



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Dr. Tahar Moulay de Saida  
Faculté de Technologie

Département d'Electronique

# *Introduction aux capteurs (Description et conditionnement)*

Présenté par :

**Dr. Benallou Yassine**

2<sup>ème</sup> Année licence génie biomédicale



Année Universitaire 2014-2015.

## Avant-propos

*Si on doit parler des capteurs on les qualifiera comme l'eau pour la terre ou l'homme, car ils sont omniprésents dans pratiquement tous les systèmes électroniques. Ils sont intégrés dans nos corps, voitures, avions, téléphones, les radios, les usines, les installations industrielles, la surveillance, l'imagerie, la cartographie et d'innombrables autres applications.*

*En général le capteur est présent dans tout système de control, de mesure, de détection et de protection. Il constitue le premier élément qui reçoit l'énergie (grandeur physique) du milieu de mesure et produit en générale une sortie de nature électrique en fonction des paramètres déterminants du capteur.*

*Dans ce polycopié nous présentons les différentes définitions des capteurs leurs types et les circuits de conditionnement associés. D'autres parts nous allons présenter et décrire les différents capteurs de base.*

*Ce programme est destiné essentiellement aux étudiants du génie biomédicale et ou toute spécialité en électronique introduisant ses éléments de capteur dans leurs études. Ce cours réalisé présente un cadre général destiné à guider l'étudiant à comprendre la conception des capteurs et les circuits dans lesquels ils sont introduits.*

*L'auteur*

# Sommaire

## Chapitre I : Capteurs définitions et caractéristiques.

1.Définition .....	3
2.Phénomènes couramment détectables .....	4
3.Méthodes de conversions communes .....	4
3.1.Physique .....	4
3.2. Chimique .....	4
3.3.Biologique .....	5
4.Types de capteurs .....	5
4.1.Capteur actif .....	6
4.1.1.Types de capteur actifs .....	6
4.2.Capteur passif .....	7
4.2.1.Types de capteurs passifs .....	7
5.Caractéristiques d'un capteur .....	9
6.Grandeurs d'influence .....	11
7.Principe d'un capteur industriel .....	12

## Chapitre II : Circuits de conditionnement et signal.

1.Introduction .....	13
2.Les montages potentiométriques .....	14
2.1.Première solution fonctionnement en petits signaux .....	15
2.2.Deuxième solution montage push-pull .....	16
3.Les ponts .....	17
3.1.Equation générale et condition d'équilibre .....	18
3.2.Montage 1/4 de Pont .....	20
3.3.Montage 1/2 de Pont .....	21
3.4.Montage en Pont entier .....	22
4.Les amplificateurs opérationnels .....	23
4.1.Ampli op et linéarisation dans un pont .....	26
5.Les oscillateurs .....	27
5.1.Oscillateurs sinusoïdaux .....	27

5.2.Oscillateurs à relaxation .....	29
<b>Chapitre III : Capteurs résistifs</b>	
1.Introduction .....	31
2.Résistivité et Résistance .....	31
3.Potentiomètre linéaire (translation) .....	32
4.Potentiomètre rotatif (rotation) .....	33
5.Jauges de contrainte .....	35
<b>Chapitre IV : Capteurs capacitifs</b>	
1.Introduction .....	38
2.Types de capteurs capacitifs .....	40
<b>Chapitre V : Capteurs inductifs</b>	
1.Introduction .....	42
2.Self-inductance .....	42
3.Inductance mutuelle .....	43
4.Transformateur différentielle .....	44
<b>Chapitre VI : Capteurs thermiques</b>	
1.Introduction .....	46
2.Résistance détecteur de température .....	46
3.Les thermistances .....	47
4.Les thermocouples .....	47
4.1.Effets thermoélectriques .....	48
4.1.1.Effet Peltier .....	48
4.1.2.Loi de volta .....	48
4.1.3.Effet Thomson .....	49
4.1.4.Effet Seebeck .....	50
4.2.Dispositif de mesure pour un thermocouple .....	50
Bibliographies .....	52

# **Capteurs définitions et caractéristiques**

## Chapitre I : Capteurs définitions et caractéristiques.

### 1. Définition

Le capteur est tout simplement l'élément qui permet de détecter une grandeur physique (température, pression, vitesse, force, etc.) et la convertir en une grandeur électrique : tension, courant ou charge.

Les différents composants qui accompagnent le capteur constituent les circuits conditionneurs ou transmetteur. Le conditionneur est l'environnement constitué de certains circuits associés au capteur qui lui permet de produire le signal image de la mesure.



*Figure I.1. schéma de base de conversion de grandeur non électrique par un capteur.*

### **Nuance (capteur et transducteur) !!**

Un capteur est un dispositif qui reçoit un signal ou un stimulus et répond par un signal électrique, tandis qu'un transducteur est un convertisseur d'un type d'énergie en une autre. Cependant, en pratique les termes sont souvent utilisés de manière interchangeable.

Ainsi les capteurs forment un petit sous-ensemble du groupe transducteur défini comme transducteur qui reçoit un signal d'entrée ou un stimulus et répond par un signal électrique ayant une relation connue à l'entrée.

Les systèmes à capteurs sont construits pour une variété d'applications y compris le génie biomédical, l'industrielle, l'instrumentation, l'imagerie. Ils sont omniprésents en étant intégrés dans nos corps, voitures, avions, téléphones cellulaires, les radios, les usines chimiques, installations industrielles et d'innombrables autres applications

## **2. Phénomènes couramment détectables**

- Biologique.
- Chimique.
- Electrique.
- Electromagnétique.
- Chaleur / Température.
- Magnétique.
- Le mouvement mécanique (déplacement, vitesse, accélération, etc.).
- Optique.
- Radioactivité.

Les capteurs et leurs circuits associés sont utilisés pour mesurer diverses propriétés physiques telles que la température, la force, la pression, le débit, la position, l'intensité lumineuse, etc. Ces propriétés jouent le rôle de stimulus qui influent sur le capteur, tandis que la sortie du capteur est conditionnée et traitée pour fournir la mesure correspondante à ces propriétés physiques.

## **3. Méthodes de conversions communes**

### **3.1. Physique**

- Photo-Électrique, photo-élastique, photomagnétique,
- Electro-Élastique, électromagnétique
- Magnéto-Electrique.
- Thermoélectrique, thermo-élastique, thermomagnétique, thermo-optique.

### **3.2. Chimique**

- Transport chimique, transformation physique, électrochimique.

### **3.3. Biologique**

- Transformation biologique, transformation physique

Dans le tableau I.1 on regroupe les stimuli possibles ainsi que les quantités mesurables.

<b>Stimulus</b>	<b>Quantité</b>
<i>Acoustique</i>	Onde (amplitude, phase, polarisation), spectre, vitesse d'onde.
<i>Biologique et chimique</i>	Les concentrations des fluides (gaz ou liquide).
<i>Electrique</i>	Charge, tension, champ électrique (amplitude, phase, polarisation), conductivité actuelle, permittivité.
<i>Magnétique</i>	Champ magnétique (amplitude, phase, la polarisation), Flux, perméabilité.
<i>Optique</i>	Indice de réfraction, la réflectivité, Absorption.
<i>Thermique</i>	Température, chaleur spécifique, conductivité thermique.
<i>Mécanique</i>	Position, vitesse, accélération, force, vibration, Pression, contrainte.

**Tableau I.1.** Présentant les grandeurs physiques détectables et leurs quantités correspondantes.

#### **4.Types de capteurs**

L'approche de l'instrumentation traite les capteurs comme des éléments de circuit. Il existe deux grandes parties de capteurs, selon qu'ils puissent fournir directement une grandeur de sortie électriques ou non.

Passive quand il nécessite une source d'alimentation externe, c'est à dire se comporte comme un élément passif de circuit tel une résistance, un condensateur ou une inductance.

Ou actif quand il tire sa puissance de l'effet du stimulus dont il est le mesurande et l'on définit alors :

##### **4.1.Capteur actif**

Ce type de capteur fonctionne en générateur sous l'effet d'une grandeur physique il délivre directement une grandeur de nature purement électrique. Autrement dit, il génère son propre signal de sortie électrique sans nécessiter des tensions ou courants externes. Des exemples des capteurs actifs sont les thermocouples et les photodiodes qui génèrent des tensions thermoélectriques et des courants photoélectriques, respectivement et sont indépendants des circuits externes.

#### 4.1.1.Types de capteur actifs

- **Capteurs photovoltaïques** : par exemple, cellules solaires, exposition mètres portables.
- **Capteurs piézoélectriques** : qui génèrent une polarisation électrique, en relation linéaire avec la force appliquée. Les exemples incluent aussi les allumeurs de gaz, microphones, jauges de contrainte. Les cristaux piézoélectriques qui sont utilisés pour mesurer les petits déplacements et aussi comme actionneurs pour mettre en œuvre les petits déplacements (moins de 1 Angstrom) dans les microscopes à effet tunnel (STM) et les microscopes à force atomique (AFM).
- **Capteurs thermoélectriques**: une jonction de thermocouple est formée lorsque deux métaux différents sont reliés à une extrémité et portée à une température différente par rapport à l'autre extrémité. Lorsque la jonction est chauffée, une petite tension apparaît entre les deux extrémités des fils, qui est en accroissement monotone avec la température (effet Seebeck).
- **Capteur électromagnétiques**: la loi de Lenz dicte qu'un flux magnétique variable à travers un conducteur de boucle induit une tension électrique à ses bornes (détection de passage d'un objet métallique). Ces capteurs électromagnétiques comprennent des microphones, des phonographes pick-ups, des détecteurs de métaux, et des dynamos.
- **Capteur a effet Hall** : Un champ magnétique  $B$  (aimant) et un courant électrique  $I$  créent dans le matériau une différence de potentiel.

- **Capteur a effet pyroélectrique** : certains matériaux ont une polarisation spontanée en l'absence de champ électrique extérieur. Une variation de température induit une variation de cette polarisation et donc l'apparition de charges électriques à la surface du matériau.

#### **4.2.Capteur passif**

Il s'agit généralement d'impédances (résistance, inductance, capacité) dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée. Ces capteurs passifs exigent l'application d'une alimentation externe pour leur fonctionnement. Ce signal d'excitation est modifié par le capteur pour produire une réponse électrique a la sortie.

La variation d'impédance résulte :

- D'une variation de dimension du capteur (capteurs de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile).
- D'une déformation résultant d'une force ou d'une grandeur s'y ramenant (pression accélération). Exemples : armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensomètre liée à une structure déformable.

#### **4.2.1Types de capteurs passifs**

- **Les capteurs à résistance variable**: La variation de la résistance d'un élément peut être facilement mesurée. Divers composants existent dont la résistance change en réponse à un paramètre externe, jauges de contrainte, capteurs de température résistifs (RTD), thermistances, dispositifs photoconducteurs, et bien sûr, potentiomètres. La résistance de la plupart des métaux et des semi-conducteurs dépend de champ magnétique, mais en général de façon très mineur.
- **Photoconducteurs** : la résistance d'un matériau photoconducteur chute en générale lorsqu'elle est exposé a un rayonnement lumineux.

- **Les jauges de contrainte** : Une jauge de contrainte est un élément piézo-résistif destiné à changer la résistance lorsqu'une force lui est appliquée. Une jauge est composée essentiellement d'un conducteur métallique mince. Lorsqu'il est étiré (fil de la jauge) de part et d'autre la longueur du fil augmente tout en réduisant la surface de la section transversale, ce qui augmente la résistance. l'effet inverse se produit lorsqu'elle est compressée.
- **Capteur de température résistifs (RTD)** : Les capteurs de température résistifs sont généralement construits en platine et leur résistance augmente avec la température (coefficient de température positif, PTC). La résistance est généralement modélisée comme un polynôme en fonction de la température, et les coefficients d'ajustement sont fournis avec le capteur :

$$R = R_0(1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \alpha_3 T^3 + \dots + \alpha_n T^n) \quad \text{I.1}$$

- **Les thermistances (résistances thermiques)** : sont construits à partir de semi-conducteurs ou céramiques qui présentent un fort coefficient de température négatif (NTC). La caractéristique de température est en général non-linéaire. Physiquement, les thermistances sont de différentes formes et tailles, y compris des perles, des disques, des pastilles, des tiges, etc. Ils sont généralement encapsulés en verre ou en résine. Etant donné que la conductivité d'une pièce de semi-conducteur varie de manière exponentielle avec la température :

$$R = R_0 \exp\left(\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) \quad \text{I.2}$$

- **Capacité variable** : Un condensateur à plaques parallèles a une capacité  $= \varepsilon \frac{A}{d}$ , ou n'importe lequel de ces termes peut être modifié pour changer la valeur de la capacité effective. Un microphone capacitif par exemple utilise la pression acoustique pour faire varier l'espacement  $d$  entre les deux plaques.

Un indicateur de niveau capacitif (par exemple les détecteurs de carburant dans les avions) fait varier la permittivité effective correspondante à celle du carburant détectant ainsi le niveau variable (non conducteur) du liquide entre les plaques. La permittivité effective est la moyenne pondérée des permittivités de l'air et du liquide. Un capteur de déplacement capacitif fonctionne en faisant varier la zone de recouvrement  $A$  en déplaçant les plaques.

- **Inductance variable** : Principalement utilisée comme capteur de déplacement. L'inducteur est enroulé sur un noyau de matière de haute perméabilité, et l'inductance peut être modifiée par déplacement du noyau par rapport à l'inducteur ou en utilisant un noyau fixe et en changeant le flux à travers une bobine auxiliaire. Une autre variante de conception de l'inductance variable peut être entreprise par utilisation d'un capteur d'inductance mutuelle variable, dans laquelle deux bobines sont enroulées sur le même noyau magnétique.

Le tableau suivant regroupe certaines grandeurs physiques mesurables par les capteurs ainsi que les caractéristiques électriques sensibles et les matériaux possibles à être utilisés dans les capteurs.

Grandeur mesurée	Caractéristique électrique sensible	Types de matériaux utilisés
Température	Résistivité électrique	Platine, Nickel, cuivre ...
Rayonnement optique	Résistivité électrique	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité électrique	Alliage de Ni, Si dopé
	Perméabilité magnétique	Alliage ferromagnétique
Position	Résistivité électrique	Matériaux magnéto résistants (Bismuth, antimoine d'indium)
Humidité	Résistivité électrique	Chlorure de lithium

**Tableau I.2.** Présentant les grandeurs mesurées et les caractéristiques électriques sensibles ainsi que matériaux utilisés pour les capteurs passifs.

### 5. Caractéristiques d'un capteur

Un capteur est normalement conçu pour détecter un mesurande spécifique ou à répondre uniquement à cette grandeur mesurable particulière. Une connaissance complète des caractéristiques électriques et mécaniques du capteur est d'une grande importance lors du choix de ce dernier, pour une application particulière. Souvent, il

est jugé essentiel d'obtenir les détails de ces caractéristiques lors de la sélection de l'instrumentation pour l'expérience concernée. Les exigences de base sont:

- **Robustesse** : Qui représente la capacité à supporter des surcharges, avec butées de sécurité pour la protection et arrêt de fonctionnement en cas de dépassement.
- **Linéarité** : Capacité à reproduire les caractéristiques d'entrées-sorties symétriques et linéaires. La linéarité globale est considérée comme le principal facteur.
- **Reproductibilité** : Aptitude à reproduire le signal de sortie exactement quand la même grandeur à mesurer est appliquée à plusieurs reprises dans les mêmes conditions environnementales.
- **Haute stabilité et la fiabilité** : Erreur minimum en mesure, non affectée par la température, les vibrations et variations de l'environnement.
- **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 vraie valeur.
- **Rapidité** : Temps de réaction du capteur. La rapidité est liée à la bande passante.
- **Etendue de mesure** : Valeurs extrêmes pouvant être mesurée par le capteur.
- **Etendue de mesure** : Valeurs extrêmes pouvant être mesurée par le capteur.

Pour une bonne utilisation du capteur on doit satisfaire certaines conditions dont :

- La sensibilité doit dépendre le moins possible de
  - La valeur du mesurande  $m$  (linéarité).
  - la fréquence de variation (bande passante).
  - du temps (vieillessement).
  - d'actions extérieures (grandeurs d'influence).

- Le domaine d'utilisation du capteur qui être pris dans le domaine nominal pour éviter sa détérioration.

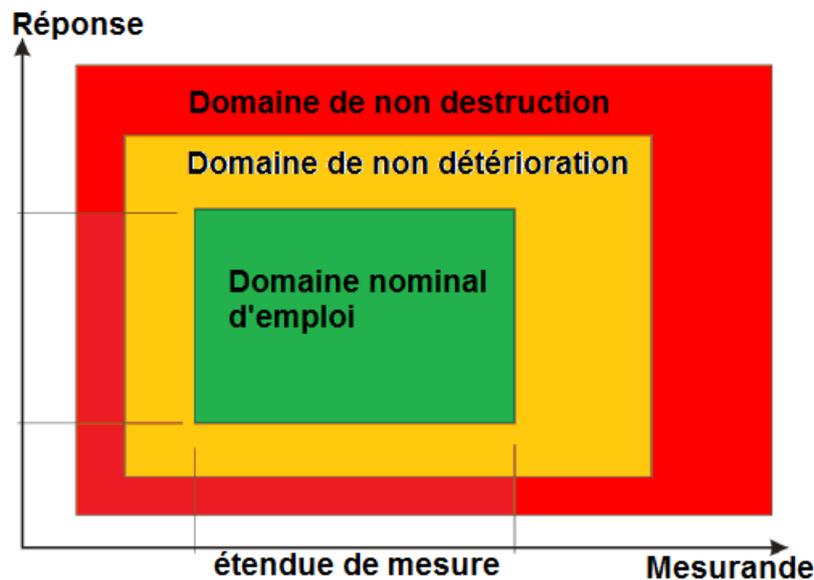


Figure I.2. Représentations des domaines d'utilisation d'un capteur.

- Eviter et corriger les erreurs qui peuvent conduire à des dérives de mesure ,tel que les erreurs de linéarité, les erreurs d'hystérésis ou le résultat doit dépendre de la mesure précédente, erreur de zéro ou «offset» et l'erreur d'échelle ou de gain.

### 6. Grandeurs d'influence

Elles représentent les grandeurs physiques autres que le mesurande dont la variation peut modifier la réponse du capteur :

- **Température** : modifications des caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles
- **Pression, vibrations** : déformations et contraintes pouvant altérer la réponse
- **Humidité** : modification des propriétés électriques (constante diélectrique ou résistivité). Dégradation de l'isolation électrique
- **Champs magnétiques** : création de fém d'induction pour les champs variables ou modifications électriques (résistivité) pour les champs statiques

- **Tension d'alimentation** : lorsque la grandeur de sortie du capteur dépend de celle-ci directement (amplitude ou fréquence).

Certaines solutions sont proposées et nécessitent de :

- Réduire les grandeurs d'influence (tables anti-vibration, blindages magnétiques...)
- Stabiliser les grandeurs d'influence à des valeurs parfaitement connues
- Compenser l'influence des grandeurs parasites par des montages adaptés (pont de Wheatstone)

### 7.Principe d'un capteur industriel

En générale on exploite un effet physique en évolution permanente, qui modifie les propriétés du capteur afin de donner une réponse électrique. Ce signal électrique de sortie est à bas niveau et de l'ordre du mV ou du  $\mu\text{A}$ . Un étage d'amplification et ou de linéarisation s'en suit pour augmenter son niveau à l'ordre V ou du mA. D'un autre côté certaines opérations peuvent avoir lieu, afin de linéariser la réponse électrique par traitement numérique en générale avec un microprocesseur. A la fin le signal passe par un transmetteur qui est un circuit électrique d'interface pour aboutir à un signal normé et interprétable par les circuits de control et de commande.

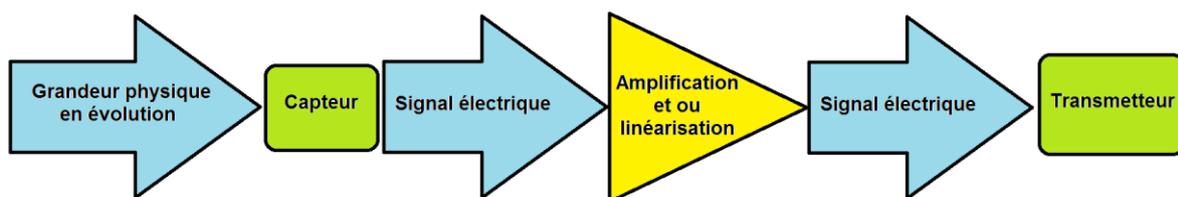


Figure I.3. Schéma de principe d'une chaîne de mesure.

# **Circuits de conditionnement du signal**

## **Chapitre II : Circuits de conditionnement du signal**

### **1.Introduction**

Ce chapitre du polycopié traite de divers circuits associés de conditionnement du signal impliquant l'utilisation des montages potentiométriques, le pont de Wheatstone, les amplis opérationnel et les oscillateurs. Bien que le sujet soit généralement très large, l'objectif est de se concentrer sur les circuits de traitement du signal d'applications des capteurs plutôt que les détails des capteurs eux-mêmes dans cette partie.

Les capteurs n'opèrent pas par eux-mêmes. Ils font généralement partie d'un système plus large comprenant des conditionneurs de signaux et différents circuits de traitement du signal analogique ou numérique. Le système peut être un système de mesure, le système d'acquisition de données ou un système de commande de processus, par exemple. Toutes les appareils électriques qui mesurent, produisent, déclenchent une réponse physique sont également considérés comme des actionneurs.

Dans les capteurs passifs les variations des impédances dues aux stimuli externes ne sont mesurables que si on les intègre dans des circuits de conditionnement de signal. Ces capteurs passifs nécessitent une source externe d'excitation. Le capteur à base de résistances telles que des thermistances ou les détecteurs de température à résistance (RTD) et les jauges de contrainte sont des exemples de capteurs passifs, car un courant doit passer à travers eux pour produire une tension correspondante mesurée afin de déterminer la valeur de résistance. Une alternative serait de placer ces corps dans un circuit en pont, mais dans les deux cas, un courant ou une tension externe est nécessaire.

Les sorties à grande échelle de la plupart des capteurs (passives ou actives) sont relativement des petites tensions, courants, ou des changements de résistance, et

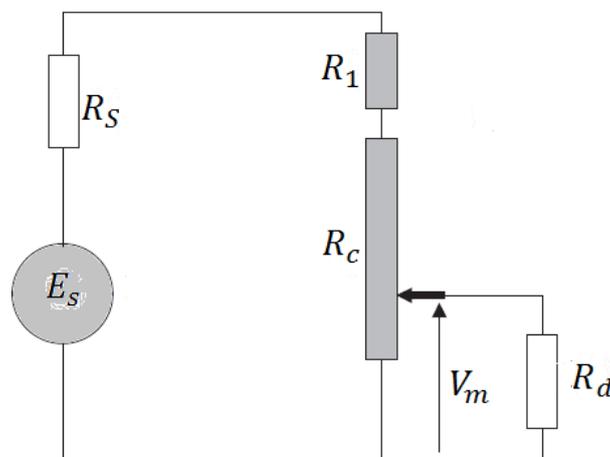
donc leurs résultats doivent être correctement conditionnés avant de poursuivre le traitement analogique ou numérique qui peut se produire. De ce fait, toute une classe de circuits est à considérer, généralement dénommé circuits de conditionnement du signal. Amplification, translation de niveau, isolation galvanique, la transformation d'impédance, linéarisation, et le filtrage sont des fonctions de conditionnement fondamental du signal qui pourraient être nécessaires.

Dans ce qui suit nous allons décrire un certain nombre de conditionneur.

## 2. Les montages potentiométriques

Il représente le plus simple des montages conditionneurs utilisés avec la mesure et la détection de diverses grandeurs physiques possibles, tel que le déplacement la position, la pression et la force.

Ce montage est représenté sur la figure suivante



*Figure II.1. Schéma de principe d'un montage potentiométrique.*

Une source d'alimentation  $E_s$  alimente le capteur de résistance  $R_c$  en série avec une protection  $R_1$ . La tension aux bornes du capteur est mesurée à l'aide d'un appareil de mesure de résistance interne  $R_d$ .

Aux moyens des lois des mailles et des nœuds, cette  $V_m$  tension peut être calculée et s'écrit alors :

$$V_m = E_s \frac{R_c R_d}{R_c(R_S + R_1) + R_d(R_c + R_S + R_1)} \quad (\text{II. 1})$$

La résistance de l'appareil de mesure  $R_d$  est très grande, ce qui permet de profiter de l'approximation  $R_d \gg R_c$  pour obtenir :

$$V_m = E_s \frac{R_c}{(R_c + R_S + R_1)} \quad (\text{II. 2})$$

D'où 
$$V_m = E_s \left( \frac{1}{\frac{R_S + R_1}{R_c} + 1} \right) \quad (\text{II. 3})$$

On montre que mis appart le cas ou  $R_1 + R_S \ll R_c$  la tension  $V_m$  n'est pas linéaire en fonction de la résistance  $R_c$ . De ce faite certaines solutions peuvent être proposées pour établir la linéarité.

### **2.1.Première solution fonctionnement en petits signaux**

Un fonctionnement en petits signaux traduit le cas où les variations  $\Delta R_c$  de la résistance du capteur sont très faibles par rapport aux autres résistances.

Pour une variation de la résistance  $R_c$  on peut écrire :

$$R_c = R_{c0} + \Delta R_c \quad (\text{II. 4})$$

De même la tension mesurée peut elle aussi s'écrire :

$$V_m = V_{m0} + \Delta V_m \quad (\text{II. 5})$$

Il s'en suit :

$$V_m = E_s \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{(R_{c0} + \Delta R_c + R_S + R_1)} \quad (\text{II. 6})$$

D'où

$$V_m = E_s \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{(R_{c0} + R_S + R_1)} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_c}{(R_{c0} + R_S + R_1)}} \quad (\text{II. 7})$$

Si

$$\Delta R_c \ll (R_{c0} + R_S + R_1) \quad (\text{II. 8})$$

Alors

$$\frac{\Delta R_c}{(R_{c0} + R_s + R_1)} \rightarrow 0 \quad (\text{II. 9})$$

Et

$$V_m = E_s \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{(R_{c0} + R_s + R_1)} \quad (\text{II. 10})$$

Dans ces conditions

$$V_m = V_{m0} + \Delta V_m = E_s \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{(R_{c0} + R_s + R_1)} \quad (\text{II. 11})$$

$$V_m = V_{m0} + \Delta V_m = E_s \frac{R_{c0}}{(R_{c0} + R_s + R_1)} + E_s \frac{\Delta R_c}{(R_{c0} + R_s + R_1)} \quad (\text{II. 12})$$

Et par conséquent on trouve :

$$\Delta V_m = E_s \frac{\Delta R_c}{(R_{c0} + R_s + R_1)} \quad (\text{II. 13})$$

La sensibilité est alors linéaire et égale a :

$$S = \frac{\Delta V_m}{\Delta R_c} = E_s \frac{1}{(R_{c0} + R_s + R_1)} \quad (\text{II. 14})$$

Si  $R_{c0} = R_1 + R_s$  alors

$$S = \frac{\Delta V_m}{\Delta R_c} = \frac{E_s}{2R_{c0}} \quad (\text{II. 15})$$

## **2.2. Deuxième solution montage push-pull**

La résistance  $R_1$  est remplacée par un deuxième capteur identique au premier mais dont l'action est de signe contraire et on écrit alors :

$$R_1 = R_{c0} - \Delta R_c \quad (\text{II. 16})$$

Et donc

$$V_m = V_{m0} + \Delta V_m = E_s \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{(R_{c0} + \Delta R_c + R_s + R_{c0} - \Delta R_c)} \quad (\text{II. 17})$$

D'où la réalisation de la linéarité :

$$\Delta V_m = E_s \frac{\Delta R_c}{(2R_{c0_c} + R_S)} \quad (\text{II. 18})$$

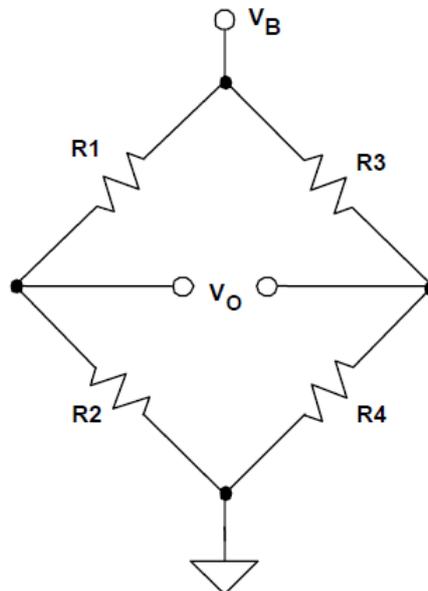
### **3. Les ponts**

Cette partie du chapitre, aborde les concepts fondamentaux du circuit de pont. Une façon logique de classer les capteurs est par rapport à la propriété physique du capteur pour laquelle est conçu pour être mesuré. Ainsi on a des capteurs de température, des capteurs de force, des capteurs de pression, des capteurs de mouvement, etc. Cependant, les capteurs qui mesurent des propriétés différentes peuvent avoir le même type de signal de sortie électrique. Par exemple, les deux sondes à résistance et les jauges de contrainte sont souvent placées dans des circuits en pont, et les circuits de conditionnement sont donc tout à fait similaires. En fait, les ponts et leurs circuits de conditionnement méritent une discussion détaillée.

Une méthode simple pour mesurer la résistance est de forcer le passage d'un courant constant à travers le capteur résistif, et mesurer la tension de sortie. Cela nécessite à la fois une source de courant précis et un moyen précis de mesurer la tension comme le pont de Wheatstone. Tout changement dans le courant sera interprété comme une variation de résistance. En outre, la puissance dissipée dans le détecteur résistif doit être faible conformément aux recommandations du fabricant, de sorte que l'auto-échauffement ne produit pas d'erreurs. En conséquence, le courant d'attaque doit être faible, ce qui tend à limiter la résolution de cette approche.

Un pont de résistance peut être décrit comme étant un double montage potentiométriques. Ce pont de résistance, comme le montre la figure II.2, offre une alternative intéressante pour mesurer de petits changements de résistance de précision. Développé par SH Christie en 1833 ce pont de Wheatstone de base constitue un excellent exemple. Il se compose de quatre résistances connectées pour former un quadrilatère, une source d'alimentation de tension  $V_B$  (ou,

alternativement, un courant) connecté aux bornes de l'une des diagonales, et un appareil de mesure de tension connecté aux bornes de l'autre diagonale.



**Figure II.2.** Schéma de base du pont de Wheatstone.

Le détecteur mesure la différence de tension  $V_o$  entre les sorties des deux diviseurs de tension connectés aux bornes de l'alimentation  $V_B$ .

Il existe deux façons principales d'exploitation d'un pont de ce genre. Il opère comme un détecteur de zéro, où la mesure de la résistance du pont est obtenue indirectement par comparaison avec une résistance standard similaire. D'autre part, il peut être utilisé comme un dispositif qui lit une différence de résistance correspondant directement à une tension sortie de proportionnelle.

### **3.1. Equation générale et condition d'équilibre**

Au moyen des lois de Kirchhoff, lois des nœuds et les transformations étoiles triangles des circuits constituées de plusieurs résistances, nous pouvons calculer la tension de déséquilibre  $V_m$  du pont de résistance alimenté par une source de tension  $E_s$  ou l'on considère que l'appareil de mesure de la tension  $V_m$  a une résistance  $R_d$ .

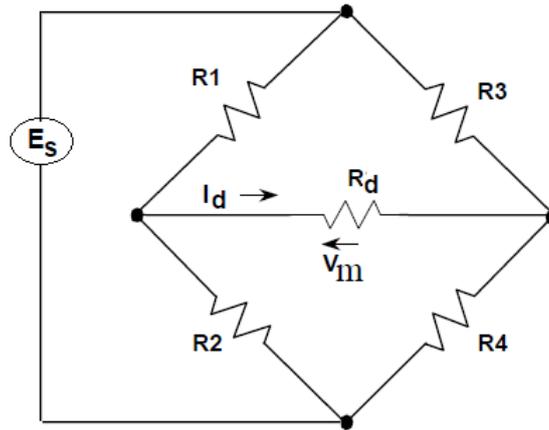


Figure II.3. Pont de Wheatstone avec source tension.

$$I_d = \frac{E_s(R_2R_3 - R_4R_1)}{R_d(R_2 + R_1)(R_4 + R_3) + (R_2R_1)(R_4 + R_3) + (R_2 + R_1)R_4R_3} \quad (\text{II. 19})$$

Généralement

$$R_d \gg R_1, R_2, R_3, R_4$$

D'où

$$I_d = \frac{E_s(R_2R_3 - R_4R_1)}{R_d(R_2 + R_1)(R_4 + R_3)} \quad (\text{II. 20})$$

Et

$$V_m = R_d I_d = E_s \frac{(R_2R_3 - R_4R_1)}{(R_2 + R_1)(R_4 + R_3)} \quad (\text{II. 21})$$

La condition d'équilibre est obtenue pour une tension  $V_m$  nulle soit pour  $I_d = 0$

Ce qui implique la condition d'équilibre :

$$R_2R_3 = R_4R_1 \quad (\text{II. 22})$$

Pour la majorité des applications du capteur utilisant des ponts, la déviation d'une ou plusieurs résistances du pont de la valeur initiale est mesurée comme une indication de l'amplitude ou le changement de valeur mesurée. Dans ces cas, la variation de tension de sortie est une indication de la variation de résistance. Il existe plusieurs façons d'intégrer un capteur dans le pont permis lesquels on cite :

### 3.2. Montage 1/4 de Pont

Dans ce cas, le pont contient trois résistances fixes  $R_1 = R_3 = R_4 = R_{C0}$  et une résistance de capteur variable  $R_2 = R_{C0} + \Delta R_{C0}$ .

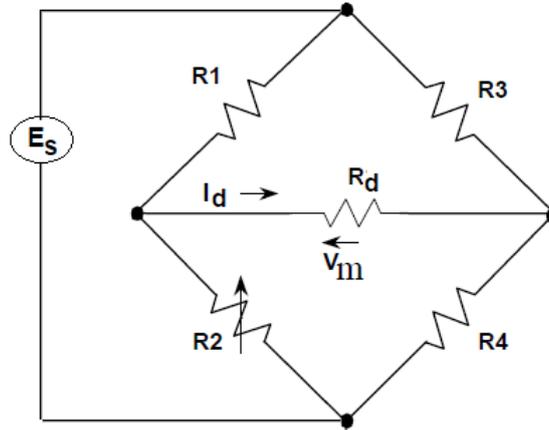


Figure II.3. Montage ¼ de Pont introduisant un seul capteur.

$$V_m = E_s \frac{(R_{C0} + \Delta R_{C0})R_{C0} - R_{C0}^2}{(R_{C0} + \Delta R_{C0} + R_{C0})(2R_{C0})} \quad (\text{II. 23})$$

D'où

$$V_m = E_s \frac{\Delta R_{C0}}{2(2R_{C0} + \Delta R_{C0})} \quad (\text{II. 24})$$

Et

$$V_m = \frac{E_s}{4} \frac{\Delta R_{C0}}{R_{C0}} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_{C0}}{2R_{C0}}} \quad (\text{II. 25})$$

Cette expression traduit l'évolution de  $V_m$  en fonction de la variation de la résistance du capteur  $\Delta R_{C0}$  et ne présente pas de linéarité.

Si l'on est en fonctionnement petits signaux, c-a-d pour de faibles variations de résistance du capteur ou  $\Delta R_{C0} \ll R_{C0}$  il s'ensuit alors :

$$V_m = \frac{E_s}{4} \frac{\Delta R_{C0}}{R_{C0}} \quad (\text{II. 26})$$

Et par conséquent  $V_m$  est une fonction linéaire des variations  $\Delta R_{C0}$  de la résistance du capteur.

Dans le cas général où les variations de la résistance  $R_C$  ne sont plus négligeables on peut linéariser le capteur par des montages à base d'amplificateurs opérationnels.

### 3.3. Montage 1/2 de Pont

Dans ce cas, le pont contient deux résistances fixes  $R_3 = R_4 = R_{C0}$  et deux autres résistances variables constituant les capteurs  $R_1 = R_{C0} + \Delta R_1$  et  $R_2 = R_{C0} + \Delta R_2$

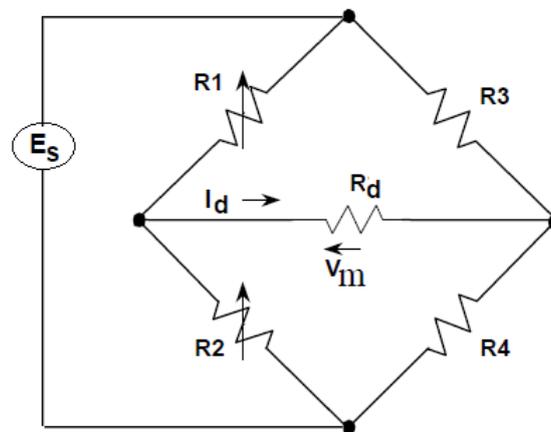


Figure II.3. Montage en  $\frac{1}{2}$  Pont introduisant deux capteurs.

La tension de déséquilibre s'écrit alors :

$$V_m = E_s \frac{(R_{C0} + \Delta R_2)R_{C0} - (R_{C0} + \Delta R_1)R_{C0}}{(2R_{C0} + \Delta R_2 + \Delta R_1)(2R_{C0})} \quad (\text{II. 27})$$

$$V_m = \frac{E_s}{4} \frac{\Delta R_2 - \Delta R_1}{R_{C0}} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_2 + \Delta R_1}{2R_{C0}}} \quad (\text{II. 28})$$

Pas de linéarité.

**1<sup>ier</sup> cas :** Si l'on est en fonctionnement petits signaux, c.-à-d. pour de faibles valeurs des deux résistances des capteurs ou  $\Delta R_2 + \Delta R_1 \ll R_{C0}$  il s'ensuit alors :

$$V_m = \frac{E_s}{4} \frac{\Delta R_2 - \Delta R_1}{R_{C0}} \quad (\text{II. 29})$$

La relation est totalement linéaire et l'on peut profiter du signe – entre les deux variations pour éliminer les perturbations dues aux grandeurs d'influence.

**2<sup>ème</sup> cas :** Les variations des résistances des deux capteurs, sont importantes et on propose le montage push-pull pour atteindre la linéarité.

$$V_m = \frac{E_s}{4} \frac{\Delta R_2 - \Delta R_1}{R_{C0}} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_2 + \Delta R_1}{2R_{C0}}} \quad (\text{II. 30})$$

Si les capteurs sont identiques et les grandeurs physiques à mesurer imposent des variations égales et de signes opposés on a :

$$R_1 = R_{C0} + \Delta R_c \quad \text{et} \quad R_2 = R_{C0} - \Delta R_c \quad (\text{II. 31})$$

Donc

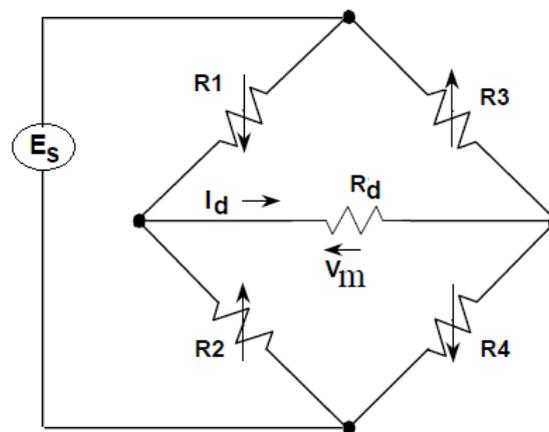
$$\Delta R_2 = -\Delta R_1 = \Delta R_c \quad (\text{II. 32})$$

Et devient

$$V_m = \frac{E_s}{2} \frac{\Delta R_c}{R_{C0}} \quad (\text{II. 33})$$

$V_m$  est linéaire et la sensibilité est deux fois plus grandes que celle du montage en  $\frac{1}{4}$  de pont.

### 3.4. Montage en Pont entier



**Figure II.4.** Montage en Pont entier introduisant quatre capteurs.

Les quatre résistances varient simultanément en fonction du stimulus en montage push-pull, avec une opposition de signe pour les variations des résistances placées dans les branches contigües.

$$V_m = E_s \frac{(R_C + \Delta R_2)(R_C + \Delta R_3) - (R_C + \Delta R_4)(R_C + \Delta R_1)}{(R_C + \Delta R_2 + R_C + \Delta R_1)(R_C + \Delta R_4 + R_C + \Delta R_3)} \quad (\text{II. 34})$$

$$\Delta R_2 = -\Delta R_1 = \Delta R_3 = -\Delta R_4 = \Delta R_c \quad (\text{II. 35})$$

En remplaçants on obtient :

$$V_m = E_s \frac{\Delta R_c}{R_C} \quad (\text{II. 36})$$

On réalise ainsi l'avantage de la linéarité avec une grande sensibilité (fois plus grandes que celle du montage en  $\frac{1}{4}$  de pont) et on peut facilement éliminer les grandeurs d'influences.

#### **4. Les amplificateurs opérationnels**

Un nombre important de capteurs ont des impédances de sortie supérieures à plusieurs mégohms, et donc le circuit de conditionnement du signal associé doit être soigneusement conçu pour répondre aux défis du faible courant de polarisation, avec un faible bruit et un gain élevé.

Pour répondre à de tels critères, il sera nécessaire d'avoir certains types de circuits comme les amplificateurs opérationnels qui ont une faible impédance de sortie, une impédance d'entrée très élevée et peuvent générer des gains importants.

Basés sur les amplificateurs différentiels et réalisés à partir des transistors montés en deux parties symétriques, ces amplificateurs présentent un intérêt tant dans les circuits de conditionnement du signal que dans la linéarisation des capteurs.

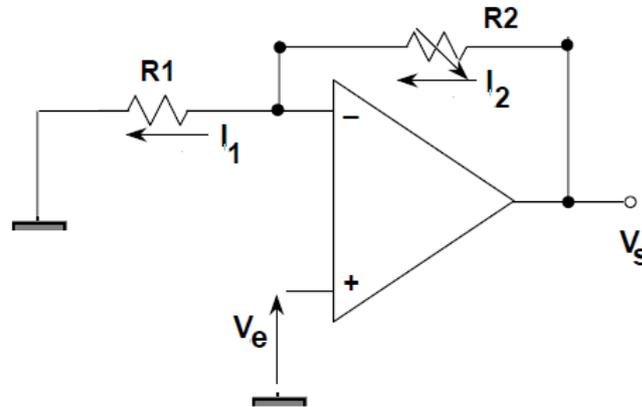


Figure II.5. Montage amplificateur non inverseur.

Un exemple le plus simple est l'amplificateur non inverseur destiné à mesurer les variations d'un capteur résistif ou thermique.

$$V_- = V_+ = V_e = I_1 R_1 \quad (\text{II. 37})$$

$$I_1 = I_2 \quad (\text{II. 38})$$

$$V_S = I_1 R_1 + I_2 R_2 = I_1 (R_1 + R_2) \quad (\text{II. 39})$$

Si on divise  $V_S$  sur  $V_e$  on obtient :

$$\frac{V_S}{V_e} = \frac{(R_1 + R_2)}{R_1} \quad (\text{II. 40})$$

Si  $V_e = E$  est une tension continue

$$V_S = E \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (\text{II. 41})$$

Si

$$R_2 = R_0 + \Delta R \quad \text{et} \quad R_1 = R_0 \quad (\text{II. 42})$$

Alors

$$V_S = E \left( 1 + \frac{R_0 + \Delta R}{R_0} \right) \quad (\text{II. 43})$$

Relation parfaitement linéaire.

Autre type de montage (Figure II.6) ou avec un seul élément sensible, il est possible de rendre la tension de sortie  $V_S$  linéaire en fonction de la variation de la résistance du capteur.

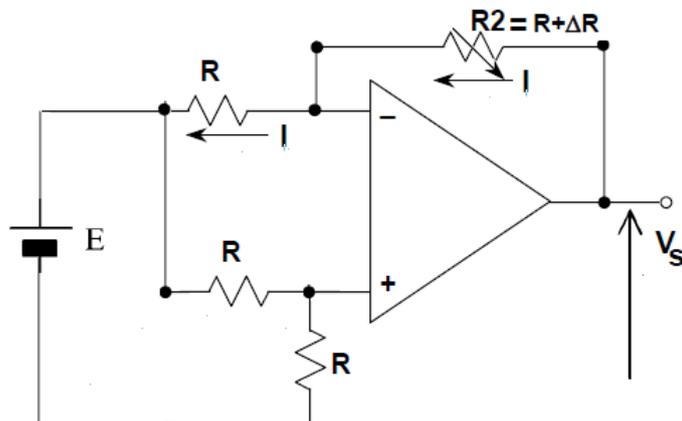


Figure II.6. Montage en amplificateur de linéarisation.

Avec le diviseur de tension on aura :

$$V_- = V_+ = \frac{E}{2} \quad (\text{II. 44})$$

$$E + IR = E/2 \quad (\text{II. 45})$$

D'où

$$I = -\frac{E}{2R} \quad (\text{II. 46})$$

$$V_S = \frac{E}{2} + IR_2 \quad (\text{II. 47})$$

$$V_S = \frac{E}{2} - \frac{E R_2}{2R} \quad (\text{II. 48})$$

$$V_S = \frac{E}{2} \left( 1 - \frac{R_2}{R} \right) \quad (\text{II. 49})$$

On supposant que la variation de la résistance est

$$R_2 = R(1 + \alpha) \quad (\text{II. 50})$$

Alors

$$V_S = \alpha \frac{E}{2} \quad (\text{II. 51})$$

#### 4.1. Ampli op et linéarisation dans pont

Un autre circuit de linéarisation et d'amplification d'un seul élément variable du pont est représenté sur la Figure II.7. Le nœud supérieur du pont est excité par la tension,  $E$ . La partie inférieure du pont est entraînée de façon complémentaire par l'ampli op à gauche, ce qui maintient un courant constant de  $(E/R)$  dans l'élément de résistance variable  $R + \Delta R$ .

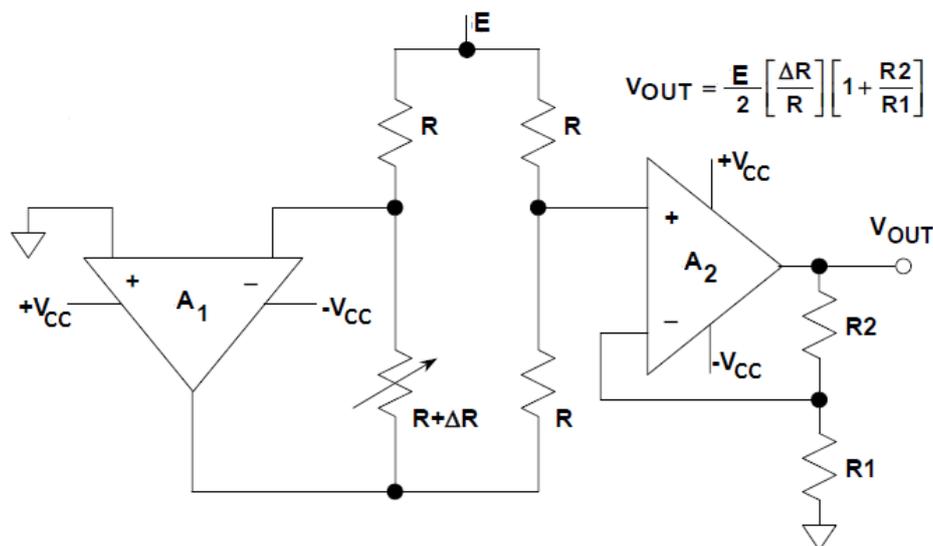


Figure II.7. Montage amplificateur de linéarisation d'un pont de Wheatstone.

L'amplificateur A1 assure la stabilisation du courant traversant la résistance du capteur, on évitant ainsi les erreurs qui peuvent être produites par les fluctuations de l'alimentation  $E$ .

Le signal de sortie est tiré du point de droite du pont et amplifié par un second amplificateur A2, qui fonctionne en montage non inverseur comme décrit dans la figure II.5 et la tension de sortie par conséquent sera égale à :

$$V_s = \frac{E}{2} \left[ \frac{\Delta R}{R} \right] \left[ 1 + \frac{R_2}{R_1} \right] \frac{E R_2}{2R} \quad (\text{II. 52})$$

Cette configuration du courant constant pour un seul élément à résistance variable fournit le mécanisme pour l'amélioration de la linéarité. De plus cette configuration supprime efficacement les tensions du mode commun.

### **5. Les oscillateurs**

L'emploi des oscillateurs comme circuits de conditionnement, permet de lier la variation des grandeurs du capteur directement à la fréquence des oscillations. Le signal délivré par l'oscillateur est dit modulé en fréquence, cette technique offre beaucoup d'avantages parmi lesquels :

- L'information portée par la fréquence est moins sensible aux parasites dus à l'amplitude. Elle possède ainsi une immunité aux bruits très supérieure à celle portée par l'amplitude.
- La conversion en signal numérique est simple.
- Facilité de transmission sur voies hertziennes, ce qui permet l'emploi de la télémesure.

On peut distinguer deux types d'oscillateurs, les oscillateurs sinusoïdaux et les oscillateurs à relaxation.

#### **5.1. Oscillateurs sinusoïdaux**

La fréquence d'un circuit résonant peut être entretenue (fixe), ce circuit peut contenir une bobine d'inductance  $L_0$  et d'un condensateur de capacité  $C_0$  associées soit en série soit en parallèle.

Pour un circuit série la fréquence de résonance  $F_0$  est :

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C_0}} \quad (\text{II. 53})$$

Pour un circuit parallèle la fréquence de résonance  $F_0$  est :

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} \sqrt{1 - \frac{1}{Q_L^2}} \quad (\text{II.54})$$

Ou  $Q_L = L_0 \Omega_0 / R_s$  est le coefficient de qualité de la bobine,  $R_s$  sa résistance série et  $\Omega_0 = 2\pi F_0$ . Une approximation habituelle est prise en compte ou  $Q_L^2 \gg 1$  ce qui nous ramène à la fréquence :

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} \quad (\text{II.55})$$

Lorsqu'un capteur inductif ou capacitif est intégré dans le circuit oscillant, les variations de ses capteurs entraînent des changements de la fréquence. Ceci entraîne une variation  $\Delta F$  de la fréquence qui est égale à :

$$\frac{\Delta F}{F_0} = -\frac{\Delta L}{2L_0} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta F}{F_0} = -\frac{\Delta C}{2C_0} \quad (\text{II.56})$$

Ceci dit pour

$$F = F_0 + \Delta F \quad (\text{II.57})$$

On a

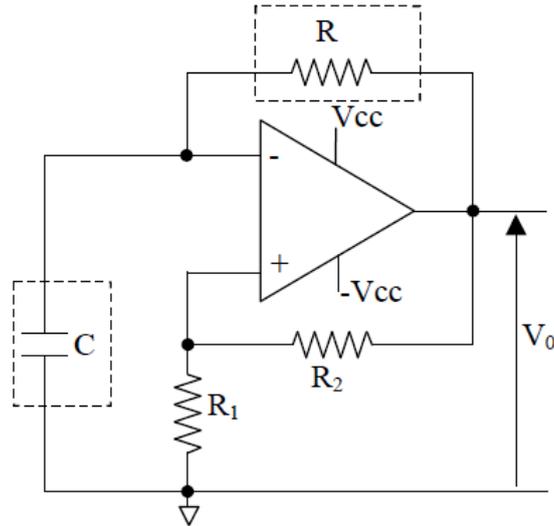
$$F = F_0 \left[ 1 - \frac{\Delta L}{2L_0} \right] \quad \text{ou} \quad F = F_0 \left[ 1 - \frac{\Delta C}{2C_0} \right] \quad (\text{II.58})$$

Ces oscillateurs LC sont généralement utilisés pour des génératrices hautes fréquences, ce qui est demandé et facilite la transmission du signal pour la télémesure.

Ils sont généralement bouclés avec une résistance négative pour compenser l'amortissement (pertes) dans la résistance de la bobine ou de la charge.

### 5.2.Oscillateurs à relaxation

L'oscillateur à relaxation le plus utilisé est le multivibrateur astable à base d'amplificateur opérationnel voir figure II.9. Il présente un générateur de signaux rectangulaires souvent rendus carré par le choix des valeurs des éléments du montage.



**Figure II.9.** Montage multivibrateur astable à base d'amplificateur opérationnel.

La fréquence d'oscillation est liée aux valeurs des composants du montage par une relation proportionnelle ou  $F \sim (a/RC)$ .

La période du cycle du signal est égale à :

$$F = 2RC \log \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) \quad (\text{II. 59})$$

Dans ce montage le capteur est soit capacitif ou la capacité est  $C = C_0 + \Delta C$  ou soit résistive ou la résistance  $R = R_0 + \Delta R$

On aura

$$\frac{\Delta F}{F_0} = -\frac{\Delta C}{C_0} \quad \text{ou} \quad = -\frac{\Delta R}{R_0} \quad (\text{II. 60})$$

Avec

$$F = F_0 \left[ 1 - \frac{\Delta C}{C_0} \right] \quad \text{ou} \quad F = F_0 \left[ 1 - \frac{\Delta R}{R_0} \right] \quad (\text{II. 61})$$

Comme pour les oscillateurs sinusoïdaux, la fréquence du multivibrateur astable est modulée par les variations de la résistance ou celle de la capacité.

# **Capteurs résistifs**

## Chapitre III : Capteurs résistifs

### 1.Introduction

Un capteur résistif est un transducteur ou un dispositif électromécanique qui convertit généralement les changements mécaniques tel que déplacement en un signal électrique qui peut être contrôlé après conditionnement. Les capteurs résistifs sont parmi les plus courants dans l'instrumentation. Le capteur résistif le plus simple est le potentiomètre. D'autres capteurs résistifs comprennent des jauges de contrainte, thermistances les anciens microphones de carbone. Ces capteurs sont souvent combinés avec les ponts de Wheatstone. Dans tous les cas le fond théorique pour tous ces capteurs est la théorie de la résistivité.

### 2.Résistivité et Résistance

La résistivité est la résistance électrique mesurée pour tout matériau ayant une section transversale uniforme et habituellement indiquée en termes de la longueur de la matière et ou de la zone de section transversale, comme indiqué dans l'équation : Résistance = (résistivité \* Longueur) /section soit :

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad \text{III. 1}$$

Ou  $R$  est résistance,  $\rho$  la résistivité,  $L$  la longueur et  $A$  la section de la matière utilisée.

Pour changer la résistance d'un matériau, on doit changer la valeur de l'un des facteurs ci-dessus. Lorsque la longueur est modifiée la variation de résistance est directe. Si on double la longueur du matériau, sa résistance double lorsque la surface transversale est modifiée le changement de résistance a un effet inverse.

La résistance d'un matériau dépend de quatre facteurs:

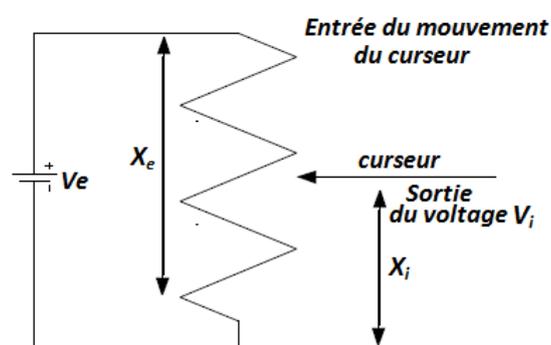
- Composition.
- Longueur.
- Température.
- Surface de la section.

Il existe plusieurs type de capteur résistif parmi lesquelles le composants potentiométriques ou potentiomètres et jauges résistives.

Pour le potentiomètre on distingue deux types de capteurs.

### **3.Potentiomètre linéaire (translation)**

Un potentiomètre est un dispositif électromécanique comportant un curseur mobile qui maintient un contact électrique avec une surface résistive. Avec ce type de potentiomètre on peut réaliser plusieurs capteurs, tel que le capteur de position, capteur de déplacement linéaire, capteur de pression, de force et de niveau surtout pour les liquides non conducteurs. Le curseur dans un potentiomètre est couplé mécaniquement à un élément mobile qui peut faire l'objet d'un contact avec une force ou pression par l'intermédiaire d'un support. La surface de la résistance ainsi que le curseur forme un circuit diviseur de tension lorsqu'une tension est appliquée sur toute la résistance à l'intérieur du potentiomètre, Voir figure III.1.



**Figure III.1.** Schéma d'un potentiomètre linéaire.

Une tension variable peut ensuite être produite sur le bras du curseur par rapport à une extrémité de la résistance lorsque ce premier se déplace. Ce curseur est généralement réalisé à partir de certains matériaux tel que le bronze phosphoreux (alliage de Cuivre, d'étain et phosphore) ou du béryllium.

Si on suppose que  $R_i$  est la résistance au niveau du curseur et que  $R_e$  est la résistance totale du potentiomètre.

Alors

$$V_e = I R_e \quad \text{III. 2}$$

Où  $I$  est le courant qui traverse la résistance du potentiomètre et  $X_e$  est la distance totale.

$$V_e = I \frac{\rho X_e}{A} \quad \text{III. 3}$$

et

$$V_i = I \frac{\rho X_i}{A} \quad \text{III. 4}$$

On divisant l'équation III.4 sur III.3 on aura :

$$\frac{V_i}{V_e} = \frac{X_i}{X_e} \quad \text{III. 5}$$

Et

$$V_i = V_e \frac{X_i}{X_e} \quad \text{III. 6}$$

Un potentiomètre linéaire produit une tension de sortie  $V_i$  proportionnelle à la position  $X_i$  du curseur.

#### **4.Potentiomètre rotatif (rotation)**

Deux cas de figure peuvent se présenter pour ce type de potentiomètre, soit un potentiomètre rotatif (un seul tour) ou un potentiomètre hélicoïdal (multi-tour) pour produire la tension  $V_i$  proportionnel au déplacement rotationnel (angulaire)  $\phi_i$ .

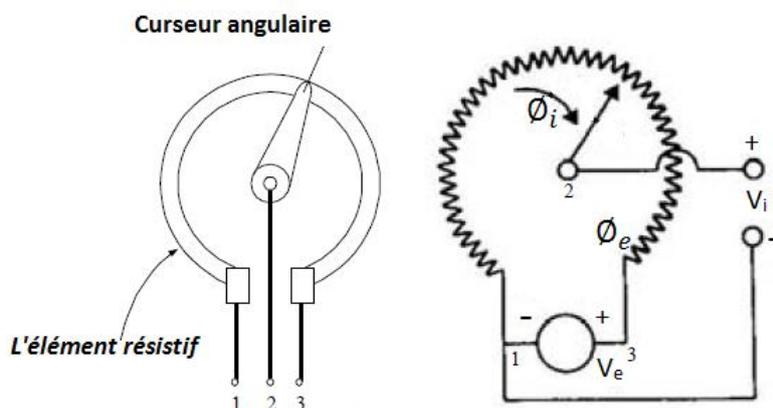


Figure III.2. Schéma d'un potentiomètre rotationnel.

Présenté dans la figure III.2 le potentiomètre rotatif possède un curseur qui peut faire un déplacement angulaire totale d'angle  $\phi_e$  (tour complet). Un déplacement partiel d'angle  $\phi_i$  produit cependant une tension de sortie égale à  $V_i$  lorsque le potentiomètre est alimenté avec une tension  $V_e$ .

La longueur totale du périmètre du cercle est  $L_e = \phi_e r$  et La longueur partielle du périmètre au point 2 du curseur est  $L_i = \phi_i r$

Et l'on peut écrire :

$$V_e = I \frac{\rho L_e}{A} = I \frac{\rho \phi_e r}{A} \quad (\text{III. 7})$$

Et

$$V_i = I \frac{\rho L_i}{A} = I \frac{\rho \phi_i r}{A} \quad (\text{III. 8})$$

Soit

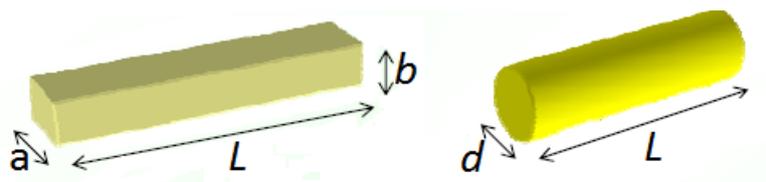
$$V_i = V_e \frac{\phi_i}{\phi_e} \quad (\text{III. 9})$$

Un potentiomètre rotatif (angulaire) produit une tension de sortie  $V_i$  proportionnelle à l'angle  $\varnothing_i$  du curseur.

### 5. Jauges de contrainte

Les Jauges de contrainte reflètent le comportement piézorésistif d'un certain type de matériau, ils sont un des moyens communs pour mesurer la déformation.

Si l'on déforme un fil fin (d'environ  $5 \mu m$  à  $25 \mu m$  d'épaisseur) dans les limites de son élasticité, on peut obtenir les mesures précises de déplacement causé par certains stimuli physiques tel que la force ou la pression. Ses déplacement on pour origines les changements de la résistance du fil dues aux variations de son diamètre et de sa longueur.



**Figure III.3.** Représentation schématique de deux fils, rectangulaire et circulaire.

La surface du fil circulaire et rectangulaire sera égale :

$$A = \pi(d/2)^2 = a \cdot b \quad \text{III. 10}$$

D'où

$$\frac{\Delta A}{A} = 2 \frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{a} = 2 \frac{\Delta a}{a} = 2 \frac{\Delta b}{a} \quad \text{III. 11}$$

Sa résistance est :

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad \text{III. 12}$$

La variation relative sera :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad \text{III. 13}$$

Le coefficient de poisson  $\mu$  relie la variation de la longueur du fil en fonction du diamètre  $d$  ou en fonction des longueurs des côtés de la surface rectangulaire.

Ou

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta b}{a} = \mu \frac{\Delta L}{L} \quad \text{III. 14}$$

$\mu$  est le coefficient de poisson et on remplaçant dans l'équation III.13 on obtient :

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu) \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad \text{III. 15}$$

Le premier terme  $(1 + 2\mu) \frac{\Delta L}{L}$  est relié aux dimensions ou la géométrie du fil et le deuxième est relié aux propriétés résistives du matériau.

On définit alors le facteur de la jauge :

$$G = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = (1 + 2\mu) + \frac{(\Delta \rho)/\rho}{\Delta L/L} \quad \text{III. 16}$$

Cette équation reflète le fait que certains types de matériaux ont un facteur de jauge dominé par les effets des variations dimensionnelles et d'autres par les effets piézorésistifs tel que pour les semi-conducteurs.

Les jauges de contraintes sont des éléments résistifs collés sur un corps d'épreuve assurant la conversion directe d'une déformation de la structure, en variation de résistance électrique  $\Delta R$ .

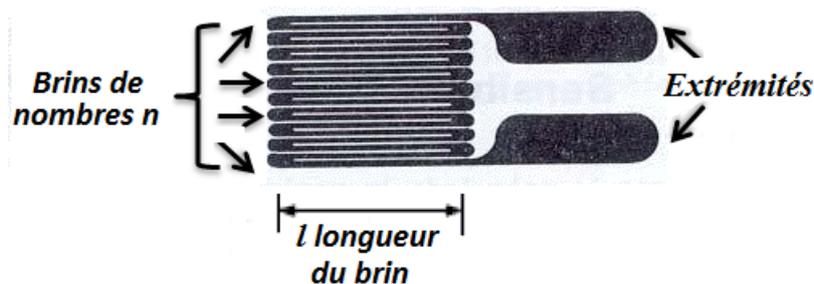


Figure III.4. Jauge résistive avec un nombre de brins  $n$  et longueur  $l$ .

La jauge résistive de contrainte comme montrée sur la figure III.4, se présente comme étant un fil faisant des allers retours appelés brin de nombre  $n$  et de longueur  $l$  collées sur une surface métallique capable de supporter les stimuli qui lui sont appliqués tel que la force, la pression et les contraintes. La longueur totale de la jauge est donc  $L = n.l$ .

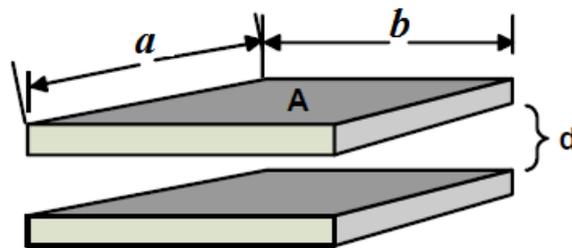
Cette jauge de contrainte est utilisée pour mesurer la déformation, la déflexion, les contraintes et la pression, etc. La résistance de l'élément de détection varie avec la déformation appliquée.

En général un pont de Wheatstone est utilisé pour mesurer de petits changements dans la résistance de jauge de contrainte.

# **Capteurs capacitifs**

**Chapitre IV : Capteurs capacitifs****1.Introduction**

Les dépendances des capteurs capacitifs aussi bien qu'ils soient compliquées peuvent être visualisées par la compréhension des bases d'un condensateur à plaques représenté par les éléments clés sur la figure VI.1



*Figure IV.1. Schéma d'un condensateur plat de base.*

D'abord la capacité de base doit être prise en compte. Le terme «capacité de base" se réfère au résultat de la mesure d'un élément capteur "intact" ou non influencé.

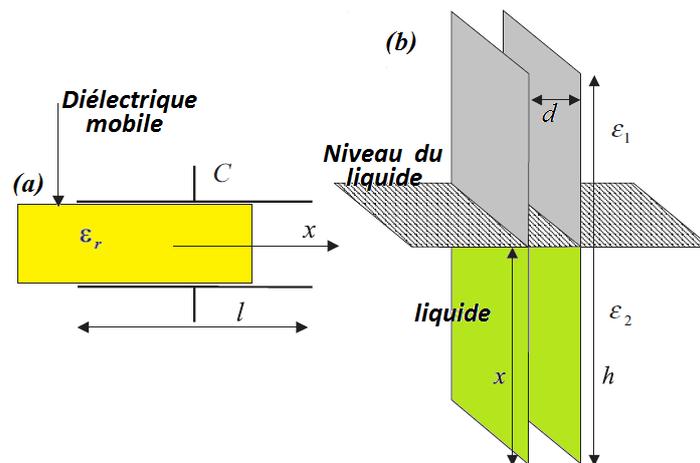
L'équation d'une capacité en fonctions des éléments du condensateur est donnée par :

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \quad \text{IV. 1}$$

Ou  $\varepsilon$  et la permittivité du milieu entre les armatures,  $A$  la surface des armatures et  $d$  est l'écart entre les armatures.

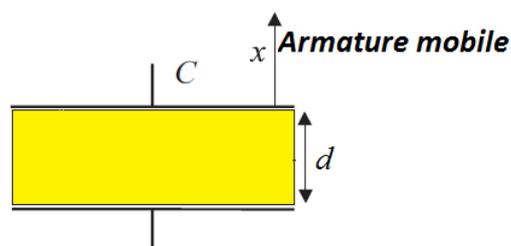
A partir de cette relation on peut voir que la capacité est directement proportionnelle à la surface du capteur et aux propriétés diélectriques du matériau, et inversement proportionnelle à l'écart séparant les armatures.

Les variations de la permittivité du milieu entre les armatures peuvent être l'origine d'un changement de la capacité. Cette variation de permittivité peut être due à une variation de niveau d'un liquide non conducteur (figure IV.2 b) entre les armatures du condensateur et permet de mesurer ce niveau comme dans les détecteurs de niveau du carburant dans les avions. Autre idée de variation de la capacité et le déplacement du corps diélectrique (isolant) mobile (figure IV.2 a) de permittivité  $\epsilon_r$ , mis entre les armatures.



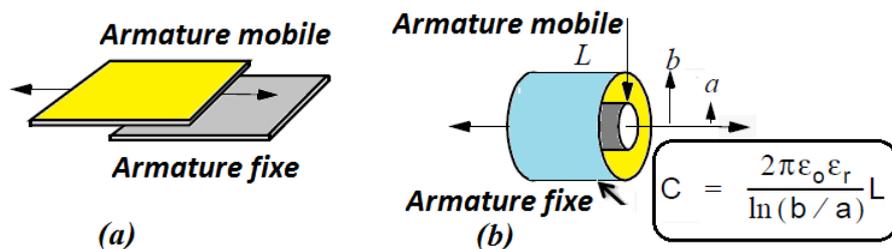
**Figure IV.2.** Schéma d'un condensateur à permittivité variable (a) déplacement du diélectrique (b) variation du niveau d'un liquide.

La variation de la distance (écart) entre les armatures traduit des déplacements rectilignes. Ce type de capteur appelé, condensateur à écartement variable ne peut être utilisé que pour des étendues (domaines) de mesure faibles (en général inférieures au *mm*). Toute variation de la capacité est inversement proportionnelle à la variation de distance entre les armatures.



**Figure IV.3.** Schéma d'un condensateur à écart variable entre les armatures.

La variation de la capacité par variation de surface est réalisée dans un condensateur plan avec un déplacement linéaire (figure IV.4 a) d'une seule armature, ou tournante dans un condensateur cylindrique (figure IV.4 b) dont une armature coulissante le long d'un axe. Le condensateur à surface variable a une étendue de mesure supérieure au cm.



**Figure IV.4.** Schéma d'un condensateur à déplacement d'armatures (a) condensateur plat (b) condensateur cylindrique.

## 2.Types de capteur capacitif

Les capteurs capacitifs sont utilisés dans une variété d'applications industrielles pour fournir des mesures précises et très stables de déplacement, des vibrations, de la position et de l'épaisseur. La plupart des sondes capacitives sont passifs par conception, elles supportent ainsi des environnements de choc et des vibrations, et peuvent être utilisées à des températures extrêmes.

Les capteurs capacitifs peuvent être divisés en deux catégories en fonction de leurs performances et de leur usage. Capteurs capacitifs haute résolution qui sont généralement utilisés dans les applications de déplacement et de position de suivi lorsqu'il s'agit de haute précision, de stabilité et la nécessité de faible dérive de température. Les capteurs capacitifs de proximité qui sont beaucoup moins coûteux et sont généralement utilisés pour détecter la présence de corps ou utilisés dans les applications de comptage.

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

# **Capteurs inductifs**

## Chapitre V : Capteurs inductifs

### 1.Introduction

Des capteurs de détection de différents types de grandeurs physiques peuvent être réalisés à partir d'une ou plusieurs bobines de différentes dimensions et dispositions.

Les capteurs à inductance variable permettent de mesurer des déplacements linéaires et angulaires par une modification de la géométrie de leurs conducteurs ou de leur circuit magnétique.

En général l'induction d'une bobine s'écrit :

$$L = n^2 \mu G \quad (\text{V.1})$$

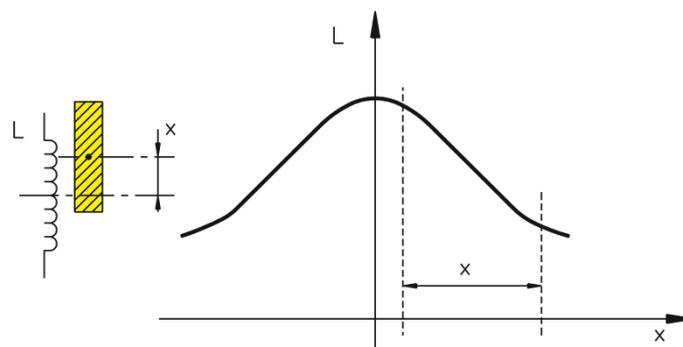
Ou

- $n$  est le nombre de tours du bobinage
- $G$  est le facteur de forme géométrique
- $\mu$  est la perméabilité effective du milieu.

Parmi ces capteurs inductifs on compte trois types qui sont décrits comme suite.

### 2.Self-inductance

Un capteur de position linéaire est généralement constitué d'une bobine à l'intérieur de laquelle se déplace un noyau ferromagnétique.

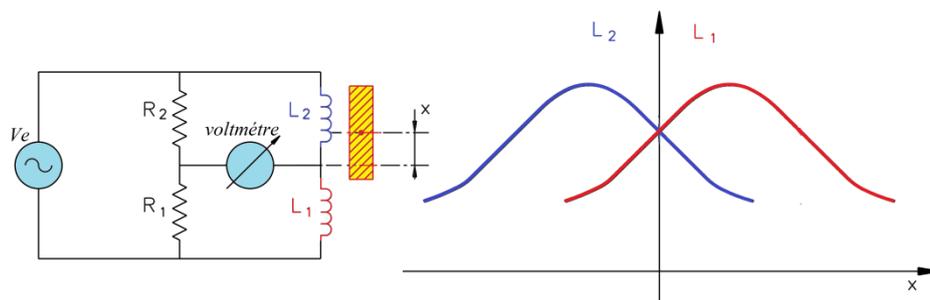


**Figure V.1.** Schéma d'une self-inductance avec noyau mobile.

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

L'inductance de celle-ci est maximale lorsque le noyau magnétique occupe une position centrale ( $x=0$ ). La sensibilité du capteur au mesurande est nulle à cet endroit.

Les changements de la position du noyau sont traduits par intégration de deux selfs inductance dans un pont de Wheatstone avec un seul noyau qui se déplace dans les deux bobines (voir figure V.2).



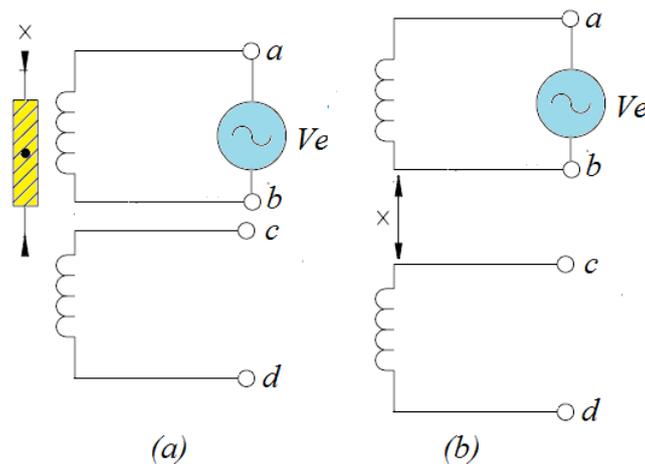
**Figure V.2.** Schéma d'un pont de mesure de déplacement avec deux Self-inductances à noyau mobile.

Lorsque le noyau magnétique occupe une position centrale ( $x=0$ ), les deux inductances sont égales et forment avec le diviseur résistif ( $R1 = R2$ ) un pont équilibré.

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

### **3. Inductance mutuelle**

Un capteur de position ou déplacement linéaire peut être réalisé avec deux bobines entre lesquelles existe un couplage magnétique.



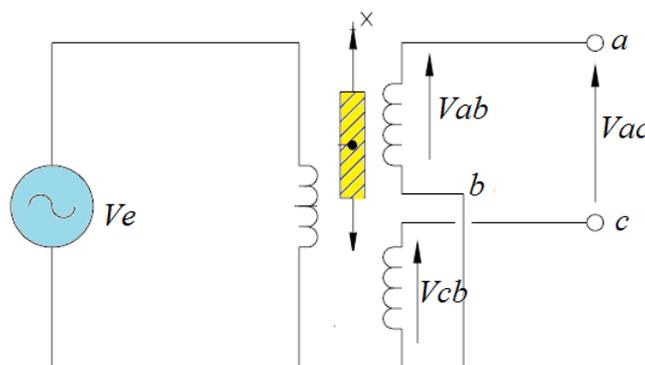
**Figure V.3.** Schéma d'inductances mutuelles (a) avec noyau mobile  
(b) avec bobinage secondaire mobile.

Un changement de position du noyau à l'intérieur du primaire permet de changer la tension de sortie dans le secondaire (figure V.3 a).

D'autre part la même variation peut être obtenue par changement de la position du secondaire par rapport au primaire (figure V.3 b).

#### **4. Transformateur différentiel**

Un capteur inductif de déplacement linéaire peut être réalisé à partir d'un transformateur différentiel qui contient un enroulement primaire et deux enroulements secondaires symétriques, qui est fréquemment désigné par ses initiales en anglais : LVDT (Linear Variable Differential Transformer).



**Figure V.4.** Schéma d'un capteur à transformateur différentiel.

Si un courant alternatif est introduit dans la bobine primaire, une tension sera induite dans la bobine secondaire. Le couplage magnétique entre le primaire et le secondaire est assuré notamment par un noyau ferromagnétique mobile dont on mesure la position.

L'amplitude de cette tension est une fonction linéaire de la position du noyau magnétique. Les écarts par rapport à la position neutre du noyau sont convertis en tensions par la relation:

$$\Delta V = K\Delta X \quad (V.2)$$

où  $\Delta V$  est la variation de tension de sortie,  $K$  est une constante de proportionnalité et  $\Delta X$  est le changement de la position.

Il est bien évident que le LVDT a un avantage sur le potentiomètre en tant que dispositif de mesure de position. Depuis sa base ne touche pas la bobine, il n'y a pas d'usure mécanique qui entraînerait une détérioration des performances dans le temps. D'autre part, il s'agit d'un transducteur plus coûteux, principalement justifiable par sa très grande précision. Cependant le capteur inductif présente certains inconvénients, car il est influencé par les champs magnétiques de proximité et la perméabilité magnétique du milieu.

# **Capteurs thermiques**

## **Chapitre VI : Capteurs thermiques**

### **1.Introduction**

La mesure de la température est un point critique dans les dispositifs électroniques modernes, en particulier les ordinateurs portables coûteux et autres appareils portables avec des circuits denses qui dissipent une puissance considérable sous forme de chaleur. La connaissance de la température du système peut également être utilisée pour contrôler la charge de la batterie afin d'éviter d'endommager des microprocesseurs coûteux.

Les équipements portatifs compacts et puissants ont souvent besoin de refroidissement par ventilateur pour maintenir les températures des jonctions aux niveaux appropriés. Afin de préserver la vie de la batterie, le ventilateur doit fonctionner lorsque cela est nécessaire. Le contrôle précis du ventilateur nécessite une connaissance des températures critiques du capteur de température appropriée. Il existe plusieurs types de capteur de température dont la majorité présente des fonctions de transfert non linéaires.

### **2.Résistance détecteur de température**

La résistance électrique d'un conducteur métallique augmente avec la température. Cette variation étant parfaitement réversible.

Les résistances détecteurs de température (Resistance Temperature Detectors RTD en anglais) ou encore résistances thermiques, sont des éléments construits typiquement d'une platine (Pt) fil enroulé autour d'une bobine en céramique dont les résistances changent avec la température. Ces capteurs ou détecteurs sont précis, mais nécessitent un courant d'excitation ou ils sont généralement utilisés dans des circuits en pont.

La formule de la résistance s'écrit en général :

$$R_T = R_0[1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots + \alpha_n T^n] \cong R_0[1 + \alpha_1 T] \quad (\text{VI. 1})$$

Où  $\alpha_i$  est le coefficient de température.

### **3. Les thermistances**

Similaire en fonction à la RTD, les thermistances sont des résistances sensibles à la température à faible coût et sont construits de matériaux semi-conducteurs solides qui présentent un coefficient de température positif ou négatif très élevé.

$$R_T = R_0 \exp \left[ \beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (\text{VI. 2})$$

Où  $\beta$  est le coefficient de température du matériau utilisé.

Les thermistances ont une sensibilité plus grande mais présentent une réponse non linéaire, ce qui nécessite une linéarisation et réduit en même temps les plages d'utilisation de température à quelques centaines de degrés, évitant ainsi les dommages à des températures élevées. Cependant, ils sont très populaires dans les applications portables telles que la mesure de température de la batterie et d'autres températures critiques dans un système.

### **4. Les thermocouples**

Une force électromotrice (f.é.m.) s'établit entre deux métaux dissemblables dont les extrémités sont portées à des différentes températures.

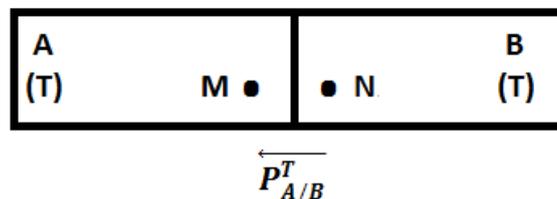
Les thermocouples ont des petites tailles, robuste, relativement peu coûteux et fonctionnent sur de très large gamme de température de tous les capteurs de température qui existent. Ils sont particulièrement utiles pour effectuer des mesures à des températures extrêmement élevées (jusqu'à plus de 2300 C°) dans des environnements hostiles.

Ils ne produisent que des millivolts de sortie, cependant ils nécessitent une amplification et de la précision pour un traitement ultérieur. Cette f.e.m est établit par les lois de la thermoélectricité qui sont décrits comme suite :

#### **4.1.Effets thermoélectriques**

##### **4.1.1.Effet Peltier**

A la jonction de deux conducteurs de nature chimique différente portés à la même température  $T$ , s'établit une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température.



**Figure VI.1.** Couple de conducteurs A et B porté à la même température  $T$ .

f.e.m de Peltier :

$$V_M - V_N = \overleftarrow{P}_{A/B}^T \quad (\text{VI. 3})$$

##### **4.1.2.Loi de volta**

La somme des f.e.m de Peltier est nulle dans un circuit fermé et isotherme fait de conducteurs différents.

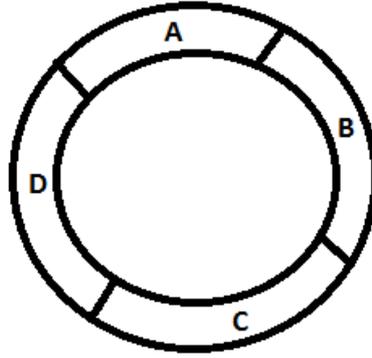


Figure VI.2. Circuit isotherme fermé de conducteurs A , B,C et D.

$$\sum P_i^T = 0 \tag{VI.4}$$

$$P_{A/B}^T + P_{B/C}^T + P_{C/D}^T + P_{D/A}^T = 0 \tag{VI.5}$$

**4.1.3.Effet Thomson**

Entre deux points d’extrémités M et N à l’intérieur d’un conducteur A homogène de températures différentes  $T_M$  et  $T_N$ , s’établit une force électromotrice appelée la f.e.m de Thomson, qui ne dépend que la nature du conducteur et des températures  $T_M$  et  $T_N$ .

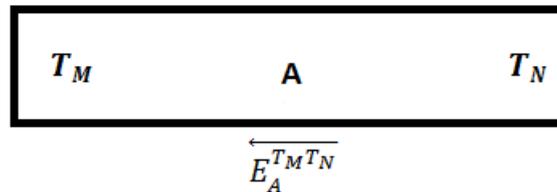


Figure VI.3. Conducteur A porté aux températures  $T_M$  et  $T_N$  sur les extrémités.

Cette f.em s’écrit :

$$E_A^{T_M T_N} = \int_{T_N}^{T_M} h_A dT \tag{VI.6}$$

Ou  $h_A$  est le coefficient de Thomson du conducteur A.

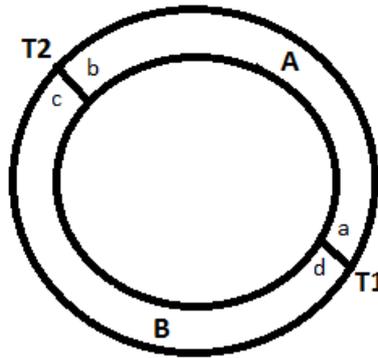
Une conséquence de cette loi est la loi de Magnus qui stipule que la f.e.m Thomson est nulle lorsque les deux températures sont égales.

$$E_A^{T_M T_N} = 0 \quad \text{ssi} \quad T_M = T_N$$

#### **4.1.4.Effet Seebeck**

Cette loi est la somme de l'effet de Peltier avec l'effet de Thomson, elle s'applique sur un couple thermoélectrique constitué d'un circuit fermé de deux conducteurs A et B, dont les jonctions sont portées à des différentes températures  $T_1, T_2$ .

Ce couple est le siège d'une f.e.m notée  $E_{A/B}^{T_2 T_1}$  appelé f.e.m de Seebeck.



**Figure VI.4.** Couple de conducteurs A et B fermé ou les jonctions sont portées aux températures  $T_1$  et  $T_2$ .

$$E_{A/B}^{T_2 T_1} = P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} (h_A - h_B) dT \quad (\text{VI. 7})$$

#### **4.2.Dispositif de mesure pour un thermocouple**

Le circuit illustré dans la figure VI.5 présente le dispositif général pour la mesure de la température par thermocouple.

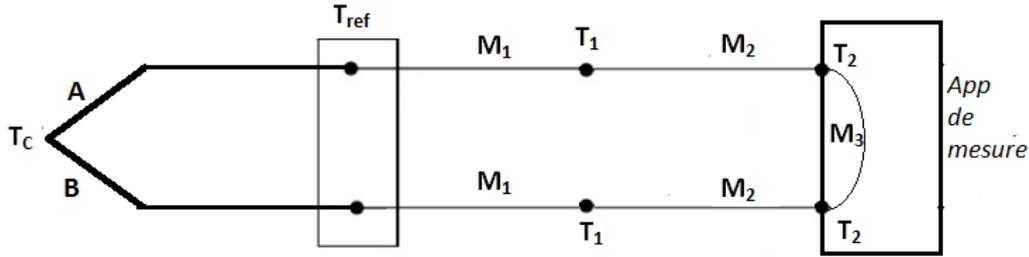


Figure VI.5. Dispositif de mesure avec thermocouple.

Ce dispositif est constitué d'un couple de conducteur A et B dont la jonction est portée à une température  $T_c$  relie a un appareil de mesure de tension par l'intermédiaire de deux conducteurs  $M_1$  et  $M_2$ . Les jonctions A/ $M_1$  et B/  $M_1$  sont à une température  $T_{ref}$ , les jonctions  $M_1/M_2$  a une température  $T_1$  et les jonctions  $M_2/M_3$  a la température  $T_2$ .

On peut établir ainsi le calcul global de la f.e.m qui sera :

$$\begin{aligned}
 E = & P_{A/B}^{T_c} + \int_{T_c}^{T_{ref}} h_B dT + P_{B/M_1}^{T_{ref}} + \int_{T_{ref}}^{T_1} h_{M_1} dT + P_{M_1/M_2}^{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} h_{M_2} dT + P_{M_2/M_3}^{T_2} \\
 & + \int_{T_2}^{T_2} h_{M_3} dT + P_{M_3/M_2}^{T_2} + \int_{T_2}^{T_1} h_{M_2} dT + P_{M_2/M_1}^{T_1} + \int_{T_1}^{T_{ref}} h_{M_1} dT + P_{M_1/A}^{T_{ref}} \\
 & + \int_{T_{ref}}^{T_c} h_A dT
 \end{aligned} \quad (VI. 8)$$

Les termes inversés sont auto éliminés et on aura :

$$E = P_{A/B}^{T_c} + \int_{T_c}^{T_{ref}} h_B dT + \int_{T_{ref}}^{T_c} h_A dT + P_{B/M_1}^{T_{ref}} + P_{M_1/A}^{T_{ref}} \quad (VI. 9)$$

D'où

$$E = P_{A/B}^{T_c} - P_{A/B}^{T_{ref}} + \int_{T_c}^{T_{ref}} (h_B - h_A) dT = E_{A/B}^{T_c T_{ref}} \quad (VI. 10)$$

**Bibliographies**

1. *Graham Brooker **Sensors and Signals** 2007 Australian Centre for Field Robotics Rose St Building (J04) University of Sydney, 2006 Australia.*
2. *Patrick POULICHET **Conditionnement du signal du capteur** Novembre 2006 Groupe ESIEE paris*
3. *Joseph J. Carr, **Electronic Circuit Guidebook: Sensors**, Prompt, 1997*
4. *Ramon Pallas-Areny and John G. Webster, **Sensors and Signal Conditioning**, John Wiley, New York, 1991.*
5. *Dan Sheingold, Editor, **Transducer Interfacing Handbook**, Analog Devices, Inc., 1980, ISBN: 0- 916550-05-2.*
6. *Sections 2, 3, Walt Kester, Editor, **1992 Amplifier Applications Guide**, Analog Devices, 1992, ISBN: 0-916550-10-9.*
7. *Sections 1, 6, Walt Kester, Editor, **System Applications Guide**, Analog Devices, 1993, ISBN: 0- 916550-13-3.*
8. *Harry L. Trietley, **Transducers in Mechanical and Electronic Design**, Marcel Dekker, Inc., 1986.*
9. *Jacob Fraden, **Handbook of Modern Sensors, 2nd Ed.**, Springer-Verlag, New York, NY, 1996.*
10. ***The Pressure, Strain, and Force Handbook, Vol. 29**, Omega Engineering, One Omega Drive, P.O. Box 4047, Stamford CT, 06907-0047, 1995.  
<http://www.omega.com>*
11. ***The Flow and Level Handbook, Vol. 29**, Omega Engineering, One Omega Drive, P.O. Box 4047, Stamford CT, 06907-0047, 1995. (<http://www.omega.com>)*
12. *Ernest O. Doebelin, **Measurement Systems Applications and Design, 4th Ed.**, McGraw-Hill, 1990.*
13. *Data sheet for **AD7730 Bridge Transducer ADC**, <http://www.analog.com>*
14. *Dan Sheingold, **Nonlinear Circuits Handbook**, Analog Devices, Inc.*

- 15. James Wong, *Temperature Measurements Gain from Advances in High-precision Op Amps*, *Electronic Design*, 15 May 1986.**
- 16. OMEGA *Temperature Measurement Handbook*, Omega Instruments, Inc.**
- 17. James Karki, *Signal Conditioning Wheatstone Resistive Bridge Sensors* 1999, Texas Instruments Incorporated Application Report, SLOA034 - September 1999**