Delta R_c} \right)$$

On retrouve donc l'expression de  $V_m$  très simple, linéaire avec une très grande sensibilité.

$$V_m = e_s \cdot \frac{\Delta R_c}{R_{c0}}$$

## 8.2. Conditionnement des signaux mesurés

### 8.2.1 Adaptation d'impédance :

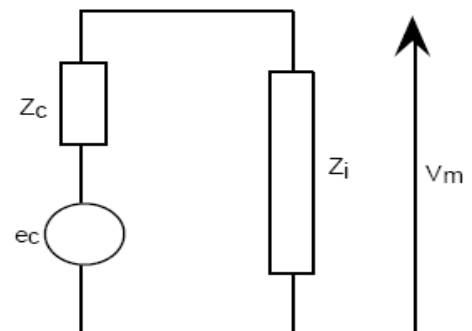
Le capteur, associé à son conditionneur, équivaut à un générateur constitué d'une source et d'une impédance interne délivrant le signal au circuit qui le charge. Afin que le signal soit obtenu dans les meilleures conditions de sensibilité et de stabilité vis-à-vis des variations éventuelles de l'impédance interne, le générateur équivalent doit être chargé par une impédance appropriée.

#### a. Cas d'un capteur source de tension :

Lorsqu'un capteur délivre une tension  $e_c(m)$ , sous l'influence de mesurande, cette tension est en série avec une impédance  $Z_c$  du capteur. Pour minimiser l'influence de cette dernière, Le dispositif de mesure doit avoir une impédance d'entrée,  $Z_i$ , très grande devant  $Z_c$ .

$$V_m = e_c(m) \cdot \frac{Z_i}{Z_i + Z_c}$$

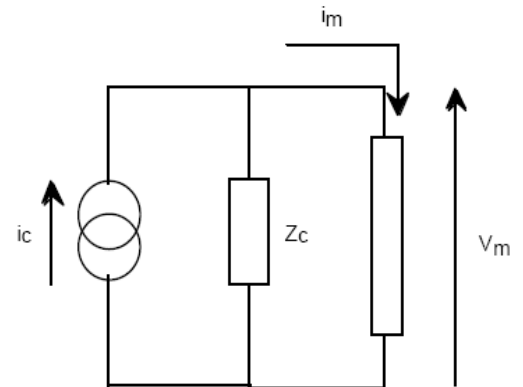
Si  $Z_i \gg Z_c$  on a alors :  $V_m = e_c(m)$



Les dispositifs à grande impédance d'entrée utilisable pour réaliser l'adaptation d'impédance sont à base d'amplificateur opérationnel en montage suiveur simple ou suiveur/amplificateur, amplificateur différentiel sous forme d'amplificateur d'instrumentation ou d'amplificateur d'isolement.

**b. Cas d'un capteur source de courant :**

Le capteur peut aussi se présenter sous une forme équivalente à une source de courant ( $i_c$ ) en parallèle avec une impédance  $Z_c$ . Le signal électrique  $V_m$  est alors donné par (figure 2.7.1.2) :



Pour que le courant  $i_m$  généré par le capteur soit peu différent de  $i_c$ , il faut que l'impédance du capteur soit très importance devant celle du dispositif de mesure :

$$V_m = Z_i \cdot i_m$$

$$i_m = i_c \cdot \frac{Z_c}{Z_i + Z_c}$$

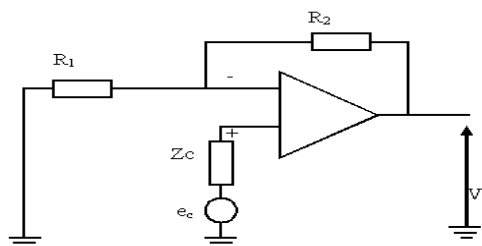
Si  $Z_i \ll Z_c$  on aura :  $i_m = i_c$

**8.2.2 Utilisation des amplificateurs opérationnels :**

Les amplificateurs opérationnels, en plus de l'adaptation d'impédance qu'ils peuvent garantir, ils permettent aussi en plus de l'amplification du signal, de convertir les signaux de sorties, quant ils sont un courant ou une charge, à un signal de sortie tension. On rappelle ici les trois montages fondamentaux, correspondant aux trois types des capteurs actifs

▪ **Cas d'un capteur source de tension :**

Le capteur est équivalent à une source de tension  $e_c$  en série avec une impédance  $Z_c$ .



L'utilisation d'un amplificateur opérationnel avec le montage ci-dessus permet, avec l'approximation de l'amplificateur opérationnel idéal, d'écrire :

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot e_c$$

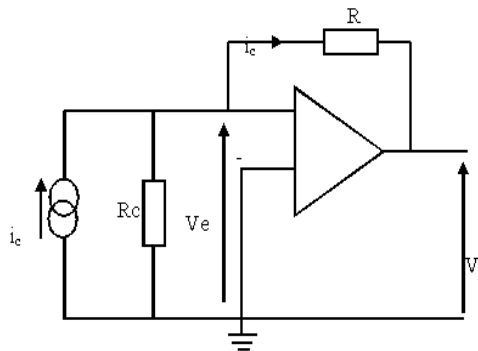
On remarque donc :

- Que le capteur ne débite pas ( $i_+ = i_- = 0$  dans l'amplificateur idéal) ou encore qu'il débite sur une impédance infinie. La condition de non influence de l'impédance interne  $Z_c$  du capteur sur la mesure est réalisée.
- Qu'en sortie,  $V_s$  est indépendant du courant débité dans la charge  $R_L$ . La tension  $V_s$  débitée par l'amplificateur se comporte comme une source de tension d'impédance interne nulle.
- Que le choix de  $R_1$  et  $R_2$  permet de régler le gain  $G$  désiré.

Ce montage permet, donc, d'adapter l'impédance au signal du capteur et d'amplifier la sortie de ce dernier.

▪ **Cas d'un capteur source de courant :**

Le capteur, cette fois, est équivalent à une source de courant placée en parallèle sur une résistance  $R_c$ , on peut alors utiliser le montage de la figure suivante :



Puisque l'entrée de l'amplificateur idéal ne débite aucun courant, et que la tension d'entrée différentielle est nulle, la différence de potentiel entre E et la masse est nulle et il n'y a aucun courant qui circule dans la résistance  $R_c$  du capteur. Le courant  $i_c$  se retrouve intégralement dans  $R$  et on peut écrire :

$$V_s = -R \cdot i_c$$

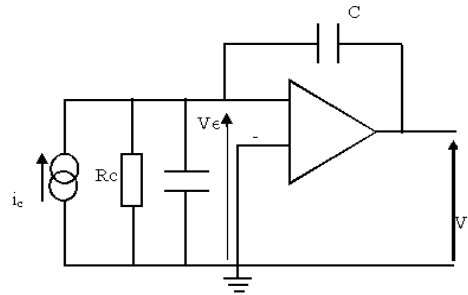
Comme pour l'amplificateur de tension ce montage élémentaire appelle quelques remarques fondamentales :

- la valeur choisie pour la résistance  $R$  de contre-réaction n'influence pas le capteur équivalent à une source de courant.
- La résistance d'entrée est nulle puisque les bornes de la source sont maintenues au même potentiel à l'entrée de l'amplificateur idéal.
- En sortie, on obtient une source de tension dont la résistance est nulle ( $V_s$  est indépendant de la résistance de charge qui peut être placée en sortie).

▪ **Cas d'un capteur source de charge :**

Enfin dans le cas du capteur équivalent à un générateur de charge, il est souvent souhaitable d'utiliser un convertisseur charge-tension qui réalise pratiquement la mise en court-circuit des électrodes. Le montage le plus élémentaire est celui de la figure qui suit.

Puisque aucun courant ne traverse les entrées de l'amplificateur, toute variation de charge aux bornes du capteur se retrouve aux bornes de C.



$$\text{On a donc : } V_s = -\frac{Q}{C}$$

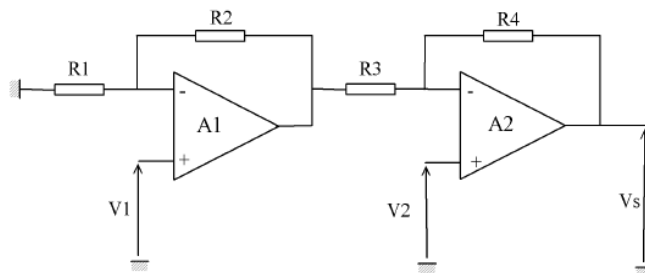
Avec :

Q : la charge délivrée par le capteur;

C : la valeur de la capacité.

**8.2.3 Utilisation des amplificateurs d'instrumentation:**

▪ **Amplificateur d'instrumentation à deux AOP**



Amplificateur d'instrumentation à 2 AOP

La tension de sortie  $V_s$  est donnée par :

$$v_s = v_d \frac{1}{2} \left( 1 + 2 \frac{R_4}{R_3} + \frac{R_2}{R_1} \frac{R_4}{R_3} \right) + v_{mc} \left( 1 - \frac{R_2}{R_1} \frac{R_4}{R_3} \right)$$

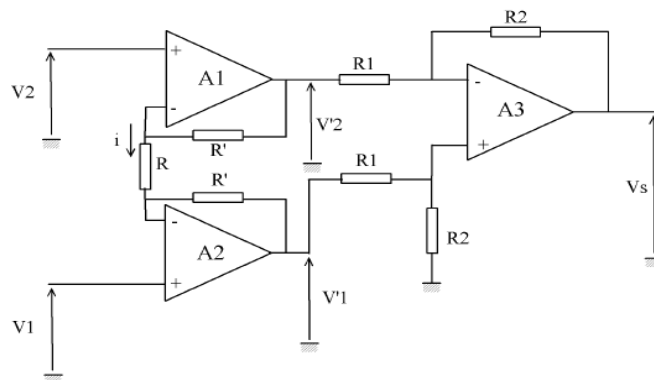
Les gains en mode communs et en mode différentiel sont donc :

$$A_d = \frac{1}{2} \left( 1 + 2 \frac{R_4}{R_3} + \frac{R_2}{R_1} \frac{R_4}{R_3} \right) \text{ et } A_{mc} = 1 - \frac{R_2}{R_1} \frac{R_4}{R_3}$$

L'annulation de  $A_{mc}$  exige d'avoir  $R_2 \cdot R_4 = R_1 \cdot R_3$  ce qui peut être obtenue par  $R_1 = R_4$  et  $R_3 = R_2$ . Cette condition est rarement vérifiée car les résistances sont toujours données avec une certaine précision.

▪ **Amplificateur d'instrumentation à trois AOP**

L'amplificateur d'instrumentation de la Figure 1. 25 est constitué par un amplificateur différentiel A3. A1 et A2 n'amplifient pas la tension de mode commun mais amplifient le mode différentiel



Amplificateur d'instrumentation à trois AOP

La tension  $V_s$  est donc donnée par :

$$V_s = \left( -\frac{R_2}{R_1} \right) \left( 1 + 2 \frac{R'}{R} \right) (V_2 - V_1)$$

**9. Chaîne d'acquisition de données**

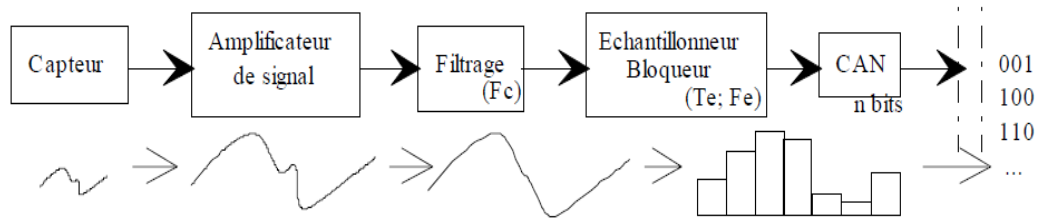
**9.1. Structure**

A l'heure actuelle, l'Électronique utilise majoritairement des techniques numériques pour le traitement de l'Information.

Les grandeurs physiques étant analogiques par nature, une chaîne d'acquisition comprend très souvent une étape de numérisation. Les autres étapes fondamentales sont la captation de la grandeur physique et la conversion en une grandeur électrique.

On peut représenter une chaîne d'acquisition par le schéma-bloc ci-dessous :





Description des blocs :

**- Capteur**

Il est l'interface entre le monde physique et le monde électrique. Il va délivrer un signal électrique image du phénomène physique que l'on souhaite numériser. Il est toujours associé à un circuit de mise en forme qu'on appelle **conditionneur**.

**- Amplificateur de signal**

Cette étape permet d'adapter le niveau du signal issu du capteur à la chaîne globale d'acquisition.

L'amplificateur utilisé est le plus souvent un **amplificateur d'instrumentation**. Dans certains cas particuliers, ce peut être un **amplificateur d'isolement**, voire un **amplificateur à découpage**.

**- Filtre d'entrée**

Ce filtre est communément appelé **filtre anti-repliement**. Son rôle est de limiter le contenu spectral du signal aux fréquences qui nous intéressent. Ainsi il élimine les parasites. C'est un filtre passe bas que l'on caractérise par sa fréquence de coupure et son ordre.

**- L'échantillonneur**

Son rôle est de prélever, à chaque période d'échantillonnage ( $T_e$ ), la valeur du signal. On l'associe de manière quasi-systématique à un bloqueur. Le bloqueur va figer l'échantillon pendant le temps nécessaire à la conversion. Ainsi durant la phase de numérisation, la valeur de la tension de l'échantillon reste constante assurant une conversion aussi juste que possible. On parle **d'échantillonneur bloqueur**.

**- Le convertisseur analogique numérique (CAN)**

Il transforme la tension de l'échantillon (analogique) en un code binaire (numérique).

Les contraintes imposées vont guider son choix : Quelque soit son principe, un CAN est caractérisé par un *temps de conversion*, ce qui limite sa cadence de fonctionnement.

Ce schéma bloc peut être complété par une **zone de stockage** éventuelle.

Elle peut être un support de traitement (DSP, ordinateur...), un élément de sauvegarde (RAM, Disque dur...) ou encore une transmission vers un récepteur situé plus loin.

Dans les conditions réelles, il faut prendre en compte d'autres contraintes :

- L'environnement, c'est à dire les grandeurs d'influence telles que la température, les vibrations, la pollution électromagnétique...

- Les exigences facilitant l'exploitation, comme la linéarité de la chaîne...

La conséquence est l'ajout de blocs fonctionnels supplémentaires dans la chaîne : Circuits de linéarisation, amplificateurs spéciaux, filtres, multiplexeurs...

Performances globales :

Ce qu'on attend avant tout d'une chaîne de mesure, c'est sa **justesse** ; la grandeur électrique de sortie doit être l'image la plus exacte possible de la grandeur physique détectée et de ses variations.

La numérisation s'effectuant sur N bits, la précision de la numérisation est limitée à  $1 / 2N$ . Il est impératif que tous les éléments de la chaîne aient au moins cette précision. (En général, on leur impose une précision double ( $0,5 / 2N$ )).

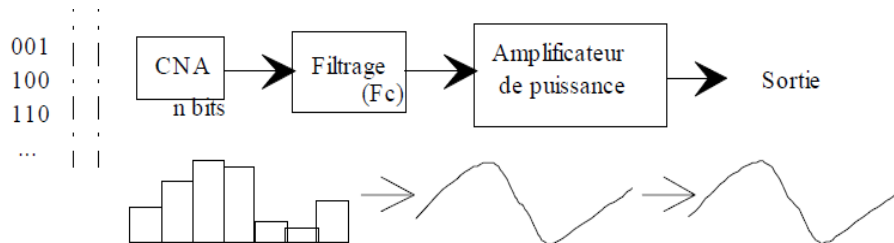
Dans certains cas, la **rapidité** de la chaîne est un paramètre dominant (grandeurs pouvant évoluer très rapidement comme une pression par exemple). La durée d'une acquisition est essentiellement fixée par la durée de la conversion analogique-numérique, ainsi que par la cadence de l'échantillonnage.

## 9.2 . Chaîne de Restitution

Ce type de chaîne fonctionne dans le sens inverse de la précédente :

Dans le cas d'un système de régulation d'une grandeur, la chaîne de restitution prend naissance dans une zone de stockage et est chargée, à partir d'un code numérique, de commander un organe de puissance appelé **actionneur**.

On peut également en donner un schéma-bloc :



### - Convertisseur numérique analogique (CNA)

Il effectue l'opération inverse du CAN : Il assure le passage du numérique vers l'analogique en restituant une tension ou un courant proportionnels au code numérique.

### - Filtre de sortie

Son rôle est de « lisser » le signal de sortie pour ne restituer que le signal utile. (Il élimine les « marches d'escalier » qui affectent la grandeur de sortie du CNA). Il a les mêmes caractéristiques que le filtre d'entrée.

### - Amplificateur de puissance

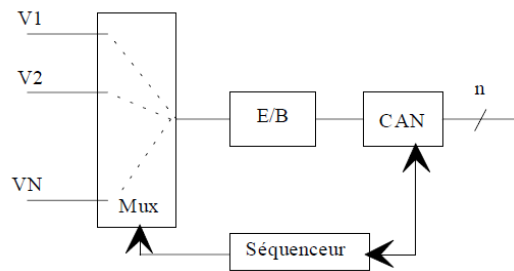
Il adapte la sortie du filtre à l'actionneur qui constitue sa charge.

## 9.3 . Acquisition de plusieurs grandeurs.

Dans le cadre d'une chaîne d'acquisition traitant plusieurs capteurs (N) vers une même zone de stockage, il existe différentes structures qui diffèrent en terme de performances et de coût. N Capteurs \_ 1 zone de stockage (traitement) numérique

### 9.3.1 Acquisition séquentielle décalée

Elle se base sur l'utilisation en amont d'un multiplexeur qui va orienter un capteur vers la chaîne unique d'acquisition. Chaque voie de captation est successivement scrutée :

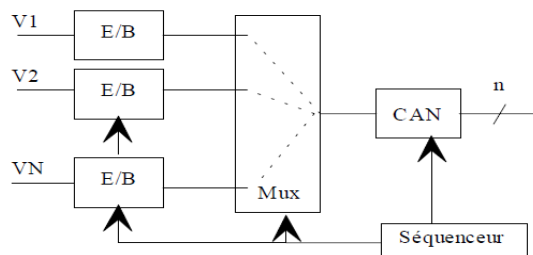


L'avantage de cette structure est bien évidemment son côté économique. Par contre, il y a un décalage dans le temps entre les acquisitions. On réservera donc cette structure aux cas ne nécessitant pas une synchronisation entre les données numérisées. De plus le temps d'acquisition complet est à priori élevé car proportionnel au nombre de capteurs.

### 9.3.2 Acquisition séquentielle simultanée

De manière à avoir des acquisitions « synchrones », on utilise la même structure que précédemment mais en utilisant des **échantillonneurs-bloqueurs (E/B)** en amont du multiplexeur.

On est dans une situation d'E/B en tête.



La prise des échantillons s'effectue simultanément ; la conversion est effectuée de manière progressive. Cela signifie que les E/B assurent un maintien de l'échantillon durant les X acquisitions sans introduire de pertes supérieures à la résolution du CAN.

Son coût est plus élevé que celui de la technique précédente.

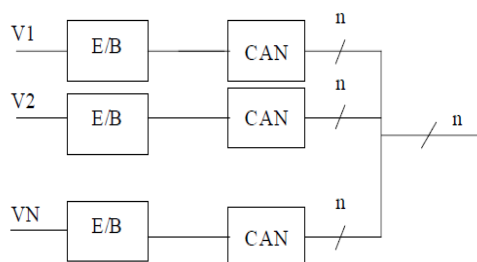
### 9.3.3 Acquisition parallèle

C'est la structure la plus complète puisqu'elle consiste à disposer X chaînes d'acquisition en parallèle et de les connecter sur un bus de données commun.

Avec cette structure, il est possible d'effectuer en même temps l'acquisition d'une donnée pendant que l'on en stocke une autre. De même, toutes les conversions peuvent être simultanées, le stockage s'effectuant après.

Cela permet un gain de temps sur l'acquisition complète.

Cette technique est la plus coûteuse.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1- Georges Asch et Collaborateurs, Les capteurs en instrumentation industrielle, Dunod 1998.
- 2- Ian R. Sinclair, Sensors and transducers, NEWNES 2001.
- 3- J. G. Webster, Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook, Taylor & Francis Ltd  
[http://www.4shared.com/file/67217379/8b969544/The\\_Measurement\\_Instrumentation\\_and\\_Sensors\\_Handbook\\_\\_CRC\\_Press\\_.html](http://www.4shared.com/file/67217379/8b969544/The_Measurement_Instrumentation_and_Sensors_Handbook__CRC_Press_.html)
- 5- Capteurs et instrumentation; [www.icampus.ucl.ac.be/claroline/course/index.php?cid=ELEC2811](http://www.icampus.ucl.ac.be/claroline/course/index.php?cid=ELEC2811)