

Ressource: Montages usuels des jauges dans les ponts de Wheatstone

Document rédigé à partir des documents ressources des collègues de CPGE du lycée Jules Renard de Nevers

Présentation d'une jauge : Dans le cas général, une jauge est constituée d'une grille formée par un fil conducteur filiforme de résistivité ρ , de section S et de longueur $n.l$; l étant la longueur d'un brin et n leur nombre; n est généralement compris entre 10 et 20 pour les jauges métalliques.

Le conducteur est fixé sur un support isolant qui est lui-même collé sur la structure étudiée. Il en résulte que la jauge subit une déformation identique à celle de la structure, dans la direction parallèle aux brins : $\epsilon_x = \Delta l / l$ qui seront à la base de toutes les mesures.

Précision obtenue avec des jauges de déformation

($\epsilon_x = 1 \mu m/m = 10^{-6}$)

Définition du facteur de jauge : La résistance du circuit résistif collé sur la jauge a pour expression $R = \rho.L^2/V$, avec:

ρ : résistivité du matériau, L : longueur du circuit,

V : volume du conducteur, $V = L.S$ et S : section du circuit,

Le changement de géométrie dû aux effets mécaniques entraîne donc une variation relative de résistance pouvant s'exprimer par $\Delta R/R = 2\Delta L/L - \Delta V/V = 2\Delta L/L + [2\nu.\Delta L/L - \Delta L/L]$. Il est possible de montrer que la variation relative de résistance s'exprime finalement par :

$$\Delta R/R = k.\epsilon \quad \text{avec : } k : \text{Facteur de jauge}$$

Alliage	Composition	Facteur de jauge
Constantan	45% Ni, 55% Cu	2,1
Karma	74% Ni, 20% cr, 3% Cu, 3% Fe	2,1

Cette déformation mesurée $\epsilon_x = 1 \mu m/m = 10^{-6}$ étant très faible. il faudra conditionner le signal en l'amplifiant avec un pont de Wheatstone.

Relation fondamentale dans un pont de Wheatstone :

Lorsque deux résistances R_1 et R_2 sont placées en série sur une alimentation à tension constante V , elles fonctionnent comme un diviseur de tension tel que:

$$V(R_1) = \frac{V \cdot R_1}{R_1 + R_2}, \quad V(R_2) = \frac{V \cdot R_2}{R_1 + R_2},$$

$$V(R_3) = \frac{V \cdot R_3}{R_3 + R_4} \quad \text{et} \quad V(R_4) = \frac{V \cdot R_4}{R_3 + R_4}$$

La tension e peut être déterminée en prenant la différence des chutes de potentiel à travers les résistances entre A et B :

$$e = V(R_1) - V(R_4) = V(R_3) - V(R_2) \Rightarrow e = V \cdot \left(\frac{R_1.R_3 - R_2.R_4}{(R_1 + R_2).(R_3 + R_4)} \right)$$

Structure et équilibre du pont de Wheatstone : Un pont est équilibré si $e = 0$, donc si $R_1.R_3 = R_2.R_4$

On peut déterminer cette variation au voisinage de l'équilibre en différentiant l'équation d'équilibre du pont

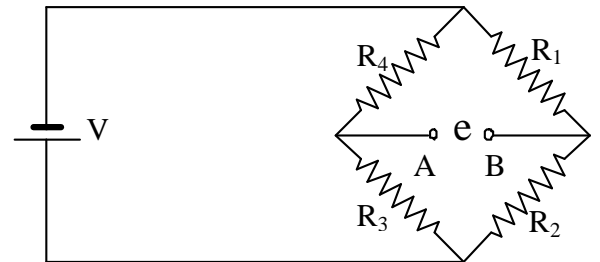
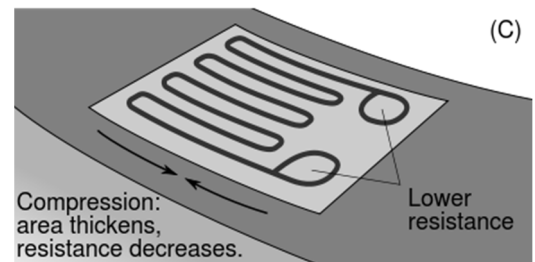
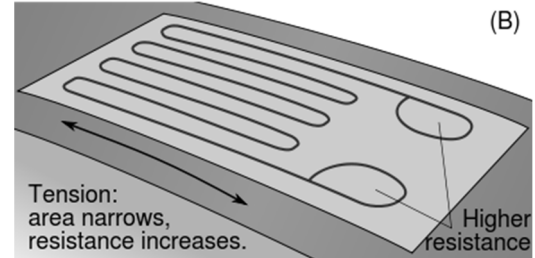
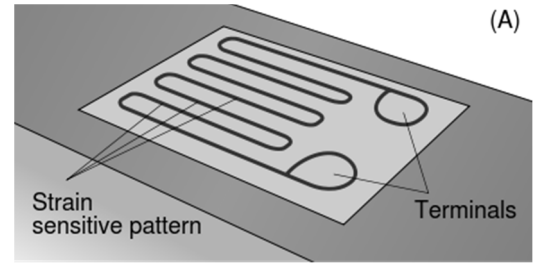
$$de = \frac{V}{4} \cdot \left(\frac{dR_1}{R_1} + \frac{dR_3}{R_3} - \frac{dR_2}{R_2} - \frac{dR_4}{R_4} \right).$$

De cette expression découlent deux règles essentielles :

1^{ère} règle : Deux variations de même signe des résistances de deux bras adjacents se neutralisent.

2^{ème} règle : Deux variations de même signe des résistances de deux bras opposés s'ajoutent.

Ces deux règles sont à la base des différents types de câblage des jauges sur un pont de Wheatstone pour minimiser des effets parasites ou pour augmenter la précision de l'analyse en "opposant" des jauges de variations contraires, ou en "additionnant" des jauges de mêmes variations.

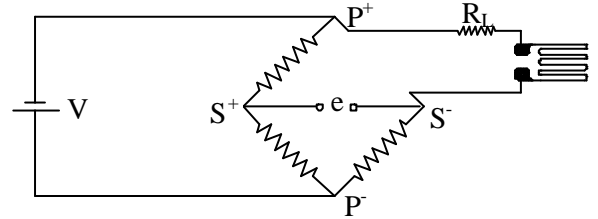


Exemples de montage en "quart de pont" :

Montage "quart de pont", deux fils : *Non recommandé*

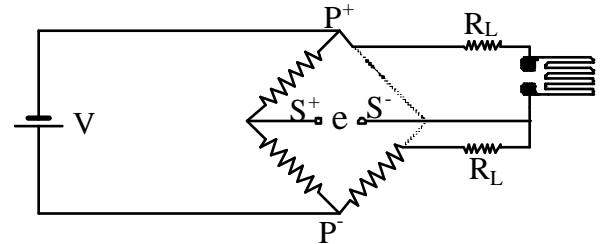
La variation de résistance R_L des fils de raccordement de la jauge dus aux effets thermiques peuvent induire des erreurs de mesure systématiques.

Il faut donc éliminer l'influence de la résistance de ligne R_L en mettant une ligne équivalente dans le bras adjacent, en application de la 1^{ère} règle, d'où le montage recommandé 'Quart de pont' à trois fil.



Montage "Quart de pont" à trois fils : *Montage recommandé*

La variation de température éventuelle au cours du mesurage peut engendrer des dilatations thermiques qui vont parasiter la mesure. Pour remédier à ce problème, les fabricants ont conçu des *jauges auto-compensées en température*.



Exemples de montage en "Demi-pont".

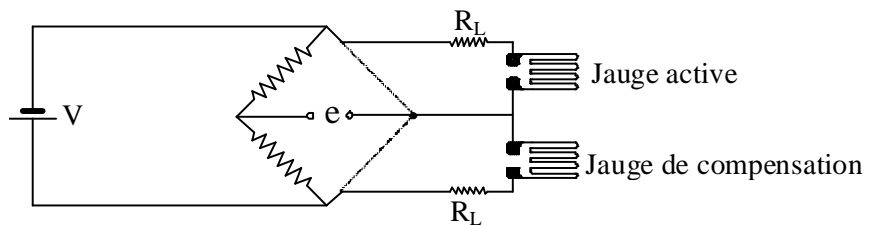
Plusieurs cas d'utilisation sont possibles :

- Doubler la précision de l'étude en mettant deux variations identiques dans des bras opposés, ou en mettant deux variations opposées dans des bras adjacents.
- Éliminer des effets d'origine thermique en mettant des variations de résistance égales d'origine thermique dans des bras adjacents : c'est le principe de la jauge de compensation.

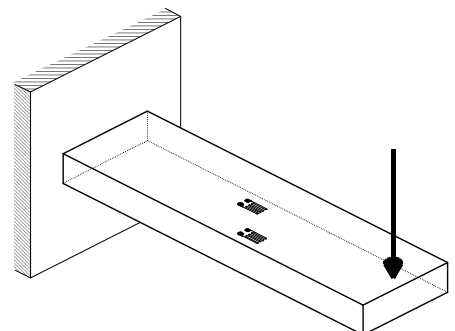
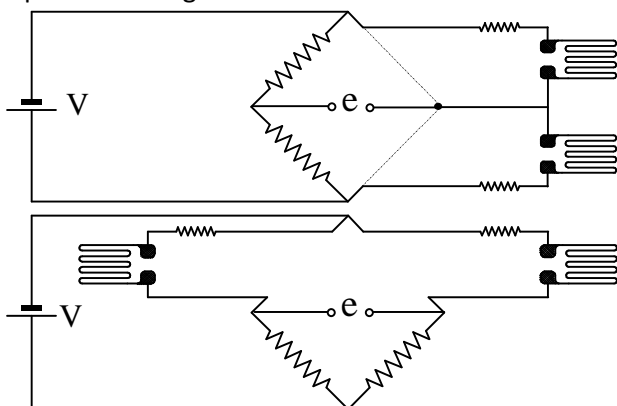
Jauge de compensation montée en "Demi-pont":

La jauge de mesure n'a pas forcément le même coefficient de dilatation que la structure sur laquelle elle est collée; il se produit donc **un allongement différentiel parasite entre jauge et structure**. Pour y remédier, on colle une seconde jauge sur une plaquette support de même matériau que celui de la structure et placée dans les mêmes conditions de température, mais non sollicitée mécaniquement. La jauge de compensation est placée dans le bras adjacent à celui comportant la jauge de mesure.

Ce montage en $\frac{1}{2}$ pont donne la même précision qu'un montage $\frac{1}{4}$ pont mais en ayant éliminé l'influence de dilatation thermique différentielle.



Exemple de montage en flexion :

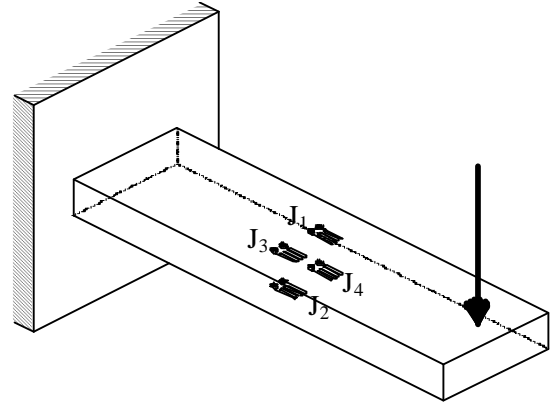
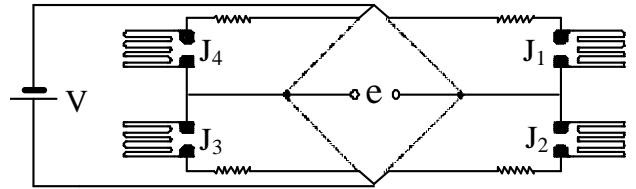


$$\Rightarrow e = \frac{V}{2} \cdot k \cdot \epsilon$$

Exemple de montage en pont complet :

L'idée générale est de placer deux jauges qui varient de la même manière dans deux bras opposés et deux jauges qui varient en opposition dans deux bras adjacents.

Essai de flexion : Les effets de résistance de ligne se neutralisent deux à deux : $e = V.k.\epsilon$. La tension de sortie **e** est quatre fois plus importante qu'en ¼ de pont, donc la précision également.



MESURES MÉCANIQUES

Des jauges, des ponts... et une solution de câblage pour chaque cas

▼ Pour assurer la qualité d'une mesure basée sur des jauges de contraintes, il faut prendre en compte de nombreux critères. Les matériaux constituant la jauge, la colle, l'influence des variations de température ou encore le type de montage, sont parmi les plus importants... Mais il en est un dont on sous-estime trop souvent l'importance : le câblage entre la jauge et l'électronique associée. Pour compenser l'influence de la température et des longueurs de câbles, il faut en effet privilégier une technique de câblage particulière. HBM nous présente ici les solutions les plus adaptées aux différents types de montages...



Les jauges de contraintes sont constituées d'un fil résistant très fin imprimé ou collé sur un support isolant. Elles traduisent en variation de résistance électrique la déformation du corps d'épreuve sur lequel elles sont collées.

L'air de rien, les jauges de contraintes font à elles seules couler plus d'encre que bon nombre d'autres capteurs de mesures mécaniques... Il faut dire que si l'on ne prend pas un certain nombre de précautions, leur utilisation peut conduire à de fâcheuses surprises. Passons encore sur l'abus de langage qui les caractérise : les jauges de contraintes ne mesurent pas... des contraintes, mais des déformations, celles du corps d'épreuve sur lequel elles sont collées. Passons aussi sur toutes les précautions nécessaires dans le choix des matériaux qui la constituent, ou qui constituent le support isolant sur lequel elles sont fixées (voir *Mesures* n° 725 p. 94). Il reste alors à choisir la colle qui transmettra le plus fidèlement possible les déformations du corps d'épreuve à la jauge, à suivre l'évolution du montage dans le temps (vieillesse de la colle, fluage des

matériaux, tenue aux accélérations, etc.), et à prendre en compte toutes les perturbations extérieures (et notamment les variations de température).

A ce niveau-là, l'affaire est encore loin d'être terminée. Pour réaliser des mesures dignes de nom, il ne faut pas négliger un maillon essentiel de la chaîne de mesure : le câblage entre les jauges et l'électronique qui leur est associée...

Mais revenons-en aux fondamentaux. Une jauge de contrainte, c'est un fil résistant très fin imprimé ou collé sur un support isolant de petite taille (de quelques millimètres à quelques centimètres de longueur). Lorsque le support se déforme, le fil s'étire. Sa résistance électrique (donnée par $R = \rho L/S$, où ρ est la résistivité du conducteur, L sa longueur et S sa section) varie alors proportionnellement à la variation de longueur :

$$\Delta R/R = k \Delta L/L$$

En mesurant la variation de résistance de la jauge, on en déduit alors sa déformation, et par conséquent celle du corps d'épreuve...

La constante k (appelée facteur de jauge) dépend des matériaux considérés et de la température. Elle caractérise la sensibilité de la jauge.

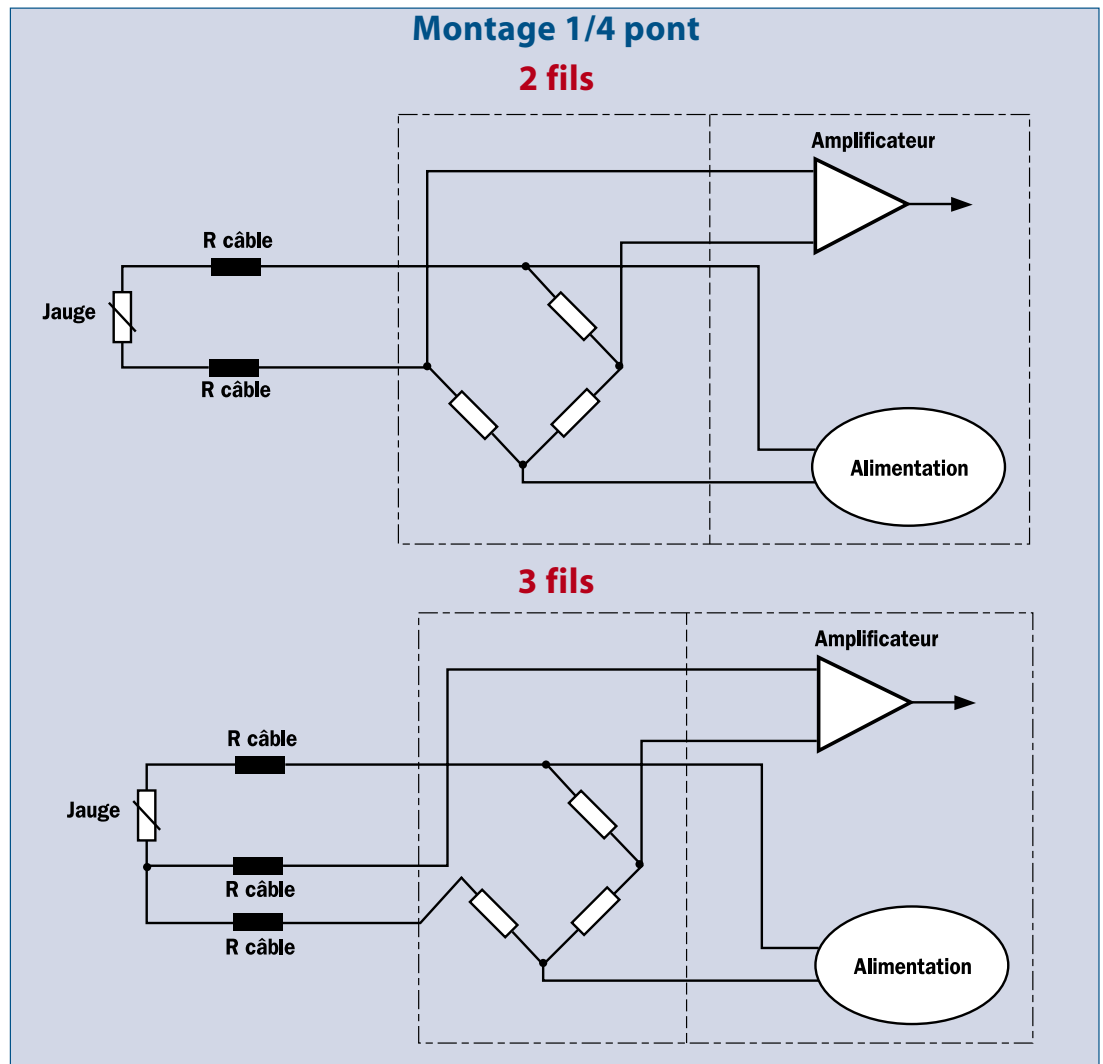
L'autre règle régissant les mesures par jauges de contraintes est liée à leur montage. Comme les variations de résistance des jauges sont trop faibles pour être mesurables directement, les jauges sont assemblées suivant un montage électrique en pont de

L'essentiel

- Avant de réaliser une mesure à l'aide de jauges de contraintes, il faut faire un choix entre différentes solutions de montage et de câblage.
- Les montages en pont complet, demi-pont et quart de pont ne s'emploient pas dans les mêmes conditions et ne nécessitent pas tous de prendre les mêmes précautions.
- Dans tous les cas, le câblage joue un rôle essentiel. Il permet de compenser les pertes en ligne et l'influence de la température.

Dans un montage en quart de pont, une seule jauge est active. Les trois autres sont des résistances (ou des jauges dites de complément). Deux fils alimentent le pont ainsi formé, et deux autres servent à restituer le déséquilibre du pont lorsque la résistance de la jauge varie. Ce montage est le plus simple mais il présente de nombreux inconvénients (pertes en lignes, influence de la température sur la jauge et les câbles, etc.)

Dans un montage à trois fils, un câble supplémentaire est ajouté entre la jauge et l'amplificateur. Par rapport au montage à deux fils, le déséquilibre du pont est alors compensé. En revanche, ce n'est pas le cas de l'influence des variations de températures ou des pertes en ligne...



Wheatstone. Suivant le nombre de jauges constituant le pont, on trouve alors des montages en quart de pont (une seule jauge dite active), en demi-pont (deux jauges actives) ou en pont complet (quatre jauges actives), les jauges manquantes étant au besoin remplacées par des résistances (ou des jauges dites de complément).

Le pont de Wheatstone a deux caractéristiques particulières. A l'équilibre, la tension entre les deux points situés aux extrémités de sa diagonale est nulle. Si l'une des résistances varie, le pont est déséquilibré et la tension de sortie mesurée permet alors d'accéder à la variation de résistance. Autre particularité, deux résistances adjacentes du pont agissent en sens opposé, alors que deux résistances opposées agissent dans le même sens. Il est ainsi possible d'éliminer l'influence de certains phénomènes (tels que la température) ou d'ajouter ceux qui sont liés aux grandeurs recher-

chées afin de les mesurer plus facilement. Le pont de jauges est ensuite raccordé à un conditionneur-amplificateur (qui alimente le capteur, conditionne et amplifie le signal de quelques millivolts à quelques dizaines de volts) puis à un afficheur.

Mais c'est entre les jauges et l'amplificateur que tout se joue... Car si un grand nombre d'utilisateurs en sous-estiment l'importance, le câble est un élément essentiel de la chaîne de mesure. L'influence des variations de température (qui agit sur la dilatation des matériaux et sur la résistivité de la jauge) et celle des longueurs de câbles utilisés déterminent en effet la qualité finale du résultat.

Pour compenser l'influence de ces deux paramètres, il faut alors privilégier certains types de câblage suivant le pont de jauges utilisé (quart de pont, demi-pont ou pont complet).

Le montage en quart de pont est constitué d'une jauge et de trois résistances de complément fournies par l'électronique

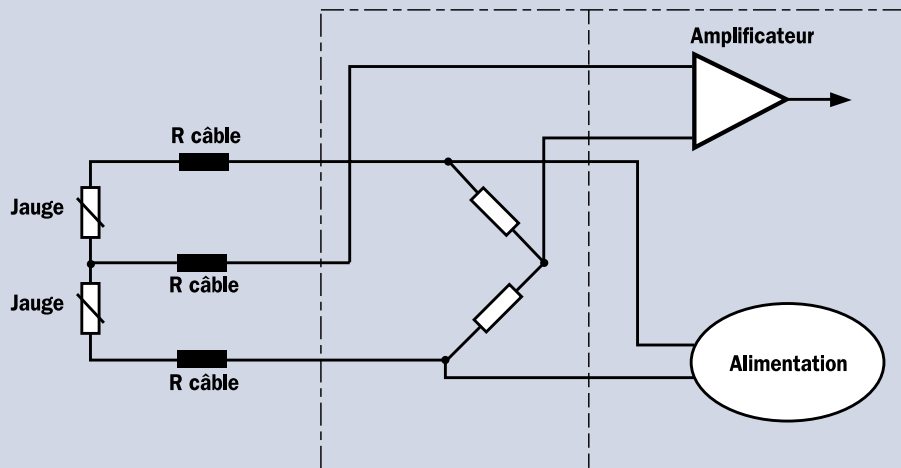
associée à la jauge. Ce montage est le plus simple et le moins cher, mais il présente de nombreux inconvénients.

La jauge étant relativement éloignée des autres résistances constituant le pont, la résistance des deux fils de liaison n'est pas négligeable par rapport à sa propre résistance. L'équilibre du pont est donc modifié. De plus, la tension alimentant la jauge diminue de la somme des variations de tension rencontrées sur les câbles de liaison. A 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...

Pour donner un ordre d'idées, si l'on utilise un câble de 100 mètres de long et de 0,14 mm² de section, l'influence sur le zéro est supérieure à 100 000 µm/m, celle de la température est supérieure à 4 000 µm/m/10 K et la sensibilité varie

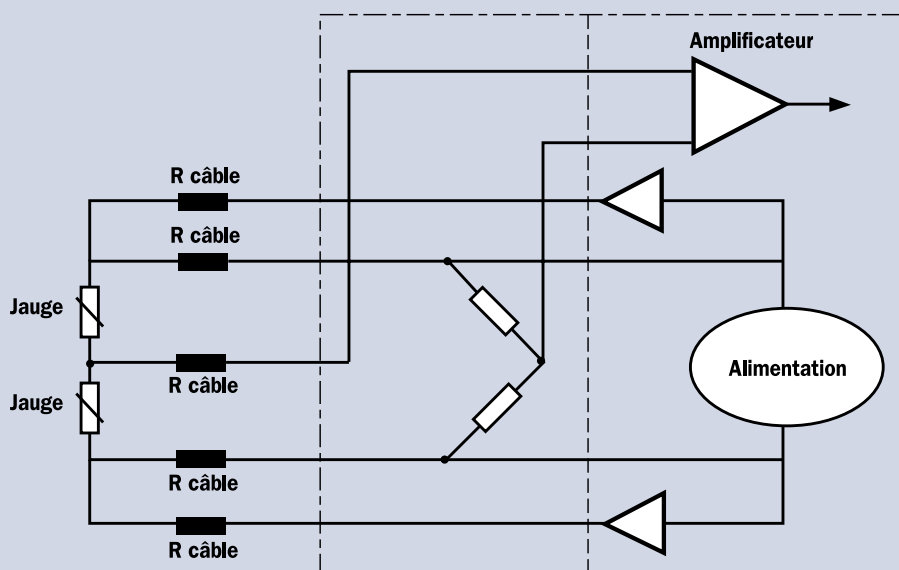
Montage 1/2 pont

3 fils



Dans ce montage, deux jauges sont actives, les deux autres résistances (ou jauges de complément) étant fournies par l'électronique associée aux jauges. Le demi-pont est relié à l'amplificateur par un câble à trois fils : deux servent à l'alimentation, et le troisième envoie le signal de mesure vers l'amplificateur. Dans ce montage, le câblage n'a pas d'influence sur l'équilibre du pont. L'effet thermique est également compensé, mais pas les pertes en ligne.

5 fils



Ce montage compense les pertes en ligne du montage classique à trois fils. Deux fils supplémentaires récupèrent en effet la tension à l'entrée du demi-pont de jauges et la retransmettent à l'amplificateur.

de 10 %... Pour limiter ces inconvénients, on utilise alors **un montage à trois fils**. Dans ce montage, un câble supplémentaire est ajouté entre la jauge et l'amplificateur (voir schéma). Comme les résistances de deux bras adjacents d'un pont agissent en sens opposé, le déséquilibre est alors compensé.

En revanche, ce n'est pas le cas des éventuelles variations de température. Les éléments constituant le pont n'étant pas nécessairement à la même température, il faut apporter le plus grand soin dans le choix du coefficient de température de la résistance du câble supplémentaire et de la jauge.

Enfin, la résistance de la ligne supplémentaire entraîne toujours une atténuation du signal de mesure (pertes en ligne).

Le montage ne convient donc pas aux applications nécessitant de grandes longueurs de câbles (plusieurs mètres).

Le montage en demi-pont est le plus répandu. Il est constitué de deux jauges actives placées à proximité l'une de l'autre. Dans l'amplificateur, deux résistances montées en demi-pont permettent de former le pont complet.

Le demi-pont de jauges est relié à l'amplificateur par un câble à trois fils : deux servent à l'alimentation des jauges et le troisième envoie le signal de mesure vers l'amplificateur.

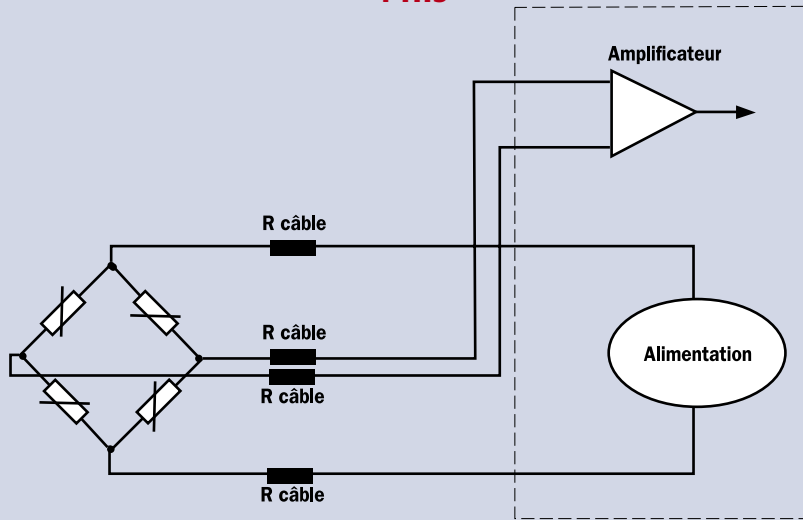
L'intérêt d'un tel montage, c'est que les fils de l'alimentation sont en série avec les jauges. S'ils sont identiques et de même longueur, il n'y a donc aucune influence du câblage sur l'équilibre du pont. L'effet thermique sur les

lignes et sur les jauges est compensé (par symétrie), mais pas l'atténuation du signal de mesure (et donc la perte de sensibilité) due aux longueurs de câble. Comme le montage en quart de pont, le demi-pont ne peut donc convenir qu'à de faibles longueurs de câbles.

Pour pallier cet inconvénient, on utilise alors **un montage en demi-pont à cinq fils** (voir schéma). Deux fils supplémentaires récupèrent la tension à l'entrée du demi-pont de jauges et la retransmettent à l'amplificateur afin de compenser la perte relevée.

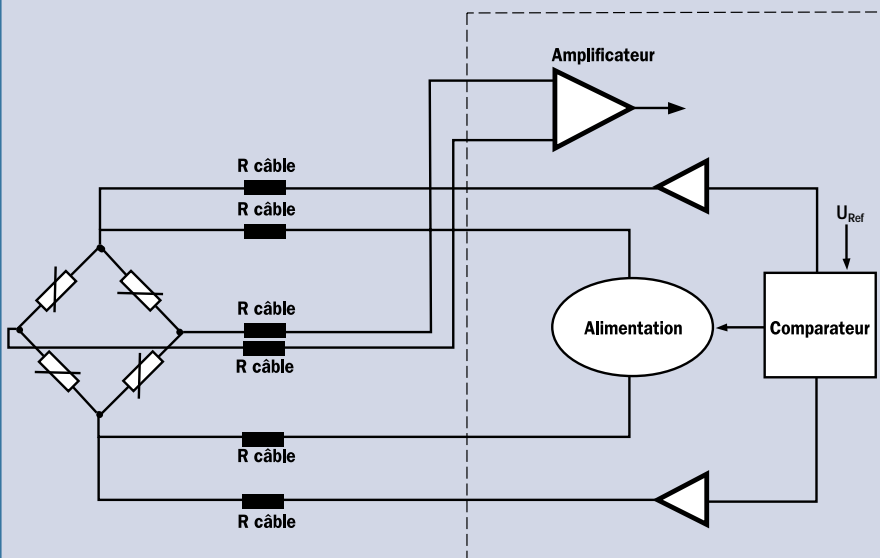
Le montage en pont complet est couramment employé dans la réalisation des capteurs de force ou de couple. Avec un collage et un câblage adéquat, il permet en

Montage pont complet 4 fils



Les quatre résistances du pont sont des jauges. L'influence du câblage et des variations de température est compensée. Les pertes en ligne, en revanche, sont toujours présentes.

6 fils



Ce montage permet de pallier l'ensemble des inconvénients liés au montage des jauges de contraintes. Deux fils de retour viennent prendre la tension d'alimentation qui arrive au capteur et la retournent vers un comparateur qui agit alors sur le générateur de tension pour augmenter la tension d'alimentation et compenser la perte en ligne.

effet d'obtenir une sensibilité optimale. Dans ce montage, les quatre résistances du pont sont des jauges. Le câblage n'a aucune influence sur l'équilibre du pont, et les jauges sont placées dans les mêmes conditions thermiques. Cependant, les longueurs de câble font toujours apparaître une résistance, qui crée une perte en ligne d'autant plus importante que le câble est long... Pour éliminer ces pertes en ligne et pouvoir utiliser de grandes

longueurs de câbles, HBM conseille alors toujours d'utiliser une technique de **racordement à six fils**. Dans ce cas, deux fils de retour viennent prendre la tension d'alimentation qui arrive au capteur et la retournent vers un comparateur qui agit alors sur le générateur de tension pour augmenter la tension d'alimentation et compenser la perte en ligne. Le montage à six fils, que HBM utilise et recommande depuis de nombreuses

HBM, en bref

La société allemande HBM (groupe Spectris) est spécialisée dans le domaine des mesures mécaniques. Elle produit et commercialise une large gamme de jauges de contraintes, de capteurs de force, de couple, ainsi que des capteurs de déplacement miniatures et des capteurs de pression (en particulier des capteurs haute pression, jusqu'à 15 000 bar). Elle fournit également l'électronique et les systèmes de câblage associés à ses capteurs, qu'elle peut délivrer avec un certificat de l'organisme d'accréditation allemand DKD. Elle propose enfin son savoir-faire dans une activité de prestation de services (notamment dans le collage des jauges). Outre son siège en Allemagne, HBM compte trois usines de production (en Allemagne, aux Etats-Unis et en Chine) et un réseau de filiales. Elle emploie 1 500 personnes (dont une vingtaine en France), et a réalisé en 2003 un chiffre d'affaires de 128 millions d'euros.

MLZ

années, permet ainsi de pallier l'ensemble des influences du câblage sur le résultat de mesure : les pertes en ligne, la variation de la résistance des câbles en fonction de la température et l'influence de la température sur les jauges...

Le raccordement à six fils permet aussi de simplifier les procédures d'étalonnage. Comme les influences du câble sont compensées, l'unité d'étalonnage peut en effet être directement connectée à l'amplificateur. Enfin, le montage autorise de grandes longueurs de câbles (jusqu'à 500 mètres). Il ne reste alors qu'à s'assurer que l'amplificateur est bien adapté à un montage à six fils. Chez HBM, les capteurs de force, de pression et de couple utilisant un montage en pont complet sont proposés en standard avec un câble de liaison à six fils et un amplificateur spécifique.

Patrick Robert
Ingénieur commercial
HBM France