

MESURES MÉCANIQUES

LES JAUGES DE CONTRAINTES... EXAMINÉES À LA LOUPE

■ Les jauges de contraintes (ou jauges d'extensométrie) sont largement utilisées depuis de nombreuses années pour la mesure de déformations à la surface des structures. La pression, la force, l'accélération, le couple... bref toute grandeur mécanique dont l'action sur un corps d'épreuve entraîne sa déformation est mesurable par extensométrie. Mais l'on oublie parfois que cette mesure n'a rien d'anodin. C'est pourquoi nous vous proposons ici d'en revoir les principales caractéristiques.

Traduire en variation de résistance électrique la déformation de la pièce sur laquelle elles sont fixées : tel est le principe de base des jauges de contraintes. Celles-ci sont généralement constituées d'une grille formée par un conducteur imprimé ou collé sur un support isolant, lui-même collé sur la pièce (le corps d'épreuve) dont on veut connaître les déformations. Il existe deux types de jauges de contraintes : les jauges piézorésistives (ou à semi-conducteurs) et les jauges métalliques, ces dernières étant actuellement les plus utilisées en extensométrie. A l'origine, elles étaient constituées d'un fil (généralement en constantan) collé en spires rapprochées sur un support mince. Aujourd'hui, on trouve plutôt des jauges à trame pelliculaire obtenues à partir d'une feuille métallique mince (quelques μm d'épaisseur) et d'un support isolant (une résine synthétique) que l'on traite, comme un circuit imprimé, par lithographie et attaque à l'acide. C'est à ce type de jauges que nous nous intéresserons plus particulièrement.

1 - Un choix judicieux des matériaux

La qualité d'un capteur à jauges de contraintes passe tout d'abord par un choix de matériaux adaptés pour le corps d'épreuve, le support isolant et la jauge elle-même.

Le corps d'épreuve. C'est l'élément fondamental du capteur puisque c'est lui qui est

soumis aux déformations. La tendance naturelle consiste à choisir des matériaux se prêtant à des déformations importantes, afin d'obtenir des signaux de grande amplitude. Il faut alors éviter d'aller aux limites d'élasticité des matériaux afin de s'affranchir des risques de déformations permanentes voire de ruptures.

Les métaux répondant à ces critères ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Les aciers alliés (E4340 par exemple) présentent une excellente résistance à la fatigue, mais ils doivent être protégés contre la corrosion. Les aciers inoxydables n'ont pas ce problème mais ils sont peu homogènes et donnent des capteurs peu précis. On utilise aussi des alliages d'aluminium, qui conviennent bien pour la réalisation de capteurs de faible capacité.

Le choix de matériaux adaptés ne suffit pas. Il faut aussi optimiser la géométrie du corps d'épreuve, afin de trouver des zones de déformations maximales et éviter de trop fortes concentrations de contraintes. L'analyse par éléments finis permet aujourd'hui d'optimiser la conception du corps d'épreuve en fonction de la répartition des contraintes qui lui sont appliquées.

Le support. Afin de transmettre le plus fidèlement possible les déformations du corps d'épreuve, le support de la jauge doit avoir des caractéristiques bien spécifiques : une bonne aptitude au collage, un coefficient de dilatation relativement faible, une bonne tenue en température,



doc. Sonepar Electronique

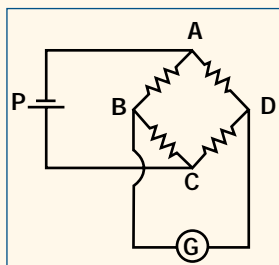
A bras cisailés, en S, en poutre, en acier inoxydable, miniatures... il existe une grande variété de capteurs à jauges de contraintes. Tous permettent de mesurer l'effort exercé sur une structure à travers la déformation qu'il engendre. Le choix de l'un ou l'autre des capteurs dépendra de l'application envisagée et des conditions d'emploi (température...).

Différents types de montage

■ Les variations de résistance des jauges sont trop faibles pour être mesurables directement. Les jauges sont donc collées sur le corps d'épreuve de manière à constituer un montage électrique en pont de Wheatstone classique.

Alimenté par une source de courant, le pont présente à l'équilibre une tension nulle entre B et D. Mais la variation de l'une quelconque des résistances fait apparaître une tension non nulle. Dans la pratique, soit l'une, soit plusieurs de ces résistances sont des jauges, les autres étant des résistances pures.

L'intérêt de ce type de montage réside dans le fait que deux résistances adjacentes agissent en sens opposé alors que deux résistances opposées agissent dans le même sens.



On peut donc retrancher des effets parasites (comme la température) et accroître la sensibilité aux grandeurs recherchées. Ainsi, un montage avec deux jauges actives dans des branches opposées du pont permet d'obtenir

la somme algébrique des déformations en deux points distincts du corps d'épreuve. Le montage en pont complet à quatre fils est le plus couramment utilisé (les quatre jauges occupent chacune une branche du pont).

Mais de manière générale, le choix du montage est guidé

par la géométrie du capteur. Sur les capteurs à bras cisailés par exemple, un montage à 8 jauges (deux jauges par branche) permet de s'affranchir de l'effet transversal et d'obtenir de meilleures performances.

etc. Là aussi, des compromis s'imposent dans le choix des matériaux pouvant servir de support. Parmi eux, citons les résines époxydes qui entrent dans la composition des capteurs de grande précision. En les renforçant de fibres de verre, elles sont utilisables dans une plus large gamme de température.

Actuellement, ce sont les polyimides qui suscitent le plus d'intérêt. Très flexibles et utilisables jusqu'à 250 °C, ils peuvent être étalés aussi bien sur la trame qu'en dessous, ce qui permet de protéger la jauge.

La colle. La liaison entre le support de la jauge et le corps d'épreuve est assurée par de la colle. Celle-ci sert d'adhésif mais aussi d'isolant électrique. En effet, aucun isolant assez résistant n'a à ce jour été trouvé pour réaliser le corps d'épreuve. On a recours à différents types de colles, choisis en fonction de la nature du support. Pour que les déformations soient transmises le plus fidèlement possible et que la liaison varie peu dans le temps, la couche de colle doit être mince et présenter une faible viscosité.

La jauge. Différents critères doivent être pris en compte, parmi lesquels le facteur de jauge, la résistance à la fatigue, l'aptitude au soudage et la tenue en température. Les principaux matériaux pouvant servir dans la réalisation de capteurs à jauges de contraintes se distinguent par leur comportement thermique, leur résistance à la fatigue ainsi que par leurs propriétés de linéarité et d'hystérésis.

- Constantan (alliage cuivre-nickel) : c'est l'alliage le plus courant. Il offre une bonne aptitude au soudage et peut être utilisé jusqu'à 200 °C.

- Karma (alliage nickel-chrome) : par rapport à l'alliage précédent, le karma présente une

sensibilité plus importante pour une contrainte similaire et sur le même corps d'épreuve. Il offre aussi de meilleures performances à haute température (jusqu'à vers 350 °C).

- Platine-tungstène : ce matériau est le plus cher, mais il présente la meilleure résistance à la fatigue, la gamme de température la plus large et un facteur de jauge élevé de 4,6. Il reste cependant employé pour des applications très spécifiques.

2 - Influence de la température

Les coefficients de dilatation thermique du corps d'épreuve et de la jauge étant généralement différents, une déformation d'origine thermique s'ajoute aux déformations provenant des contraintes que l'on souhaite mesurer.

Les variations de température entraînent plus précisément deux effets majeurs : la dilatation des matériaux et une variation de résistivité de la jauge. En théorie, ces effets thermiques se compensent (si toutes les branches d'un pont de Wheatstone ont les mêmes caractéristiques thermiques). Mais lorsque l'on veut atteindre une certaine précision, dans les applications de pesage par exemple, il ne faut pas négliger deux facteurs : l'effet thermique sur le zéro et sur la sensibilité.

Dérive thermique du zéro. Tous les métaux constituant les jauges ont une dérive d'autant plus importante que la température est élevée. Ces dérives sont presque toujours positives (elles se traduisent par une augmentation de la résistance en fonction du temps). La plus importante est celle du zéro : en l'absence de charge appliquée, le signal est proche de zéro

mais il n'est jamais tout à fait nul.

Ce déséquilibre initial peut être compensé à l'intérieur du pont dans lequel sont montées les jauges : il faut installer une courte longueur de fil sensible à la température dans la bonne branche du pont (en série avec la jauge) ou ajuster à la longueur voulue une échelle de résistance. Encore faut-il tester auparavant chaque capteur car cette dérive est imprévisible.

Effet thermique sur la sensibilité. Le module d'élasticité du corps d'épreuve et le facteur de jauge dépendent de la température, ce qui entraîne une légère variation de la sensibilité. Contrairement au cas du zéro, cet effet thermique est présent sur tous les capteurs. Avec des jauges en constantan, il est nécessaire de réaliser une compensation en plaçant des thermistances en série avec le pont (et non pas à l'intérieur du pont comme dans le cas du zéro). Au contraire, les jauges en karma que réalise *Interface* compensent de manière intrinsèque la dérive en fonction de la température et ne nécessitent pas l'ajout d'autres composants dans le circuit.

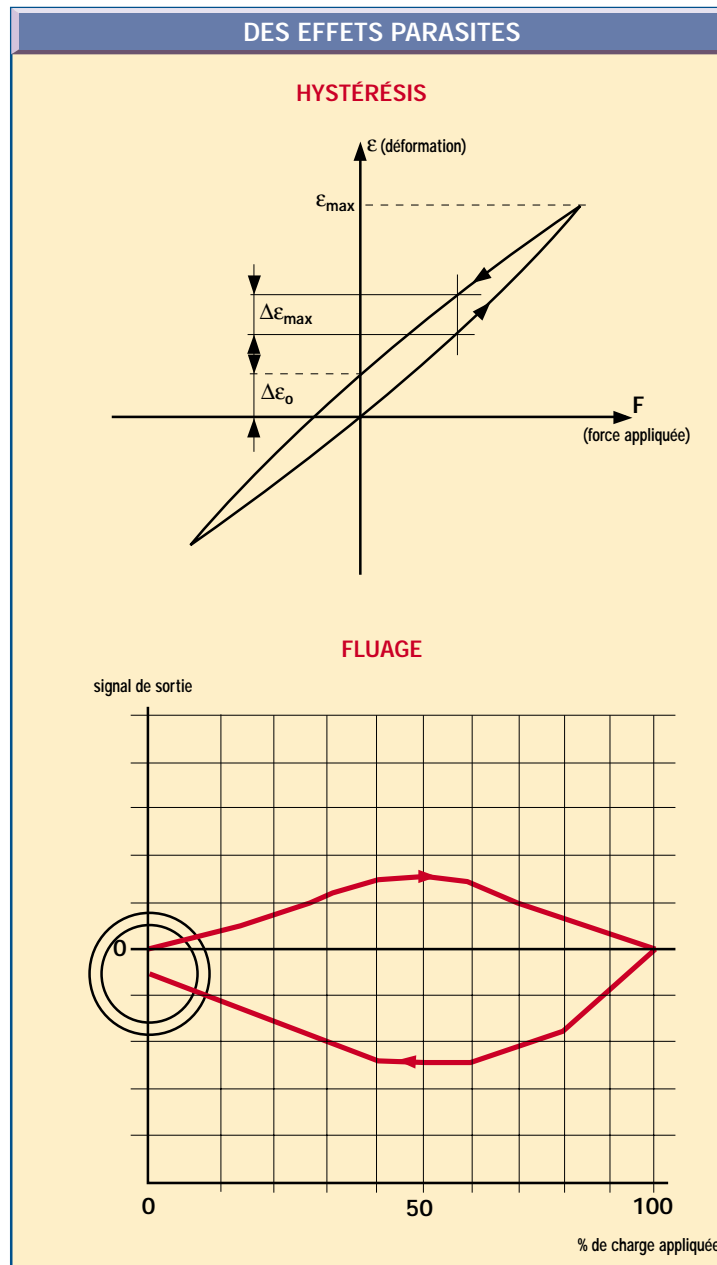
3 - D'autres effets parasites

Fluage. On parle de fluage lorsque la déformation d'un solide soumis à une force constante augmente avec le temps. Plus ce paramètre est faible, plus le capteur est de bonne qualité. En première approximation, on peut considérer qu'il varie comme une fonction logarithmique du temps. Le fluage augmente avec la température et dépend des matériaux utilisés dans la réalisation du capteur.

Il est intéressant de noter que le fluage apparent peut être positif, négatif ou nul. En effet, il est le résultat de deux effets antagonistes. D'une part, le comportement viscoélastique du corps d'épreuve à charge constante se traduit par une augmentation de sa déformation. D'autre part, la colle et le support de jauge subissent une relaxation, se traduisant par une diminution de la contrainte à déformation constante. Ainsi, la liaison entre le corps d'épreuve et la jauge ne sert pas seulement d'adhésif et d'isolant, mais elle constitue un bon moyen de contrôler le fluage.

Hystérésis. Un capteur présente un phénomène d'hystérésis si l'information qu'il délivre est différente suivant que les mesures sont effectuées sous charge croissante ou décroissante. Cette source d'erreur est donc particulièrement gênante dans le cas de cycles de mesures avec montée et descente en charge répétées, ou en fonctionnement dynamique.

L'hystérésis peut être positive ou négative). Contrairement à l'écart de linéarité, il n'est pas aussi simple de la compenser avec l'électronique de mesure. Il s'agit en effet d'une caractéristique liée aux matériaux constituant le



Le capteur présente une hystérésis ($\Delta\epsilon$) lorsque l'information qu'il délivre est différente, suivant que les mesures sont effectuées à charge croissante ou décroissante. Il peut aussi présenter du fluage. Dans ce cas, sa déformation augmente avec le temps et le signal de sortie ne revient pas à zéro lorsqu'on ôte la charge appliquée.

Un paramètre essentiel : le facteur de jauge

■ Le fonctionnement des capteurs à jauges de contraintes est fondé sur la variation de résistance électrique de la jauge proportionnellement à sa déformation. C'est le coefficient ou facteur de jauge k qui traduit cette proportionnalité, suivant la relation :

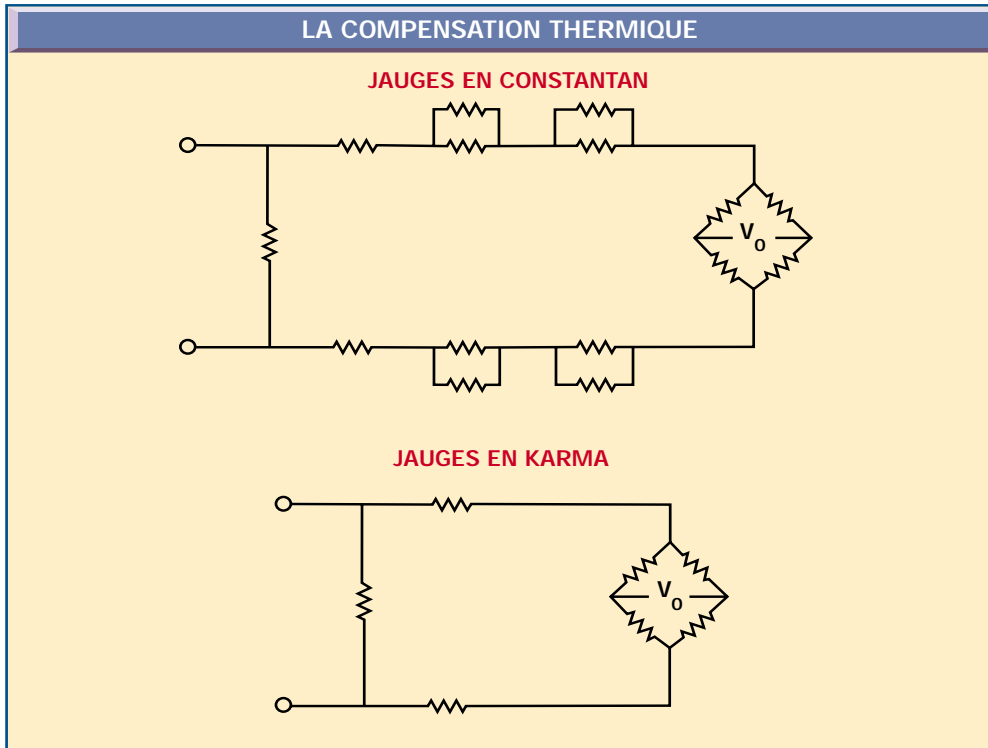
$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta L}{L}$$

k est une constante qui dépend des maté-

riaux considérés et de la température. Elle caractérise la sensibilité de la jauge. Pour les jauges métalliques, k est proche de 2. Pour les jauges semi-conductrices, la valeur absolue de k est comprise entre 100 et 200. Ces dernières ont donc une sensibilité bien supérieure aux jauges métalliques. Cependant, elles ont une linéarité inférieure et sont plus sensibles aux effets de la température.

► Valeurs de k pour les principaux alliages constituant les jauges

Alliage	Composition	Facteur de jauge k
Constantan	45 % Ni, 55 % Cu	2.0 à 2.1
Karma	74 % Ni, 20 % Cr, 3 % Cu, 3 % Fe	2.1 à 2.2
Platine - Tungstène	92 % Pt, 8 % W	4.0 à 4.6



Lorsque les jauges sont réalisées en constantan, il faut placer des résistances en série avec le pont pour compenser l'effet de la température. Ce n'est pas le cas avec les jauges en karma que réalise Interface.

corps d'épreuve et à la liaison corps d'épreuve-détecteur. Les aciers inoxydables, par exemple, présentent une hystérésis positive importante et des traitements thermiques sont nécessaires afin de limiter ce phénomène. On peut aussi contrôler la dureté des feuilles de constantan.

Erreurs de linéarité. L'information délivrée en sortie n'est pas toujours proportionnelle à la valeur d'entrée. Les systèmes d'acquisition modernes permettent de corriger cet écart de linéarité, même s'il suffit souvent d'optimiser la conception du corps d'épreuve. En comprenant mieux la distribution des forces qui rentrent en jeu, on peut placer les jauges à des endroits stratégiques du corps d'épreuve et obtenir une excellente linéarité.

Ce texte a été rédigé à partir d'un article de LaVar Clegg (Interface), auquel nous avons ajouté des éléments d'informations tirés des ouvrages «Encyclopédie Vishay d'analyse des contraintes», «Les capteurs en instrumentation industrielle (Georges Asch, édité par Dunod)» et «Les Techniques de l'ingénieur, traité Mesures et Contrôle».*