

N/621.809

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des sciences et de la Technologie  
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de fin d'étude  
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : Sciences et Technologique  
Filière : Electronique  
Spécialité : Systèmes Electroniques

---

**CAPTEURS DE PRESSION PIEZORESISTIFS : ETUDE ET  
SIMULATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DE LA  
TENSION D'OFFSET**

---

Présenté par :  
**FOUGHALLI ATTI FATIMA**

Sous la direction de :

Boulsina fayçal

Mai 2014



# Dédicace

24/2056

*Nous dédions notre travail à nos parents, nos frères,  
nos sœurs, toute la famille, nos amis, nos camarades,  
nos collègues de fin de cycle,*

*et tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à  
l'élaboration de cet modeste mémoire sans pour  
autant oublier nos enseignants et notre encadreur qui  
méritent un dédicace spécial pour leurs efforts qui nous  
ont consacres afin de réussir ce travail.*



**Fatima**





# Remerciement

*Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la force afin d'accomplir ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer mes profonde gratitude à toutes celles et ceux qui m'ont apporté leur soutien, leur amitié Ou leur expérience tout au long de ce travail de mémoire.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur Monsieur. boulsina pour son aide précieux, sa remarque et ses conseils durant la préparation de ce mémoire.*



---



---

## Sommaire

INTRODUCION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR LES CAPTEURS	
I. Introduction.....	2
II. Principes fondamentaux :.....	2
II.1. Définitions et caractéristiques générale.....	2
II.2. Classification des capteurs .....	3
II.2.1. Capteurs passifs .....	3
II.2.2. Capteurs actifs.....	4
II.3. Capteurs intégrés .....	7
II.4. Grandeurs d'influence.....	8
II.5. Chaîne de mesure .....	8
III. Caractéristique métrologique.....	10
III.1. Erreurs de mesure .....	10
III.1.1. Erreurs systématiques .....	11
III.1.2. Erreurs accidentales .....	11
III.1.3. Fidélité – Justesse – précision .....	13
III.2. Etalonnage du capteur .....	14
III.2.1. Etalonnage simple.....	14
III.2.2. Etalonnage multiple.....	15
III.2.3. Validité d'un étalonnage .....	15
III.3. limites d'utilisation du capteur .....	15
III.4. sensibilité .....	16
III.5. linéarité .....	17
III.6. rapidité -temps de réponse.....	19
III.7. discrétion ou finesse :.....	19
IV. conditionneurs des capteurs passifs.....	20
IV.1. caractéristiques générales des conditionneurs de capteurs passifs .....	20
IV.1.1. Principaux types de conditionneurs .....	20
IV.1.2. Qualités d'un conditionneur .....	21
IV.2. Montage potentiométrique .....	25
IV.3. Les ponts :.....	27
IV.4. Oscillateurs .....	28

IV.4.1. Oscillateurs sinusoïdaux .....	28
IV.4.2. Oscillateurs de relaxation : .....	28
V. Conclusion.....	29

## CHAPITRE 2 : CAPTEURS DE PRESSIOSN PIEZORESISTIF

I. INTRODUCTION.....	30
II. La pression.....	30
II.1. Définition de la pression.....	30
II.2. Les différentes unités de pression.....	30
II.3. Les différents types des pressions .....	31
II.4. Techniques des capteurs de pression.....	32
III. Capteurs de pression piezoresistifs.....	32
III.1. généralités .....	32
IV. Construction de capteur de pression .....	33
IV.1. Membrane.....	33
IV.1.1. le corps d'épreuve.....	33
IV.1. 2. Transducteur.....	35
V. Principe.....	36
VI. Exemple d'un capteur pression piezoresistive Motorola séries mpx7050 .....	37
VII. Conclusion.....	38

## CHAPITRE 3 : ETUDE ET SIMULATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DE LA TENSION D'OFFSET

I.Introduction.....	39
II. La tension d'offset .....	39
II.1. Définition de la tension d'offset .....	39
II.2. Comportement thermique de la tension d'offset.....	40
II.2.1. Comportement thermique d'une piézorésistance.....	40
II.2.2.Comportement thermique du demi-pont .....	40
II.3 .Comportement thermique du pont complet.....	43
III. Résultats et discussion.....	44
III.1. Capteurs 1.....	44

---

III.1.1. Comportement thermique d'une quatre quipiezorésistance.....	44
III.1.2. Comportement thermique pour le première demi pont .....	45
III.1.3. Comportement thermique Pour le deuxième demi pont .....	46
III.1.4. Comportement thermique Pour pont.....	46
III.2. Capteurs 2.....	48
III.2.1.Comportement thermiques d'un quatre piézorésistances.....	48
III.2.2. Comportement thermique pour le premier demi pont .....	48
III.2.3. Comportement thermique pour le deuxième demi pont.....	49
III.2.4 Comportement thermique pour pont.....	49
III.3. Capteurs 3.....	50
III.3.1. Comportement thermique pour le premier demi-pont.....	50
III.3.2. Comportement thermique pour le deuxième demi- pont.....	51
III.3.3. Comportement thermique pour le pont.....	52
IV. Conclusion.....	52
CONCLUSION GENERALE.....	53
Références Bibliographiques.....	54

## LISTE DE FIGURE

### Chapitre 1 :

Fig. I.1 :	Exemple dévolution d'un mesurande m et de la réponse s correspondante du capteur	3
Fig. I.2:	Exemples d'application d'effets physiques à la réalisation de capteurs actifs.....	7
Fig. I.3:	Structure d'un capteur composite.....	7
Fig. I.4:	constitution d'une chaîne de mesu.....	9
Fig. I.5 :	Erreur d' hystérésis.....	12
Fig. I.6.a:	Erreurs systématiques importantes, erreurs accidentelles réduites appareillage fidèle mais non juste.....	14
Fig. I.6.b:	Erreurs systématiques faibles, erreurs accidentelles importantes: appareillage juste mais non fidèle.....	14
Fig. I.6.c:	Erreurs systématiques accidentelles faible : appareillage juste et fidèle donc précis...	4
Fig. I.7:	Domaines d'utilisation d'un capteur.....	16
Fig. I.8:	Meilleure droite - calcul de l'écart de linéarité.....	18
Fig. I.9:	Temps de réponse.....	19
Fig. I.10 :	Conditionneurs des capteurs passifs : (a) : montage potentiométrique, (b) : capteur alimenté par une source de courant, (c) : montages en ponts, (d) : oscillateur.....	21
Fig. I.11:	Montage potentiométrique.....	25

### Chapitre 2 :

Fig. II.1:	Unités de pression.....	31
Fig. II.2:	Schéma synoptique d'un capteur de pression piezoresistif.....	33
Fig. II.3:	Représentation schématique de la membrane.....	34
Fig. II.3:	Résistance R de forme parallélépipédique.....	35
Fig. II. 5:	Représentation des quatre piézorésistances implantées à la surface de la membrane de silicium et connectées en pont de Wheatstone.....	37

### Chapitre 3 :

<b>Fig. III.1:</b> Variations thermiques d'une piézorésistances quand la pression est nulle.....	40
<b>Fig. III.2 :</b> Variation thermiques des piézorésistance parallèle et perpendiculaire quand la pression est nulle.....	45
<b>Fig.III.3 :</b> Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le premier demi-pont.....	45
<b>Fig. III.4:</b> Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le deuxième demi-pont.....	46
<b>Fig. III.5:</b> Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le pont. (Logiciel matlab).....	47
<b>Fig. III.6:</b> Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le pont. (Logiciel origin).....	47
<b>Fig. III.7 :</b> Variation thermiques des piézorésistance parallèle et perpendiculaire quand la pression est nulle.....	48
<b>Fig. III.8 :</b> Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le premier demi-pont.....	48
<b>Fig. III.9:</b> Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le deuxième demi-pont.....	49
<b>Fig. III.10:</b> Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le pont (logiciel matlab).....	49
<b>Fig. III.11:</b> Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le pont (logiciel origin).....	50
<b>Fig. III.12 :</b> Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le premier demi-pont.....	51
<b>Fig. III.13:</b> Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le deuxième demi-pont.....	51
<b>Fig. III.14:</b> Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le pont (logiciel matlab).....	52



---

## INTRODUCTION GENERALE

La pression est une notion physique fondamentale et une grandeur de mesure importante, on peut la voir comme une force rapportée à la surface sur laquelle elle s'applique. En tant que paramètre physique, la pression, tout comme la température, joue un rôle extrêmement important dans la plupart des domaines. Dans des secteurs aussi variés que la médecine, l'Automobile, thermodynamique. La plupart des applications industrielles modernes nécessitent un suivi strict de la pression dans la chaîne de fabrication ou dans la chaîne de contrôle. Ainsi les capteurs de pression se retrouvent comme étant le premier maillon d'un système de perception de contrôle ou de mesure.

Jusque dans les années 1970-1980 les capteurs de pression étaient de type électromécanique et réalisés à partir de machines-outils conventionnelles. Compte tenu du coût relativement élevé de ces capteurs, les principales applications étaient liées au secteur industriel.

A partir des années 1970, les capteurs miniatures en silicium ont profondément changé le marché des capteurs de pression grâce à leurs excellentes performances obtenues pour de faibles coûts de fabrication. En effet, par rapport aux capteurs de pression classiques, les capteurs en silicium présentent plusieurs avantages : une grande sensibilité à la pression, une fabrication en grande série, une petite taille, une faible consommation et une connexion facile avec les circuits intégrés MOS.

Développé dans les années 1960, le capteur de type piézorésistif en silicium a mis plus de trente ans pour diffuser dans tous les domaines d'activité (automobile, médical, instrumentation, environnement...). Il constitue aujourd'hui la majeure partie des capteurs de pression disponibles sur le marché.

Pour ce type de capteurs, à la surface d'une membrane carrée en silicium, quatre piézorésistances, de valeur nominale identique sont implantées. Elles sont électriquement connectées en pont de Wheatstone. La réponse électrique à l'excitation en pression devrait être alors une droite avec une tension d'offset nulle. En pratique aussi petite soit-elle, une tension existe à la sortie du montage même si aucune pression n'est appliquée 'tension d'offset'.

Ce travail est consacré à l'étude du comportement thermique de cette tension. Il est organisé comme suit :

Chapitre 1 : Généralités sur les capteurs.

Chapitre 2 : Capteurs de pression piézorésistif.

Chapitre 3 : Etude et simulation du comportement thermique de la tension d'offset.

# Chapitre 1

## I. INTRODUCTION

Assez peu de grandeurs physiques sont directement accessibles à la mesure. La grandeur la plus facilement mesurable est la tension électrique. Un capteur est un système permettant un couplage entre une grandeur physique à mesurer et une grandeur physique mesurable encore appelée signal de mesure. Dans ce chapitre nous allons présenter en détails les caractéristiques générales et métrologiques et conditionneuses de capteurs passifs.

## II. PRINCIPES FONDAMENTAUX

### II.1. Définitions et caractéristiques général

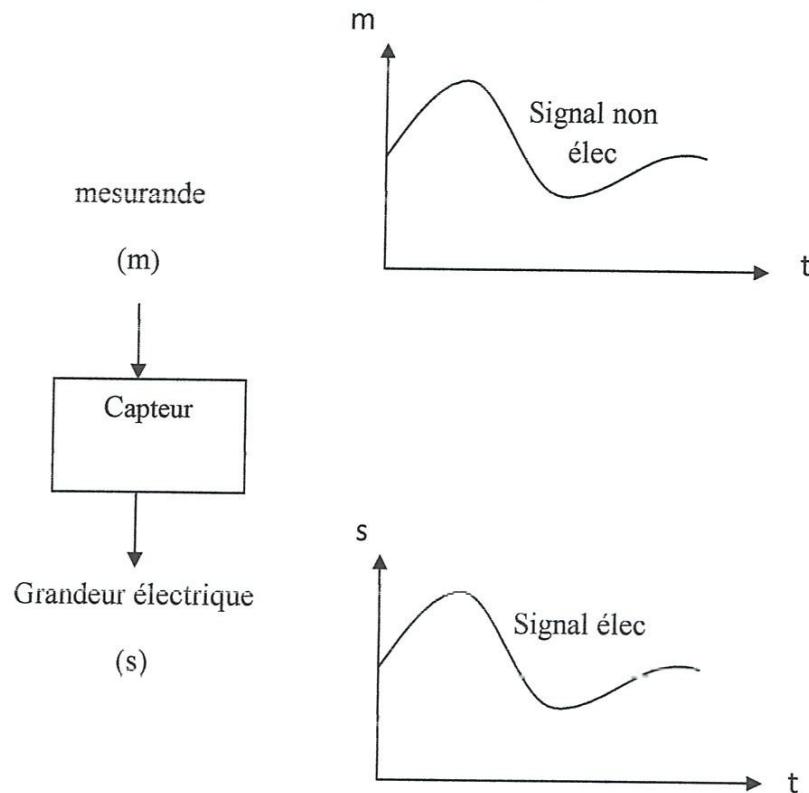
La Grandeur physique Object de la mesure : déplacement, température, pression, etc... est désignée comme le mesurande et représentée par  $m$ ; l'ensemble des opérations expérimentales qui concourent à la connaissance de la valeur numérique du mesurande constitue son mesurage. Lorsque le mesurage utilise des moyens électroniques de traitement du signal, il est nécessaire de produire à partir du mesurande une grandeur électrique qui en soit une représentation aussi exacte que possible : ceci signifie que la grandeur électrique et ses variations apportent toute l'information nécessaire à la connaissance de la mesurande. Le capteur est le dispositif qui soumis à l'action d'un mesurande non électrique présente une caractéristique de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) désignée par  $s$  et qui est fonction du mesurande:  $s = F(m)$

- $s$  est la grandeur de sortie ou réponse du capteur
- $m$  est la grandeur d'entrée ou excitation.

La mesure de  $s$  doit permettre de connaître la valeur de  $m$  (Fig. I. 1). la relation:  $s = F(m)$  résulte dans sa forme théorique des lois physiques qui régissent le fonctionnement du capteurs et dans son expression numérique de sa construction (géométrique, dimension), des matériaux qui le constituent et éventuellement de son environnement et de son mode d'emploi (température, alimentation). Pour tout capteur la relation :  $s = F(m)$  sous la forme numériquement exploitable est explicitée par étalonnage: pour un ensemble de valeur de  $m$  connues avec précision, on mesure les valeurs correspondantes de  $s$ .

Pour les raisons de facilité d'exploitation on s'efforce de réaliser le capteur en sorte qu'il établisse une relation linéaire entre les variations  $\Delta s = S \cdot \Delta m$

$S$  est la sensibilité du capteur [1].



**Figure I.1 :** Exemple dévolution d'un mesurande  $m$  et de la réponse  $s$  correspondante du capteur [2].

## II.2. Classification des capteurs

La nature des phénomènes physiques mis en jeu dans le fonctionnement des capteurs permet d'en distinguer deux types : les capteurs actifs et les capteurs passifs

### II.2.1. Capteurs passifs

Il s'agit généralement d'impédance dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée. La variation d'impédance résulte : soit d'une variation de dimension du capteur, c'est le principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteurs de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile, soit d'une déformation résultante de force ou de grande  $s$ 'y ramenant, pression accélération (armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensomètre liée à une structure déformable) [3].

Grandeur physique à mesurer	Caractéristique sensible	Matériaux utilisés
Température	Température	Métaux : platine, nickel, cuivre
Très basse température	Constante diélectrique	Verre
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité	Alliage de Nickel,
Déformation	Perméabilité magnétique	Alliage ferromagnétique
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnéto résistants
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

**Tableaux. I.1:** Capteurs passifs.

On remarque la prépondérance des capteurs basés sur la résistivité. Le capteur passif ne délivre pas immédiatement un signal électrique; en effet les variations d'impédances ne sont mesurables que par les modifications du courant ou de la tension qu'elles entraînent dans un circuit alimenté par une source extérieure: donc pour fonctionner un capteur passif on aura besoin d'un circuit électrique appelé conditionneur du capteur passif.

### II.2.2. Capteurs actifs

Un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion énergie électrique de la forme d'énergie propre à la grandeur physique à prélever, énergie thermique, mécanique ou de rayonnement [3].

#### ➤ *Effet thermoélectrique*

Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente dont les jonctions sont à des températures  $T_1$  et  $T_2$  est le siège d'une force électromotrice ( $T_1, T_2$ ). Application: détermination à partir de la mesure de  $e$  d'une température inconnue  $T_1$  lorsque  $T_2$  ( $0^\circ\text{C}$  par exemple) est connue. (Fig. I.2a)[3].

#### ➤ *Effet pyroélectrique*

Certains cristaux dits pyroélectriques, le sulfate de triglycine par exemple, ont une polarisation électrique spontanée qui dépend de leur température. Application : un flux de rayonnement lumineux absorbé par un cristal pyroélectrique élève sa température ce qui entraîne

une modification de sa polarisation qui est mesurable par la variation de tension aux bornes d'un condensateur associé (Fig. I.2b) [3].

➤ **Effet piézo-électrique**

L'application d'une force et plus généralement d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézo-électriques, le quartz par exemple, entraîne une déformation qui suscite l'apparition de charges électriques égales et de signes contraires sur les faces opposées.

Application : mesure de forces ou de grandeurs s'y ramenant (pression, accélération) à partir de la tension que provoquent aux bornes d'un condensateur associé à l'élément piézo-électrique les variations de sa charge. (Fig. I.2c)[1].

Grandeur physique à mesurer	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Température	Pyroélectricité	Charge
Flux de rayonnement optique	Photo-émission	Courant
Flux de rayonnement optique	Effet photovoltaïque	Tension
Flux de rayonnement optique	Effet photo-électrique	Tension
Force ou pression	Piézo-électrique	Charge
Accélération ou vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant) ou Courant	Effet Hall	Tension

**Tableau I. 2:** Capteurs actifs.

➤ **Effet d'induction électromagnétique**

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ d'induction fixe, il est le siège d'une f.é.m. proportionnelle à sa vitesse de déplacement. Application : la mesure de la f.é.m. d'induction permet de connaître la vitesse du déplacement qui est à son origine (Fig. I.2d) [1].

➤ **Effets photoélectriques**

On en distingue plusieurs, qui diffèrent par leurs manifestations mais qui ont pour origine commune la libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement

---

lumineux ou plus généralement électromagnétique, dont la longueur d'onde est inférieure à une valeur seuil, caractéristique du matériau [3].

➤ ***Effet photoémissif***

Les électrons libérés sont émis hors de la cible éclairée et forment un courant collecté par application d'un champ électrique [1].

➤ ***Effet photovoltaïque***

Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction de semi-conducteurs P et N illuminée ; leur déplacement dans le champ électrique de la jonction modifie la tension à ses bornes[1].

➤ ***Effet photo électromagnétique***

L'application d'un champ magnétique perpendiculaire au rayonnement lumineux provoque dans le matériau éclairé l'apparition d'une tension électrique dans la direction normale au champ et au rayonnement.

Applications : Les effets photoélectriques sont à la base de méthodes de mesure des grandeurs photométriques d'une part, et ils assurent d'autre part, la transposition en signal électrique des informations dont la lumière peut être le véhicule (Fig. I.2e) [3].

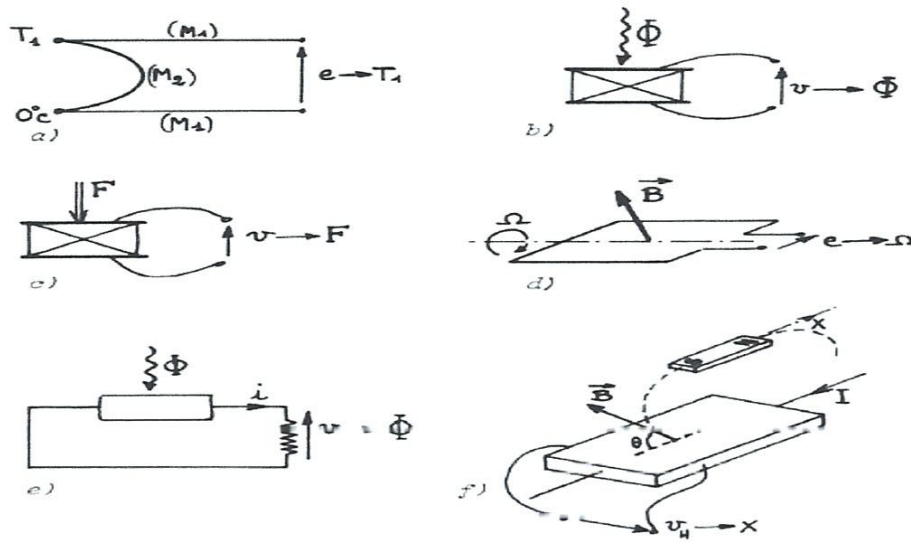
➤ ***Effet Hall***

Un matériau, généralement semi-conducteur et sous forme de plaquette, est parcouru par un courant  $I$  et soumis à une induction  $B$  faisant un angle  $\theta$  avec le courant. Il apparaît, dans une direction perpendiculaire à l'induction et au courant une tension  $V_H$  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.

Application : un aimant lié à l'objet dont on veut connaître la position détermine les valeurs de  $B$  et  $\theta$  au niveau de la plaquette : la tension  $V_H$ , qui par ce biais est fonction de la position de l'objet en assure donc une traduction électrique (Fig. I.2f) [1].



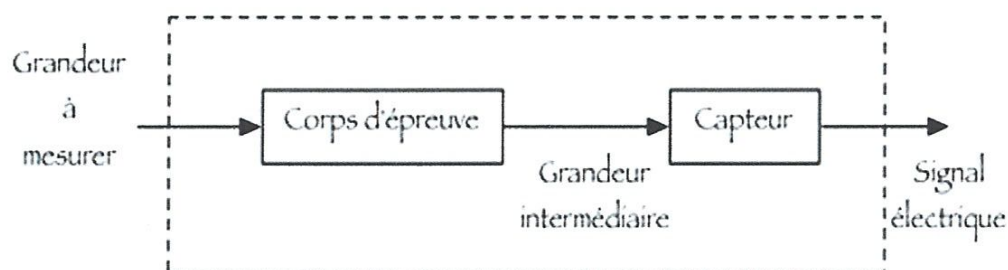
**Figure I.2:** Exemples d'application d'effets physiques à la réalisation de capteurs actifs: (a) thermoélectricité, (b) pyroélectricité, (c) piézoélectricité, (d) induction électromagnétique, (e) photoélectricité, (f) effet Hall [2].

### II.3. Capteurs intégrés

Pour des raisons de coût ou de facilité d'exploitation on peut être amené à utiliser un capteur, non pas sensible à la grandeur physique à mesurer, mais à l'un de ses effets. Le corps d'épreuve est le dispositif qui, soumis à la grandeur physique à mesurer, produit une grandeur directement mesurable par le capteur [4].

En mécanique notamment, la conversion de  $m$  en  $s$  n'est pas directe. Par exemple, la mesure d'une force nécessite de l'appliquer à un solide déformable auquel sera fixé un capteur de déformation. Ce solide déformable, et plus généralement tout corps intermédiaire entre le capteur et le mesurande, constitue le corps d'épreuve.

L'ensemble formé par le corps d'épreuve et le capteur constitue un capteur composite.



**Figure I.3:** Structure d'un capteur composite [2].



## II.4. Grandeurs d'influence

La fonction  $F(m)$  dépend souvent d'autres grandeurs physiques, propres à l'environnement du capteur, en plus de "m" ; Or, ces grandeurs qui ne font pas objet de la mesure peuvent influencer négativement sur la réponse du capteur en introduisant notamment des erreurs. Ces grandeurs sont appelées "grandeurs d'influence". D'où la définition ci-après :

On appelle grandeur d'influence toute grandeur physique parasite à laquelle la réponse du capteur peut être sensible.

Si l'on désigne par  $g_1, g_2, \dots, g_n$  les grandeurs d'influence, la relation  $s=F(m)$  qui correspond au cas idéal devient :  $s = F(m, g_1, g_2, \dots, g_n)$

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 des contraintes et des déformations de certaines parties du capteur ce qui a pour effet de perturber la réponse du capteur.
- L'humidité à laquelle certaines propriétés électriques sont sensibles risque d'altérer l'isolation électrique à l'intérieur du capteur, ou entre le capteur et son environnement.
- Les champs magnétiques variables ou statiques, la tension d'alimentation sont d'autres grandeurs d'influence qui peuvent avoir une influence néfaste sur le signal de mesure.

Pour remédier à ces erreurs de mesure introduites par les grandeurs d'influence, il est nécessaire :

- Soit de réduire leurs importances au niveau du capteur en le protégeant par un isolement adéquat (supports antivibratoires, blindage magnétique,...).
- Soit de stabiliser les grandeurs d'influence à des valeurs parfaitement connues et d'étalonner le capteur dans ces conditions de fonctionnement (enceinte thermostatée, source d'alimentation régulée, ...).
- Soit d'utiliser des montages qui permettent de compenser l'influence des grandeurs parasites (pont de Wheatstone,...) [1].

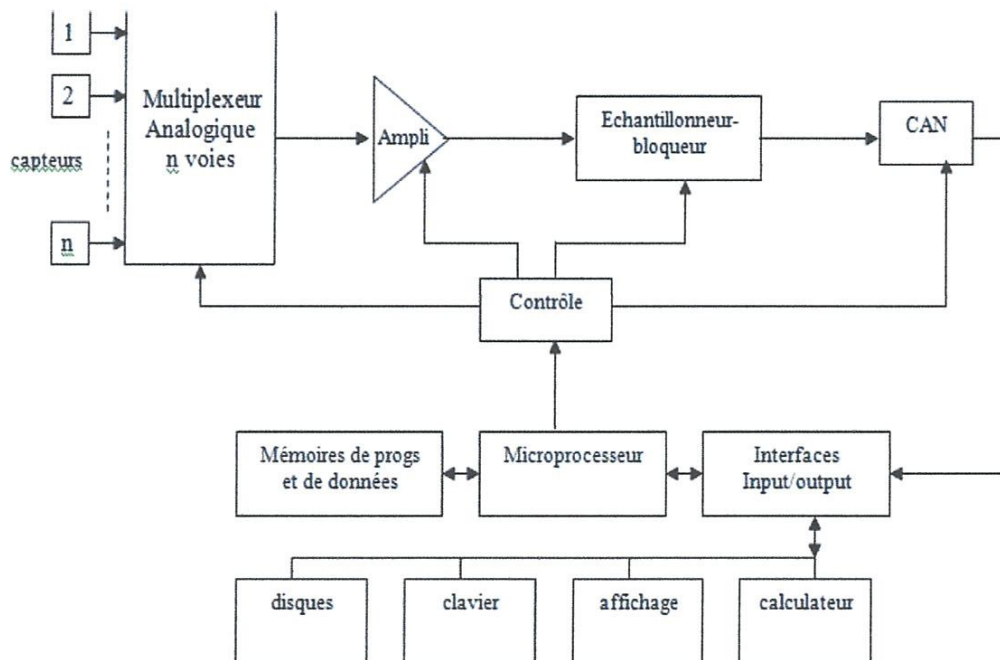
## II.5. Chaîne de mesure

Généralement, le signal "s" n'est pas directement utilisable. On appelle chaîne de mesure l'ensemble des circuits ou dispositifs, y compris le capteur, qui rendent possible dans les meilleures conditions la détermination précise de la valeur du mesurande.

La chaîne de mesure a donc pour rôle d'optimiser l'acquisition et le traitement du signal de mesure en amplifiant, en adaptant, en convertissant, en linéarisant, en numérisant... le signal avant sa lecture sur le support de sortie, qui peut être :

- Un appareil à cadre mobile.
- Un enregistreur analogique.
- Un afficheur.

La figure 1.4 donne un exemple de constitution d'une chaîne de mesure [1].



**Figure I.4:** Constitution d'une chaîne de mesure [1].

### ➤ **Le multiplexeur**

Lorsque l'acquisition des données porte sur plusieurs mesurandes, le multiplexeur permet la sélection d'un canal afin d'aiguiller son signal vers les dispositifs de traitement. La sélection d'une voie s'effectue par son adresse.

### ➤ **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).

➤ ***Le calculateur***

C'est le chef d'orchestre de la chaîne de mesure, il délivre les séquences de commande activant chacun des blocs de circuit de la chaîne :

- La sélection d'une voie d'entrée par l'envoi d'une adresse au multiplexeur;
- La fixation du gain de l'amplificateur programmable;
- L'échantillonnage puis le blocage du signal;
- Le déclenchement de la conversion analogique/numérique;
- La lecture et l'affichage de la donnée numérique dès qu'est reçu le signal de fin de conversion du CAN

### **III. CARACTERISTIQUE METROLOGIQUE**

Le capteur, premier élément de la chaîne de mesure est la source déterminante du signal électrique que le reste de la chaîne doit traiter et exploiter. L'adaptation du capteur et de la chaîne de mesure implique que celle-ci n'ajoute pas au signal initial des incertitudes ou limitations supérieures à celles apportées par le capteur. C'est donc de la qualité du capteur que dépendent en premier lieu d'un part, la plus ou moins bonne concordance entre valeur mesurée et valeur vraie du mesurande, et d'autre part, les limites de l'incertitude sur la valeur mesurée [1].

#### **III.1. Erreurs de mesure**

Les seuls mesurandes dont la valeur est parfaitement connue sont les grandeurs étalons puisque leur valeur est fixée par convention. La valeur de tout autre mesurande ne peut être connue qu'après traitement par une chaîne de mesure. C'est la valeur vraie du mesurande qui détermine l'excitation du capteur, mais l'expérimentateur n'a accès qu'à la réponse globale de la chaîne de mesure : **valeur mesurée**. L'écart entre valeur mesurée et valeur vraie est l'erreur de mesure : **Erreur de mesure = valeur mesurée – valeur vraie**.

L'erreur de mesure est due en particulier aux imperfections de la chaîne de mesure qui dégradent l'information du signal au cours de son traitement. L'erreur de mesure ne peut être qu'estimée : la valeur vraie du mesurande ne peut donc être connue. Cependant, une conception rigoureuse de la chaîne de mesure permet de réduire l'erreur de mesure et donc l'incertitude sur la valeur vraie [1].

On distingue les erreurs systématiques des erreurs accidentales car elles ont des origines et des conséquences sur la mesure très différentes.

### **III.1.1. Erreurs systématiques**

L'erreur systématique est toujours due à une mauvaise connaissance ou à une mauvaise utilisation du capteur. L'erreur systématique se détecte en comparant les valeurs moyennes d'un même mesurande, données par deux capteurs différents [5].

Les causes les plus fréquentes d'erreur systématique sont les suivantes :

- **Erreurs sur la valeur d'une grandeur de référence :** Exemple : décalage du zéro d'un appareil de mesure à déviation. Ce type d'erreur peut être réduit par la vérification soignée des appareillages associés.
- **Erreurs sur les caractéristiques du capteur :** Exemple : modification de la courbe d'étalonnage par suite de vieillissement. Le réétalonnage fréquent du capteur permet de réduire ce type d'erreurs.
- **Erreurs dues au mode ou aux conditions d'emploi :** Parmi ce type d'erreurs on peut citer : l'erreur de rapidité (non attente du régime permanent pour effectuer une mesure), l'erreur de finesse (modification du mesurande par le capteur lui-même).
- **Erreurs dans l'exploitation des données brutes de mesure :** Ces erreurs font qu'on apprécie mal la correction qu'il faut apporter aux mesures brutes afin d'en obtenir une valeur plus approchée de la valeur vraie.

### **III.1.2. Erreurs accidentales**

Ce sont des erreurs dont on peut connaître l'origine sans que cette connaissance permette de prévoir leurs valeurs. Étant de type aléatoire leur évaluation ne peut être que statistique (estimation).

Les causes possibles de ces incertitudes sont :

- **Erreurs liées aux imperfections intrinsèques des caractéristiques instrumentales :**

Parmi les erreurs de ce type on distingue :

---

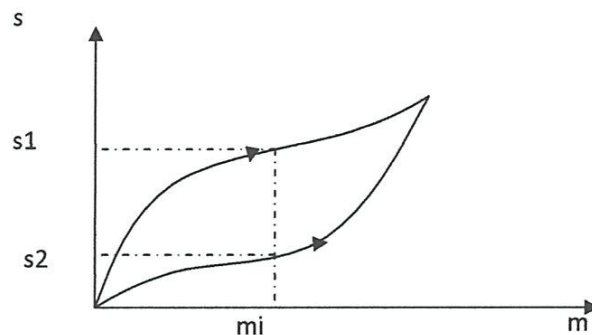
- L'erreur de mobilité  $\varepsilon_m$ : en dessous de certaine valeur, les variations du mesurande n'entraînent pas de variation détectable du signal électrique fourni par le capteur. L'erreur de mobilité est spécifiée comme la variation maximale du mesurande qui n'entraine pas de variation détectable de la grandeur de sortie du capteur.

- L'erreur de lecture d'un appareil de déviation  $\varepsilon_l$ : l'origine de ce type d'erreur est inhérent soit à l'opérateur humain, soit à l'appareil lui-même.

Ces deux erreurs définissent l'erreur relative de résolution d'un appareil qui est la variation minimale du mesurande mesurable avec un appareillage donné :  $\varepsilon_r = \sqrt{\varepsilon_m^2 + \varepsilon_l^2}$ .

- L'erreur d'hystérésis  $\varepsilon_h$ : Il y a phénomène d'hystérésis lorsque le résultat de la mesure dépend de la précédente mesure.

- L'erreur d'hystérésis est spécifiée comme étant la moitié de l'écart maximum des valeurs de la grandeur de sortie correspondant à une valeur de mesurande, selon que cette dernière est obtenue par valeur croissance ou décroissance.  $\varepsilon_h = \frac{\Delta S}{2}$



**Figure I.5 :** Erreur d' hystérésis.

- L'erreur de quantification  $\varepsilon_q$ : dans le cas d'un convertisseur Analogique/Numérique l'opération de quantification attribue une valeur unique à l'ensemble des valeurs analogiques comprises dans une plage du mesurande correspond à un bit de poids le plus faible (L.S.B).

L'incertitude maximale est  $\varepsilon_q = \pm \frac{1}{2} LSB$  .

➤ **Erreurs dues à des signaux parasites aléatoires :** Bruit de fond, induction électromagnétique parasite, fluctuations des tensions d'alimentations.

➤ **Erreurs dues à des grandeurs d'influence:** Elles se produisent dans le cas où les grandeurs d'influence n'ont pas été prises en considération lors des opérations d'étalonnage.

**Remarque :** Contrairement aux erreurs systématiques, les erreurs aléatoires ne peuvent être annulées, mais on doit cependant les réduire, soit en utilisant des dispositifs de protection, tels

que régulation des forces électromotrices, stabilisation de la température, isolation mécanique, blindage électromagnétique, soit en mettant en œuvre des procédures adaptées, telles que filtrage, traitement du signal etc... il est en tous cas toujours indispensable de les évaluer.

### **III.1.3. Fidélité – Justesse – Précision**

#### **➤ Fidélité**

C'est l'aptitude d'un appareil (capteur) à donner la même indication pour une même valeur de la grandeur mesurée. Elle se traduit par des résultats de mesurage groupés autour de leur valeur moyenne (figure I.6 a), mais pas obligatoirement proches de la valeur vraie, ce qui implique des erreurs accidentelles faibles. Les erreurs systématiques pouvant être très importantes [5].

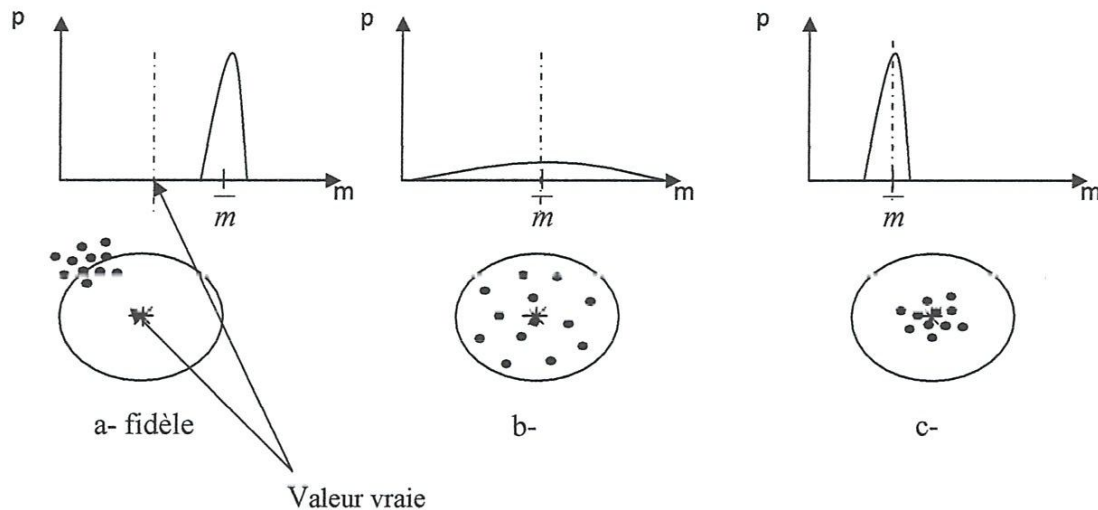
#### **➤ Justesse**

C'est l'aptitude d'un appareil (capteur) à donner des indications, qui en moyenne correspondent à la valeur vraie, ou conventionnellement vraie, de la grandeur mesurée. Elle se traduit par la proximité de la valeur vraie de la valeur la plus probable résultant des mesures effectuées sur la grandeur mesurée (figure I.6-b), ce qui implique des erreurs systématiques très réduites, les erreurs accidentelles pouvant être très élevées [5].

#### **➤ Précision**

C'est la caractéristique qui combine les deux qualités précédentes (figure I.6-c), pour qualifier l'aptitude d'un appareil (capteur) à donner des résultats qui sont proches de la valeur vraie ou conventionnellement vraie du mesurande. Elle se traduit par la simultanéité de la justesse et de la fidélité. La précision peut être spécifiée numériquement par l'erreur de précision qui, compte tenu de toutes les causes d'erreur délimite l'intervalle autour de la valeur mesurée, à l'intérieur duquel on est assuré de trouver la valeur vraie [5].

$\bar{m}$  : Valeur moyenne. P : Densité de probabilité.



**Figure I.6:** a) erreurs systématiques importantes, erreurs accidentelles réduites : appareillage fidèle mais non juste b) erreurs systématiques faibles, erreurs accidentelles importantes: appareillage juste mais non fidèle c) erreurs systématiques accidentelles faible : appareillage juste et fidèle donc précis.

### III.2. Etalonnage du capteur

L'étalonnage est l'opération qui établit la relation, sous forme graphique ou algébrique, entre le mesurande et la grandeur électrique de sortie. Cette relation peut dépendre non seulement du mesurande mais aussi des grandeurs d'influence. S'il n'y a pas de grandeurs d'influence, l'étalonnage est dit simple, dans le cas contraire il est dit multiple [1].

#### III.2.1. Etalonnage simple

C'est le cas des mesurandes statiques, c'est-à-dire à valeurs constantes. Exemple : mesure d'une température stable avec un thermocouple. On distingue deux méthodes possibles :

- L'étalonnage direct dans lequel les valeurs du mesurande sont issues d'étalons ou d'objets de référence pour lesquels le mesurande est connu avec une incertitude donnée [1].

- L'étalonnage par comparaison dans lequel on compare les mesures du capteur à étalonner avec celles provenant d'un capteur préalablement étalonné pris comme référence.

### **III.2.2. Etalonnage multiple**

L'existence de grandeurs d'influence, susceptible de varier au cours du mesurage, oblige à paramétrer l'étalonnage pour différentes valeurs de chacune de ces grandeurs [1].

### **III.2.3. Validité d'un étalonnage**

La validité d'un étalonnage est établie à l'aide des deux critères suivants :

- Répétabilité : C'est la qualité d'un capteur à donner les mêmes résultats chaque fois qu'il est utilisé dans les mêmes conditions : même mesure de, mêmes paramètres additionnels.
- Interchangeabilité : C'est la qualité d'une série de capteurs garantissant des résultats identiques, aux tolérances près, chaque fois qu'un quelconque capteur de cette série est utilisé dans les mêmes conditions [1].

## **III.3. Limites d'utilisation du capteur**

Pour une utilisation optimale d'un capteur, il est nécessaire que l'on sache quelles sont les diverses limites de son utilisation et quelles sont les conséquences qui découlent de leur dépassement. On distingue trois domaines d'utilisation du capteur :

### ➤ **Domaine nominal d'emploi**

Il correspond aux conditions normales d'utilisation du capteur. Les caractéristiques du capteur ne sont pas affectées ni par la variation du mesurande ni de celle des grandeurs d'influence tant qu'ils restent à l'intérieur de ce domaine.

### ➤ **Domaine de non détérioration**

Si le mesurande ou les grandeurs d'influence dépassent le domaine nominal d'utilisation tout en restant à l'intérieur de celui de non détérioration, les caractéristiques du capteur risquent d'être modifiées. Cependant, cette modification est réversible, c.-à-d. qu'elle disparaît une fois que la grandeur physique qui l'a provoqué revient à l'intérieur du domaine nominal d'utilisation [1].



➤ **Domaine de non destruction**

Une fois que le mesurande ou les grandeurs d'influence dépassent le domaine de non détérioration tout en restant à l'intérieur de celui de non destruction, les caractéristiques métrologiques du capteur sont altérées d'une manière irréversible, c-à-d que toute nouvelle utilisation du capteur nécessite son réétalonnage de nouveau.

➤ **Etendue de mesure**

Elle correspond en général au domaine nominal d'emploi. Cependant, elle peut être plus réduite ou plus étendue selon la précision demandée.

La figure 2-4 donne l'allure des différents domaines d'emploi d'un capteur.

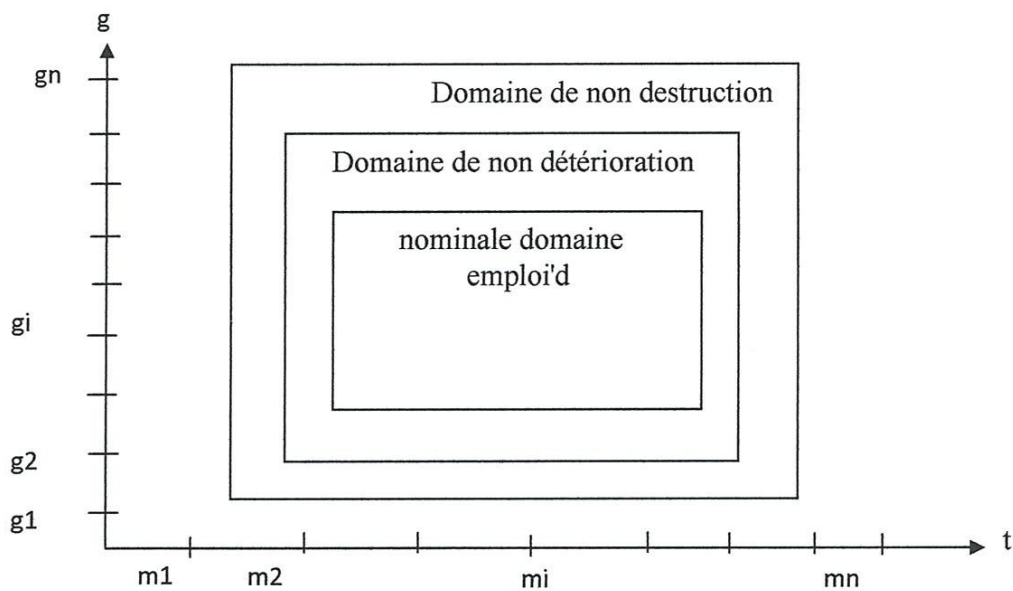


Figure I.7: Domaines d'utilisation d'un capteur.

### III.4.Sensibilité

La sensibilité  $S$  est définie, autour d'une valeur constante  $m_i$  du mesurande, par le rapport de la variation  $\Delta S$  de la grandeur de sortie à la variation  $\Delta m$  du mesurande qui lui a donné naissance :

$$S = \left[ \frac{DS}{Dm} \right]_{m = m_i}$$

La sensibilité est une caractéristique très importante pour l'exploitation et l'interprétation des mesures, sa valeur est fournie par le constructeur, son unité est déterminée à partir de l'ordre de grandeur des valeurs mises en jeu, ainsi que du principe de fonctionnement du capteur.

Exemple : pour une résistance thermométrique :  $[S] = \frac{\Omega}{^{\circ}\text{C}}$  .Pour un thermocouple :  $[S] = \frac{\mu\text{V}}{^{\circ}\text{C}}$

Pour des raisons de facilité d'exploitation il faut qu'il y ait une relation linéaire entre les variations  $\Delta s$  de la sortie et celles  $\Delta m$  de l'entrée :  $\Delta s = S \cdot \Delta m$

La réalisation de cette condition nécessite d'avoir une sensibilité  $S$  constante.

Dans le cas où des grandeurs physiques autres que le mesurande interviennent dans la détermination de la réponse du capteur leurs unités doivent apparaître dans l'expression de la sensibilité [1].

### III.5.Linéarité

Un capteur est dit linéaire, dans une plage déterminée du mesurande, si sa sensibilité  $y$  est indépendante de la valeur du mesurande.

Exemple : - soit une résistance au Platine de valeur  $R = 100 \Omega$  à  $T = 0^{\circ}\text{C}$  :

Pour :  $T = 0^{\circ}\text{C}$   $S = 0.39 \Omega/^{\circ}\text{C}$  alors que pour  $T = 130^{\circ}\text{C}$   $S = 0.38 \Omega/^{\circ}\text{C}$

Donc la variation de cette résistance en fonction de la température est approximativement linéaire pour  $T$  variant entre  $0^{\circ}\text{C}$  et  $130^{\circ}\text{C}$ .

Soit une thermistance d'un type donné de valeur  $R = 5000 \Omega$  à  $T = 25^{\circ}\text{C}$

Pour  $T = 0^{\circ}\text{C}$   $S = 835 \Omega/^{\circ}\text{C}$  alors que pour  $T = 130^{\circ}\text{C}$   $S = 3.8 \Omega/^{\circ}\text{C}$

Donc la variation de cette thermistance en fonction de la température est fortement non linéaire pour  $T$  variant de  $0^{\circ}\text{C}$  à  $130^{\circ}\text{C}$  [1].

#### *Remarques :*

- Quand la caractéristique de sortie d'un capteur n'est pas linéaire, la sensibilité dépend du point de fonctionnement de ce dernier.
- Quand la caractéristique de sortie d'un capteur est linéaire, la variation du signal de mesure est proportionnelle à la variation du mesurande qui lui a donné naissance. Il en résulte plus grande simplicité dans l'utilisation de ce capteur et donc de la détermination de la valeur numérique recherchée. Il existe des circuits de linéarisation qui permettent de linéariser un signal qui ne l'est pas.

➤ **Meilleure droite et écart de linéarité**

✓ **Meilleure droite**

Il est rare qu'un instrument de mesure possède une linéarité parfaite et cela en raison de l'imprécision des mesures et/ou des imperfections dans la réalisation du capteur, donc les points expérimentaux ne sont pas tous alignés. Cependant, il est possible de calculer, à partir de ces points, l'équation d'une droite qui en est la représentation la plus proche, elle est appelée meilleure droite. Cette droite est telle que *la somme des carrés des écarts  $\varepsilon$  des divers points expérimentaux à cette droite soit minimale.*

Si l'équation de la meilleure droite est donnée par :

$$s = a.m + b$$

alors après un certain raisonnement de minimisation du critère précédent au sens des moindres carrés on trouve les expressions suivantes de a et de b :

$$a = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N s_i \cdot m_i - \sum_{i=1}^N s_i \cdot \sum_{i=1}^N m_i}{N \cdot \sum_{i=1}^N m_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N m_i \right)^2} \quad b = \frac{\sum_{i=1}^N s_i \cdot \sum_{i=1}^N m_i^2 - \sum_{i=1}^N s_i \cdot m_i \sum_{i=1}^N m_i}{N \cdot \sum_{i=1}^N m_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N m_i \right)^2}$$

N : nombre des points expérimentaux.

La figure II.4 donne un exemple de la meilleure droite.

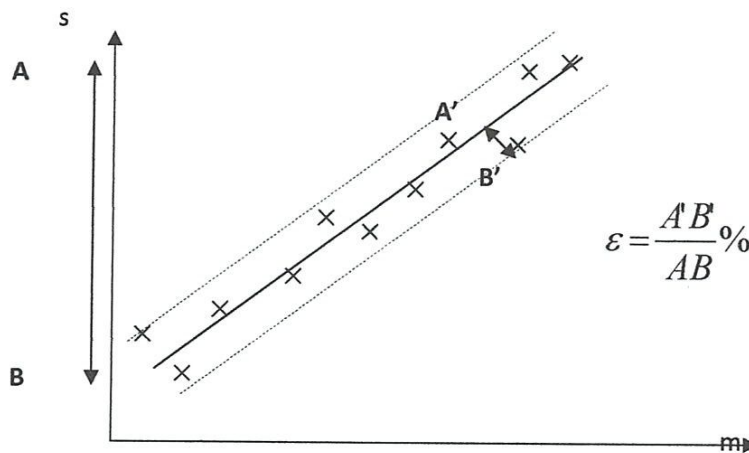


Figure I.8: Meilleure droite - calcul de l'écart de linéarité.

✓ **Ecart de linéarité**

L'écart de linéarité est la spécification qui permet d'apprécier la plus ou moins bonne linéarité d'une courbe d'étalonnage : il est défini à partir de l'écart maximum entre la courbe

d'étalonnage et la meilleure droite, cet écart étant exprimé en % de la valeur maximale de la grandeur de sortie dans la plage considérée du mesurande (Fig I.8).

### III.6. Rapidité -temps de réponse

La rapidité est la spécification d'un capteur qui permet d'apprécier de quelle façon la grandeur de sortie suit dans le temps les variations du mesurande. La rapidité est donc liée au temps nécessaire pour que la contribution du régime transitoire à la grandeur de sortie devienne négligeable dans des conditions de précision définies.

La grandeur utilisée pour définir quantitativement la rapidité est **le temps de réponse** : qui est l'intervalle de temps qui s'écoule après une variation brusque (échelon) du mesurande jusqu'à ce que la variation de la sortie du capteur ne diffère plus de sa valeur finale d'un écart supérieur à une limite  $\varepsilon$  % conventionnellement fixée. Un temps de réponse doit donc toujours être spécifié avec l'écart  $\varepsilon$  % auquel il correspond :  $t_r(\varepsilon \%)$ .

Un capteur est d'autant plus rapide que son temps de réponse est plus court.

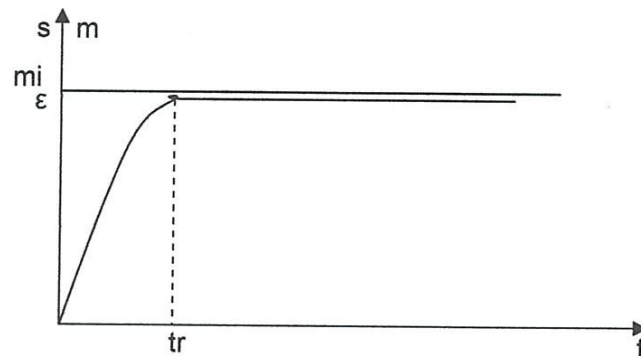


Figure I.9: Temps de réponse

### III.7. Discrétion ou finesse

C'est une spécification qui permet à l'utilisateur d'estimer la perturbation que le capteur et ses liaisons peuvent créer dans le milieu où s'effectue la mesure et donc influencer sur la valeur du mesurande.

Pour certains types de capteurs, finesse et sensibilité sont des qualités antagonistes. Il peut y avoir un compromis à faire. Par contre finesse et rapidité sont des qualités, en général évoluent dans le même sens [1].

**Exemple :**

Si on introduit un capteur de niveau pour mesurer la hauteur d'une colonne d'eau contenue dans un récipient, il ne faudrait pas que le capteur fasse augmenter d'une quantité considérable la hauteur de la colonne d'eau, ce qui fausserait la mesure

**IV. CONDITIONNEURS DES CAPTEURS PASSIFS****IV.1. Caractéristiques générales des conditionneurs de capteurs passifs****IV.1.1. Principaux types 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 la forme d'un signal électrique qu'en associant au capteur une source de tension  $e_s$  ou de courant  $i_s$  et généralement d'autres impédances  $Z_L$  constituant alors le conditionneur du capteur.

On peut distinguer deux groupes principaux de conditionneurs selon qu'ils transfèrent l'information liée aux variations d'impédance du capteur :

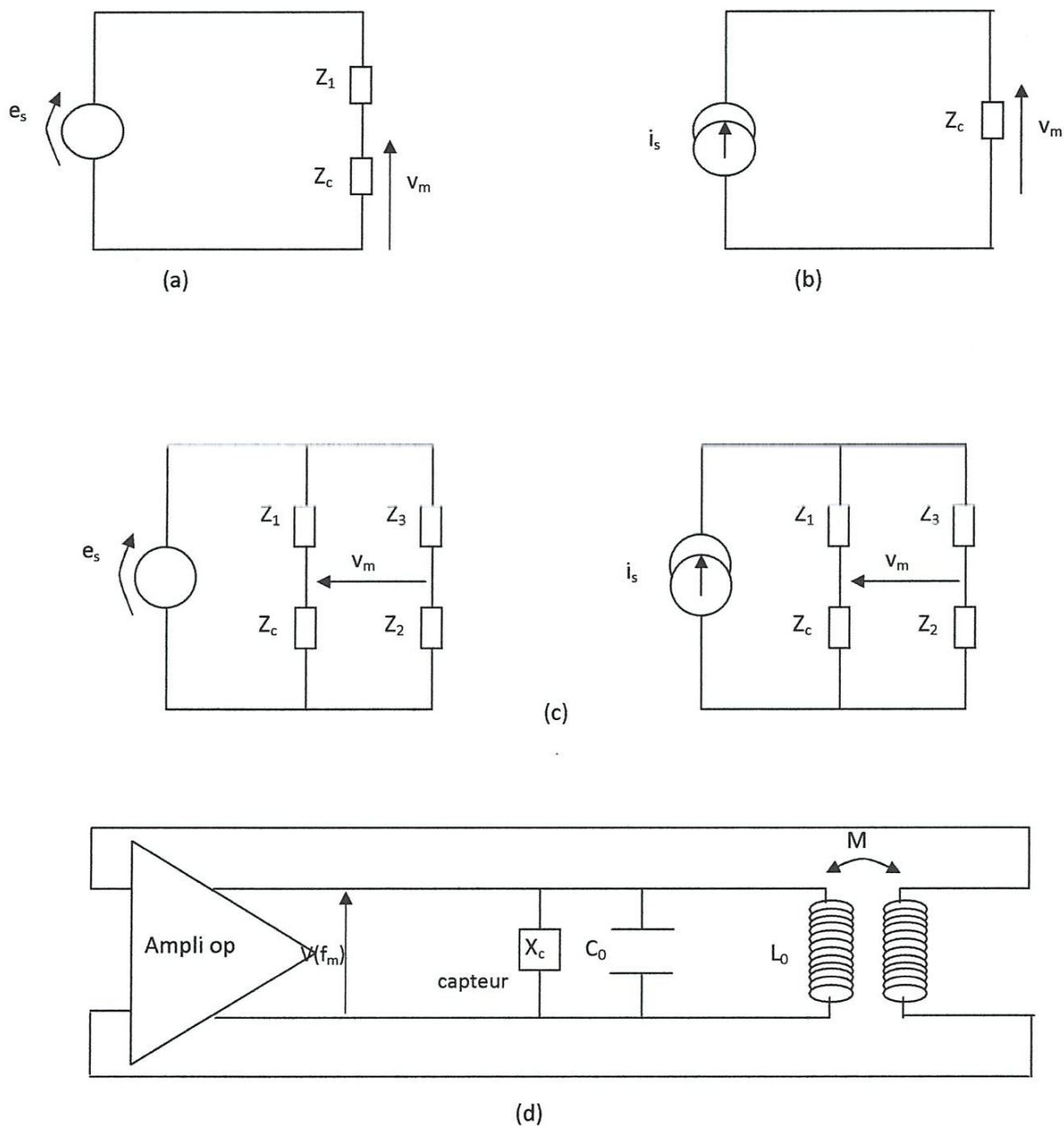
Soit sur l'amplitude du signal de mesure :  $V_m = e_s F(Z_k, Z_c)$ , c'est le cas des *montages potentiométriques* et des *ponts*.

Soit sur la fréquence du signal de mesure :  $f_m = G(Z_k, Z_c)$ , il s'agit alors d'*oscillateurs*.

➤ **Le montage potentiométrique** : (Fig. I.10.a) présente l'intérêt de la simplicité mais son inconvénient majeur est sa sensibilité aux parasites ; l'alimentation par source de courant (Fig. I.10.b) peut être considérée comme un cas limite ( $Z_1 \gg Z_c$ ) du montage potentiométrique dont elle améliore la protection vis-à-vis des parasites.

➤ **Le pont** : (Fig. I.10.c) qui est un double potentiomètre permet une mesure différentielle réduisant d'une façon considérable l'influence des parasites.

➤ **Les oscillateurs** : utilisés en conditionneurs peuvent être de type sinusoïdal (Fig. I.10.d) ou de relaxation ; ils délivrent un signal dont la fréquence est modulée par l'information ce qui lui assure une bonne protection contre les parasites, en particulier dans le cas de télémessure. En outre, la conversion de l'information sous forme numérique est facilitée puisqu'il suffit de faire un comptage de périodes.



**Figure I.10 :** Conditionneurs des capteurs passifs : (a) : montage potentiométrique, (b) : capteur alimenté par une source de courant, (c) : montages en ponts, (d) : oscillateur.

### IV.1.2. Qualités d'un conditionneur

#### ➤ Sensibilité et Linéarité

A la variation  $\Delta m$  du mesurande correspond une variation  $\Delta Z_c$  de l'impédance du capteur qui selon le type de conditionneur entraîne soit une variation de l'amplitude de la tension de mesure soit de sa fréquence. La sensibilité globale  $S_a$  de l'association du conditionneur et du capteur est :

\*dans le premier cas :

$$S_a = \frac{\Delta v_m}{\Delta m} \quad \text{soit :} \quad S_a = \frac{\Delta v_m}{\Delta Z_c} \cdot \frac{\Delta Z_c}{\Delta m}$$

\*dans le second cas :

$$S_a = \frac{\Delta f_m}{\Delta m} \quad \text{soit :} \quad S_a = \frac{\Delta f_m}{\Delta Z_c} \cdot \frac{\Delta Z_c}{\Delta m}$$

La sensibilité propre du conditionneur est, selon le cas :

$$\frac{\Delta v_m}{\Delta Z_c} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta f_m}{\Delta Z_c}$$

alors que la sensibilité du capteur est :

$$S = \frac{\Delta Z_c}{\Delta m}$$

Un conditionneur est linéaire si sa sensibilité propre est indépendante de  $Z_c$ . L'association d'un conditionneur linéaire et d'un capteur linéaire délivre un signal de mesure proportionnel aux variations du mesurande. Si le conditionneur n'est pas linéaire il peut être linéarisé en remplaçant l'un des composants fixes ( $Z_k$ ) par un second capteur qui travaille en fonctionnement push-pull avec le premier capteur [1].

#### **Exemple :**

On considère l'exemple d'un capteur résistif  $R_c$  et d'un conditionneur constitué de résistances  $R_k$  dont certaines sont sensibles au mesurande ; on peut écrire :

$$v_m = e_s \cdot F(R_k, R_c)$$

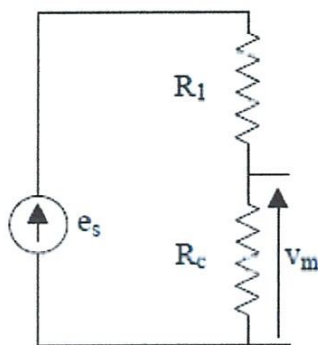
en prenant la dérivée par rapport à  $m$  :

$$\frac{dv_m}{dm} = \left( \sum_k \frac{\partial v_m}{\partial R_k} \cdot \frac{\partial R_k}{\partial m} + \frac{\partial v_m}{\partial R_c} \cdot \frac{\partial R_c}{\partial m} \right)$$

L'ensemble est linéaire à condition que :  $\left( \sum_k \frac{\partial v_m}{\partial R_k} \cdot \frac{\partial R_k}{\partial m} + \frac{\partial v_m}{\partial R_c} \cdot \frac{\partial R_c}{\partial m} \right) = \text{Constante}$ .

Dans le cas simple d'un potentiomètre constitué d'une résistance  $R_1$  et d'un capteur purement résistif  $R_c$  on aura :

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



$$\frac{\partial v_m}{\partial R_1} = e_s \cdot \frac{-R_c}{(R_1 + R_c)^2}, \quad \frac{\partial v_m}{\partial R_c} = e_s \cdot \frac{R_1}{(R_1 + R_c)^2}$$

et la sensibilité du montage est :

$$S_a = \frac{e_s}{(R_1 + R_c)^2} \left( R_1 \cdot \frac{dR_c}{dm} - R_c \cdot \frac{dR_1}{dm} \right)$$

en remplaçant  $R_1$  par un capteur semblable à  $R_c$  mais sur lequel le mesurande a une action opposée :

$$\frac{dR_c}{dm} = -\frac{dR_1}{dm} = S$$

il en résulte alors :

$$\frac{dR_c}{dm} + \frac{dR_1}{dm} = 0 \quad \text{soit : } R_1 + R_c = 2R_{c0} = \text{constante}$$

La sensibilité du montage est dans ces conditions  $S_a = \frac{e_s}{2R_{c0}} \cdot S$

**Remarque :** Le montage est linéaire dès lors que chacun des capteurs l'est.



Lorsque le capteur lui-même n'est pas linéaire, il est quelquefois possible de compenser sa non linéarité par une non linéarité opposée du conditionneur, l'ensemble ayant un fonctionnement qui est quasi linéaire, au moins dans une plage limitée du mesurande.

➤ **Compensation des grandeurs d'influence**

Si le capteur est sensible à une grandeur d'influence, température ou rayonnement par exemple, il est important de pouvoir éliminer du signal de mesure sa contribution aux variations de  $Z_c$ .

Si on prend l'exemple précédent :

$$v_m = e_s \cdot F(R_k, R_c)$$

La grandeur d'influence de valeur  $g$  pouvant affecter aussi bien certains composants du conditionneur que le capteur lui-même, une variation  $dg$  entraîne une variation  $dv_m$  de la tension de mesure :

$$\frac{dv_m}{dg} = \left( \sum_k \frac{\partial v_m}{\partial R_k} \cdot \frac{\partial R_k}{\partial g} + \frac{\partial v_m}{\partial R_c} \cdot \frac{\partial R_c}{\partial g} \right)$$

les évolutions de la grandeur d'influence n'ont aucun effet sur la tension de mesure lorsque la condition suivante est satisfaite :

$$\left( \sum_k \frac{\partial v_m}{\partial R_k} \cdot \frac{\partial R_k}{\partial g} + \frac{\partial v_m}{\partial R_c} \cdot \frac{\partial R_c}{\partial g} \right) = 0$$

si par exemple une seule des résistances  $R_k$  du conditionneur est rendue sensible à la grandeur d'influence et qu'elle est en outre, choisie identique à  $R_c$  :

$$\frac{dR_k}{dg} = \frac{dR_c}{dg}$$

il y a compensation des variations de la grandeur d'influence si :  $\frac{\partial v_m}{\partial R_k} = -\frac{\partial v_m}{\partial R_c}$ .

## IV.2. Montage potentiométrique

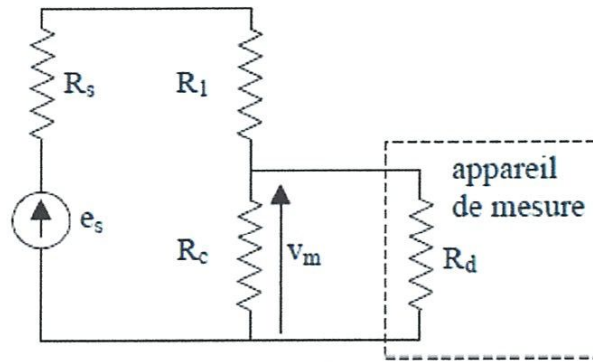


Figure I.11: Montage potentiométrique.

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

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

La tension aux bornes du capteur est indépendante de l'appareil de mesure à condition que sa résistance d'entrée  $R_d$  soit grande devant celle du capteur  $R_c$ , dans ce cas :

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

la tension  $V_m$  n'est pas une fonction linéaire de  $R_c$ .

### ➤ Linéarisation de la mesure afin d'obtenir $\Delta V_m$ proportionnel à $\Delta R_c$

#### • Solution 1 : Fonctionnement en « petits signaux »

Pour une variation du mesurande de  $m_0 \rightarrow m_0 + \Delta m$ , la résistance du capteur varie de  $R_{c0} \rightarrow R_{c0} + \Delta R_c$  et la tension mesurée  $V_m$  passe de  $V_{m0}$  à  $V_{m0} + \Delta V_m$  :

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

$$V_{m0} + \Delta V_m = e_s \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{R_{c0} + \Delta R_c + R_1 + R_S}$$

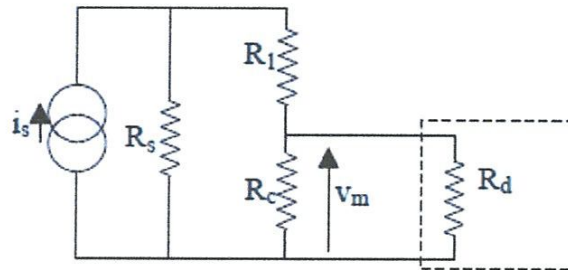
A condition que les variations du capteur soient négligeables devant les autres résistances du circuit, c'est-à-dire  $\Delta R_c \ll R_{c0} + R_1 + R_S$ , on a :

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

Dans ces conditions, la sensibilité du montage potentiométrique est maximale si on choisit  $R_1 + R_S = R_{c0}$ . Alors,

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

- **Solution 2 : Alimentation par une source de courant**

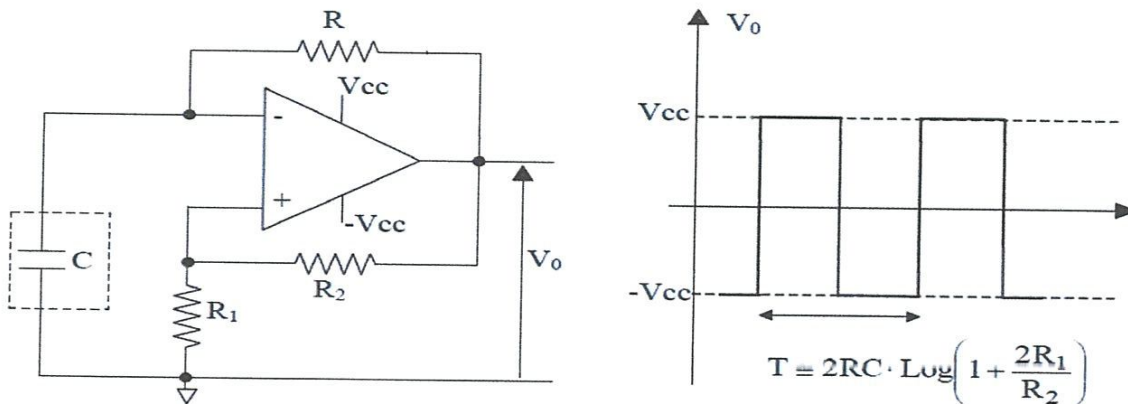


Le montage est alimenté par une source de courant, ayant une impédance interne très élevée  $R_S \gg R_{c0} + R_1$ . Dans ce cas, la linéarisation est immédiate puisque  $\Delta V_m = i_s \Delta R_c$

- **Solution 3 : Montage Push-Pull**

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 dite push-pull. On a alors :

$$V_m = V_{m0} + \Delta V_m = e_s \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{R_{c0} + \Delta R_c + R_{c0} - \Delta R_c + R_S}$$

**Exemple:**

La période des oscillations est directement reliée à la valeur de la capacité par la relation :

$$T = 2RC \log \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right)$$

**V.CONCLUSION**

Dans ce premier chapitre, nous avons donné des généralités sur les capteurs. Nous avons présenté les capteurs d'une manière générale

Le chapitre suivant nous avons présenté les capteurs de pression piézorésistif.

# Chapitre I

## I. INTRODUCTION

La pression occupe une place de première importance dans la plupart des applications industrielles modernes. C'est pourquoi il existe aujourd'hui une grande variété de capteurs de pression. Nous nous sommes intéressés aux capteurs de pression piézorésistif

## II. LA PRESSION

### II.1. définition de la pression

Un corps liquide ou gazeux enfermé dans un récipient, qu'il remplit entièrement exerce sur toutes les parois de celui-ci une force dite de pression.

La pression est une grandeur dérivée du système international. Elle est définie comme le quotient d'une force par une surface [6].

$$P = \frac{F}{S} \quad (\text{II.1})$$

P : pression en  $\text{N/m}^2$ .

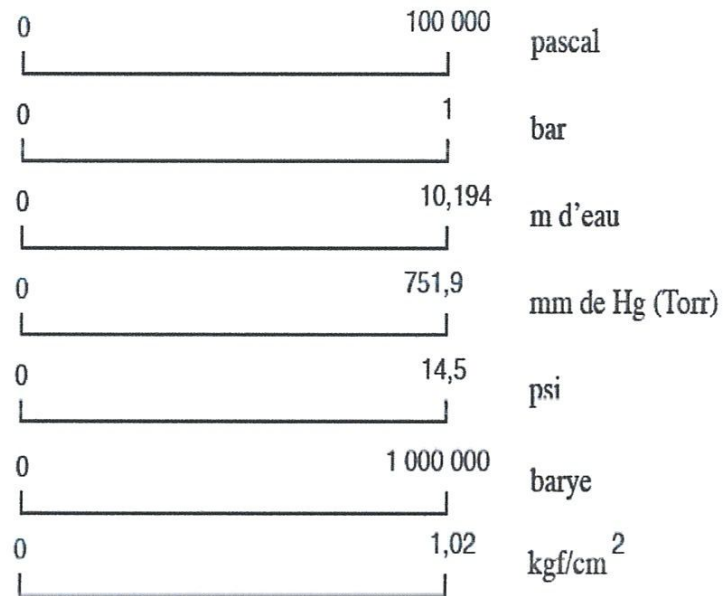
F : force en Newton.

S : surface en  $\text{m}^2$ .

Ce quotient est indépendant de l'orientation de la surface. La pression s'exerce perpendiculairement à la surface considérée.

### II.2. les différentes unités de pression

La relation  $p = dF/ds$  définit, à la fois, la pression et l'unité de pression en tant qu'unité dérivée. Cette unité, le pascal (Pa), correspond dans le Système International (S.I.) à une pression uniforme exerçant sur une surface de un mètre carré, une force totale de un newton. La pression d'un pascal étant relativement faible on utilise de préférence pour la mesure des pressions dans l'industrie son multiple le bar valant  $10^5$  pascals.



**FIGURE II.1:** Unités de pression.

### II.3. les différents types des pressions

Il existe plusieurs types des pressions parmi :

- ❖ La pression absolue : c'est la pression réelle.
- ❖ La pression atmosphérique (ou barométrique) : c'est la pression exercée par l'atmosphère sur la terre. Exemple : La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer, à 15 °C, est d'environ 1013 mbar.  
  
Donc la valeur de la pression atmosphérique décroît lorsque l'altitude augmente.
- ❖ La pression relative : c'est la différence de pression par rapport à la pression atmosphérique. Elle est le plus souvent utilisée dans les capteurs.
- ❖ Pression différentielle : c'est différence entre deux pressions. Une pression différentielle peut prendre une valeur négative.
- ❖ Le vide : il correspond théoriquement à une pression absolue nulle [6].

## II.4. techniques des capteurs de pression

- ❖ Capacitif : Une membrane se comportant comme l'une des plaques d'un condensateur est disposé en vis à vis de l'autre plaque et c'est la mesure de capacité qui est liée au phénomène pression. Ce concept est précis et sensible, robuste et insensible aux variations thermiques mais il demeure onéreux et ne permet pas de mesurer des pressions importantes.
- ❖ Inductif : La membrane induit une variation d'inductance dans un pont inductif ou un transformateur différentiel. La sortie électrique est de haut niveau et les échelles de mesure possibles peuvent être importantes. Instable en température, ce concept est fragile et supporte difficilement chocs et vibrations.
- ❖ Piézoélectrique : L'effort exercé sur un élément piézoélectrique : quartz, piézite de synthèse etc... Produit une tension électrostatique aux bornes de l'élément. Cette technologie, lorsque l'électronique est séparée, ne nécessite pas d'alimentation, les échelles de mesure peuvent être très importantes, les bandes passantes sont importantes et la tenue thermique très bonne. En contre partie, la sortie est faible, la précision toute relative et, surtout, ces capteurs ne mesurent pas la composante continue.
- ❖ Piézorésistif : Le phénomène pression exerce une contrainte sur un élément sensible créant une variation mesurable de résistance. Forte sensibilité, faible hystérésis, robustesse et tenue thermique sont les points forts de cette technologie. Le signal de sortie est en revanche faible et suivant les concepts, le capteur est plus ou moins complexe à réaliser.

Ce qui suit traite principalement des capteurs de pression piézorésistifs [6].

## III. CAPTEURS DE PRESSION PIEZORESISTIF

### III.1. généralités

De manière générale, un capteur de pression est un système constitué des deux parties :



- une partie détection que l'on peut appeler « cellule sensible » et une partie traitement de l'information par l'intermédiaire d'un circuit électronique que l'on peut appeler « circuit électronique de traitement » ou encore « circuit convertisseur ».
- La partie détection, est quant à elle, constituée d'un « corps d'épreuve » et d'un « Transducteur » qui transforme la déformation de ce corps d'épreuve en une grandeur physique, la plupart du temps électrique, Un capteur de pression peut donc être représenté par le schéma de la figure ci-dessous.

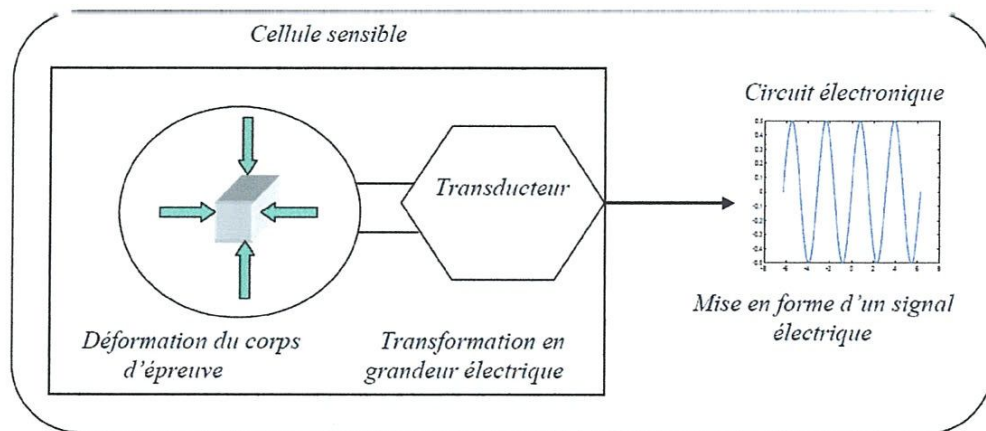


FIGURE II.2: schéma synoptique d'un capteur de pression piézorésistif [7].

## IV. CONSTRUCTION DE CAPTEUR DE PRESSION

### IV.1. membrane

#### IV.1.1-Le corps d'épreuve

Le corps d'épreuve est le plus souvent une membrane encadrée dont la forme dépend de l'application visée. Elle peut être rectangulaire, carré ou circulaire, d'épaisseur variable ou uniforme [7].

La membrane en silicium va être le siège de contraintes internes lorsqu'une pression  $P$  est appliquée à sa surface. A leur tour, ces contraintes vont agir sur la valeur de chacune des résistances du pont, selon leur position et géométrie respective.

La fonction d'amplification d'une membrane carrée apparaît à travers l'expression de la contrainte normale  $\sigma$  calculée au bord extrême de chaque côté :

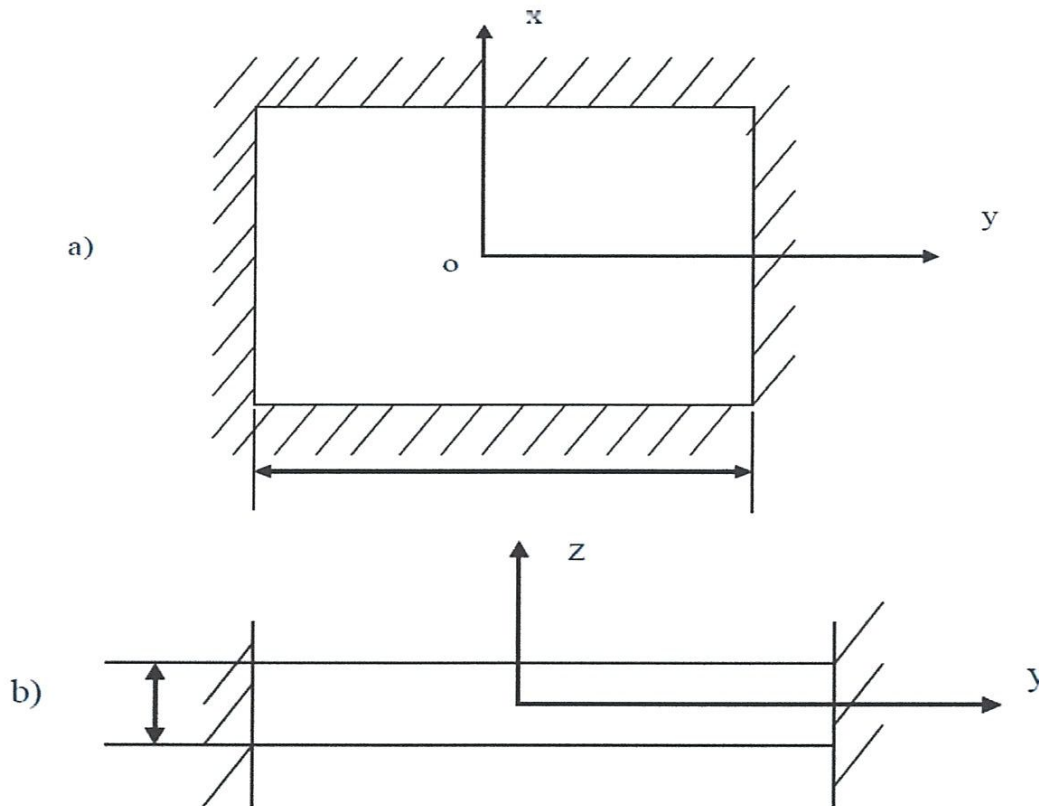
$$\sigma = \frac{5}{6} \left(\frac{a}{h}\right)^2 p \quad (\text{II.2})$$

Où  $a$  est la longueur du côté et  $h$  l'épaisseur de la membrane. Généralement,  $a$  est beaucoup plus grand que  $h$ , ce qui donne :  $\sigma \gg P$ . assurant ainsi la fonction d'amplification de la membrane.

Pour une membrane de surface  $S$  et d'épaisseur uniforme  $h$  totalement encadrée sur ses bords et dans le cas des faibles déflexions, celle ci est définie par

$$W(0,0) = K \frac{S^2}{h^3} P \quad (\text{II.3})$$

Où  $P$  représente la pression hydrostatique différentielle appliquée de chaque côté de la membrane;  $K$  est un facteur qui dépend des caractéristiques mécaniques du matériau et de la forme de la membrane. La déflexion au centre est donc directement proportionnelle à la pression [7].



**FIGURE II.3:** représentation schématique de la membrane.

a) en vue de dessus. b) vue en coupe [7].

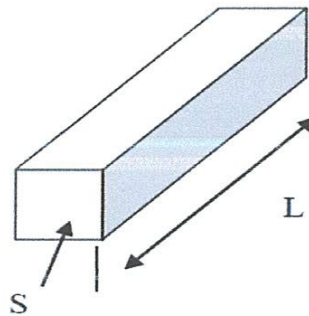
#### IV.1. 2. Transducteur

C'est une résistance semi-conducteur en (Si, Ge, Ga, As). L'utilisation du silicium permet d'obtenir des capteurs de petites dimensions, de sensibilité élevée et de cout modéré.

Il existe de très nombreux principes de transduction mais nous n'aborderons ici que les transducteurs les plus utilisés pour les capteurs de pression miniatures, c'est-à-dire les résistances.

Soit une résistance R de forme parallélépipédique constituée d'un matériau homogène de résistivité  $\rho_0$ . Sa valeur au repos est donnée par :

$$R_0 = \rho_0 \frac{L}{S} \quad (\text{II.4})$$



**Figure II.3:** Résistance R de forme parallélépipédique [7].

Où L et S représentent respectivement la longueur et la section de la résistance et  $\rho$  la résistivité du matériau.

L'application d'une contrainte (ou déformation) introduit une variation de résistance  $\Delta R$  [3].

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} \quad (\text{II.5})$$

Les deux derniers termes de la relation représentent les changements dimensionnels de la jauge ; ils sont prépondérants pour les métaux. Le premier terme représente une variation de résistivité qui est très largement dominant pour les semi-conducteurs: C'est l'**effet piézorésistif** [8].

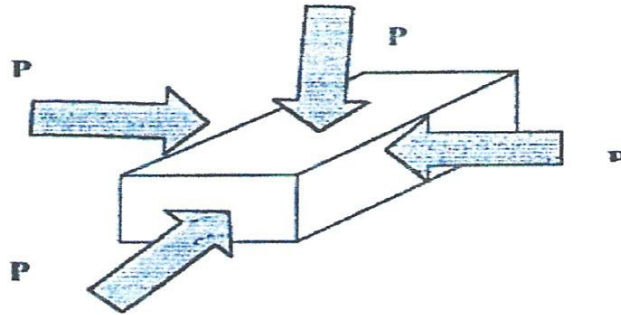


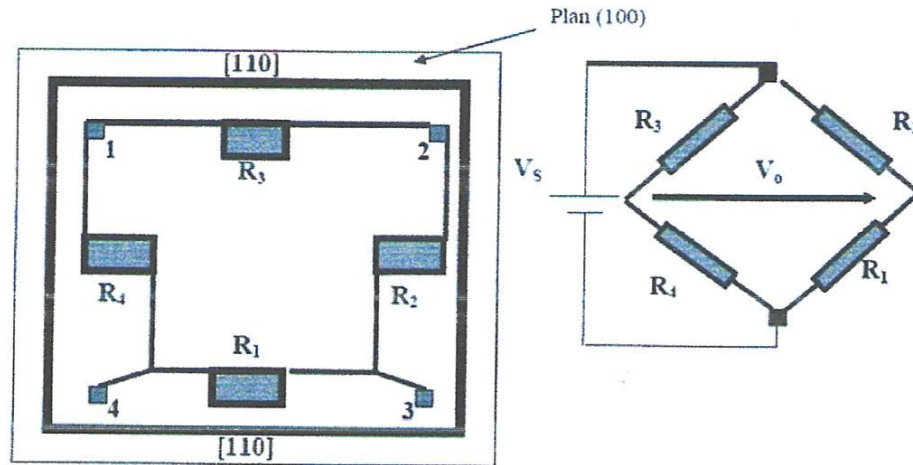
Figure II.4: La piezoresistance attaquée par des pressions.

Les contraintes dues à l'application d'une pression sont maximales au milieu du bord encasturé de la membrane; pour avoir une meilleure sensibilité à la pression il est clair que l'implantation des jauges sera au milieu des bords de la membrane [8].

## V. PRINCIPE

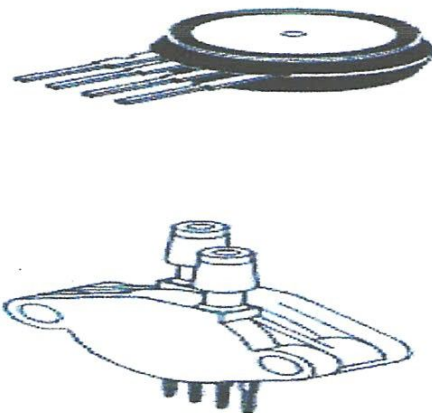
A la surface d'une membrane carrée en silicium, quatre piézorésistances, de valeur nominale identique sont implantée. Elles son électriquement connectées en pont de Wheatstone.

L'application d'une pression provoque des contraintes internes dans la membrane, ce qui modifier, à son tour, la valeur de chacune des quatre résistances. Ceci conduit à la naissance d'une tension. La mesure de cette tension permet d'estimer la valeur de la pression [8].



**Figure II. 5:** Représentation des quatre piézorésistances implantées à la surface de la membrane de silicium et connectées en pont de Wheatstone [7].

## VI. EXEMPLE D'UN CAPTEUR PRESSION PIEZORESISTIVE MOTOROLA SERIES MPX7050



## VII. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre les capteurs de pression piézorésistifs à base de Silicium. Le capteur exposé ici est constitué par quatre jauges en silicium implantées sur une membrane, également en silicium, et connectées électrique en pont de Wheatstone.

Malgré leur performance, les capteurs de pression piézorésistifs sont extrêmement sensibles à la température .

# Chapitre II

## I.INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons une approche théorique basée sur le comportement thermique de la tension d'offset en fonction de la température. Elle permet de relier les coefficients thermiques à celui de la dérive thermique de la tension d'offset, nous avons tracé la variation de la tension d'offset en fonction de la température où nous avons comparé nos résultats théorique avec l'expérimental.

## II. LA TENSION D'OFFSET

### II.1. Définition de la tension d'offset

Le cas idéal d'un capteur de pression piézorésistif consiste en l'utilisation de quatre résistances de valeur égale. La réponse électrique à l'excitation en pression devrait être alors une droite avec une tension d'offset nulle. En pratique, aussi petite soit-elle, une tension existe à la sortie du montage même si aucune pression n'est appliquée. La connaissance de cette tension et de ses dérivés thermiques est d'une importance primordiale dans la chaîne de mesure. En effet, le capteur étant appelé à travailler dans un milieu où la température n'est pas constante [8].

Pour quatre piézorésistance montées en pont, la tension  $V_0$  de sortie s'écrit :

$$\frac{V_0}{V_a} = \frac{R_2}{R_2+R_1} - \frac{R_4}{R_4+R_3} \quad (\text{III.1})$$

$V_a$  est l'alimentation du pont.

Après le calcul on obtient :

$$\frac{V_0}{V_A} = \frac{\Delta R_2 - \Delta R_1}{2R_0} \quad (\text{III.2})$$

Cette tension existe même en l'absence de pression, sa valeur peut affecter la sensibilité du capteur et doit être prise en compte dans la conception et la réalisation de la chaîne de mesure. On outre, ce type de capteurs étant appelé à travailler dans un milieu où la température n'est pas constante, la dérive thermique de la tension d'offset doit être, non seulement la plus faible possible, mais également et surtout la plus reproductible, pour cela il est indispensable d'analyser ses variations et les causes qui leur donnent naissance [8].



## II.2. Comportement thermique de la tension d'offset

Afin d'analyser la réponse globale du capteur, nous avons étudié le comportement thermique d'une simple résistance, puis la réponse électrique d'un demi-pont et finalement reporté ces résultats sur un pont entier.

### II.2.1. Comportement thermique d'une piézorésistance

Voici la courbe de la variation thermique d'une piézorésistance en fonction de la température quand la pression est nulle.

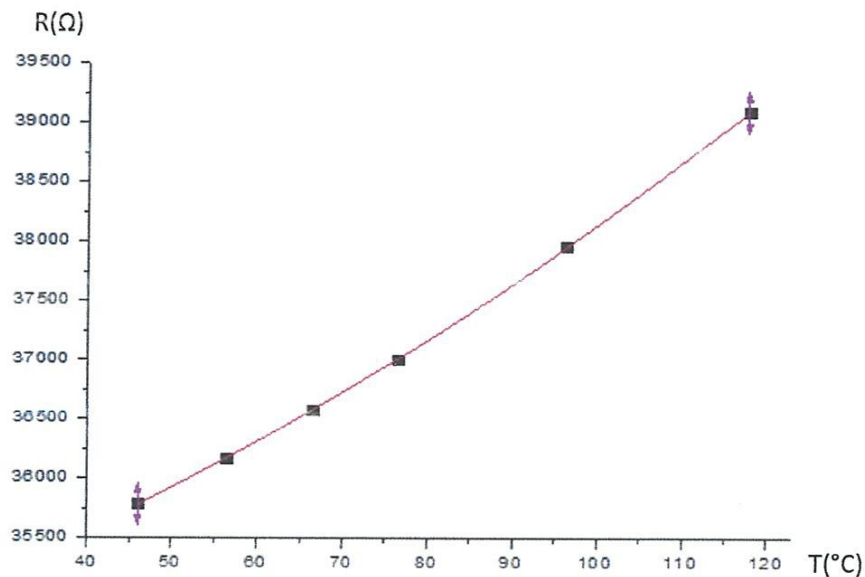


Figure III.1: Variations thermiques d'une piézorésistance quand la pression est nulle.

La régression effectuée sur les points expérimentaux permet d'écrire l'équation du comportement de la piézorésistance.

$$R(T) = R(0)(1 + \alpha T + \beta T^2) \quad (\text{III.3})$$

Où  $\alpha$  et  $\beta$  sont respectivement les coefficients de dérive thermique du premier et second ordre de la résistance.

### II.2.2. Comportement thermique du demi-pont

Quand les piézorésistances parallèle et perpendiculaire  $R_P$  et  $R_N$  sont connectées pour former un demi-pont la tension de sortie s'écrit.

$$\frac{V_0(T)}{V_A} = \frac{R_P(T)}{R_P(T) + R_N(T)}$$

$$V_0(T) + \Delta V_0(T) = \frac{R_P(0) + \Delta R_P}{R_P(0) + \Delta R_P + R_N(0) + \Delta R_N} V_A$$

$$V_0(T) + \Delta V_0(T) = \frac{R_P(0) + \Delta R_P}{R_P(0) + R_N(0)} * \frac{1}{1 + \left(\frac{\Delta R_P + \Delta R_N}{R_P(0) + R_N(0)}\right)} V_A$$

$$(V_0T) + \Delta V_0(T) = \frac{R_P(0) + \Delta R_P}{R_P(0) + R_N(0)} \left(1 - \frac{\Delta R_P + \Delta R_N}{R_P(0) + R_N(0)}\right) V_A$$

$$(V_0T) + \Delta V_0(T) = \frac{R_P(0) + \Delta R_P}{R_P(0) + R_N(0)} \left(\frac{R_P(0) + R_N(0) - \Delta R_P - \Delta R_N}{R_P(0) + R_N(0)}\right) V_A$$

$$(V_0T) + \Delta V_0(T) = \frac{R_P(0)}{R_P(0) + R_N(0)} V_A \left[ \frac{-\Delta R_N * R_P(0) + \Delta R_P * R_N(0) - \Delta R_P(\Delta R_N + \Delta R_P)}{(R_P(0) + R_N(0))^2} \right] V_A$$

$$\Delta R_P(\Delta R_N + \Delta R_P) \approx 0$$

$$\Delta V_0(T) = \frac{V_A}{[R_P(0) + R_N(0)]^2} (\Delta R_P * R_N(0) - \Delta R_N * R_P(0))$$

$$R_P(T) = R_P(0)[1 + \alpha_P T + \beta_P T^2] \rightarrow \Delta R_P(T) = R_P(0)[\alpha_P T + \beta_P T^2]$$

$$R_N(T) = R_N(0)[1 + \alpha_N T + \beta_N T^2] \rightarrow \Delta R_N(T) = R_N(0)[\alpha_N T + \beta_N T^2]$$

$$\Delta V_0(T) = \frac{V_A}{[R_P(0) + R_N(0)]^2} [R_N(0)R_P(0)(\alpha_P T + \beta_P T^2) - R_P(0)R_N(0)(\alpha_N T + \beta_N T^2)]$$

$$\Delta V_0(T) = \frac{V_A [R_N(0)R_P(0)]}{[R_P(0) + R_N(0)]^2} [\alpha_P T + \beta_P T^2 - \alpha_N T - \beta_N T^2]$$

$$\frac{\Delta V_0(T)}{V_A} = \frac{R(0) * R_P(0)}{[R_P(0) + R_N(0)]^2} [(\alpha_P - \alpha_N)T + (\beta_P - \beta_N)T^2]$$

Cette relation est valable pour  $T_0 = 0$

Dans le cas général ou  $T_0 \neq 0$  cette relation devienne :

$$\frac{\Delta V_0(T)}{V_A} = \frac{R_N(T_0) * R_P(T_0)}{[R_N(T_0) + R_P(T_0)]^2} [(\alpha_P - \alpha_N)\Delta T + (\beta_P - \beta_N)\Delta T^2]$$

(III.4)

Avec  $\Delta T = T - T_0$

On constate que cette courbe représentative est une parabole dont l'amplitude

est pondérée par les termes  $(\alpha_P - \alpha_N)$  et  $(\beta_P - \beta_N)$

$$\frac{R_N(T_0) * R_P(T_0)}{[R_N(T_0) + R_P(T_0)]^2} \approx 0,25$$

La valeur maximale de cette courbe est  $V_{\max}$  serait atteinte Pour une température  $T_{\max}$  telle que

$$V_{\max} = \frac{R_N(T_0) * R_P(T_0)}{[R_N(T_0) + R_P(T_0)]^2} \left[ \frac{-\Delta\alpha^2}{4\Delta\beta} \right]$$

$$T_{\max} = \frac{2T_0\Delta\beta - \Delta\alpha}{2\Delta\beta}$$

Ou  $\Delta\alpha = \alpha_P - \alpha_N$   $\Delta\beta = \beta_P - \beta_N$

L'examen de cette expression permet de faire les remarques suivantes :

- a) Si les deux coefficients de dérivé thermique du second ordre  $\beta_P$  et  $\beta_N$  étant égaux, la courbe aurait un maximum rejeté à l'infini : la variation de tension  $\Delta V_0(T)$ , dans un domaine limité de température, s'apparenterait à une droite, ascendante, de pente descendante, de pente

$$\frac{R_P(T_0)R_N(T_0)}{[R_P(T_0) + R_N(T_0)]^2} (\alpha_N - \alpha_P)$$

Cette dernière serait d'autant plus accentuée que les valeurs de  $\alpha_P$  et  $\alpha_N$  sont éloignées l'une de l'autre ;

- b) Si les deux coefficients de dérive thermique du premier ordre  $\alpha_P$  et  $\alpha_N$  égaux, la courbe représentative de la dérive thermique de la tension d'offset s'apparenterait à une branche descendante  $\beta_N < \beta_P$  ou ascendante  $\beta_N > \beta_P$  de parabole [2].

### II.3. Comportement thermique du pont complet

En connectant maintenant quatre résistances en pont et en appliquant les résultats du paragraphe précédent aux deux montages potentiométrique qui le forment, la variation de la tension de sortie s'écrit :

➤ **Pour le premier demi pont**

$$\frac{\Delta V_{01}(T)}{V_A} = \frac{R_{N1} * R_{P1}}{[R_{N1}(0) + R_{P1}(0)]^2} [(\alpha_{P1} - \alpha_{N1})T + (\beta_{P1} - \beta_{N1})T^2] \quad (III.5)$$

➤ **Pour le deuxième demi pont**

$$\frac{\Delta V_{02}(T)}{V_A} = \frac{R_{N2} * R_{P2}}{[R_{N2}(0) + R_{P2}(0)]^2} [(\alpha_{P2} - \alpha_{N2})T + (\beta_{P2} - \beta_{N2})T^2]$$

(III.6)

➤ **Pour le pont**

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V_0(T)}{V_A} &= \frac{\Delta V_{01}(T) \Delta V_{02}(T)}{V_A} \\ \frac{\Delta V_0(T)}{V_A} &= \frac{R_{N1} * R_{P1}}{[R_{N1}(0) + R_{P1}(0)]^2} [(\alpha_{P1} - \alpha_{N1})T + (\beta_{P1} - \beta_{N1})T^2] \\ &\quad - \frac{R_{N2} * R_{P2}}{[R_{N2}(0) + R_{P2}(0)]^2} [(\alpha_{P2} - \alpha_{N2})T + (\beta_{P2} - \beta_{N2})T^2] \end{aligned}$$

: Ce résultat est obtenu pour  $T_0=0$

Dans le cas générale ou  $T_0 \neq 0$  la relation devient :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V_0(T)}{V_A} &= \frac{R_{N1}(T_0) * R_{P1}(T_0)}{[R_{N1}(T_0) + R_{P1}(T_0)]^2} [(\alpha_{P1} - \alpha_{N1})\Delta T + (\beta_{P1} - \beta_{N1})\Delta T^2] \\ &\quad - \frac{R_{N2}(T_0) * R_{P2}(T_0)}{[R_{N2}(T_0) + R_{P2}(T_0)]^2} [(\alpha_{P2} - \alpha_{N2})\Delta T + (\beta_{P2} - \beta_{N2})\Delta T^2] \end{aligned} \quad (III.7) [8,9]$$

Où les indices P1 et P2 font référence aux piésorésistances parallèles, N1 et N2 aux piésorésistances perpendiculaires.

La courbe représentant cette fonction est évidemment une parabole dont la valeur maximale est atteinte pour une température  $T_{max}$  telle que :

$$T_{max} = \frac{B(\alpha_{P1} - \alpha_{N1}) - A(\alpha_{P2} - \alpha_{N2}) + 2A(\beta_{P1} - \beta_{N1}) - 2B(\beta_{P2} - \beta_{N2})T_0}{2[A(\beta_{P1} - \beta_{N1}) - B(\beta_{P2} - \beta_{N2})]}$$

$$A = \frac{R_{N1}(T_0) * R_{P1}(T_0)}{[R_{N1}(T_0) + R_{P1}(T_0)]^2} \quad B = \frac{R_{N2}(T_0) * R_{P2}(T_0)}{[R_{N2}(T_0) + R_{P2}(T_0)]^2}$$

### III. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette partie nous allons simuler le comportement thermique de la tension d'offset en utilisant les équations précédentes, et comparer ensuite les résultats obtenus avec des mesures expérimentales.

#### III.1. Capteur 1

##### III.1.1. Comportement thermique des quatre piézorésistances

La courbe suivante représente les variations des valeurs des quatre piézorésistances, constituant le pont de Wheatstone de ce capteur, en fonction de la température quand la pression est nulle.

- ❖ Comme on peut le constater sur cette figure les variations des quatre résistances, sont très proches surtout entre les résistances R1, R3 qui constituent le premier demi-pont et R2, R4 qui constituent le deuxième demi-pont
- ❖ Les différences entre les valeurs de ces résistances reviennent surtout aux valeurs des coefficients de température  $\alpha$  et  $\beta$  qui ne sont pas les mêmes pour les quatre jauges

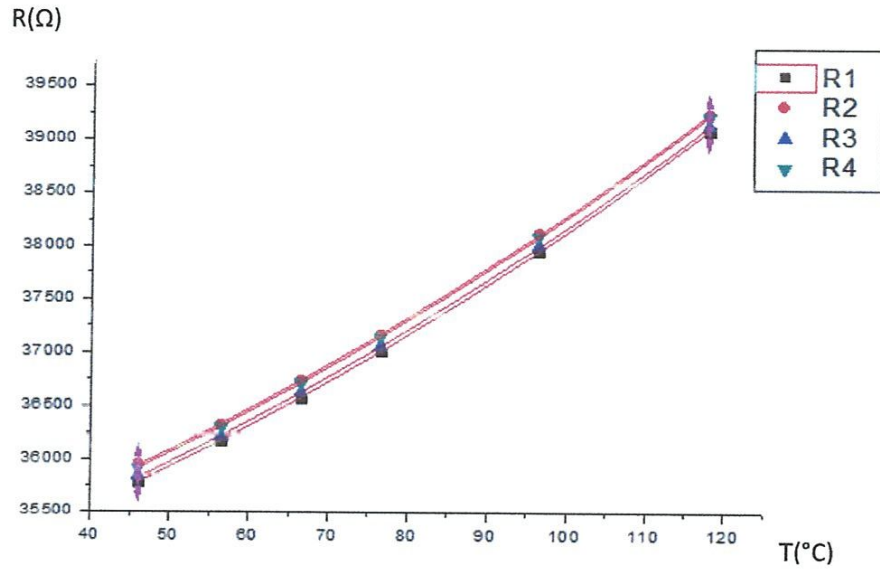


Figure III.2 : Variation thermiques des piézorésistance parallèle et perpendiculaire quand la pression est nulle.

### III.1.2. Comportement thermique pour le premier demi pont

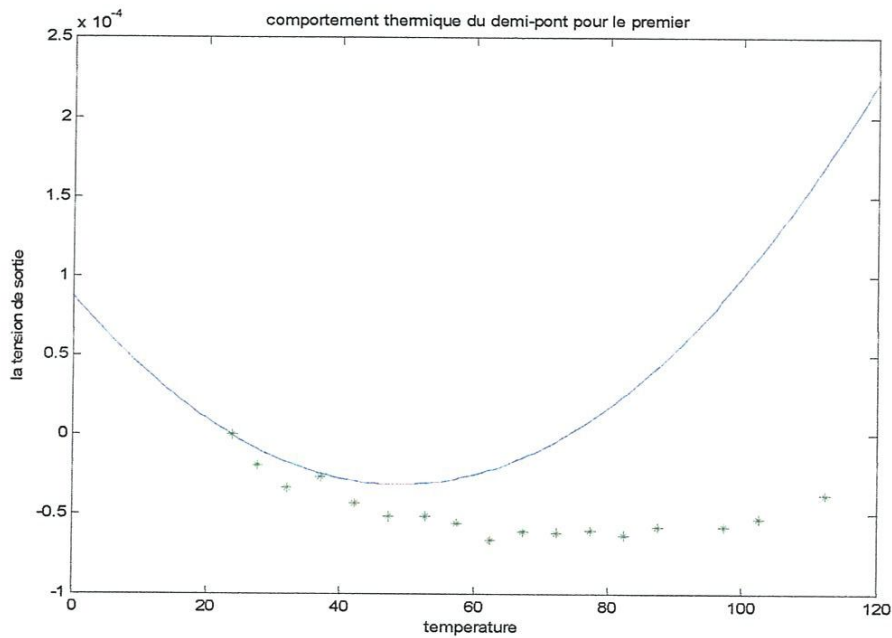
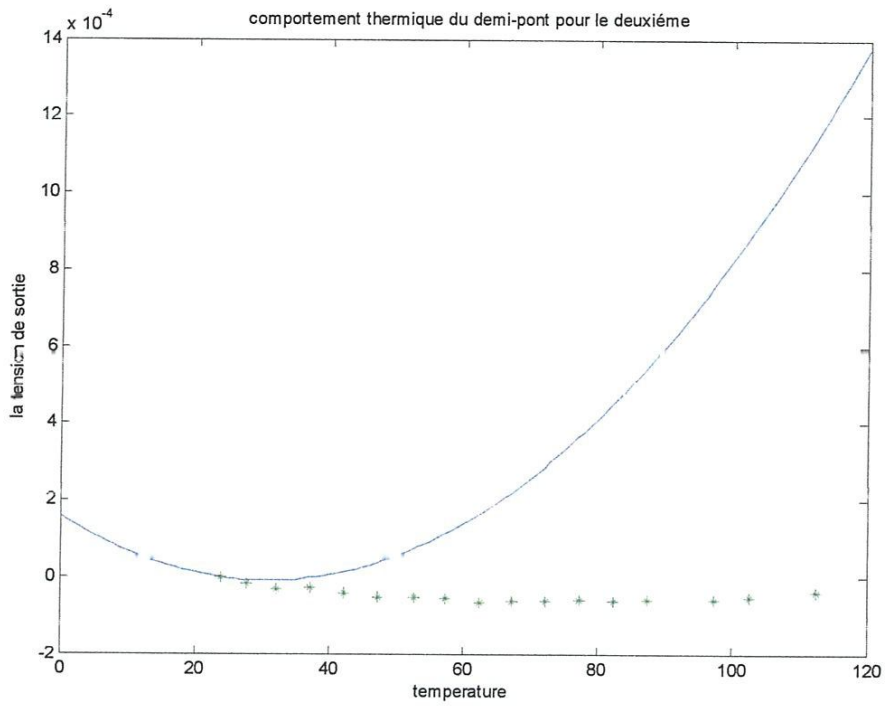


Figure III.3 : Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le premier demi-pont, points : mesure, courbe continue : simulation.

### III.1.3. Comportement thermique pour le deuxième demi pont



**Figure III.4:** Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le deuxième demi-pont: mesure, courbe continue : simulation .

### III.1.4. Comportement thermique pour pont

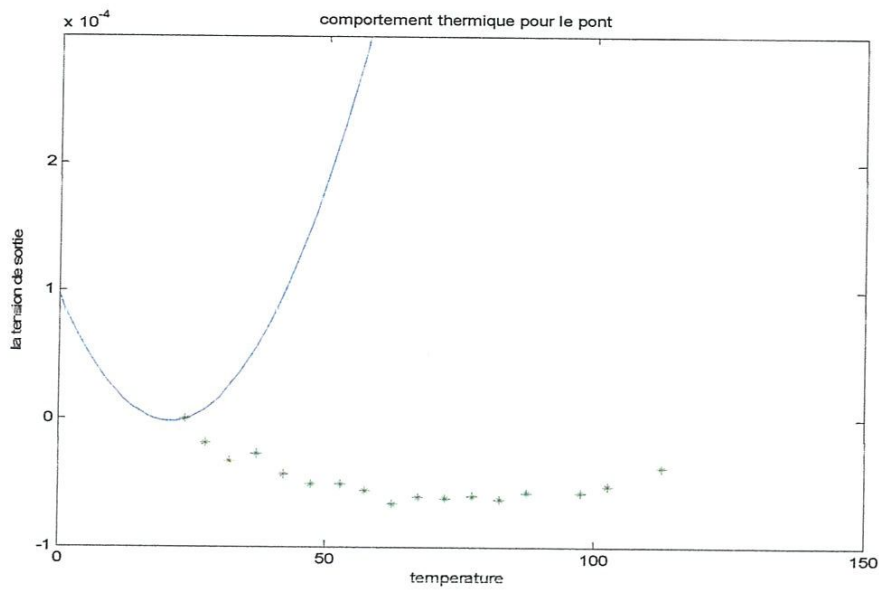


Figure III.5: Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le pont: mesure, courbe continue : simulation . (Logiciel matlab)

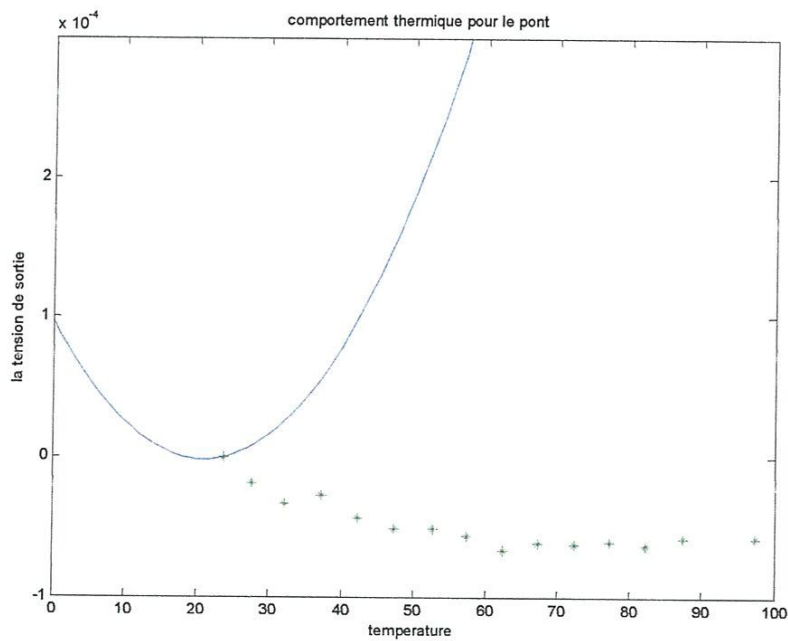


Figure III.6: Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le pont. : mesure, courbe continue : simulation (logiciel origin)



### III.2. CAPTEUR 2

#### III.2.1.comportement thermiques d'un quatre piézorésistances

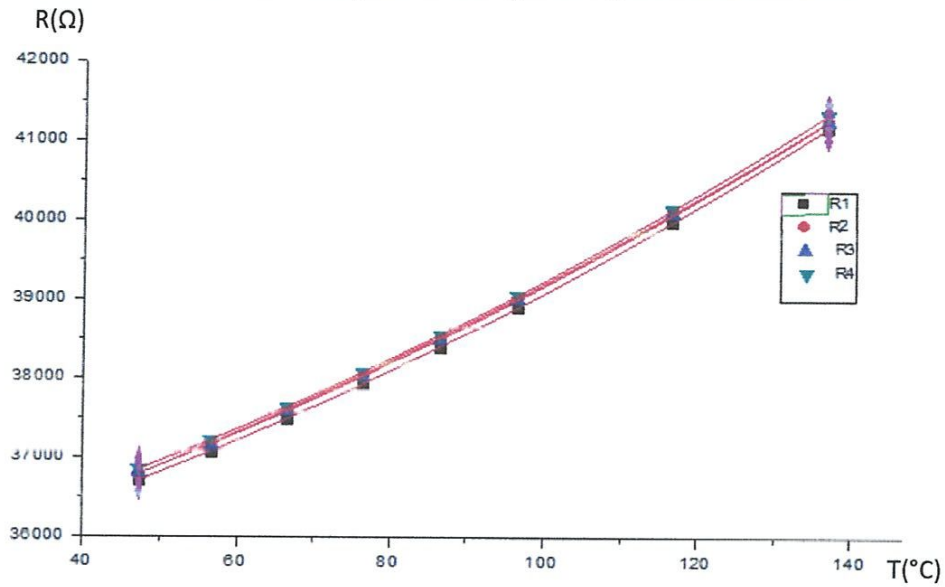


Figure III.7: Variation thermiques des piézorésistance parallèle et perpendiculaire quand la pression est nulle

#### III.2.2. Comportement thermique pour la première demi -pont

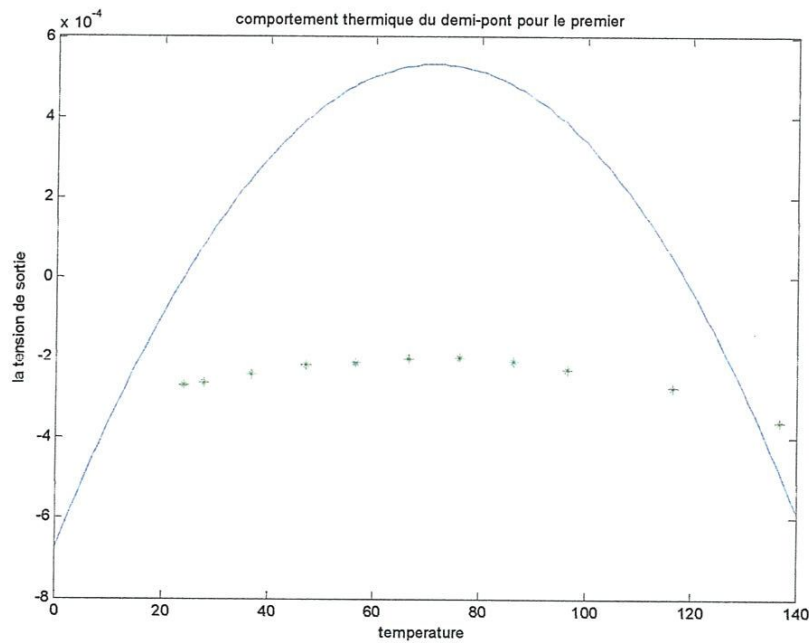


Figure III.8 : Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le premier demi-pont.

### III.2.3. Comportement thermique pour le deuxième demi-pont

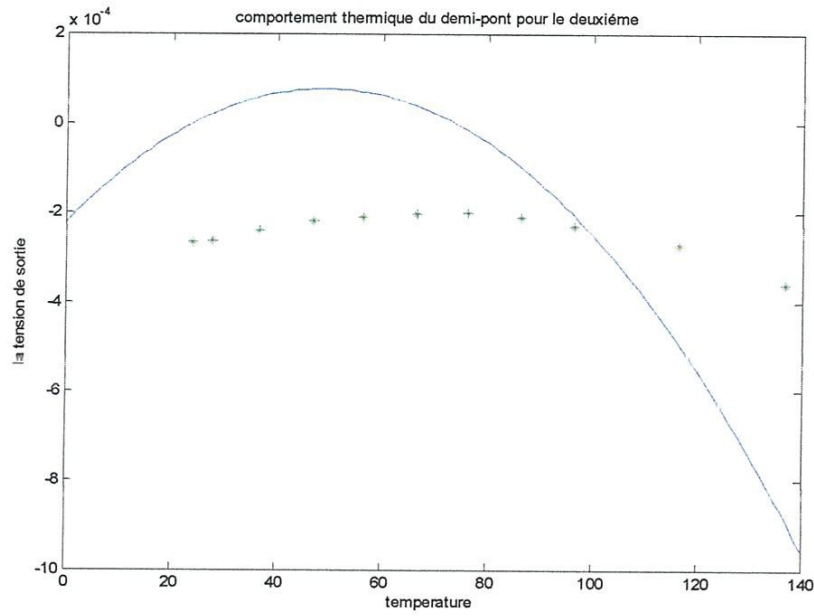


Figure III.9: Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le deuxième demi-pont.

### III.2.3. Comportement thermique pour le pont

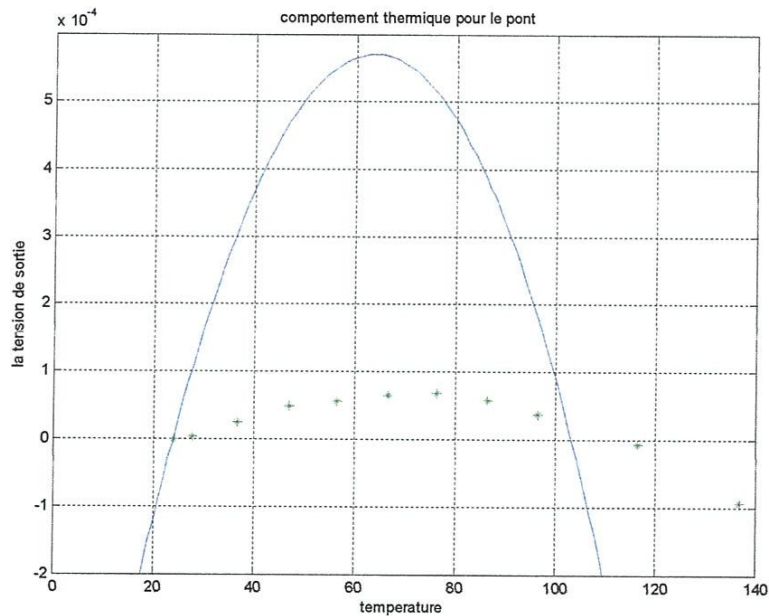


Figure III.10: Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le pont (logiciel matlab).

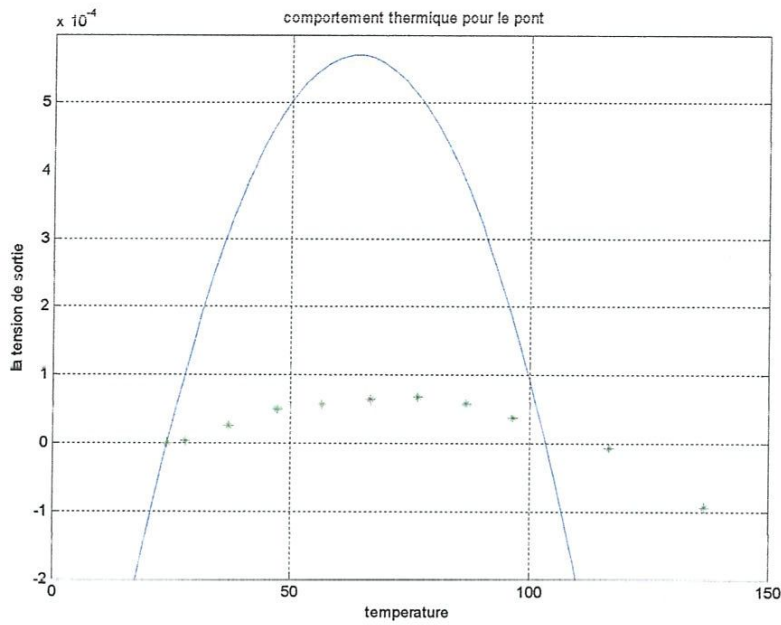


Figure III.11: Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le pont (logiciel origin).

### III.3. CAPTEURS 3

#### III.3.1. Comportement thermique pour la première demi-pont

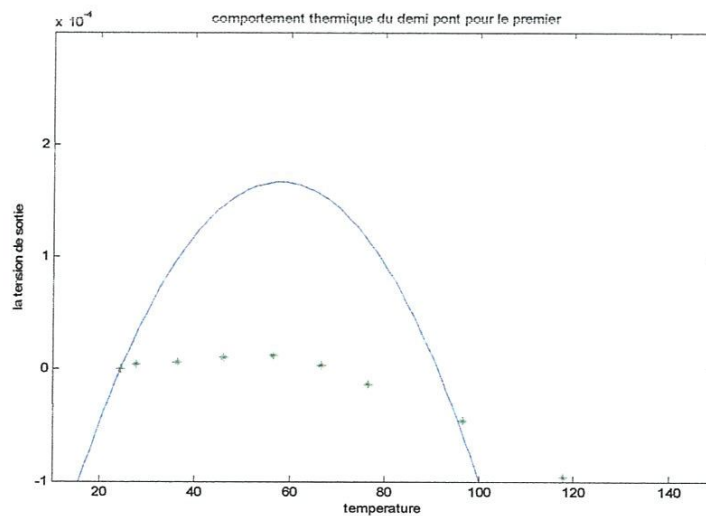


Figure III.12 : Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le premier demi-pont.

### III.3.2. Comportement thermique pour le deuxième demi-pont

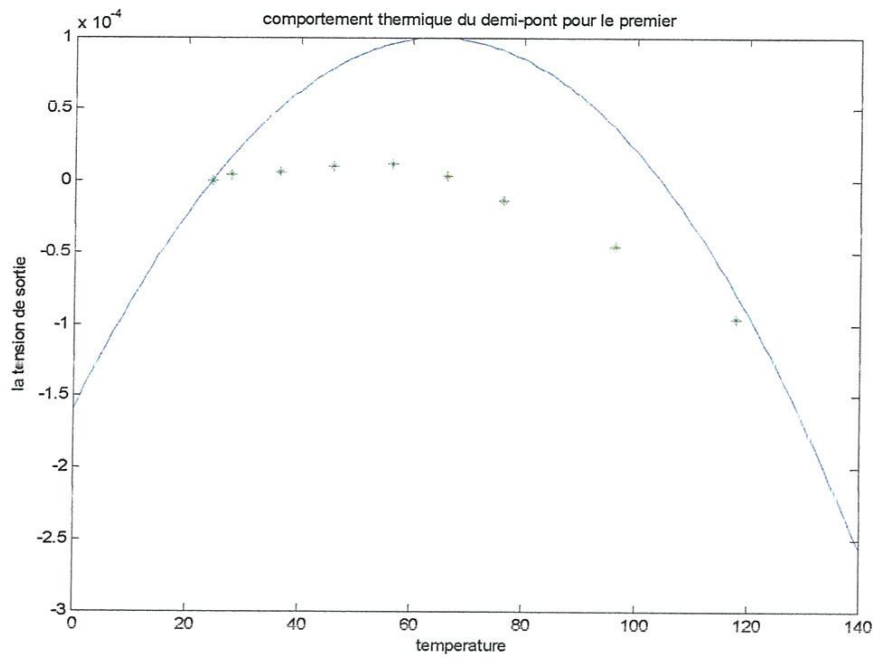


Figure III.13: Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le deuxième demi-pont.

### III.3.3. Comportement thermique pour le pont

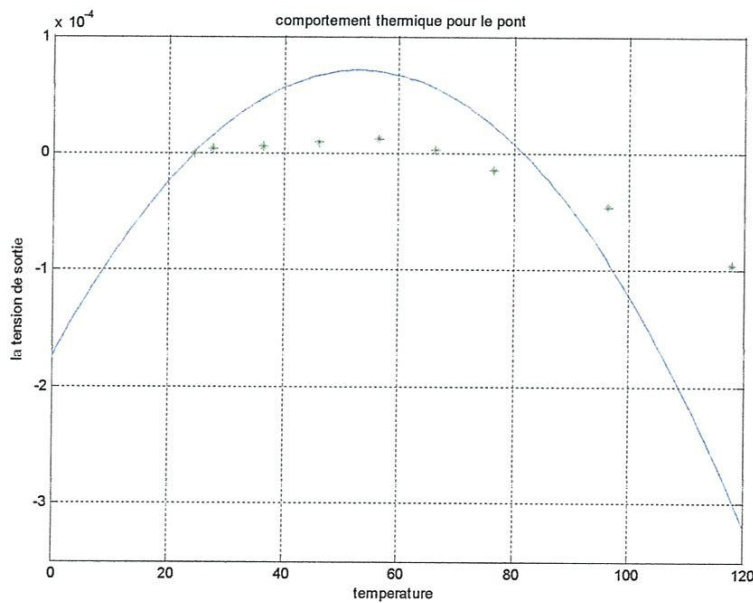


Figure III.14: Variation thermique de la tension d'offset en fonction de la température pour le pont (logiciel matlab).

- **Discussion des résultats**

On remarque que les courbes obtenues par simulation ont la même forme que les mesures expérimentales. Ce qui montre qu'il y a une relation entre les coefficients de température des quatre jauges et la présence de la tension d'offset. Cependant, on observe un décalage entre les valeurs de simulation et les valeurs mesurées. Ceci peut être expliqué par :

- Les erreurs de fittage des paramètres  $\alpha$  et  $\beta$ .
- Les erreurs de mesure.
- L'offset est probablement influencée par d'autres paramètres qui ne sont pas tenu en compte par la simulation effectuée ici comme les fluctuations de la membrane.

#### **IV. CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons simulé le comportement thermique de la tension d'offset en fonction de la température, pour trois capteurs de pression piézorésistif, et comparé les résultats obtenus avec des mesures expérimentales.

## CONCLUSION GENERALE

Les capteurs de pression en silicium ont profondément changé le marché des capteurs de pression grâce à leurs excellentes performances obtenues de faibles couts de fabrication. L'intérêt de l'utilisation du silicium réside dans la possibilité de fabrication simultanée d'un grand nombre de dispositifs sur la même puce.

Le travail présenté dans ce mémoire avait comme objectif l'étude et la simulation du comportement thermique de la tension d'offset d'un capteur de pression piézorésistifs.

Nous avons commencé par des généralités sur les capteurs. Par la suite, nous avons présenté un capteur de pression piézorésistifs, la filière explorée dans cette étude se base sur la fabrication d'une membrane à la surface de laquelle sont implantées quatre piézorésistances électriquement connectées en pont de Wheatstone.

Enfin, nous avons simulé le comportement thermique de la tension d'offset de ce capteur. On remarque que les courbes simulées ont la même forme que les courbes expérimentales. Ce qui montre qu'il y a une relation entre les coefficients de température et la tension d'offset. Cependant, un décalage est observé entre les valeurs de simulation et les valeurs mesurées, et qui peut être expliqué par :

- Les erreurs de fittage de  $\alpha\epsilon\beta$
- Les erreurs de mesure
- L'offset est probablement influencée par d'autres paramètres en plus de  $\alpha\epsilon\beta$  comme les fluctuations de la membrane.

---

## Références Bibliographiques

- [1] Georges Asch et collaborateurs « Les capteurs en instrumentation industrielle », 5<sup>ème</sup> édition, Dunod, 1999
- [2] « Capteurs et électronique associée ». Olivier Française, 2000.
- [3] Christin Bissierer., (<http://cbissprof.free.fr>).
- [4] <https://www.google.dz/capteur+et+transmetteur+pdf>.
- [5] Jean-Pierre Giradot., «Capteurs et instrumentation utilisés en océanographie physique ». Cour, 2002.
- [6] <https://www.google.dz/capteur+de+pression+pdf>.
- [7] Ras lain M., « Contribution à l'identification des paramètres de non idéalité dans les capteurs de pression piézorésistifs au silicium ».Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2009.
- [8] Djama K., Boulsina F., « Etude et simulation du comportement non linéaire de piézorésistance » PFE, Université de Constantine, 2001.
- [9] Philippe Menini., « Faisabilité d'un capteur de pression on capacitif miniature sur silicium ». Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 1998.
- [10] A.Boukabache., P. Pons, G. Blasquez , Z. Dibi « characterisation and modeling of the mismatch of TCRs and their effects on the drift of the offset voltage of piezoresistive pressure sensors. »Sensors and Actuators, 2000.