

CHAPITRE I :

CAPTEURS DE PRESSIONS PIEZORESISTIFS

I.1 Introduction

Lorsque l'on souhaite traduire une grandeur physique en une autre grandeur, on fait appel à ce que l'on nomme classiquement "**capteur**". Son rôle est de donner une image interprétable d'un phénomène physique de manière à pouvoir l'intégrer dans un processus plus vaste.

I.2 Définitions

I.2.1 Mesurande

C'est la grandeur physique que l'on souhaite connaître.

I.2.2 Capteur

C'est l'élément qui va permettre sous l'effet du mesurande d'en délivrer une image exploitable (signal électrique par exemple).

On parle aussi de transducteur, la grandeur physique d'entrée (le mesurande) étant transformée en une autre grandeur physique de sortie ou en un signal électrique. [5]

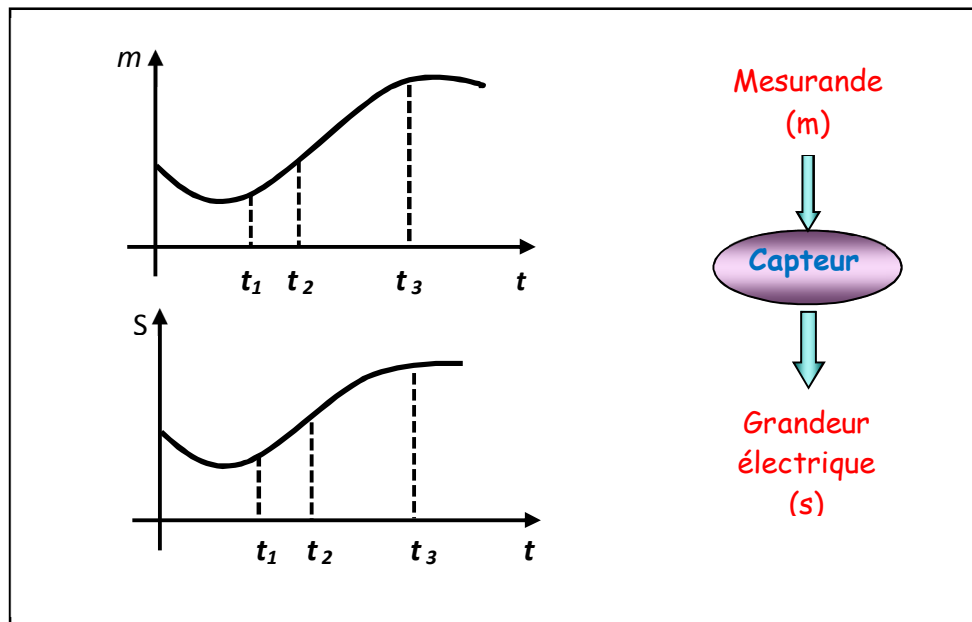


Figure I.1 : Principe d'un capteur

Généralement, on obtient une grandeur de sortie du type électrique. Elle peut être soit :

- une charge,
- une tension,
- un courant,
- une impédance (R, L, C). [5]

1.2.3 Chaîne de mesure

Pour obtenir une image d'une grandeur physique, on fait appel à une chaîne de mesure qui peut faire intervenir plusieurs phénomènes différents. Par exemple, la mesure d'un débit peut se faire en plusieurs étapes :

- transformation du débit en une pression différentielle,
- transformation de la pression différentielle en la déformation mécanique d'une membrane,
- transformation de la déformation mécanique en une grandeur électrique (à l'aide d'un piézo-électrique) via un circuit électronique associé.

L'ensemble de ces étapes constitue la chaîne de mesure.

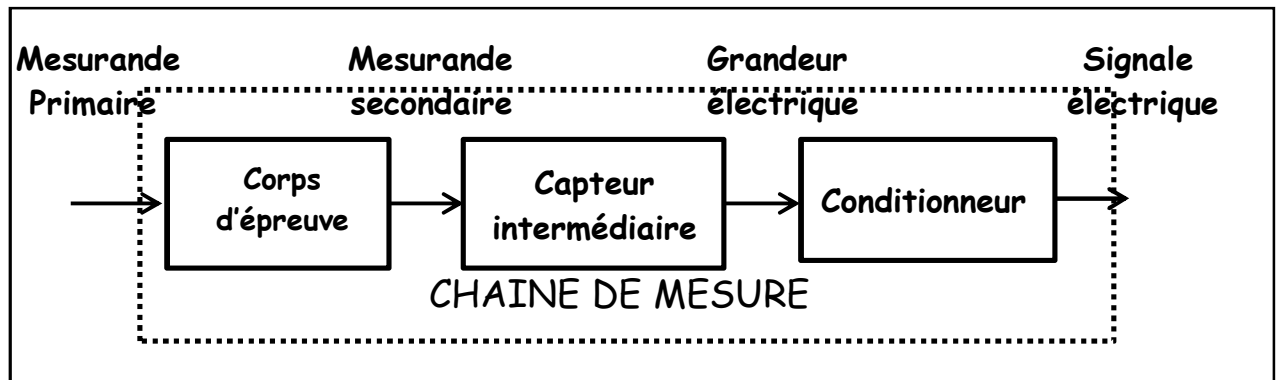


Figure I.2 : Chaîne de mesure d'un capteur

De manière classique, la sortie d'une chaîne de mesure est du type électrique. Si la chaîne de mesure fait intervenir plusieurs transducteurs, on appelle corps d'épreuve celui en contact direct avec le mesurande. Le dernier transducteur est associé à un conditionneur qui fournit la grandeur électrique de sortie de manière exploitable. Le choix de ce conditionneur est une étape importante dans le cadre de la chaîne de mesure car, associé au capteur, il détermine la nature finale du signal électrique et va influencer les performances de la mesure. [5]

1.2.4 Type de grandeur physique

On peut classer les grandeurs physiques en 6 familles, chaque capteur s'associant à l'une de ces 6 familles :

- ❖ Mécanique : déplacement, force, masse, débit, etc...
- ❖ Thermique : température, capacité thermique, flux thermique, etc...
- ❖ Electrique : courant, tension, charge, impédance, diélectrique, etc...
- ❖ Magnétique : champ magnétique, perméabilité, moment magnétique, etc...
- ❖ Radiatif : lumière visible, rayons X, micro-ondes, etc...
- ❖ (Bio)Chimique : humidité, gaz, sucre, hormone, etc...[5]

1.3 Classification des capteurs

On classifie les capteurs en deux grandes familles en fonction de la caractéristique électrique de la grandeur de sortie. Cette classification influe sur le conditionneur qui lui est associé. [6]

1.3.1 Capteurs passifs

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

Mesurande	Caractéristique électrique sensible	Type de matériaux utilisés
Température	Résistivité $[\rho]$	Métaux : Pt, Ni, Cu
Très basse T	Constante diélectrique $[\epsilon]$	Semi-conducteur verre
Flux lumineux	Résistivité $[\rho]$	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité $[\rho]$ Perméabilité magnétique $[\mu]$	Alliage de Ni, Si dopé Alliage ferromagnétique
Position (aimant)	Résistivité $[\rho]$	Matériaux Magnétorésistant
Humidité	Résistivité $[\rho]$ Constant diélectrique $[\epsilon]$	Chlorure de lithium Alumine ; polymère
Niveau	Constante diélectrique $[\epsilon]$	Liquide isolants

Tableau I. 3: Les principes physiques d'un capteur passif.

I.3.2 Capteurs actifs

Dans ce cas, la sortie du capteur est équivalente à un générateur. C'est un dipôle actif qui peut être du type courant, tension ou charge. Les principes physiques mis en jeu sont présentés ci-dessous.

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité Pyroélectricité	Tension charge
Flux lumineux	Photoémission Effet photovoltaïque Effet photoélectromagnétique	Courant Tension Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction magnétique	Tension
Position	Effet Hall	Tension

Tableau I. 3: Les principes physiques d'un capteur actif.

I.4 Les caractéristiques d'un capteur :

- *Etendue de mesure* : Valeurs extrêmes pouvant être mesurée par le capteur.
- *Résolution* : Plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur.
- *Sensibilité* : Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.
- *Précision* : Aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie.
- *Rapidité* : Temps de réaction du capteur. La rapidité est liée à la bande passante.
- *Linéarité* : représente l'écart de sensibilité sur l'étendue de mesure. [5]

I.5 Capteur de pression piézorésistif

De façon générale, un capteur (exemple de pression) est un ensemble constitué d'un corps d'épreuve et une surface sur laquelle sont implantées sur une ou plusieurs jauges de contraintes dont le principe est décrit par la figure I. 3 :

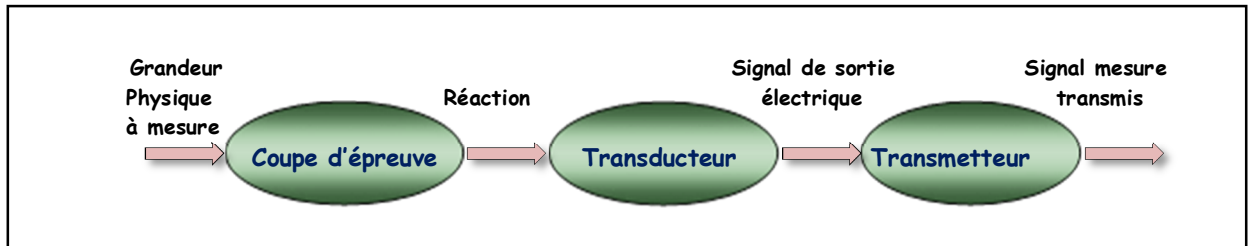


Figure I. 3 : constitution d'un capteur

Une différence de pression appliquée entre les faces supérieures et inférieures du capteur engendre l'apparition d'une déformation au sein du corps d'épreuve. Cette déformation est transférée par l'intermédiaire de la couche isolante vers le transducteur puis convertit par effet piézorésistif en une variation de résistance des jauges. On recueille en sortie une tension électrique proportionnelle à la tension appliquée. [7]

Capteur de pression piézorésistif

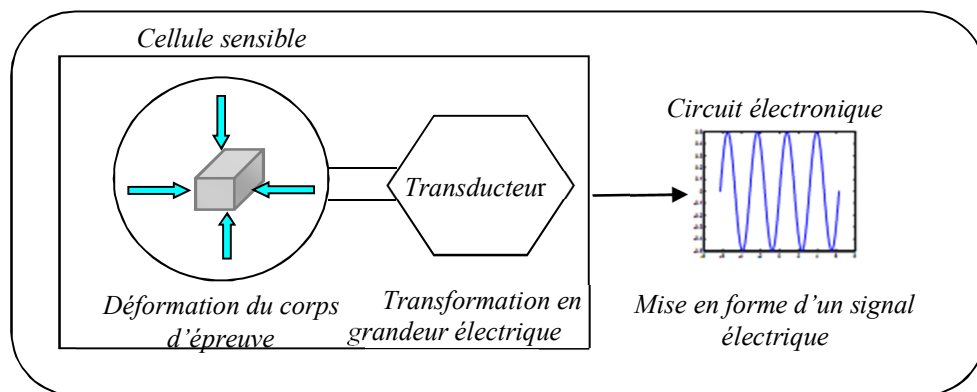


Figure I.4 : schéma synoptique d'un capteur de pression

Le corps d'épreuve du capteur de pression considéré est composé d'une membrane micro-usinée dans une plaquette de silicium. Cette membrane est soudée sur un substrat rigide en pyrex. [8]

1.5.1 Nature et propriétés du corps d'épreuve

Sa forme dépend principalement de l'application visée, mais aussi de la nature et de l'amplitude de la pression à mesurer. Le corps d'épreuve joue un rôle purement mécanique. Le choix du matériau qui le constitue est essentiellement établi à partir des critères suivants :

- ❖ Rigidité ;
- ❖ Contrainte de limite élastique ;
- ❖ Résistance à la fatigue ;
- ❖ Homogénéité ;
- ❖ Dilatation thermique ;
- ❖ Résistances aux agents chimiques..... etc.

Ces grandeurs conditionnent principalement la sensibilité, la plage d'utilisation en pression, la durée de vie, la stabilité et la précision du capteur. [8]

1.5.2 Le transducteur

Il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie. Les principales qualités métrologiques du transducteur sont :

- Une forte sensibilité à la grandeur mécanique à mesurer ;
- Une faible sensibilité aux grandeurs d'influence (température, hygrométrie, vibration...etc).

Il existe de nombreux dispositifs pour convertir une grandeur électrique ; les plus usuels sont : les résistances variables, les capacités variables, les inductances variables, les oscillateurs et les éléments piézoélectriques. [9]

1.5.3 La jauge

Dans les capteurs piézorésistifs, l'élément sensible à la pression est la jauge. C'est l'organe qui assure la conversion du signal mécanique appliqué au corps d'épreuve (déformation) à un signal électrique en sortie du pont. En effet, le type et le niveau de la réponse électrique attendue, lors de l'application d'une pression P sur la membrane, sera en fonction de la position qu'occupera la jauge sur cette dernière, en fonction du type et de la concentration des dopants qui y sont introduits. [10]

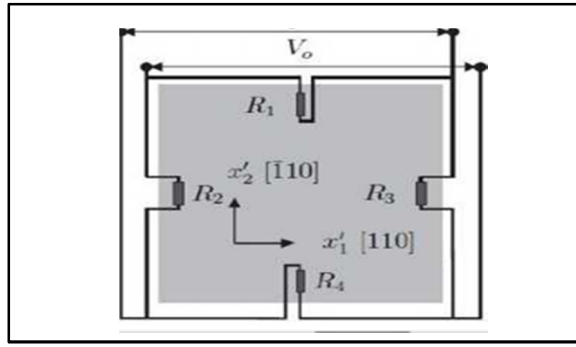


Figure I.5: Représentation des quatre piézorésistances

La figure ci-dessus représente les quatre piézorésistances implantées à la surface de la membrane de Silicium et connectées en pont de WHEATSTONE. Les quatre jauges sont orientées selon la direction [110] et implantées sur une surface [100].

❖ **Expression de la variation de la résistance :**

Considérons une jauge représentée par la figure I.5. Sous l'influence du champ électrique appliqué parallèlement à sa longueur, et soumise à une pression P , la variation relative de la résistance s'écrit :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S}$$

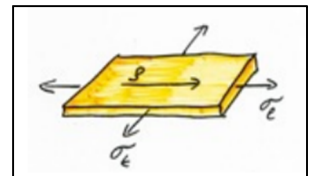
où : L et S représentent respectivement la longueur et la surface de la jauge.

ρ représente sa résistivité.

Certains matériaux présentent une dépendance de leur résistivité électrique ρ et les contraintes mécaniques appliquées, longitudinalement σ_l et transversalement σ_t à la direction de circulation du courant électrique.

Dans ce cas, la variation relative de la résistivité s'écrit comme suit :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t$$



avec : π_l et π_t sont les constantes de piézorésistivité longitudinale et transversale, respectivement [11].

I.6 Pont de WHEATSTONE

La filière explorée dans cette étude se base sur la fabrication d'une membrane à la surface de laquelle sont implantées quatre résistances électriquement connectées en pont de WHEATSTONE. L'application d'une pression provoque des contraintes internes dans la

membrane, ce qui modifie, à son tour, la valeur de chacune des quatre résistances. La sensibilité d'une telle structure dépend de la position des résistances et de leurs dopages. Quant à l'existence de la tension d'offset, elle peut être due à de multiples facteurs. [12]

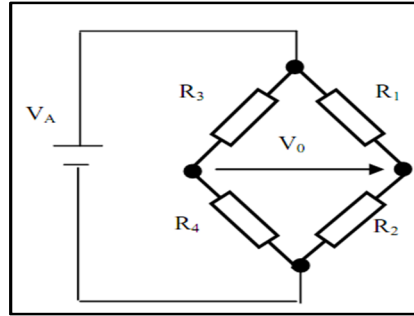


Figure I.6 : Les quatre piézorésistances électriquement connectées en pont de WHEATSTONE

I.6.1 Tension de sortie à vide :

En utilisant les équations générales de l'électricité, et si aucun phénomène physique ne vient perturber la variation intrinsèque de la résistance des jauges, la tension de sortie du pont à vide V_0 s'exprime de la manière suivante :

$$V_0 = \left[\frac{R_3}{R_2 + R_3} - \frac{R_4}{R_1 + R_4} \right] V_e$$

En général, le pont est implanté sur le corps d'épreuve de manière à créer une symétrie de fonctionnement, dans ce cas, les jauges opposées possèdent la même valeur de résistance. Donc, la relation devient :

$$V_0 = \left[\frac{R_1 - R_4}{R_1 + R_4} \right] V_e$$

Pour : $R_1 = R_3$ et $R_2 = R_4$

Cette valeur de tension est dite tension d'offset, sa valeur est nulle dans le cas où les jauges sont parfaitement identiques et on dira que le pont est en équilibre. [13]

I.6.2 Tension de sortie en charge

Lorsqu'un phénomène physique extérieur, tel que la pression, vient perturber la valeur des résistances des jauges, un déséquilibre apparaît en sortie du pont sous la forme :

$$V_0 = \left[\frac{R_1 \left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} \right) - R_4 \left(1 + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)}{R_1 \left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} \right) + R_4 \left(1 + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)} \right] V_e$$

Généralement, la variation relative de la résistance ne dépasse pas quelques pourcentages de sa valeur. De plus, si on suppose que les jauges sont parfaitement appariées, on peut écrire en première approximation :

$$V_0 = \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \frac{V_e}{2}$$

Cette relation permet de mettre en évidence les avantages du pont suivants :

- ✓ linéarité de la réponse du pont ;
- ✓ réjection de la tension d'alimentation car le signal de sortie est en général faible par rapport à la tension d'alimentation ;
- ✓ compensation de tout phénomène parasite pouvant intervenir dans la structure (dérive thermique des résistances, contrainte thermique sur les jauges...etc). [13]

I.7 Paramètres influent sur la piézorésistivité

Le cas idéal d'un capteur de pression piézorésistif consiste en l'utilisation de quatre jauges de type P, de valeur égale, montées en pont de WHEATSTONE.

La loi de variation en température de chacune des piézorésistances s'écrit sous la forme suivante:

$$R(T) = R(T_0)(1 + \alpha\Delta T + \beta\Delta T^2)$$

Avec : $\Delta T = T - T_0$

Où :

α et β : représentent respectivement les coefficients de température du premier et du second ordre.

$R(T_0)$: est la valeur de la piézorésistance à une température de référence T_0 .

En effet, il serait intéressant de déterminer les plages de températures relatives à l'influence de chaque coefficient en tenant compte du comportement des résistances. [14]

I.8 Conclusion

Cette brève présentation a pour objet de présenter une connaissance préalable du capteur de pression piézorésistif afin de mieux comprendre la suite de notre travail.