

Chapitre 4. Mesure de pressions

4-1 Définition de la pression

La pression est la force appliquée à une surface ou répartie sur celle-ci.

Elle se définit comme suit :

$$P = \frac{F}{S} \quad \text{Avec : } P : \text{pression en N/m}^2 \text{ (1 Pa = 1 N/m}^2\text{)}$$

F : force en Newton

S : surface en m²

La pression est souvent exprimée en bar (1 bar = 10⁵ Pa)

Certains constructeurs utilisent des unités anglo-saxonnes p.s.i (1 p.s.i = 0,07 bar)

4-1-2 Différents types de pression

- **Pression absolue :**
- pression mesurée au-dessus du vide total ou du zéro absolu. Le zéro absolu représente une absence de pression.
- **Le vide :**

Il correspond théoriquement à une pression absolue nulle. Il ne peut être atteint, ni même dépassé. Quand on s'en approche, on parle alors de vide poussé.

- **Pression atmosphérique (ou barométrique) :**

C'est la pression exercée par l'atmosphère de la terre. La pression atmosphérique au niveau de la mer est de 1,012 bar. Elle peut varier de +/- 25 mbar avec la pluie ou le beau temps.

Nb : La valeur de la pression atmosphérique décroît lorsque l'altitude augmente.

- **Pression relative :**

C'est la pression au-dessus de la pression atmosphérique. Elle représente la différence positive entre la pression mesurée et la pression atmosphérique existante. C'est celle qui est le plus souvent utilisée, parce que la plupart des capteurs sont soumis à la pression atmosphérique et mesurent en relatif. Pour faire une mesure en absolu, il leur faut un vide poussé dans une chambre de référence (pression de gonflage d'un pneu par exemple).

- **Pression différentielle :**

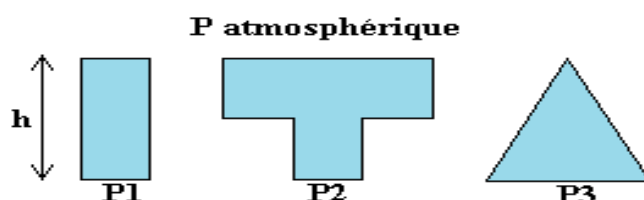
C'est la différence de deux pressions ou la différence de grandeur entre une valeur de pression donnée et une pression de référence donnée.

- **Pression hydrostatique :**

C'est la pression exercée au-dessous de la surface d'un liquide par le liquide situé au-dessus, quand le fluide est au repos. A l'intérieur d'une colonne de fluide se crée une pression due au poids de la masse de fluide sur la surface considérée ; elle est donnée par :

$$P = \rho * g * h$$

Avec : ρ : masse volumique du fluide kg/m^3 .
h : hauteur d'une colonne de fluide



Pour chacun de ces récipients, la pression au fond de ceux-ci est identique :

$$P1 = P2 = P3 = \rho * g * h$$

➤ **Pression hydrodynamique :**

Elle résulte de la vitesse du fluide en mouvement. Un fluide qui se déplace crée une pression supplémentaire :

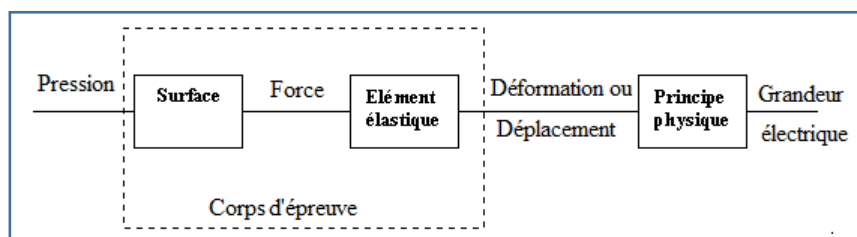
$$P = \frac{1}{2} \rho V^2$$

Avec : v : la vitesse de déplacement du fluide en m/s

4-1-3 Constitution des capteurs de pression

4-1-3-1 Principes

Dans tous les cas, les capteurs de pression peuvent se ramener au schéma synoptique ci-dessous.



Le corps d'épreuve est l'élément mécanique qui, soumis aux variations de la grandeur à mesurer a pour rôle de transformer celle-ci en grandeur physique mesurable.

Il existe deux familles de capteurs à jauges :

- les capteurs à jauges de contrainte semi-conducteurs, dites aussi à piézorésistives.
- les capteurs à jauges de contrainte métalliques, à fils ou à trame pelliculaire, appelées jauges extensométriques ;

Toutes les jauges sont caractérisées par leur coefficient ou facteur de jauge K qui fait correspondre une variation de résistance $\Delta R/R$ proportionnellement à une variation d'allongement $\Delta L/L$:

$$\frac{\Delta R_0}{R_0} = K \frac{\Delta L}{L}$$

Ce coefficient K caractérise donc la sensibilité de jauge.

4-3 Jauge de contrainte

La jauge de contrainte est l'un des outils les plus importants de la technique de mesure électrique appliquée à la mesure de quantités mécaniques. Comme leur nom l'indique, elles sont utilisées pour la mesure de contrainte (extensomètre).

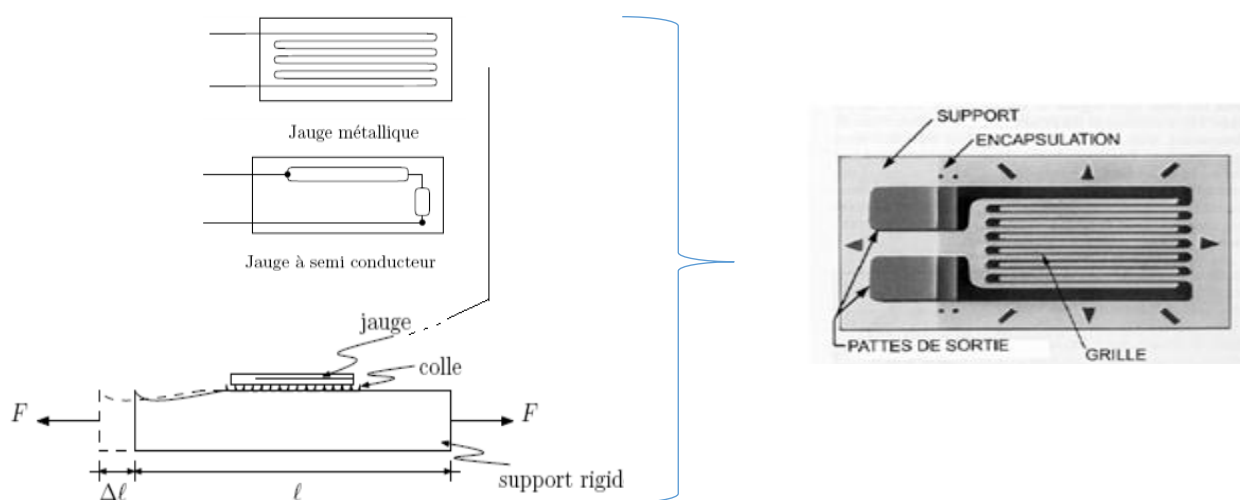


Figure a : Diagramme d'une Jauge de contrainte

4-3-1 Fonctionnement d'une jauge de contrainte

La jauge est un élément résistif qui est collé sur une pièce au point où on veut mesurer la déformation. Cet élément est fait d'un fil fin enroulé selon une direction préférentielle et collé à la pièce par l'entremise d'un support d'isolation.

Lorsque la pièce est soumise au chargement, sa déformation est transmise à travers la colle et le support à la jauge un changement proportionnel de la résistance en résulte

Corps au repos (pas d'allongement) $\xrightarrow{\text{(Effort de traction)}}$ Corps ayant subi un étirement

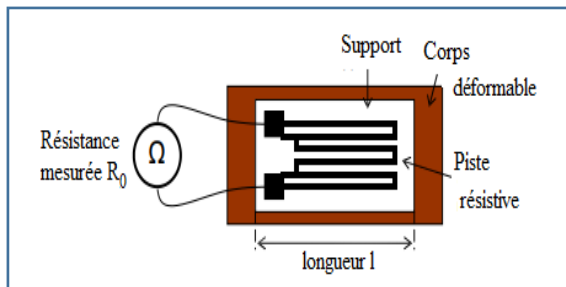


Figure d : Jauge d'extensiométrie

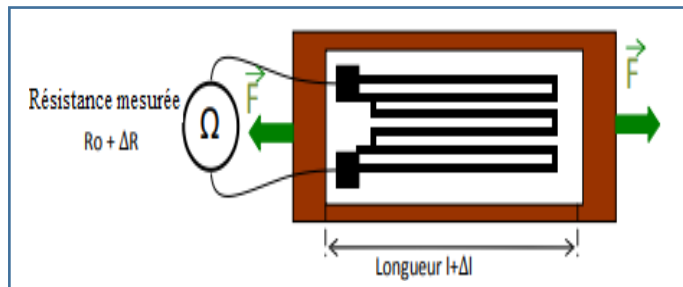


Figure c : Jauge d'extensiométrie ayant force

4-3-2 Principe circuits de mesure

Afin de mesurer la contrainte avec une jauge de contrainte à résistance liée, elle doit être reliée à un circuit électrique (Conditionneur de signal) qui est capable de mesurer les changements minuscules de résistance correspondant à la déformation.

Principe

La résistance d'un conducteur est donnée par : $R = \rho \frac{L}{S}$;

La déformation du la jauge (dans ce cas) modifie la longueur] une variation de la résistance R qui devient à son tour $R + \Delta R$.

ρ : Résistivité en $\Omega \cdot m$
 L : longueur en m
 S : section en m^2

Remarque :

Dans le cas d'une contraction, la résistance de la jauge serait $R - \Delta R$

La relation générale pour les jauges est :

$$\frac{\Delta R_0}{R_0} = K \frac{\Delta L}{L} \quad (K : \text{Est le facteur de jauge})$$

4-3-2-1 Mesure par pont de Wheatstone

La jauge étant un composant purement résistif, il faut l'associer à un circuit électrique pour obtenir une tension image de la déformation. Le circuit souvent utilisé est appelé "pont de Wheatstone". Il est ici constitué d'un générateur de tension associé à 4 résistances dont une est la jauge (figure e) :

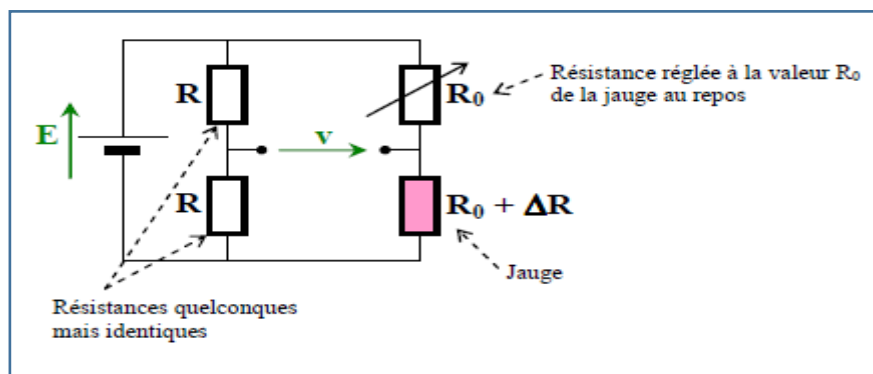


Figure e : Pont de Wheatstone

La tension de sortie v du pont à l'expression suivante :

$$\begin{aligned} V &= E \left(\frac{R_0 + \Delta R}{R_0 + \Delta R + R_0} \right) - E \left(\frac{R}{R + R} \right) \\ &= E \left(\frac{R_0 + \Delta R}{2R_0 + \Delta R} \right) - E \left(\frac{R}{2R} \right) = E \left(\frac{R_0 + \Delta R}{2R_0 + \Delta R} - \frac{1}{2} \right) \\ &= E \left(\frac{2R_0 + 2\Delta R - 2R_0 - \Delta R}{4R_0 + 2\Delta R} \right) \end{aligned}$$

$$V = E \left(\frac{\Delta R}{4R_0 + 2\Delta R} \right)$$

En général, la variation ΔR est petite devant R_0 ; la relation se simplifie alors pour devenir quasi-linéaire

$$V = E \left(\frac{\Delta R}{4R_0} \right)$$

Remarque : On peut améliorer la sensibilité et la linéarité du dispositif en utilisant un pont à 2 résistances et 2 jauges symétriques $R_0 + \Delta R$ et $R_0 - \Delta R$. Il est même possible d'utiliser un pont à 4 jauges symétriques pour avoir une parfaite linéarité.

❖ **Dans la pratique, ces résistances sont souvent d'autres jauges (une, deux ou quatre).**

L'alternance des signe + et - caractérise la propriété fondamentale des ponts : deux résistances adjacentes agissent en sens opposé et deux résistances opposées agissent dans le même sens. On peut donc réduire les variations parasites (comme la température) et avoir une meilleure précision.

Un capteur à quatre jauges permet d'avoir encore une meilleure précision qu'un capteur à une jauge. Dans la pratique, le nombre de jauges est souvent dicté par la géométrie de la pièce.

On distingue trois montages différents selon le nombre de jauges mis en place.

➤ **Montage en Quart de pont**

Dans le montage en quart de pont, on ne dispose que d'une jauge et trois résistances viennent en complément avec l'électronique associée. Ce montage est le plus simple et le moins cher mais présente de nombreux inconvénients :

- La jauge étant éloignée des autres résistances, il faut prendre en compte la résistance induite par la longueur de câble.
- La tension alimentant la jauge diminue de la somme des variations de tension rencontrées sur les câbles de liaison. À l'entrée de la jauge, elle est largement inférieure à celle qui sort de l'amplificateur. La sensibilité du capteur (qui varie proportionnellement à la tension d'alimentation) s'en trouve alors amoindrie...
- La résistance du câblage ajoute également une atténuation du signal et donc une perte d'information. Par exemple, un câble de 100 m conduit à une variation de 10 %.

➤ **Montage en demi-pont**

Le montage demi-pont est couramment utilisé lorsque l'on souhaite faire des corrections en température sur matériaux à mesurer. Il est aussi utilisé pour supprimer la composante de traction (ou compression) lors de mesures de flexion.

➤ **Montage en pont complet**

- Les jauges varient selon les configurations de montage
- Est linéaire,
- A une meilleure sensibilité
- Compense les efforts parasites

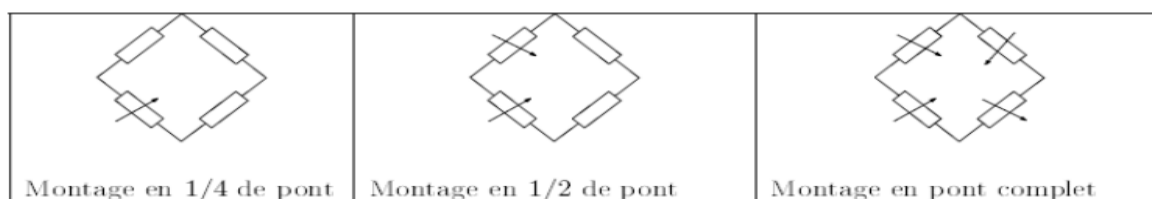


Figure F : Montages

4-3-2-2 Mesure par jauges à semi-conducteurs

La variable k d'un semi-conducteur peut-être cent fois supérieure à celle des métaux. Les semi-conducteurs généralement utilisés sont le germanium et le silicium (amorphe ou cristallisé). Une contrainte appliquée sur du silicium va modifier sa conductibilité pour deux raisons : sa variation géométrique mais aussi sur la conductibilité intrinsèque du matériau. Il en résulte une amplitude bien plus importante que pour des capteurs métalliques.

➤ Présentation

Les jauges extensiométriques diffusées à couches minces ne dépassent guère une vingtaine de millivolts pour l'étendue de mesure nominale d'un capteur. Il peut être décuplé avec des jauges à piézorésistances diffusées dans un substrat de silicium, ce dernier étant utilisé directement pour la constitution du corps d'épreuve, membrane ou barreau dynamométrique, par exemple.

Le silicium a été choisi en raison de la parfaite élasticité de ses mono-cristaux assurant une hystérésis négligeable et, aussi, à cause de ses propriétés semi-conductrices et piézorésistantes permettant la réalisation in situ, par diffusion "planar" d'un ensemble de jauges pouvant former un pont. Le substrat cristallin assurant la conversion de la pression appliquée en contraintes internes est du type N. Les impuretés du type P sont diffusées dans les zones dont l'orientation par rapport aux axes cristallins assure une bonne sensibilité par la combinaison des contraintes développées par la déformation du substrat.

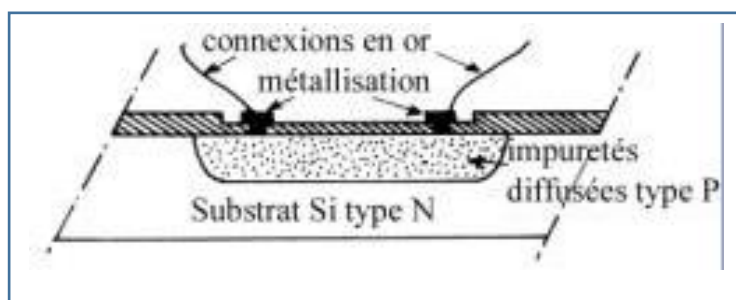


Figure F : Jauges à semi-conducteurs

Les jauges sont implantées de manière à ce que les variations de résistance en fonction des contraintes internes restent égales et de signe opposé pour les deux paires de jauges. Par exemple pour une implantation de quatre jauges :

$$\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R_4 = \Delta R$$

La tension V_m aux bornes de la diagonale de mesure d'un pont alimenté à courant constant I est :

$$V_m = I/4. (\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4) = I. \Delta R$$

La variation relative de résistance en fonction de la contrainte « σ (F/S) » ayant pour expression :

$$\Delta R/R_0 = \pi \sigma$$

Où π est le coefficient de piézorésistivité du cristal (4.10^{-10} m²/N par exemple) la tension de mesure peut encore s'écrire :

$$V_m = \pi \sigma. I. R_0$$

La sensibilité peut varier de 0,1 à 3 mV/mbar, pour les basses pressions, suivant la géométrie de la membrane et l'intensité I , et de 0,2 à 12,5 mv/bar pour des pressions allant de

quelques centaines de millibars à quelques centaines de bars. Pratiquement cela correspond à un signal de 100 à 300 mV pour l'étendue de mesure.

Utilisables entre -40°C et $+125^{\circ}\text{C}$ les capteurs à jauges diffusées peuvent être compensés en température par un choix convenable du taux de dopage en impuretés, du moins dans des limites définies, -20°C $+80^{\circ}\text{C}$ par exemple. On peut également compenser les variations thermiques des résistances des jauges en introduisant dans le conditionneur un dispositif de correction commandé grâce à une sonde de température JT diffusée à cette fin dans la membrane en plus des jauges.

Caractéristiques métrologiques	ordres de grandeur
Linéarité	$\pm 0,2$ à ± 2 % de l'étendue de mesure (E.M.)
Résolution	bien meilleure que 0,1 % de E.M.
Précision	0,1 à 0,5 % de E.M.
Rapidité	fréquence propre de 50 kHz à 1 MHz selon le diamètre et l'épaisseur de la membrane
Signal de sortie	50 à 100 mV

➤ **Avantages et inconvénients**

1. Avantage :

- Très faibles dimensions
- Masse quasi nulle : possibilité de réaliser des membranes de diamètre de l'ordre du millimètre;
- Insensibilité aux vibrations et chocs

2. Inconvénient :

- Sensibilité à la température qui est limitée à 150°C