

1. Introduction

Les capteurs physiques nous permettent de traduire le geste instrumental en termes de données. Ils utilisent des phénomènes physiques comme la gravitation, l'électromagnétisme, la propagation des ondes, la génération ou la conduction du courant électrique à travers des matériaux ou des circuits électroniques. Un capteur se caractérise par le type de grandeurs physiques qu'il mesure mais aussi par la technologie qu'il utilise, ses dimensions et sa structure. D'autres considérations, comme le type de tension électrique qu'il délivre ou sa réaction à l'application d'une tension, sont importantes dans la réalisation d'un instrument mais sont plutôt de l'ordre technique que de la conception. On peut globalement regrouper en deux grandes familles les capteurs physiques, celle des capteurs de mouvement et celle des capteurs de forces [2].

Ce chapitre est apporté une vue sur le capteur de force et leur caractéristique et les procédés de mesure des forces, et on a présenté par conséquent, les différents appareils et les différentes jauges de contrainte et les capteurs utilisés à cette fin.

2. Définition d'un capteur

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique (information entrante) une autre grandeur physique de nature différente (la plus part du temps, électrique). Cette grandeur, représentative de la grandeur prélevée, est utilisable à des fins de mesure ou de commande. [3]

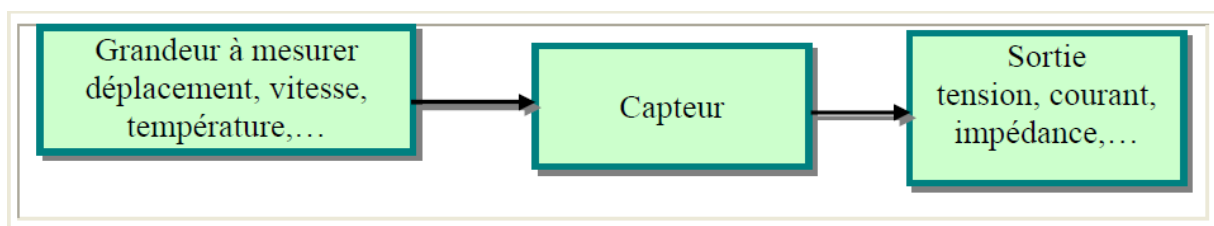


Figure I-1 Principe d'un capteur

2.1. Qualité des capteurs

Nous allons maintenant aborder les problèmes liés à la qualité et à l'utilisation en continu de ces différents capteurs. En effet, pour que le fonctionnement de l'ensemble d'une boucle de mesure soit correct, il est essentiel de s'assurer de la compatibilité de chacun des

instruments de la boucle et en particulier du capteur. L'information ainsi délivrée, doit être la plus représentative possible de la valeur vraie du paramètre mesuré et être très fiable [4].

2.1.1. Paramètres du capteur

Comme beaucoup de composants ou ensembles électroniques, il existe un certain nombre de paramètres électriques communs à tous les capteurs. Ils caractérisent les performances et donc leurs utilisations dans un environnement donné. [3]

a) Précision

La précision d'un capteur est caractérisée par l'incertitude absolue obtenue sur la grandeur électrique obtenue à la sortie du capteur. Elle s'exprime en fonction de la grandeur physique mesurée.

b) Sensibilité

Ce paramètre caractérise l'aptitude du capteur à détecter la plus petite variation de la grandeur à mesurer.

c) Étendue de mesure

Cette caractéristique donne la plage de fonctionnement du capteur pour la grandeur à mesurer. Elle est souvent notée E.M.

d) Linéarité :

Un capteur est dit linéaire s'il présente la même sensibilité sur toute l'étendue de sa plage d'emploi.

e) Fidélité

Un capteur est dit fidèle si le signal qu'il délivre ne varie pas pour une série de mesures concernant la même valeur de la grandeur d'entrée.

2.1.2. Fiabilité

La fiabilité est définie comme la capacité du capteur à fonctionner correctement, c'est-à-dire à fournir des données avec la précision annoncée. Elle dépend naturellement de la

qualité de conception du matériel qui doit être robuste et avoir été entretenu conformément aux spécifications du constructeur [5].

2.2. Domaines d'utilisation des capteurs

<i>MECANIQUE</i>	<i>ELECTRIQUE</i>	<i>CLIMATIQUE</i>	<i>DIVERS</i>
indication de présence	tension	température	rayonnement
déplacement linéaire	courant	humidité	luminosité
déplacement angulaire	puissance	vent	niveau acoustique
vitesse	fréquence	pluviométrie	célérité acoustique
accélération	champ électrique	ensoleillement	champ magnétique
force	charge	durée d'insolation	débit
pression		durée de pluie	couleur
couple			salinité

Tableau I-1 Différents domaines d'application des capteurs

3. Capteur de force

La notion de force peut regrouper plusieurs quantités mesurables qui lui sont relatives. On peut mesurer par exemple la force avec laquelle une touche de clavier est enfoncée, et dans ce cas la vitesse d'enfoncement peut être considérée comme équivalente [2].

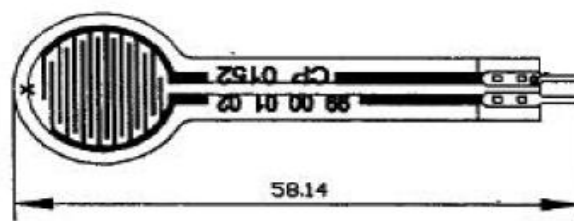


Figure I-2: Capteur de pression de type résistance variable sensible à la pression, FSR (Force Sensor Resistance)

La mesure de la déformation d'un matériau piézoélectrique ou piézo-résistif est aussi en quelque sorte la mesure d'une force appliquée à celui-ci. La mesure d'une flexion, comme elle peut se faire par exemple dans le cadre de la capture du mouvement des doigts avec un gant équipé de capteurs correspond à une déformation d'un capteur qui peut être une

piézorésistance ou une fibre optique par exemple. Ce type de capteur a été utilisé dans deux des réalisations décrites en deuxième partie [4].

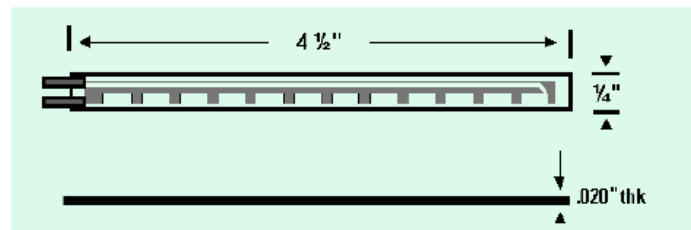


Figure I-3 : Capteur de flexion de type résistance variable

4. Conception de nouveaux capteurs

La conception de ce nouveau système consistait principalement à apporter une solution à une question essentielle : quels types de capteurs devons-nous utiliser pour mesurer les efforts ?

4.1. Choix du procédé de mesure des forces

Il existait de nombreux moyens de mesurer une force de pression [6] :

- **les capteurs piézo-électriques** : France utilisaient la propriété qu'ont certains matériaux de produire une charge proportionnelle à la contrainte qui leur était appliquée (et inversement de se déformer en fonction du champ électrique).
- **les capteurs de force par extensométrie (à jauges de contraintes)** : ils reposaient sur l'effet d'une pression sur les caractéristiques d'une résistance, appelée jauge de contrainte, soumise à la même déformation que le matériau sur lequel elle était collée. La variation de la géométrie de la jauge se traduisait par une variation de sa résistivité permettant d'identifier l'amplitude de la contrainte.
- **Les films en polymère (Figure I-4) de type « capacitif »** : ils indiquaient une variation de tension proportionnelle à la force qui leur était appliquée. Leur faible épaisseur (de 0,15 à 1 mm) autorisait la réalisation des semelles baropodométriques.



Figure I-4 : Capteur de pression avec film polymère FSR data sheet (Interlink). Diamètre 15 mm, épaisseur 1 mm.

- **Les capteurs de force tri axiaux:** ces capteurs réalisés à partir d'un copolymère rigide (PVDF-TrFE) étaient capables de mesurer les forces suivant les trois axes de l'espace.

5. Capteur piézo-électrique



Figure I-5 : Capteur piézoélectrique

En raison de la haute impédance des matériaux piézoélectriques (**Figure I. 5**), leur emploi comme capteurs implique la proximité de l'amplificateur, dont l'impédance d'entrée doit évidemment être très grande, afin de limiter l'influence des câbles de liaison. La tendance est d'ailleurs de plus en plus à l'intégration de l'électronique dans le boîtier. On note que cette obligation de proximité induit un effet pervers. En effet l'effet piézoélectrique est peu sensible à la température et de ce fait une jauge piézoélectrique peut être a priori utilisée France des températures relativement élevées puisque les céramiques utilisées ont généralement une stabilité chimique France des températures très élevées. Cependant, la présence de l'électronique, du fait de la limitation du silicium à 200°C environ, a proximité immédiate de la membrane réduit quasi à néant cet avantage des capteurs piézoélectriques [4].

6. Capteur de force par extensomètre

6.1. Rappel des principes de l'extensomètre

Le capteur de force à jauges extensométriques est composé essentiellement [6] :

- d'un corps d'épreuve déformable (un anneau, dans notre cas)
- d'une ou plusieurs jauges de déformation collées sur celui-ci.
- d'un pont d'extensomètres enregistrant la déformation de cette jauge.

Le terme déformable signifie que sous une contrainte de pression (ici, le pied du marcheur) le corps d'épreuve se déforme de façon élastique, c'est-à-dire que celui-ci reprend sa forme initiale à la cessation de la contrainte de compression.

6.1.1. Les jauges de déformation

Une jauge était composée d'un fil conducteur très fin ou d'une trame métallique, collé sur une feuille très mince, afin de mesurer une déformation via la variation de longueur du fil ou de la trame métallique [6].

Il existait plusieurs types de jauges de déformation en fonction de:

- l'environnement (température, allongement maximal, nombre de cycles).
- les conditions de mise en œuvre (commodités de collage et câblage).
- la nature physique de la structure (coefficient de dilatation de la structure).
- la nature géométrique de la structure (dimensions et causes de contraintes).
- l'instrumentation (matériel à utiliser pour le conditionnement, l'amplification, l'acquisition des données).

6.1.2. Le pont d'extensomètre

Le pont d'extensomètre était un pont de Wheatstone à haute sensibilité dont certaines des quatre résistances ont été remplacées par des jauges de déformation. L'une des branches était soumise à une tension d'entrée (V_e) et la tension de sortie (V_s) était mesurée. La résistance de chacune des jauges variait en fonction de la déformation du matériel étudié et créait ainsi le déséquilibre du pont. Il était alors possible de mettre en évidence leurs

variations de résistance et donc de déduire l'allongement du matériau résultant d'une force appliquée sur celui-ci [6].

Ce pont pouvait être monté en quart, en demi ou en pont complet. Le montage dépendait du nombre de jauges de mesure utilisé.

Pour notre capteur nous avons choisi de n'utiliser qu'une jauge montée en quart de pont. Cette jauge était collée sur la face externe de l'anneau.

Le montage en quart de pont de Wheatstone permettait de mesurer la déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$) de la jauge donc de l'anneau dans le sens longitudinal :

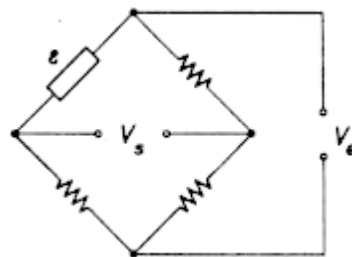


Figure I-6: Le pont d'extensomètre

- ε_r : Déformation réelle
- ε_i : Déformation mesurée
- ε En m/m
- V_e Tension d'entrée en volt
- V_s Tension de sortie en volt

7. Jauge de contrainte

La jauge est un capteur passif traduisant, en variation de résistance électrique, sa propre déformation qui est en principe égale à celle de la structure à l'endroit où il est collé. Pratiquement, son allongement est habituellement limité à environ 3%. En général, une jauge est constituée d'une grille formée par un conducteur collé sur un support isolant.

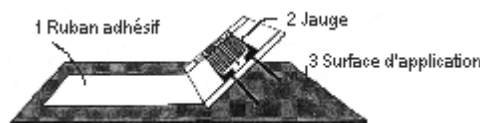


Figure I-7 : Jauge juste avant son collage sur la structure

Le conducteur est soit d'origine métallique, souvent des alliages à base de nickel, soit c'est un semi-conducteur. Le nombre de brin de la grille diffère selon le type du conducteur. Il varie entre 10 et 20 pour un conducteur métallique et est égal à 1 pour les jauges semi-conductrices (*Figure I-8*).



Figure I-8: Jauge à fil métallique et jauge semi-conductrice

Le support isolant est en papier ou, le plus souvent, en plastique. C'est ce support qui est collé sur la pièce dont on veut connaître les déformations et c'est lui qui transmet les déformations au circuit métallique. On conçoit que, pour transmettre avec fidélité les déformations, le support doit avoir des caractéristiques bien particulières (bonne aptitude au collage, coefficient de dilatation pas trop important afin d'éviter un décollement de la jauge par cisaillement, l'adhérence ou faculté du support de pouvoir être bien collé au circuit métallique...) [7]. On peut encore différencier les jauges métalliques par la réalisation de la grille. En effet, il existe des jauges dites à fil et d'autres dites à trame pelliculaire comme elle est montrée dans la (*Figure I-9*). C'est les plus fréquentes. Elles sont réalisées selon les procédés de fabrication des circuits imprimés.

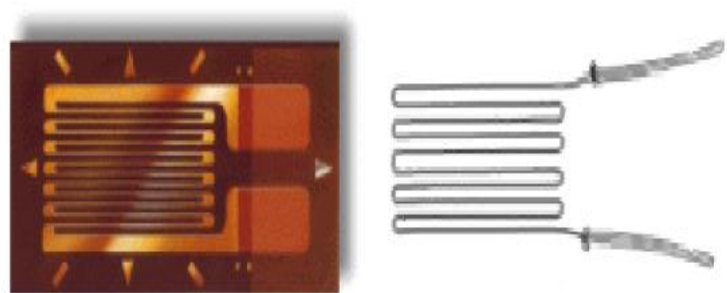


Figure I-9 : Jauge à fil et jauge à trame pelliculaire

La résistance électrique d'un fil conducteur est définie par la loi de Pouillet qui est le produit scalaire de la résistivité du matériau par la longueur du fil d'une section du fil :

$$R = \frac{\rho \cdot L}{s} \dots\dots\dots (I.1)$$

7.1. Structure d'une jauge

Afin d'étudier l'influence des différents paramètres sur le seuil de détection, on suppose une jauge déposée à la surface de la poutre d'épreuve, formant une boucle. Les dimensions des jauges sont cependant différentes en fonction des cas étudiés. Ainsi, pour les structures soumises à une contrainte normale, on suppose que la jauge recouvre toute la largeur de la poutre (entrefer nul impliquant $w_j = w/2$ **Figure I-10 .a**) alors que pour les jauges soumises à une force tangentielle, la jauge ne recouvre que la moitié de la surface de la poutre ($w_j = w/4$ – figure 46.b). Par ailleurs, la longueur totale de la jauge est de 2λ , c'est-à-dire que l'on néglige le morceau permettant de relier les deux brins de la jauge [8].

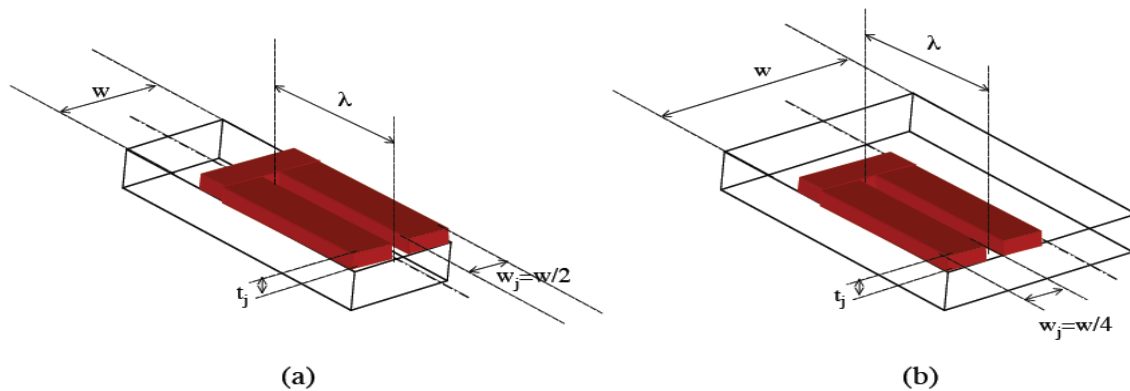


Figure I-10 : Vue schématique des jauges en forme de boucle. (a) Jauge déposée sur la largeur de la poutre pour la détection normale, (b) jauge déposée sur la demi-largeur pour la détection tangentielle

7.2. Mesure de contraintes

7.2.1. Sensibilité

La sensibilité est définie comme étant la variation de l'information de sortie d'un capteur, en fonction de la variation de la grandeur à mesurer. Pour le cas d'un capteur de force à détection piézorésistive, la variation de résistance est liée à la déformation relative de la jauge par :

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad \dots\dots\dots (I.2)$$

Avec K le facteur de jauge et ε la déformation relative, en considérant seulement les composantes longitudinales. Le facteur de jauge dépend du matériau utilisé ainsi que du dopage comme le montre P.J. French [4].

7.2.2. Seuil de détection

La seconde caractéristique importante pour un capteur est le niveau minimal détectable de la grandeur mesurée. La force minimale que l'on peut détecter est ainsi appelée seuil de détection. Cette grandeur est définie en identifiant la source de limitation des performances du capteur qui, en général, est le bruit. Dans notre cas, le bruit mécanique (lié à la résonance de la structure) et le bruit électrique (lié à la résistance électrique de la jauge) sont les deux principales sources de bruit. Afin de déterminer le seuil de détection, il convient tout d'abord de préciser la chaîne de mesure. On considère ici la jauge piézorésistive insérée dans le montage électrique qui transforme la variation de résistance en variation de tension : le pont de Wheatstone (*Figure I-11*). [8]

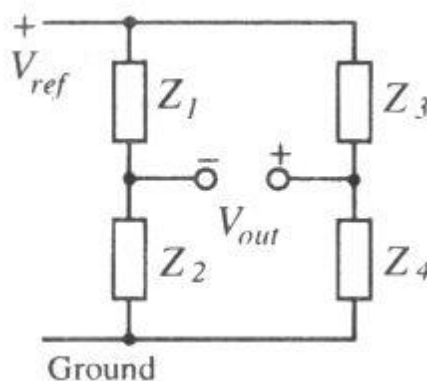


Figure I-11 : Schéma du pont de Wheatstone pour la détection de variation d'impédance.

Les conditions d'équilibre du pont sont que si les impédances Z_2 et Z_4 , et Z_1 et Z_3 sont identiques deux à deux, alors la tension différentielle de sortie V_{out} sera nulle. Si une des impédances varie, le pont est déséquilibré et la tension V_{out} ne sera plus nulle. En pratique, on prend généralement la même valeur pour les quatre impédances, afin d'obtenir un maximum de dynamique (V_{out+} et V_{out-} valent alors $V_{ref}/2$).

En plaçant la piézorésistance à la place de l'impédance Z_2 par exemple, on peut donc détecter la variation de résistance due à la déformation de la jauge. La tension de sortie du pont de Wheatstone vaut alors [8] :

$$V_{out} = \frac{\Delta R}{4R} V_{ref} \quad \text{..... (I.3)}$$

La plus petite tension mesurable correspondant au niveau de bruit ($V_{out} = V_{bruit}$) et en notant $\varepsilon = F \times \gamma$. On peut alors définir le seuil de détection comme étant :

$$F_{min} = \frac{4}{V_{ref}} \frac{V_{bruit}}{k_\gamma} \quad \text{..... (I.4)}$$

7.3. Différents types de jauges

On va donner un aperçu sur les types de jauges, utilisées en analyse des contraintes. Chaque type correspond bien évidemment à une application particulière.

7.3.1. Les jauges simples

Ce type est utilisé pour la mesure des déformations en vue du calcul des contraintes. Elles ont des formes classiques avec une grille rectangulaire.

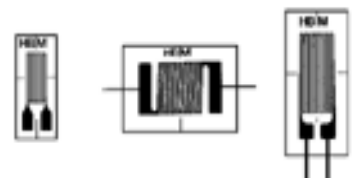


Figure I-12 : Jauge simple

7.3.2. Les minis et micro jauges

Les minis, micro jauges (voir Figure I-13) sont utiles aux points de concentration de contraintes. Certaines ont des dimensions de l'ordre de 0.2 mm. (Chainette de jauges).

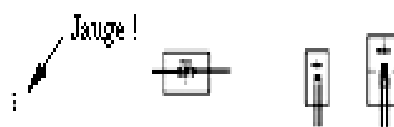


Figure I-13: Mini, micro jauge

7.3.3. Rosettes

Ce sont des associations de jauges fixées sur un support unique et dont les directions des brins font entre elles des angles parfaitement définis. Elles sont utilisées quand on souhaite connaître simultanément les déformations dans plusieurs directions. Lorsque les directions principales des déformations sont inconnues, il faut pour les déterminer mesurer les déformations dans trois directions : on emploie pour cela des rosettes de 3 jauges à 120° ; lorsque l'une des directions principales est présumée probable, on utilise des rosettes à 45° , la jauge centrale étant alignée avec cette direction. Les rosettes à deux jauges perpendiculaires sont utilisées quand on connaît les directions principales de déformation. D'autres rosettes à deux jauges sont adaptées à la mesure des déformations de torsion [4].

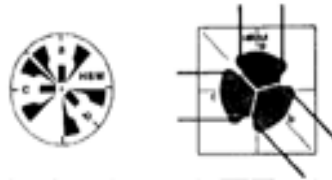


Figure I-14 : Rosette de jauges

7.3.4. Les jauges des contraintes résiduelles

On colle la jauge, puis on la perce d'un trou à l'endroit indiqué sur la jauge, puis on mesure les contraintes induites par des jauges résiduelles (**Figure I-15**) [4].



Figure I-15 : Jauge de contrainte résiduelle

7.3.5. Les jauges longues

On utilise les jauges longues dans la (**Figure I-16**) pour mesurer la moyenne d'une déformation intégrée sur une certaine longueur, par exemple sur des matériaux hétérogènes, tel le béton [4].

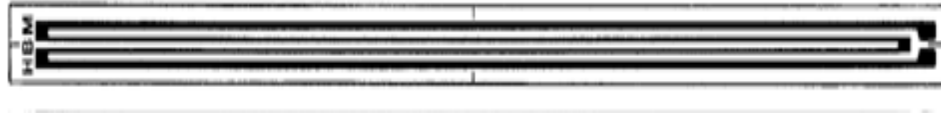


Figure I-16 : Jauge longue

7.4. Circuit de détection amélioré et jauge à deux brins

Comme il a été précisé précédemment, le circuit de détection en pont de Wheatstone est basé sur la dissymétrie engendrée par variation d'une des résistances. Par ailleurs, seulement la moitié de la poutre était jusque-là mise à contribution pour détecter les déformations. En déposant un second brin actif constituant une seconde jauge sur la deuxième moitié de la poutre, et en implémentant le circuit de détection de la manière suivante (**Figure I-17**), on peut doubler la sensibilité du capteur [8].

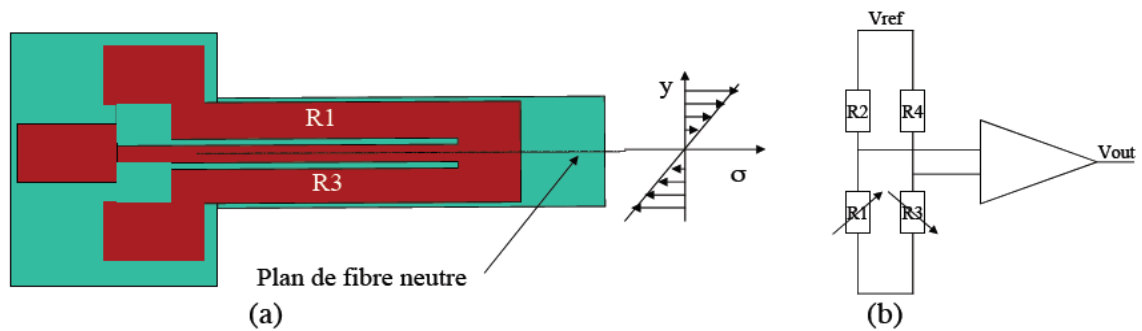


Figure I-17 : Vue de dessus d'une jauge à deux brins actifs déposée à la surface de la poutre (a), implémentée au sein du pont de Wheatstone (b).

En effet, lors d'une déformation, de la poutre d'épreuve, les résistances électriques des brins $R1$ et $R3$ vont varier de manière égale mais opposée, et la différence de potentiels électriques à l'entrée de l'amplificateur va varier deux fois plus que s'il n'y avait qu'une seule jauge. La sensibilité est donc doublée et le seuil de détection divisé par deux puisque les équations (I.5) et (I.6) relatives à la tension de sortie du pont et à la force minimale détectable sont alors [8] :

$$V_{out} = \frac{\Delta R}{2R} V_{ref} \dots\dots\dots (I.5)$$

$$F_{min} = \frac{2}{V_{ref}} \frac{V_{bruit}}{k_Y} \dots\dots\dots (I.6)$$

8. Conclusion

Nous avons passé en revue le capteur de force et différents types de mesure du force et leur caractéristique et les procédés de mesure des forces, et on a présenté par conséquent, les différents appareils et les différentes jauges de contrainte. La majeure partie des nouvelles capteurs de force disponibles dans le marché pour la mesure du force est basée sur le principe de détection de type jauge de contrainte et de type piezorésistif vu la compatibilité de cette structure.

Un certain nombre de techniques existe et chacune présente certains avantages et inconvénients. Il n'est pas question ici d'établir une liste exhaustive des techniques utilisées dans le domaine du contrôle non destructif (CND), mais de donner un aperçu global des techniques les plus répandues industriellement.