

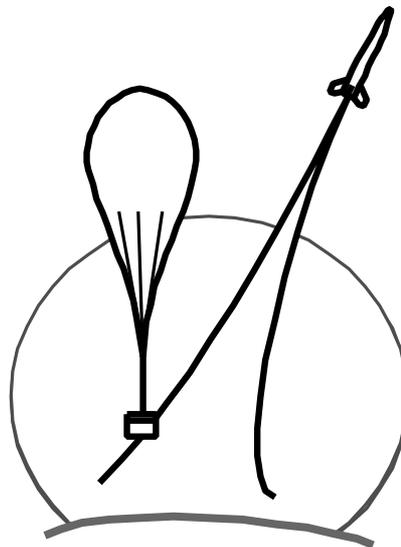


CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES



Département Education-Jeunesse du CNES
18, avenue Edouard Belin - 31401 TOULOUSE CEDEX 4
Tél. : () 5 61 27 31 14 / Fax : () 5 61 28 27 67
Site Internet : <http://cnes.fr>

ANSTJ - Secteur Espace
16, place Jacques Brel - 91130 RIS-ORANGIS
Tél. : () 1 69 02 76 10 / Fax : () 1 69 43 21 43
Site Internet : <http://www.anstj.org/espace/>



Les jauges de déformation

--

Edition Mars 2002

Note technique ANSTJ

Jauges de déformation

| | |
|---|----|
| INTRODUCTION | 1 |
| I - PRINCIPE | 3 |
| II - DESCRIPTION | 7 |
| III - FABRICATION des JAUGES | 8 |
| Le métal | |
| Le support | |
| Les sorties | |
| La géométrie | |
| IV - EFFETS PARASITES d'ORIGINE THERMIQUE | 13 |
| V - ELONGATION MAXIMALE | 15 |
| VI - PUISSANCE LIMITE | 15 |
| VII - CARACTERISTIQUES USUELLES | 18 |
| VIII- COLLAGE des JAUGES | 18 |
| Choix des colles | |
| IX - CABLAGE des JAUGES | 23 |
| X - PROTECTION des JAUGES | 24 |
| XI - NOTIONS de DEPOUILLEMENT des MESURES | 26 |
| XII - EXEMPLES de DEPOUILLEMENT | 28 |
| XIII- METHODES d'ETALONNAGE des voies de MESURE | 33 |
| XV - INFLUENCE des CABLAGES | 36 |
| ANNEXE | |

INTRODUCTION

La résistance des matériaux (RdM) , est une science théorique qui permet de connaître l'état de contrainte et de déformation d'une pièce mécanique soumise à une sollicitation extérieure .

Connaissant la valeur de la limite de rupture du matériau constituant la pièce , il est alors possible de dimensionner cette pièce . Ceci en supposant que la pièce à étudier soit de **FORME SIMPLE** et que les **SOLLICITATIONS EXTERIEURES** soient parfaitement **CONNUES** .

En pratique , sauf cas particulier ces conditions sont rarement réunies .

Par exemple :

Quelles sont les contraintes en divers points sur la structure constituant une aile d'avion ?

- au décollage
 - à différentes vitesses
 - dans un trou d'air
- } avec et sans vent?

La résistance des matériaux ne peut dans ce cas que permettre une évaluation très approximative des contraintes .

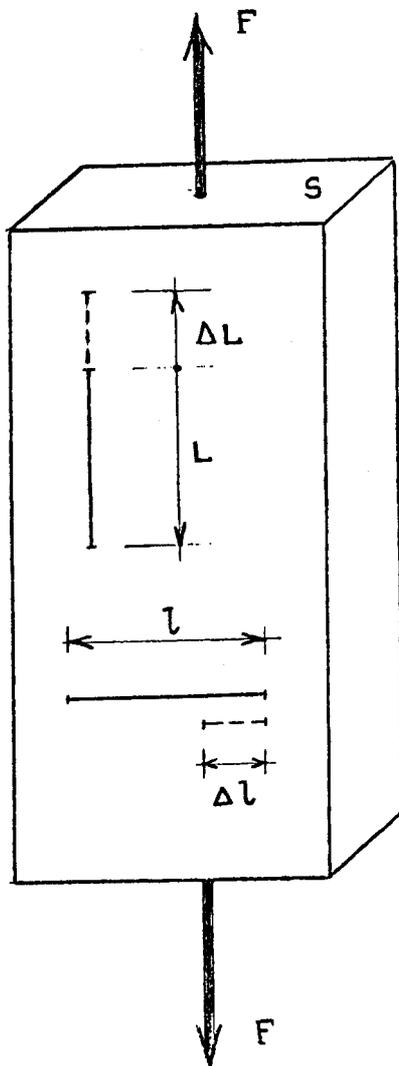
Une des techniques actuelles de mesure des déformations est l'EXTENSOMETRIE . Elle permet , à partir d'un capteur appelé JAUGE DE DEFORMATION de déterminer les valeurs d'allongement relatif en surface d'une structure . Seules sont alors connues les déformations superficielles .

Comme en règle générale , les déformations les plus élevées se situent en surface , cette technique permet de ce fait une bonne précision .

nota: La contrainte est l'effort mutuel entre des éléments voisins de matière .

LES JAUGES DE DEFORMATION

I-PRINCIPE



Une pièce parallélépipédique de section S est soumise à une traction suivant sa plus grande dimension .

Un segment longitudinal de longueur initiale L s'allongera sous l'effet de la traction d'une quantité ΔL (delta L). L'allongement relatif (ou déformation longitudinale) sera par définition :

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta L}{L} \quad (\epsilon = \text{epsilon})$$

Un segment transversal de longueur initiale l se contractera sous l'effet de la traction d'une quantité Δl . La déformation transversale correspondante est alors :

$$\epsilon_2 = \frac{\Delta l}{l}$$

Expérimentalement il est possible de vérifier qu'entre l'allongement relatif ϵ_1 et la contraction ϵ_2 , il existe une proportionnalité,

$$\epsilon_2 = -\mu \epsilon_1 \quad (\mu = \text{MU})$$

Le coefficient de proportionnalité μ est le coefficient de POISSON .

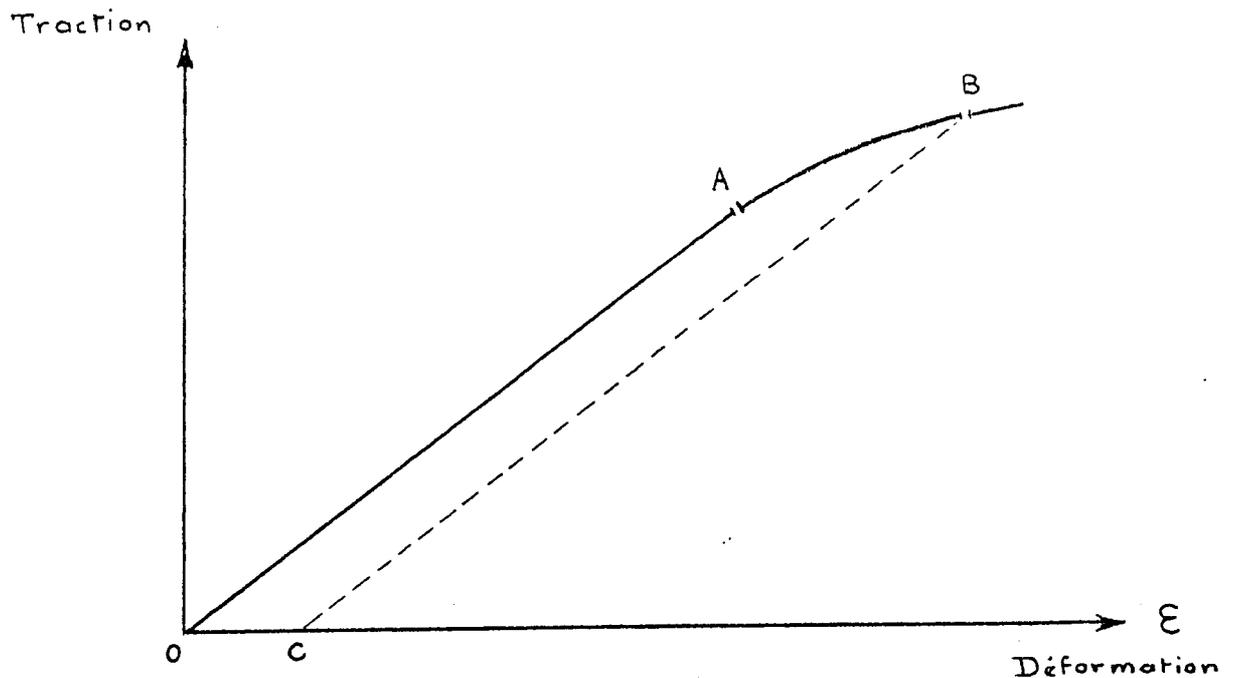
- c'est un nombre sans dimension
- $\mu \approx 0,3$ pour les métaux

Les allongements relatifs ϵ_1 et ϵ_2 , sont proportionnels à la contrainte appliquée, c'est à dire au rapport de la force à la section, soit :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{en Kg/cm}^2) \quad (\sigma = \text{sigma})$$

$$\sigma = E \epsilon$$

Le facteur de proportionnalité (E) qui lie la contrainte à la déformation, est le module d'élasticité ou module de YOUNG .



Remarque :

La courbe qui lie la contrainte à la déformation d'un métal (comme l'acier par exemple) , est linéaire jusqu'à un point A . Si l'on supprime la charge (traction) la déformation revient à zéro . C'est le domaine ELASTIQUE .

Si l'on tire jusqu'au point B et que l'on supprime la charge , il subsiste une déformation résiduelle OC ; c'est le domaine PLASTIQUE .

A titre indicatif , le module de YOUNG est de

20 000 pour l'ACIER

7 000 " l'ALUMINIUM

4 600 " le MAGNESIUM

Il est d'autant plus grand que le métal est plus rigide

Supposons que la pièce parallélépipédique soit un fil conducteur ,

- . de longueur L
- . de section $S = l^2$
- . de résistivité ρ

la résistance du fil sera

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

En soumettant le fil à une traction ,

- . L s'allonge d'une quantité ΔL
- . S diminue d'une quantité ΔS
- . R varie d'une quantité ΔR

S étant liée à L par le coefficient de POISSON , la relation exprimant la variation relative de résistance ($\Delta R/R$) , en fonction de la variation relative de longueur est :

$$\boxed{\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L}} \quad (\text{en supposant } \rho \text{ constant})$$

ou K est une constante qui dépend de la nature du fil.

nota :

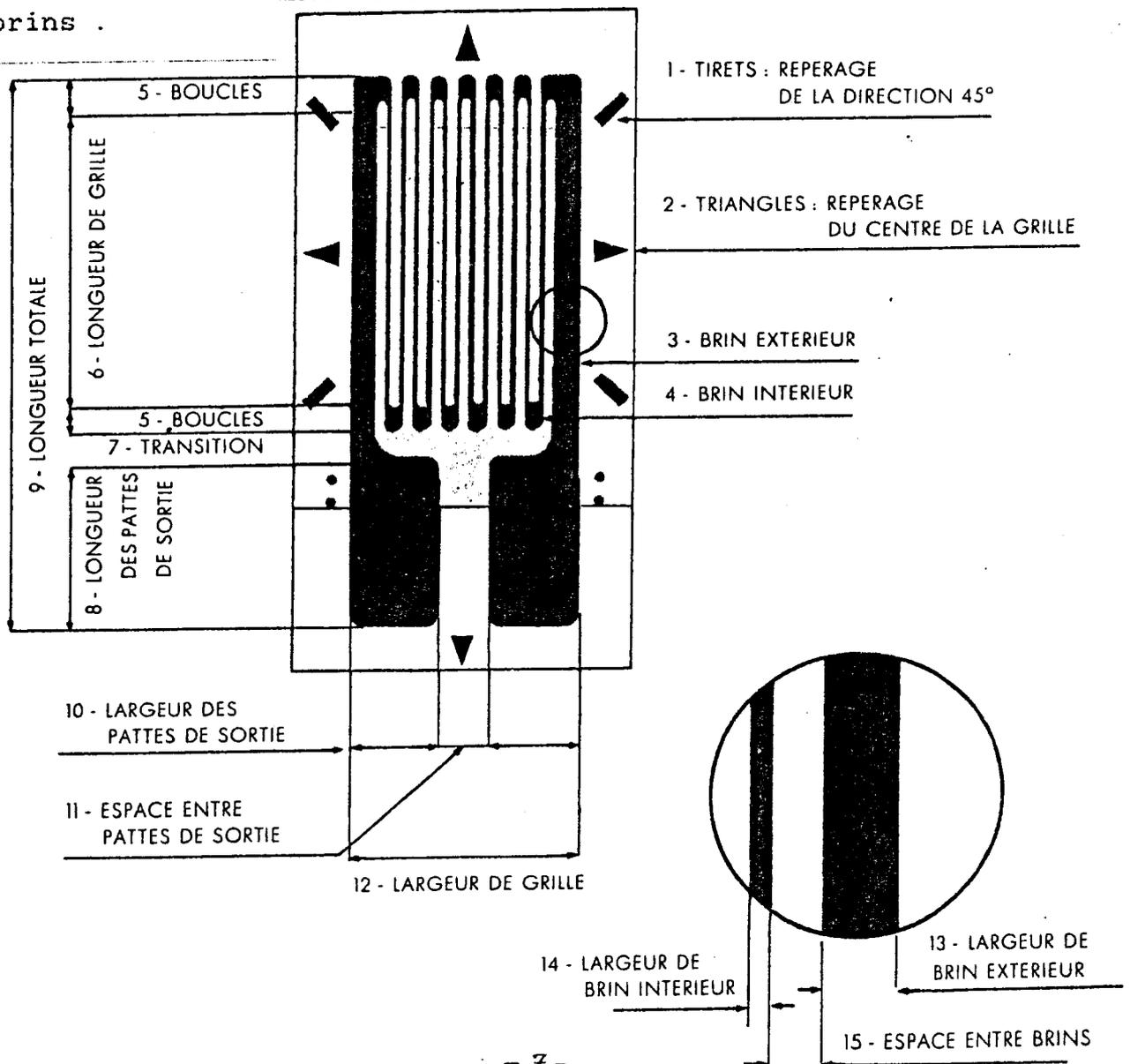
$$R = \rho \frac{L}{S} \quad \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S}$$

$$\frac{\Delta S}{S} = 2 \frac{\Delta l}{l} = -2 \mu \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{puisque } \epsilon_2 = -\mu \epsilon_1)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} (1 + 2\mu) \quad (\text{étant supposé constant})$$

II-DESCRIPTION

Une JAUGE de DEFORMATION fonctionne suivant le principe énoncé dans le chapitre précédent . Elle est constituée d'un fil métallique solidaire d'un support isolant , de façon à former un certain nombre de brins parallèles à une direction donnée . Des sorties de raccordement plus épaisses permettent de souder les fils de liaison aux instruments . Les effets transverses sont annulés en augmentant la section des boucles de liaison entre brins .



III-FABRICATION des JAUGES

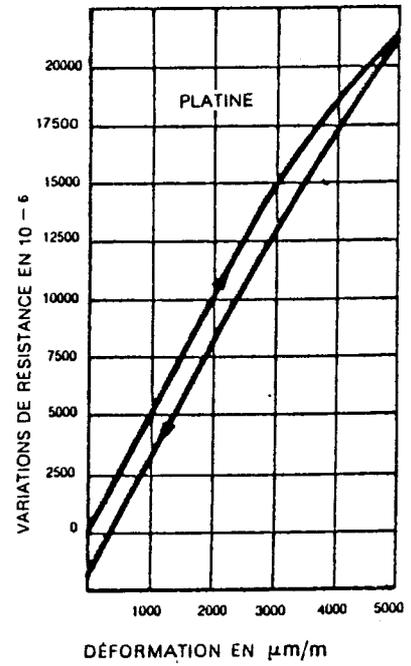
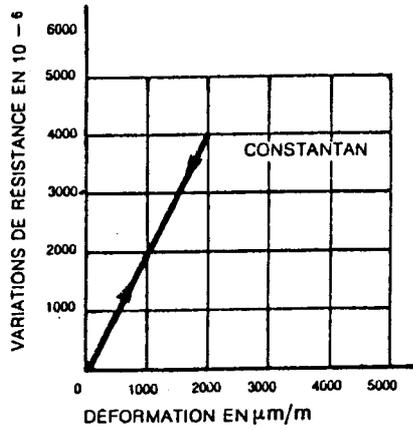
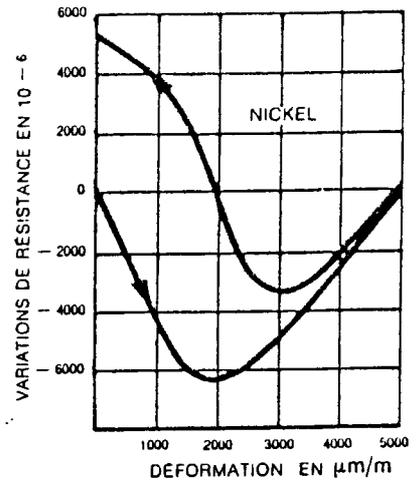
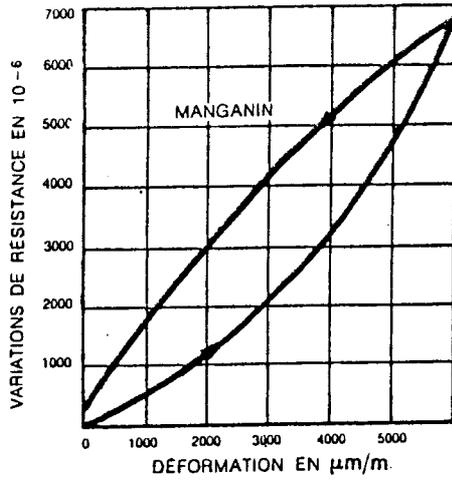
- Le METAL -

La variation relative de résistance ($\Delta R/R$) doit être proportionnelle à l'allongement relatif ($\Delta L/L$) du métal considéré . Ceci conduit à choisir des métaux ou alliages ayant un coefficient de jauge (K) constant .

L'hystérésis doit être minimale , c'est à dire que la courbe qui lie la variation relative de résistance à l'allongement relatif doit être la même lorsque la charge appliquée croît ou décroît . Compte tenu de ces critères , les métaux utilisables en EXTENSOMETRIE sont:

- le CONSTANTAN
- les alliages de NICKEL/CHROME
- l'ELINVAR
- le PLATINE/TUNGSTENE

| METAL OU ALLIAGE | NOM COMMERCIAL | SENSIBILITÉ AUX DÉFORMATIONS | OBSERVATIONS |
|---------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|--|
| Fer | | + 4 | au-dessous de 500 |
| Cuivre | | + 2,6 | |
| Argent | | + 3 | |
| Nickel | | - 12 | |
| Platine | | + 6 | |
| Titane pur | | - 1,1 | au-dessous de 750 |
| Alliage 6AL4V de titane | | - 0,2 | |
| Aluminium | | + 0,85 | |
| Cupro-Nickel 55-45 (Constantan) | Advance, Cupron, Copel, etc. | + 2,1 | |
| Nickel-Chrome 80-20 | Nichrome V, Tophet A, etc. | + 2,2 | |
| Cuivre-Nickel-Manganèse | Manganin | + 0,6 | Variable suivant traitement thermique Travaillé à froid Aux faibles déformations Variable suivant composition Aux faibles déformations |
| Nickel-Chrome 75-20 + additions | Karma, Evanohm, Chromel | + 2,1 | |
| Fer-Nickel-Chrome | Acier inoxydable 18-8 | + 2,6 | |
| Fer-Chrome-Molybdène | Elinvar, Isoélastic | + 3,5 | |
| Or-Chrome | | 0,0 | |
| Fer-Chrome-Aluminium | Armour D - Alliage 815 - Alchrome | + 2,4 | Aux faibles déformations |
| Cuivre-Or | | - 80 à - 120 | |
| Platine-Tungstène 92-8 | Alliage 479 | + 4,1 | |



- L'effet extensométrique est très variable suivant les métaux. Il peut ne pas être linéaire ou présenter de l'hystérésis. De ce fait, seuls des alliages bien définis peuvent servir à la fabrication des jauges.

- Le SUPPORT -

Une JAUGE de DEFORMATION est composée

- d'un circuit électrique en forme de grille
solidaire d'une
- feuille isolante qui constitue le support .

C'est ce support qui est collé sur la pièce dont on veut mesurer les allongements et qui transmet les déformations à la grille métallique .

Pour transmettre avec fidélité les allongements , le support doit répondre à des caractéristiques particulières ..

Les plus importantes sont :

- le FLUAGE (diminution de la déformation transmise dans le temps)
- la FLEXIBILITE (nécessaire au moment du collage)
- la limite d'ALLONGEMENT
- l'ADHERENCE
- la résistance d'ISOLEMENT
- la tenue en TEMPERATURE
- le coefficient de DILATATION

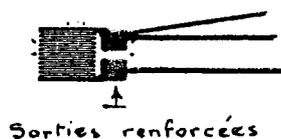
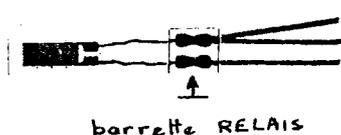
Compte tenu de ces impératifs , les supports sont le plus souvent en

- RESINE EPOXYDE
- POLYIMIDE

- Les SORTIES -

Les " PATTES " de sortie des JAUGES doivent supporter les soudures aux fils de liaison des barrettes RELAIS . Elles sont constituées par un élargissement du circuit métallique.

Certains types de JAUGES possèdent des sorties renforcées autorisant un cablage direct .



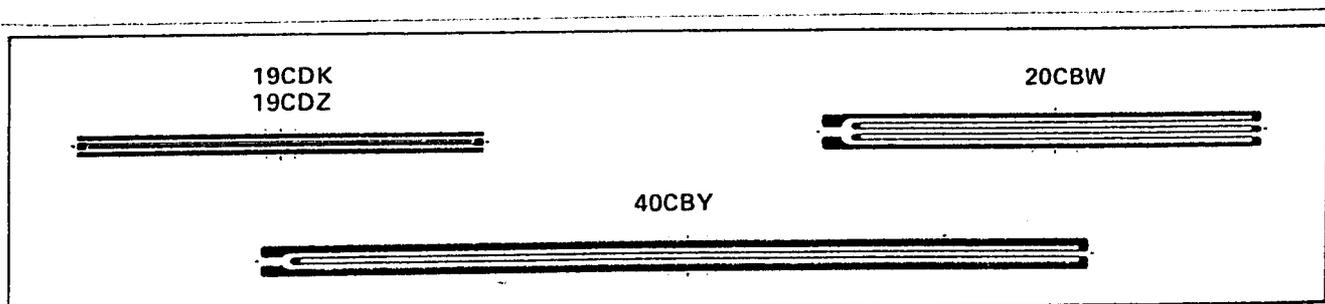
- La GEOMETRIE -

Actuellement , les JAUGES sont fabriquées suivant une technique analogue à celle des circuits imprimés . La JAUGE est d'abord dessinée à très grande échelle , puis reproduite par réduction photographique .

Cette technique permet d'obtenir les formes les plus variées.

Jauges longues

Elles servent à mesurer la moyenne d'une déformation intégrée sur une certaine longueur, par exemple sur des matériaux hétérogènes, tel le béton sur lequel la déformation totale peut être plus intéressante que celle des seuls cailloux ou du seul ciment.



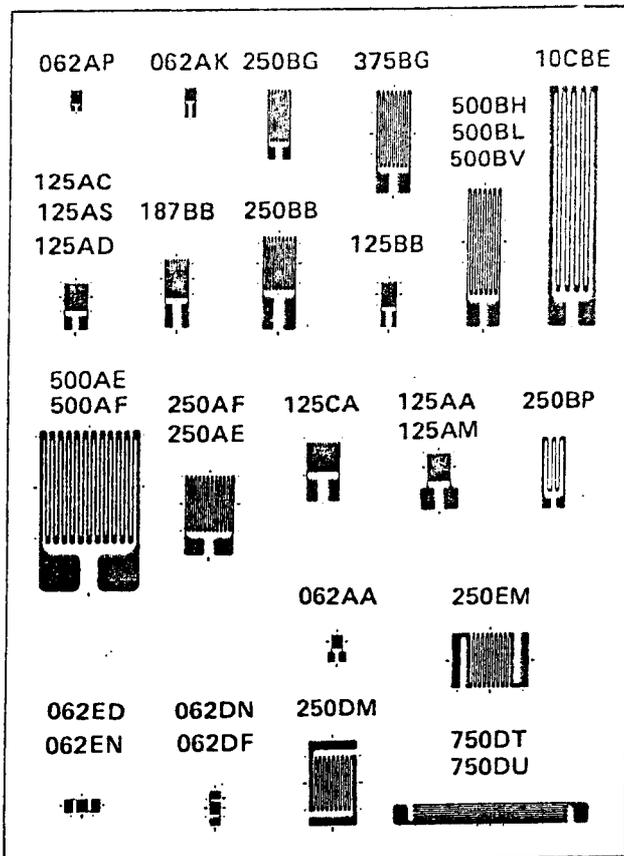
Jauges simples

Les jauges utilisées pour la mesure des déformations en vue du calcul des contraintes sont de formes classiques avec une grille en forme de rectangle, allongée dans le sens des brins. Ces géométries sont celles qui donnent des effets latéraux les plus faibles et généralement négligeables. Les modèles les plus couramment utilisés sont de taille moyenne, par exemple 250 BG.

Les modèles larges sont utilisés parfois pour obtenir des signaux plus importants en appliquant des tensions plus fortes.

Parmi les plus petites, certaines ont des pattes élargies (062 AA - 125 AA) ce qui peut faciliter les soudures lorsqu'on opère dans des conditions inconfortables.

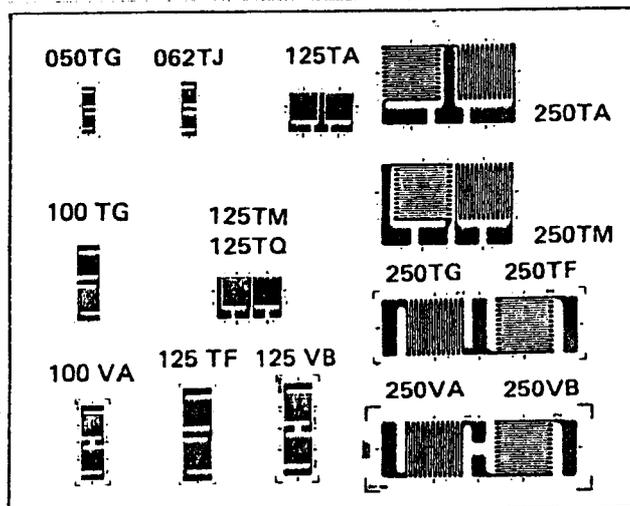
Les sorties sont généralement du même côté, mais sur certains types, elles sont de part et d'autre, question de facilité de câblage suivant les conditions d'emploi.



Rosettes de 2 jauges

Sont constituées par deux jauges réalisées simultanément sur un même support, sensibles respectivement à deux directions orthogonales. On les utilise pour mesurer les déformations principales lorsqu'on en connaît les directions, soit pour des raisons théoriques (par exemple symétrie), soit parce qu'on les a obtenues par une étude préliminaire (verniss craquelants ou revêtement photoélastique).

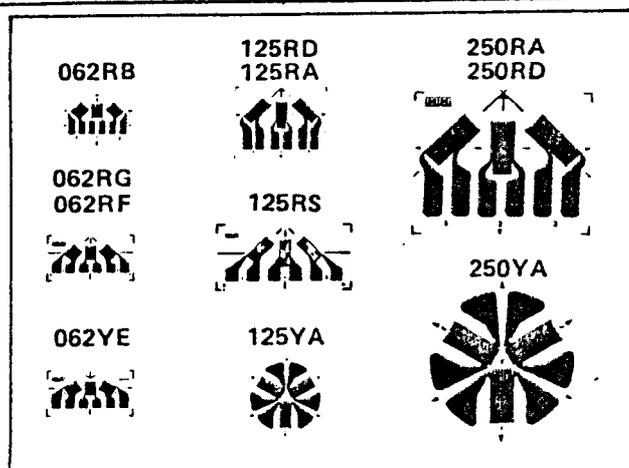
Certaines ont un point commun, d'autres non, le choix dépendant des nécessités du câblage ou de la nature des instruments utilisés.



Rosettes de 3 jauges

Lorsqu'on ignore même les directions principales, 3 mesures sont nécessaires puisque l'état des contraintes superficielles en un point dépend de 3 paramètres. Les 3 jauges sont disposées à 45° (R) ou à 120° (Y) ou 60°. Les dispositions à 120° ou 60° sont équivalentes.

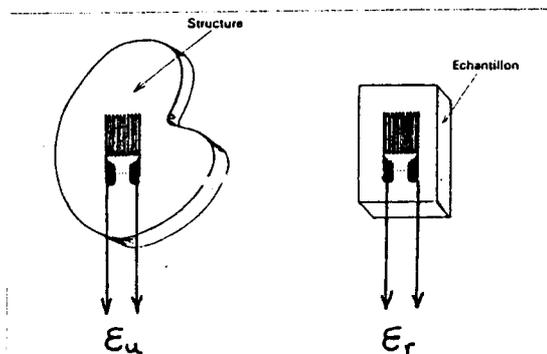
La géométrie 120° est la plus logique théoriquement si l'on ne connaît pas, même approximativement, une direction principale. Par contre, les calculs de dépouillement des rosettes 45° sont plus simples (sauf évidemment avec machine calculatrice ou ordinateur). Les facilités de câblage et certaines traditions locales font que les 45° sont plus utilisées que les 120°.



IV- EFFETS PARASITES d'ORIGINE THERMIQUE

Lorsque une JAUGE est collée sur un métal , elle subit la dilatation du métal .

Le procédé le plus élémentaire de compensation thermique consiste à associer à une JAUGE ACTIVE , une JAUGE identique collée sur un échantillon de même métal ne subissant que les effets thermiques .



La valeur de déformation à prendre en compte est alors :

$$\epsilon_u - \epsilon_r$$

L'utilisation de JAUGES AUTOCOMPENSEES permet également de résoudre ce problème . Le choix du type de JAUGE à utiliser est alors fonction de la nature du matériau constituant la structure étudiée .

| Code | Coefficient de dilatation | Matériaux |
|------|---------------------------------------|--|
| 00 | 0 | Quartz, Invar |
| 03 | $5,4 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | Tungstène-Molybdène-Zirconium-Carbure de Tungstène |
| 05 | $9 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | Titane et alliages |
| 06 | $11 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | Acier-certains inox-Beryllium |
| 09 | $16 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | Aciers inox-Cuivre et alliages |
| 13 | $23,4 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | Aluminium et alliages |
| 15 | $27 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | Magnésium et alliages - Zinc et alliages |
| 18 | $32,4 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | Matières plastiques |
| 41 | $73,8 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | Matières plastiques |
| 50 | $90 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | Plexiglass - Araldite. |

| NOMBRE A.C.T. | COEFFICIENT DE DILATATION EN PPM/° | | MATÉRIAUX |
|---------------|--|--|---|
| | 32 à 212° F | 0 à 100° C | |
| 00 | 0.8 0.28 0.017 | 1.4 0.5 0.03 | Invar Quartz Silicate* de Titane |
| 03 | 3.0 2.2 2.4 3.1 | 5.4 4.0 4.3 5.6 | Alumin Molybdène Tungstène Zirconium |
| 05 | 5.1 5.0 5.5 4.8 4.9 | 9.2 9.0 9.9 8.6 8.8 | Verre Acier 15-7 Mo. PH. Acier 410 S.S. Titane Pur* Titane 6 AL - 4V* |
| 06 | 6.4 7.0 6.7 6.0 7.5 6.6 6.7 6.3 6.0 5.7 | 11.5 12.6 12.1 10.8 13.5 11.9 12.1 11.3 10.8 10.3 | Beryllium Inconel Inconel X Fer, fonte grise Monel Nickel, A Acier, 1008, 1018* Acier 4340 Acier 17-4 PH Acier 17-7 PH |
| 09 | 9.3 10.2 9.3 9.6 8.0 8.9 | 16.7 18.4 16.7 17.3 14.4 16.0 | Cuivre au beryllium Bronze, Phos. (10%) Cuivre Acier 304 S.S.* Acier 310 S.S. Acier 316 S.S. |
| 13 | 12.9 11.1 13.0 | 23.2 20.0 23.0 | Aluminium, 2024-T4*, 7075-T6 Laiton 30-70 Etain (Pur) |
| 15 | 14.5 | 26.1 | Magnesium, AZ-31B* |

V-ELONGATION MAXIMALE

Les JAUGES de déformation ont des limites d'allongement à ne pas dépasser . Au delà de cette limite , la grille peut se couper , le support se fissurer ou la jauge se décoller .

L'élongation maximale des principales jauges utilisées est la suivante :

- Jauges d'usage courant à support POLYIMIDE
5 à 10% (50000 à 100000 μ def)
- Jauges à support renforcé de fibre de verre
1 à 2%
- Jauges spéciales grandes élongations
20 à 25%

VI-PUISSANCE LIMITE

La variation de tension aux bornes d'une jauge de déformation est d'autant plus grande que le courant traversant la jauge est important .

Par contre , plus le courant est important , plus la jauge chauffe . Pour déterminer la valeur maximale de la tension d'alimentation , il faut tenir compte :

- de la surface de la grille
- de la résistance nominale de la jauge
- de la dissipation de la chaleur dans la structure

Pour ce dernier point , le tableau de la page suivante indique les puissances recommandées , compte tenu de la nature de la structure , et de la précision souhaitée .

Exemple

Une grosse pièce d'aluminium est équipée de la jauge de déformation suivante :

- Résistance nominale 120 Ω
- Dimension de la grille 0,38 * 0,51 mm
- Précision souhaitée en statique : moyenne

Le tableau des puissances recommandées donne pour cette utilisation 0,5 à 1,5 W/cm².

En choisissant une puissance moyenne de 1 W/cm² quelle est la valeur de l'intensité traversant la jauge ?

Quelle est la tension aux bornes de la jauge ?

Surface de la jauge :

$$0,38 * 0,51 = 0,1938 \text{ mm}^2 = 1,938 * 10^{-3} \text{ cm}^2$$

Puissance dissipée par la jauge :

$$1 * 1,938 * 10^{-3} = 1,938 \text{ mW}$$

Valeur de l'intensité dans la jauge

$$P = RI^2 \text{ donc } I = \sqrt{\frac{P}{R}} = 4,02 \text{ mA}$$

Tension aux bornes de la jauge :

$$U = RI. \quad U = 120 * 4,02 * 10^{-3} = 0,48 \text{ v}$$

PUISSANCES RECOMMANDÉES EN WATTS/cm²

| DISSIPATION DE LA CHALEUR | PRÉCISION REQUISE | | | | | |
|---|-------------------|---------------|--------------|---------------|---------------|-------------|
| | STATIQUE | | | DYNAMIQUE | | |
| | ÉLEVÉE | MOYENNE | BASSE | ÉLEVÉE | MOYENNE | BASSE |
| Excellente. Grosses pièces d'aluminium ou de cuivre | 0,30 à 0,75 | 0,75 à 1,5 | 1,5 à 3 | 0,75 à 3 | 1,5 à 3 | 3 à 8 |
| Bonne. Grosses pièces d'acier | 0,15 à 0,30 | 0,30 à 0,75 | 0,75 à 1,5 | 0,75 à 1,5 | 1,5 à 3 | 3 à 8 |
| Moyenne. Tôles minces d'inox ou de titane | 0,08 à 0,15 | 0,15 à 0,30 | 0,30 à 0,75 | 0,30 à 1,5 | 0,75 à 1,5 | 1,5 à 3 |
| Mauvaise. Plastiques chargés, verre epoxy | 0,01 à 0,03 | 0,03 à 0,08 | 0,08 à 0,15 | 0,08 à 0,15 | 0,15 à 0,30 | 0,15 à 0,75 |
| Très mauvaise. Plastiques non chargés, par exemple, acryliques ou polystyrène | 0,001 à 0,003 | 0,003 à 0,008 | 0,001 à 0,03 | 0,001 à 0,008 | 0,003 à 0,015 | 0,03 à 0,08 |

VII-CARACTERISTIQUES USUELI.ES -

. Facteur de JAUGE K : valeur proche de 2

Ce facteur est généralement exprimé avec 2 décimales
et une tolérance (1% par exemple)

. RESISTANCE nominale

Valeurs normalisées :

120 Ω

350 Ω

600 Ω

1000 Ω

. LINEARITE

0,1 % jusqu'à 4000 $\mu\text{m}/\text{m}$

1 % " 10000 $\mu\text{m}/\text{m}$

VIII-COLLAGE des JAUGES

- Préparation de la surface -

La surface de collage doit être débarrassée de traces d'oxyde ,
de calamine , de peinture et de toute aspérité .

Cette opération peut être effectuée à l'aide de meules , limes
et papiers abrasifs .

La surface doit être dégraissée en utilisant des solvants tels
que :

- le CHLOROTHENE
- l'ACETONE
- le TOLUENE
- le METHYLETHYLCEtone

- 1'ALCOOL ISOPROPYLIQUE

La surface doit ensuite être conditionnée et neutralisée . Le conditionneur de métal est utilisé pour nettoyer et préparer chimiquement la surface destinée à recevoir la jauge . Il peut être utilisé comme mouillant avec du papier abrasif pour polir la surface . Légèrement acides , les traces de conditionneur utilisé pour préparer la surface de collage , doivent être neutralisées avec une solution alcaline (neutraliseur) .

Les pages suivantes illustrent la façon d'effectuer un collage .

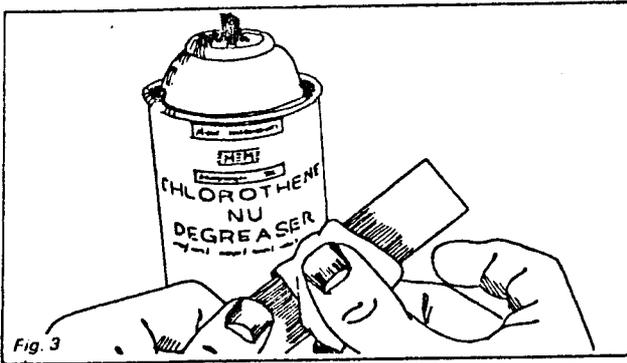


Fig. 3

1^{re} opération
Dégraisser initialement la pièce à l'aide de solvants tels que le chlorothène NU et le fréon TF. Le chlorothène NU est préférable toutes les fois que c'est possible, puisque les dégraissants chlorés sont très actifs. Il existe des matériaux tels que le titane et les plastiques qui réagissent avec les dégraissants chlorés. Le fréon permet de remplacer ces produits (lorsque l'on travaille sur de tels matériaux). Chaque dégraissage doit être pratiqué avec des solvants propres. Aussi l'usage des bombes « aérosols » est fortement recommandé.

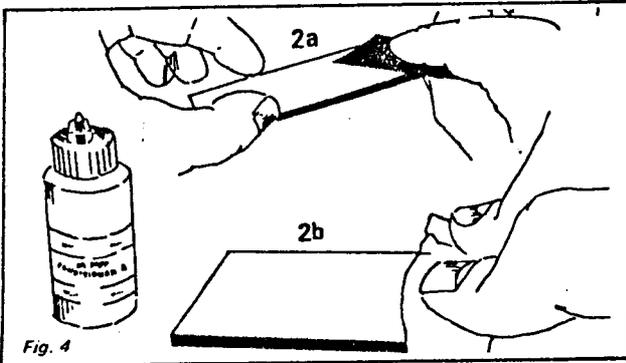


Fig. 4

2^e opération
La surface qui doit recevoir la jauge nécessite un polissage à sec avec un papier abrasif au carbure de silicium (siliconcarbide) N° 220 ou 320 pour enlever les oxydations ou défauts à la surface du matériau. Appliquer le conditionneur A et procéder à un polissage avec le papier abrasif en gardant la surface mouillée durant le polissage. Nettoyer en passant lentement une compresse de gaze sur la surface traitée. Cette opération doit être répétée. Avec un crayon à mine 4H sur de l'aluminium ou la pointe d'un crayon à bille sur de l'acier, tracer les repères de positionnement de la jauge sur la pièce. Humecter à nouveau avec le conditionneur A et frotter avec des coton-tiges jusqu'à obtenir un coton propre. Nettoyer à nouveau avec le conditionneur A en faisant une seule passe avec chaque compresse de gaze jusqu'à obtenir une compresse propre.

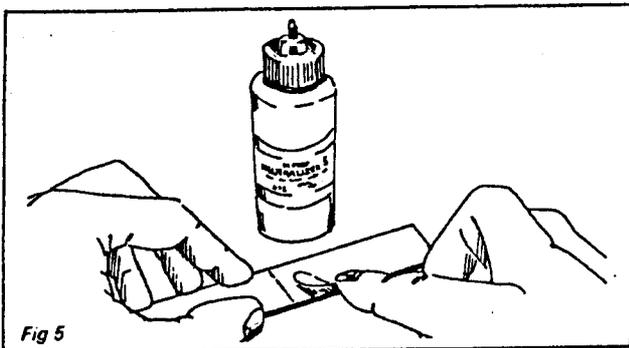


Fig. 5

3^e opération
Déposer du neutraliseur 5 sur la surface qui doit recevoir la jauge. Éviter de laisser sécher et nettoyer avec les coton-tiges. Ne pas permettre une évaporation du produit de nettoyage car il pourrait laisser un dépôt entre la colle et le matériau, ce qui empêcherait un collage efficace. Utiliser les compresses de gaze pour absorber le neutraliseur 5 en ne faisant qu'une passe jusqu'à obtenir une compresse propre.

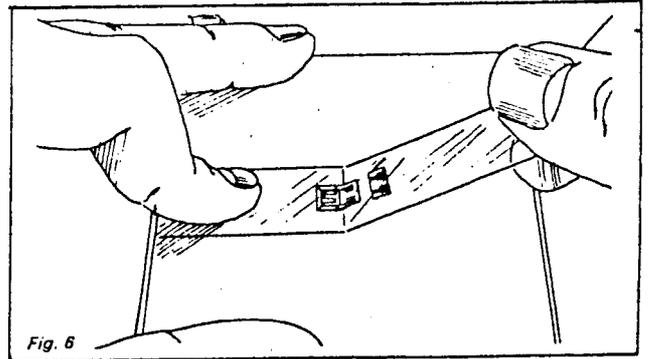


Fig. 6

4^e opération
Enlever la jauge de son étui à l'aide de précelles et la déposer sur une surface de verre chimiquement propre ou sur la boîte plastique des jauges, côté à coller en dessous. Pour les colles AE-10 et GA-2, utiliser 10 à 12 cm de ruban adhésif, centrer la jauge sur le ruban et relever le « Scotch », sous un faible angle en entraînant la jauge au dos. Pour la colle AE 15, le ruban mylar est préférable en prévision du traitement thermique supérieur à appliquer.

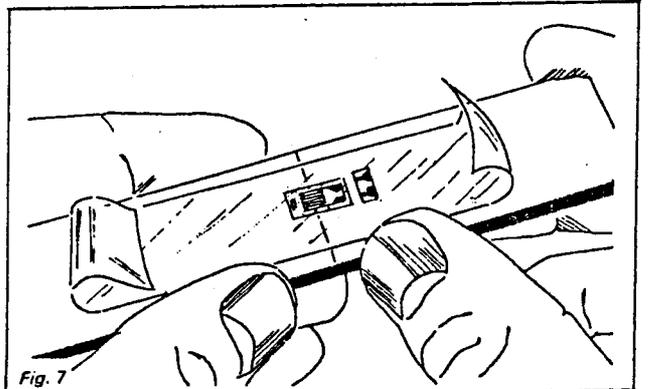


Fig. 7

5^e opération
Positionner la jauge à l'aide du ruban adhésif selon les repères du support et la trace visible sur la structure. Si les repères ne sont pas parfaitement alignés, relever le ruban sous un faible angle et replacer la jauge de la même manière que précédemment jusqu'à obtenir la coïncidence des repères. Fixer soigneusement un bout de ruban sur la structure. Durant cette opération éviter de souiller la surface réservée à la jauge.

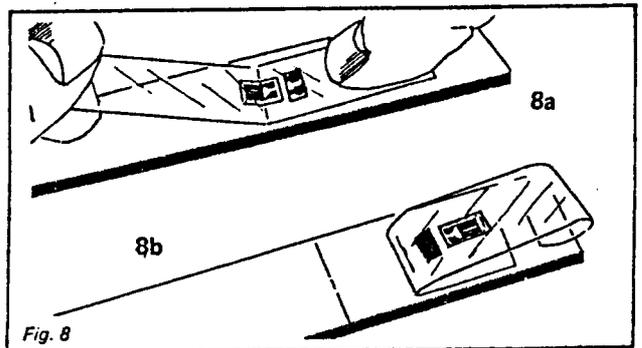


Fig. 8

6^e opération
Soulever le ruban d'un côté seulement sous un angle de 45° environ avec la surface jusqu'à ce que la jauge et les cosse relais soient libérées de la structure (figure 8a) et fixer le ruban tel qu'il est indiqué sur la figure 8b. Dans certains cas cette opération est rendue difficile par le manque de place. Si cela se produit, maintenir avec un doigt, le ruban adhésif au niveau de la jauge pendant l'opération d'encollage.

COLLAGE À LA COLLE RAPIDE

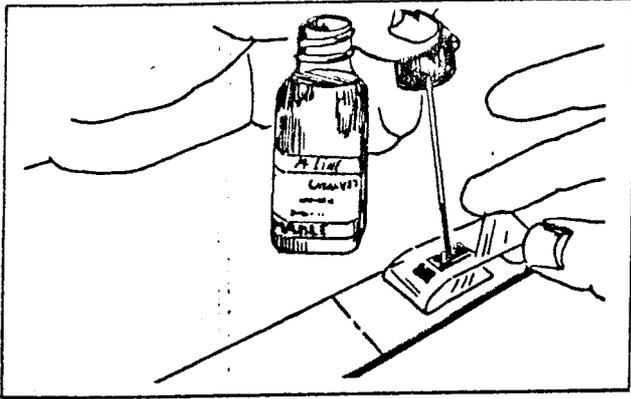


Fig. 9

7^e opération
Enduire très légèrement de catalyseur le verso de la jauge et de la plaquette de cosses-relais. Il en faut très peu. Le pinceau est bien égoutté sur le bord du flacon. En passant très méticuleusement sur toute leur surface, de façon continue. Enlevé trop brusquement, le pinceau laisse trop de catalyseur là où on l'a retiré. Laisser sécher le catalyseur, ce qui dure environ une minute aux températures normales.

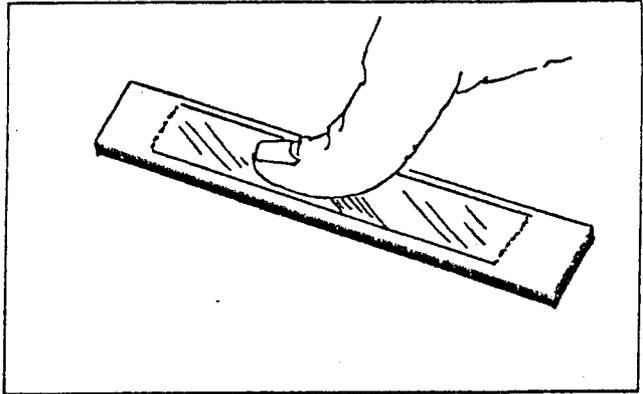


Fig. 12

10^e opération
Presser la jauge durant une minute en appuyant fermement son pouce sur l'emplacement de la jauge. La pression et la chaleur du pouce provoquent une polymérisation rapide. Si le pouce reste collé, la première fois, on aura appris d'une part, que la colle est bonne, mais surtout que l'on n'a pas bien frotté l'ensemble, comme recommandé ci-dessus.

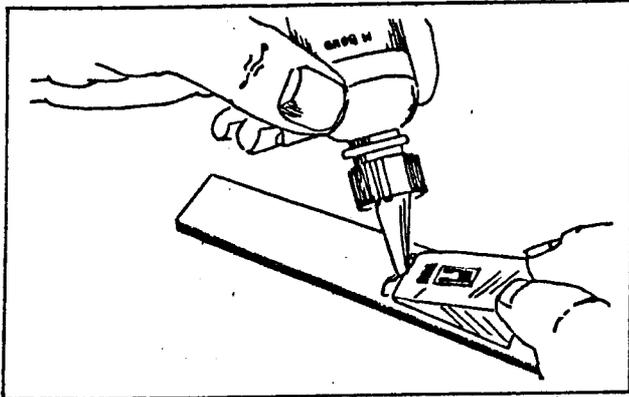


Fig. 10

8^e opération
Déposer une goutte unique de colle à la limite du contact entre le ruban adhésif et la structure. C'est dire que la colle n'est pas encore en contact avec la jauge ni avec la plaquette de cosses-relais.

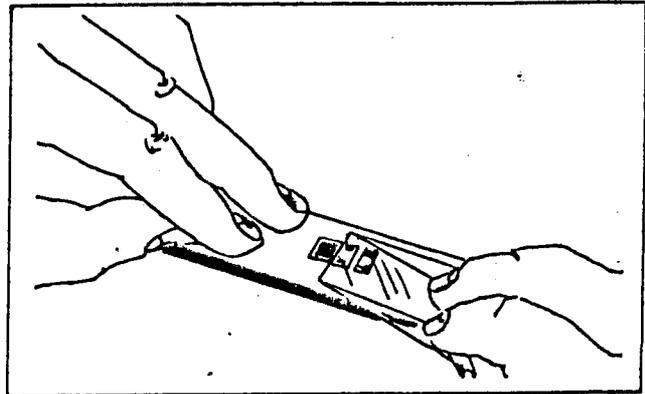


Fig. 13

11^e opération
La jauge et la plaquette étant désormais bien collées, on attend deux minutes, après quoi, on peut retirer le ruban adhésif. Le retirer sous un angle très vif (180°), replié sur lui-même, ce qui facilite la séparation définitive de ce ruban provisoire de la jauge et de la plaquette de cosses-relais. Il n'est pas absolument obligatoire de retirer le ruban adhésif au bout de ces deux minutes. Si nous devons faire autre chose, par exemple, chauffer le fer à souder, préparer les fils, etc., autant le laisser jusqu'au dernier instant. Une jauge n'a rien à gagner et tout à perdre à rester nue exposée à l'humidité et aux poussières.

La jauge est prête à être câblée, nettoyée, protégée et contrôlée.

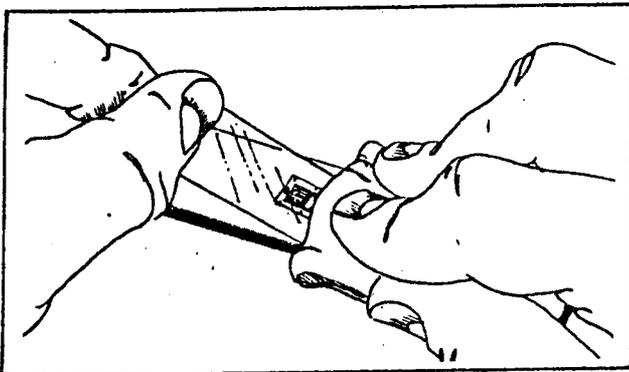


Fig. 11

9^e opération
Présenter le ruban adhésif au-dessus de la structure, sous un angle faible. A l'aide d'un tampon de gaze, le coller progressivement en refoulant la goutte de colle, afin qu'elle se propage sur toutes les surfaces à coller. Déplacer cette gaze avec fermeté et d'une seule passe.

CHOIX des COLLES

| Désignation | Température d'utilisation | Allongement maximum | Fluage 25 °C | Fluage en température | Traitement thermique* | Durée de vie du mélange à 24 °C | Durée de vie en stockage à 24 °C | Durée de vie en stockage à ± 5 °C |
|--------------------|---------------------------|-----------------------------|--|---|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Colle rapide M 200 | - 20 à + 60 °C | 5% | 0,5 % en 2 h à 2 000 µm/m | | 1 minute à l'ambiante | | 9 mois | 12 mois |
| AE-10 | - 270 à + 90 °C | 6% | inférieur à 0,1 µm/m par heure pour 2 000 µm/m | | 6 h à 24 °C | 20 minutes | 12 mois | 18 mois |
| AE-15 | - 270 à + 90 °C | 6% à 20% | inférieur à 0,1 µm/m par heure pour 2 000 µm/m | | 1 h à 75 °C | 90 minutes | 12 mois | 18 mois |
| GA-2 | - 196 à + 90 °C | 6% à 20% | 0,5% en 2 h à 2 000 µm/m | 1% en 2 h à 90 °C*1 500 µm/m | 6 h à 24 °C 40 h à 24 °C | 15 minutes | 12 mois | 18 mois |
| M 43-B | - 270 à + 150 °C | 4% à 24 °C 1% à - 270 °C | inférieur à 1 µm/m/h pour 2 000 µm/m | | 1 h à 175 °C puis 2 h à 195 °C | 9 mois | 9 mois | 18 mois |
| M 600 | - 270 à + 320 °C | 3% à 24 °C 1% à - 270 °C | inférieur à 1 µm/m pour 2 000 µm/m | | 1 h à 140 °C | 2 semaines | 6 mois | 12 mois |
| M 610 | - 270 à + 320 °C | 3% à 24 °C 1% à - 270 °C | inférieur à 1 µm/m pour 2 000 µm/m | 3% en 10 mn | 2 h à 160 °C | 6 semaines | 12 mois | 18 mois |
| GA-60 | - 150 à + 300 °C | 2% | négligeable en 2 h à 1 500 µm/m | à 300 °C- 1 500 µm/m | 1 h à 300 °C 2 h à 180 °C | 10 heures | 12 mois | 18 mois |
| GA-100 | - 200 à + 800 °C | 0,5% | négligeable en 2 h à 1 500 µm/m | négligeable en 2 h à 500 °C 1 500 µm/m | 1 h à 300 °C | 1 jour | 12 mois | |

IX-CABLAGE des JAUGES

La jauge étant collée sur la structure à tester, il faut la relier aux appareils de mesure. Suivant le type de jauge, le raccordement aux fils de liaison s'effectue par l'intermédiaire de " COSSES RELAIS " et de fils de faible section.

Pour éviter les projections de soudure, la grille est protégée avec du ruban adhésif ou un produit de protection. Les différents types de soudure, sont présentes ci-dessous. Après soudage des fils, la résine est nettoyée à l'aide d'un solvant.

Choix de la soudure

En extensométrie, le choix des soudures est essentiellement lié aux températures maximales à atteindre lors des mesures. Il est évident qu'il n'y a aucune raison valable d'utiliser une soudure fondant à une température très élevée et ainsi de risquer de brûler une jauge qui n'a pas été conçue pour de tels échauffements.

La soudure courante utilisée en électronique est un alliage étain-plomb fondant à 183 °C. Elle est utilisée pour les usages courants, sous condition d'être conditionnée en fils très fins.

Parmi les différentes soudures utilisées, citons, suivant les conditions d'emploi :

Soudure étain 63% - plomb 37%

Fond à 183 °C, coule et mouille bien. Résistance mécanique à la corrosion, bonne. Conductibilité, bonne. Soudure satisfaisante pour les usages courants, elle n'est pas indiquée pour les basses températures au-dessous de 0 °C, et ceci du fait de la « peste de l'étain », phénomène de transformation de ce métal qui au froid se transforme en une variété amorphe et tombe en poussière.

Soudure étain 63% - plomb 36,4% - antimoine 0,6%

Comparable à la précédente. Cependant, la présence d'antimoine évite les inconvénients des basses températures. Ces soudures peuvent être utilisées en mesures cryogéniques.

Soudure étain 96% - argent 4%

Fond à 220 °C. Mouille très bien. Très bonne résistance mécanique à la fatigue et à la corrosion. Très grande conductibilité électrique. C'est la soudure à utiliser pour certains travaux critiques nécessitant une très bonne conductibilité. Ne pas utiliser en cryogénie.

Soudure étain 95% - antimoine 5%

Fond vers 235 °C. Mouille très bien. Mécaniquement très dure et bonne conductrice. Est utilisée avec les flux AR pour cuivre, constantan, nickel ou SS pour inox, isoelastic, alliage K. Elle est un peu cassante aux très basses températures.

Soudure plomb 93,5% - étain 5% - argent 1,5%

Fond vers 300 °C. Bonne tenue mécanique. Mouille très bien. Corrosion acceptable. C'est la soudure à employer pour les températures élevées. Elle est également bonne pour les mesures cryogéniques de longue durée, du fait de sa forte concentration en plomb.

Soudure étain 50% - Indium 50%

Fond vers 115 °C. Bonne tenue mécanique. Mouille très bien. Excellente contre la corrosion et bonne conductibilité électrique. Du fait de son bas point de fusion, elle est avantageusement utilisée sur les plastiques, polymères, sur le verre, etc. Est relativement molle. Est excellente pour les essais sous vide, du fait de sa faible tension de vapeur.

En résumé, les soudures recommandées sont :

- températures courantes, jusqu'à 180 °C : étain 63% - plomb 37%
- jusqu'à 220 °C : étain 96% - argent 4%
- jusqu'à 235 °C : étain 95% - antimoine 5%
- jusqu'à 300 °C : plomb 93,5% - étain 5% - argent 1,5%
- plastiques, soudures pas trop chaudes 115 °C - étain 50% - indium 50%
- cryogénie : étain 63% - plomb 36,4% - antimoine 0,6%
- sous vide (jusqu'à 115 °C) : étain 50% - indium 50%

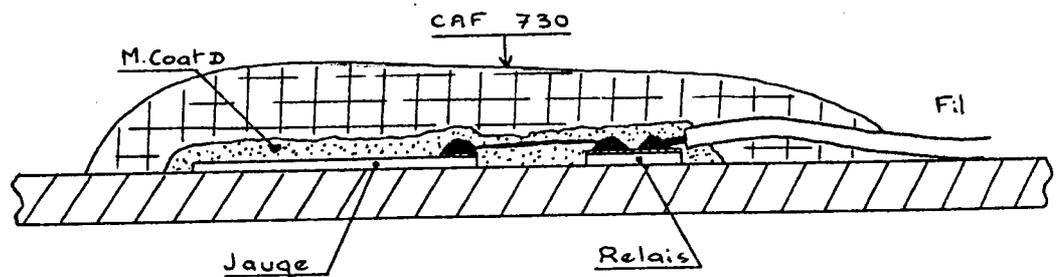
X-PROTECTION des JAUGES

Après collage et câblage , une jauge doit être protégée . Cette protection permet de s'affranchir de l'humidité ambiante , principale cause de perte d'isolement . Outre l'humidité , d'autres paramètres d'ambiance tels que :

- température
- pression
- fluides
- poussières
- chocs mécaniques

peuvent conduire à des mesures éronnées .

En fonction du milieu ambiant , différents produits de protection sont utilisés .



Exemple de Protection

| | | |
|---------------------------------------|--|--|
| A l'air libre température ambiante : | — usage courant au labo : | — M coat D — ou bien M coat A (pour installations transparentes) |
| | — projection d'eau : | — M coat D + M coat G + M coat B |
| | — crainte de corrosion : | — M coat D + M coat G + M coat B |
| | — abrasion du vent : | — M coat D + M coat G + M coat B — ou bien RTV 3145 — ou bien GB-2 — ou bien cire GB-3 |
| | — protection solide avec nécessité de voir les jauges (par ex. enseignement) : | — RTV 3140 — ou bien GB-2 transparent |
| | — béton : | — pré-couche de colle AE-10 ou GA-2 puis protection suivant environnement |
| | — installation au ciment GA 100 pour très hautes températures ; GW-6 | |
| | — surfaces verticales : | — M coat D + M coat G |
| | — matières plastiques : | vérifier la nature du solvant pour voir s'il n'attaque pas la structure |
| | — fortes accélérations : | — fibre de verre (voir page 212) |
| Air jusqu'à 260 °C : | | — M coat C — ou bien M coat Q traité thermiquement |
| Air jusqu'à 300 °C : | | — colle M 610 traitée thermiquement — ou bien M coat Q pour durée limitée |
| Vide poussé > 10 ⁻⁶ Torr : | | — colle M 610 en 2 couches traitée 3 heures à 175 °C |
| Immersion dans l'eau : | | — M coat D + M coat G + M coat B (traiter les câbles PVC avec M coat B ou téflon avec tétra-etch) — ou bien GB-7) |
| Eau sous pression : | | — M coat D + M coat G + M coat G + M coat B (traiter les câbles PVC avec M coat B ou téflon avec tétra-etch) — ou bien GB-7 |
| Eau de mer : | | — M coat D + M coat G + M coat B (traiter les câbles PVC avec M coat B ou téflon avec tétra-etch) — ou bien GB-7 |
| Eau ou vapeur vers 100 °C : | | — GB-2 traitée 1 heures à 120 °C |
| Cryogénie : | | — M coat B — ou bien colle M 43-B en couche très fine |
| Hydrocarbures, huiles, essences : | | — M coat D + M coat G + M coat B — M coat D + 2 ou 3 couches de RTV 3145 + M coat B — ou bien GB-2 |
| Huile moteur chaude (90 °C) : | | — GA-60 |
| Acides (sauf fluorhydrique) bases : | | — M coat D + M coat G — ou bien RTV 3145 — ou bien GB-2 |
| Alcools : | | — M coat D + M coat G + M coat B — ou bien RTV 3145 — ou bien GB-2 |
| Radiations neutrons : | | — M coat G sur jauges EA |
| Capteurs : | | — jusqu'à 120 °C : colle M 43-B traitée thermiquement — au delà : colle M 610 traitée thermiquement |

XI - NOTIONS de DEPOUILLEMENT des MESURES -

Unités de mesure

Les déformations, qui sont des rapports d'un allongement à une longueur de base s'expriment par des nombres sans dimensions. Ces nombres étant très petits sont souvent désignés par le nombre de 10^{-6} qu'ils contiennent. On désigne parfois 10^{-6} par le terme microdéformations. Etant sans dimensions, les mesures de déformations sont indépendantes du système d'unités, aussi :

$$10^{-6} = 1 \text{ microdéformation} = 1 \text{ micron/mètre} = 1 \text{ microinch/inch}$$

Les contraintes s'expriment dans les mêmes unités que les pressions.

L'unité légale est donc le pascal (Pa).

Cette unité étant très faible, on lui préfère le bar ou l'hectobar.

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ hbar} = 10^7 \text{ Pa.}$$

Dans la pratique industrielle on utilise encore l'unité en principe prohibée équivalente à 1 kg/mm^2 .

$$1 \text{ kg/mm}^2 = 9\,806\,650 \text{ pascals}$$

Lorsque les précisions ne sont pas trop sévères on peut prendre

$$1 \text{ kg/mm}^2 \approx 10^7 \text{ pascals} = 1 \text{ hectobar}$$

Moyen mnémotechnique : le kg/mm^2 en usage pratique est voisin de ce qu'on pourrait appeler le "décamégapascal".

Unités anglo-saxonnes : pound/square inch dit psi

$$1 \text{ psi} = 0,000703 \text{ kg/mm}^2$$

$$1 \text{ psi} = 0,068947 \text{ bar}$$

JAUGES monodirectionnelles

L'état des contraintes ne peut être connu que pour des cas simples .

Par exemple:

Une poutre longue est soumise à une traction simple suivant sa direction longitudinale . Collée suivant cette direction , une jauge indique l'allongement relatif ϵ_1 . La contrainte perpendiculaire est nulle ($\sigma=0$) mais non la déformation .

- Calcul des déformations

$$\epsilon_1 \text{ mesuré par la jauge}$$

$$\epsilon_2 = - \mu \epsilon_1$$

- Calcul des contraintes

$$\sigma_1 = E \epsilon_1$$

$$\sigma_2 = 0$$

Jauges bidirectionnelles

Lorsque les directions principales des contraintes sont connues (Ex : structure cylindrique ou sphérique en pression) 2 jauges peuvent être utilisées . Les jauges sont collées suivant les directions principales .

- Calcul des déformations

ϵ_1 mesuré par la jauge 1

ϵ_2 mesuré par la jauge 2

- Calcul des contraintes

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_1 + \mu\epsilon_2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_2 + \mu\epsilon_1)$$

Rosettes

Une rosette est constituée par trois jauges implantées sur le même support . Lorsque l'état de déformation ou de contrainte en un point de la surface d'une structure est inconnu , l'utilisation de rosettes permet de déterminer les directions principales .

Le dépouillement consiste à partir des trois mesures obtenues , à déterminer le positionnement des directions principales et des déformations correspondantes , puis des contraintes .

Ces dépouillements sont généralement effectués par :

- calcul algébrique
- construction géométrique
- ordinateur

Ils ne seront pas abordés dans cet exposé .

XII-EXEMPLES de DEPOUILLEMENTS

Mesure de déformation avec une seule jauge

Une barre d'acier est soumise à une traction pure . Une jauge collée dans le sens de la traction indique un allongement relatif de

$$\epsilon_1 = 1275 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Quelles sont

1/ Les déformations principales ?

2/ Les contraintes , sachant que :

$$\cdot E = 21000 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\cdot \mu = 0,28$$

Déformations principales

$$\epsilon_1 = \text{mesure} = 1275 \text{ } \mu\text{m/m}$$

$$\epsilon_2 = -\mu \epsilon_1 = -0,28 * 1275 * 10^{-6} = -357 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Contraintes principales

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= E \epsilon_1 = 21000 * 1275 * 10^{-6} = 28,8 \text{ Kg/mm}^2 \\ &= 28,8 \text{ hbar} \end{aligned}$$

$$\sigma_2 = 0$$

Mesure de déformation avec deux jauges

Soit un réservoir vertical cylindrique en aluminium pour lequel $E=7200 \text{ Kg/mm}^2$, $\mu=0,33$. On admet que les directions principales sont verticales et horizontales . Deux jauges équipent cette structure suivant ces directions . Les mesures indiquent :

$$\epsilon_1 = 3950 \text{ } \mu\text{m/m}$$

$$\epsilon_2 = 2540 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Quelles sont les contraintes dans la zone de collage des jauges ?

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_1 + \mu\epsilon_2) \\ &= \frac{7200}{1-(0,33)^2} (3950 + (0,33*2540)) 10^{-6} \\ &= 38,7 \text{ Kg/mm}^2 = 38,7 \text{ hbar}\end{aligned}$$

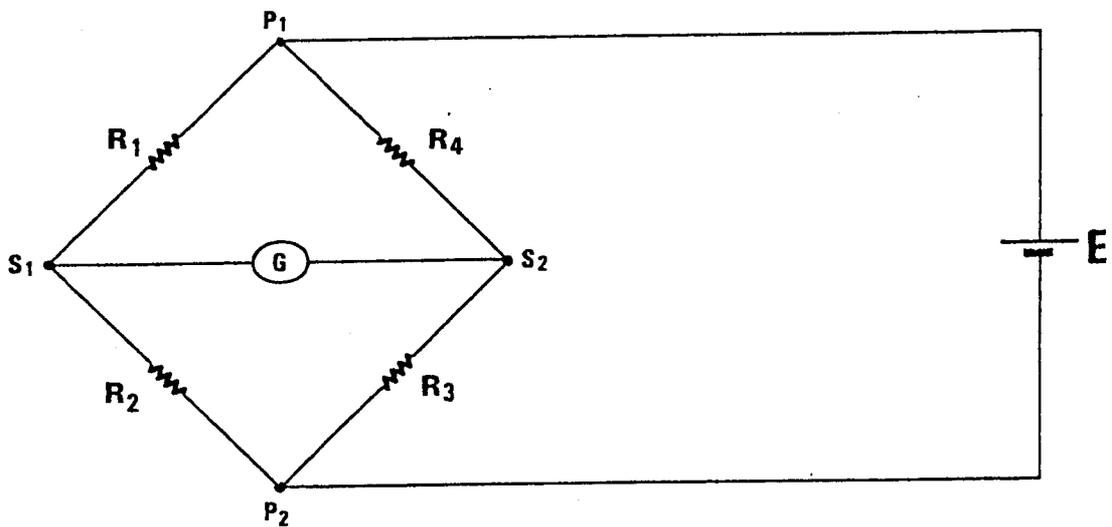
$$\begin{aligned}\sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_2 + \mu\epsilon_1) \\ &= \frac{7200}{1-(0,33)^2} (2540 + (0,33*3950)) 10^{-6} \\ &= 31 \text{ Kg/mm}^2 = 31 \text{ hbar}\end{aligned}$$

XIII-PONT de WHEATSTONE-

- Application aux jauges -

Compte tenu des faibles amplitudes de variation observées en extensométrie ($1\mu\text{m}/\text{m} = 0,24\text{m}\Omega$), seule importe la variation de résistance de jauge et non sa valeur absolue. En règle générale, la grandeur électrique la plus facile à transformer (amplification, enregistrement, numérisation) est la tension. Le montage électrique permettant d'obtenir en sortie une tension proportionnelle à la variation d'une résistance est :

le PONT de WHEATSTONE.



- Principe -

On démontre que si 4 résistances montées comme sur la page précédente sont alimentées en P1 et P2 par une source de tension E , la tension de sortie Vs obtenue entre S1 et S2 est :

$$V_s = E \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (1) \quad \text{ceci en}$$

considérant que :

- L'impédance interne de la source est nulle
- L'impédance de l'indicateur (G) est infinie

Dans ces conditions la tension de sortie Vs est nulle pour :

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \quad \text{c'est à dire lorsque :}$$

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (2)$$

Cette égalité est vérifiée en particulier quand les quatre résistances sont égales .

Lorsque Vs est nul , le pont est dit EQUILIBRE .

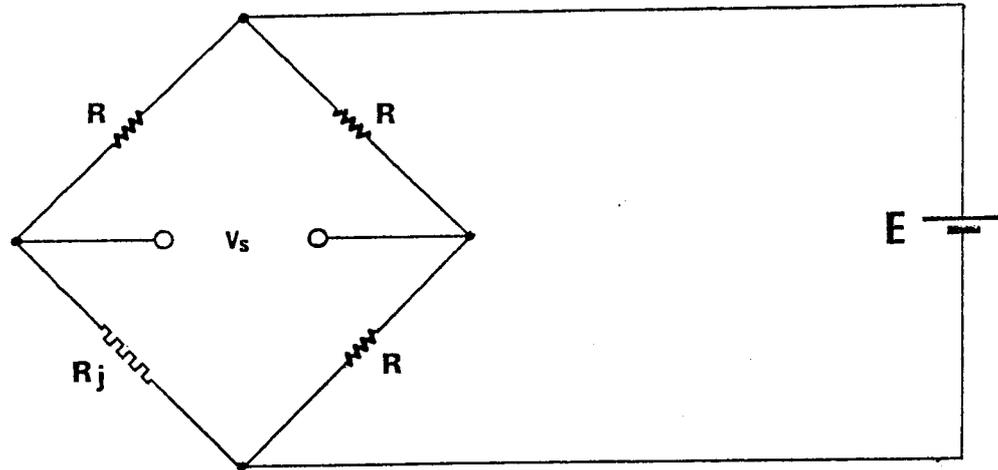
Les calculs montrent que la meilleure sensibilité du pont est obtenue avec 4 résistances égales.

- Montage en 1/4 pont -

Pour des mesures avec une seule jauge active (Rj) , le complément de pont (R1 , R3, R4) est constitué de résistances dont la valeur est identique à la valeur nominale de la jauge Rj.

$$R_1 = R_3 = R_4 = R_{j\emptyset} = R$$

ΔR = variation de résistance de la jauge
 ($\Delta R = R_j - R_{j\emptyset}$) lorsque la jauge subit une déformation.



1/ Sans contrainte sur la structure , la résistance de la jauge $R_{j\emptyset}$ est égale à R . Dans ces conditions le pont est équilibré et

$$V_s = V_{s\emptyset} = 0$$

2/ En contrainte , la structure se déforme et la résistance de jauge devient :

$$R_j = R_{j\emptyset} + \Delta R = R + \Delta R$$

La tension de sortie V_{se} est alors :

$$V_{se} = \frac{E}{4} \frac{\Delta R}{R} \quad (3) \quad \text{elle montre que la}$$

tension de sortie est d'autant plus grande que :

- E est élevé
- ΔR est grand (donc l'allongement relatif important)

XIV-METHODES d'ETALONNAGE des VOIES de MESURE

- à l'aide d'un simulateur -

L'étalonnage à l'aide d'un simulateur consiste à remplacer la jauge de déformation par une résistance variable de bonne précision . En choisissant comme résistance la valeur nominale de la jauge (120Ω par exemple) on vérifie tout d'abord que la tension de sortie du pont est nulle .

En faisant varier la résistance d'une quantité ΔR , la tension de sortie est identique à celle que produirait un allongement relatif de la jauge de :

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R}$$

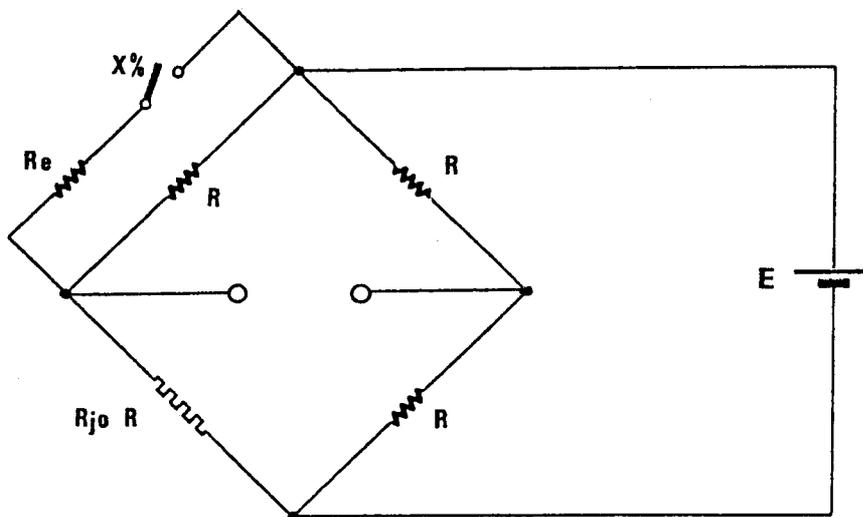
Cette méthode bien que présentant un certain intérêt est très peu utilisée pour les essais au banc , compte tenu de la lourdeur de mise en oeuvre , en particulier lorsque le nombre de points de mesure est important .

- par déséquilibre d'un pont de Wheatstone -

Le pont de Wheatstone équipé de la jauge active est utilisé en générateur de tension . Le pont est déséquilibré en shuntant pendant la durée des étalonnages , une résistance sur l'une des branches du pont .

La tension de déséquilibre est d'autant plus grande que cette résistance (résistance d'étalonnage R_e) est faible . Par un choix judicieux de R_e , le montage peut simuler différentes tensions donc différentes valeurs d'allongement relatif .

En déséquilibrant simultanément tous les ponts , cette méthode permet un étalonnage rapide de bonne précision .



Lorsque l'on ferme l'interrupteur de commande d'étalonnage ($X\%$) le pont est déséquilibré . La tension de sortie devient

$$V_x = \frac{E}{2} \frac{R}{R + 2R_e}$$

Si l'on suppose que pour une R_e donnée la tension de sortie du pont est la même que celle obtenue pour un ΔR pendant un essai , nous pouvons écrire :

$$V_x = V_e \text{ soit}$$

$$\frac{E}{2} \frac{R}{R+2R_e} = \frac{E}{4} \frac{\Delta R}{R} \text{ d'ou}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = 2 \frac{R}{R+2R_e} \text{ et comme } \frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L}$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{2}{K} \frac{R}{R+2R_e}$$

Cette relation précise le $\frac{\Delta L}{L}$ simulé lorsque le pont est déséquilibré par une résistance R_e -

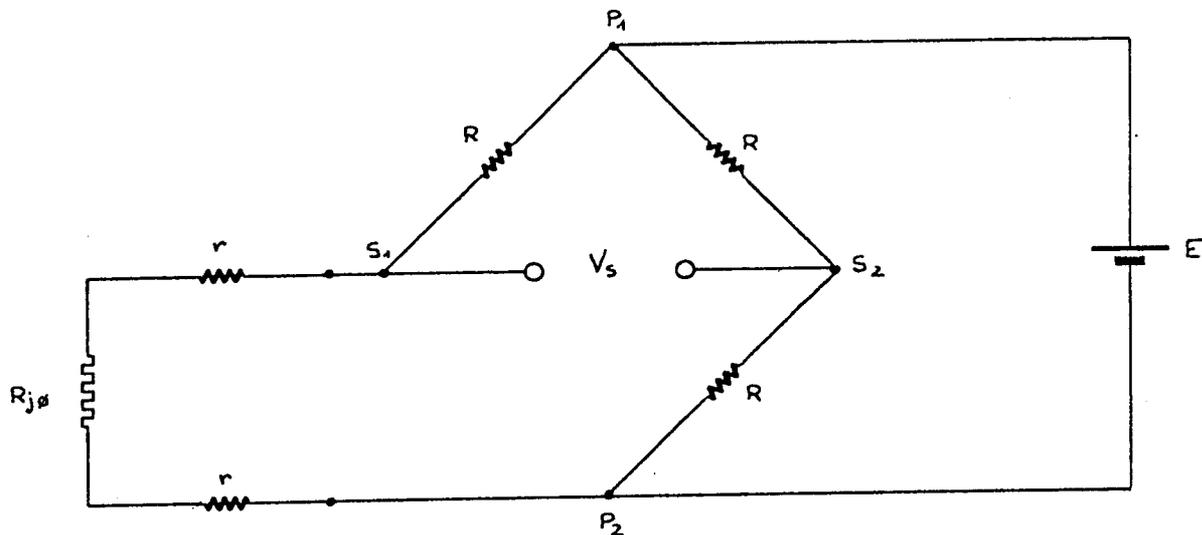
XV-INFLUENCE des CABLAGES

En règle générale la structure équipée de jauges de déformation est éloignée des compléments de pont .

Soit r la résistance d'un fil de liaison à la jauge :

- Cablage en 2 fils -

le schéma équivalent est le suivant :

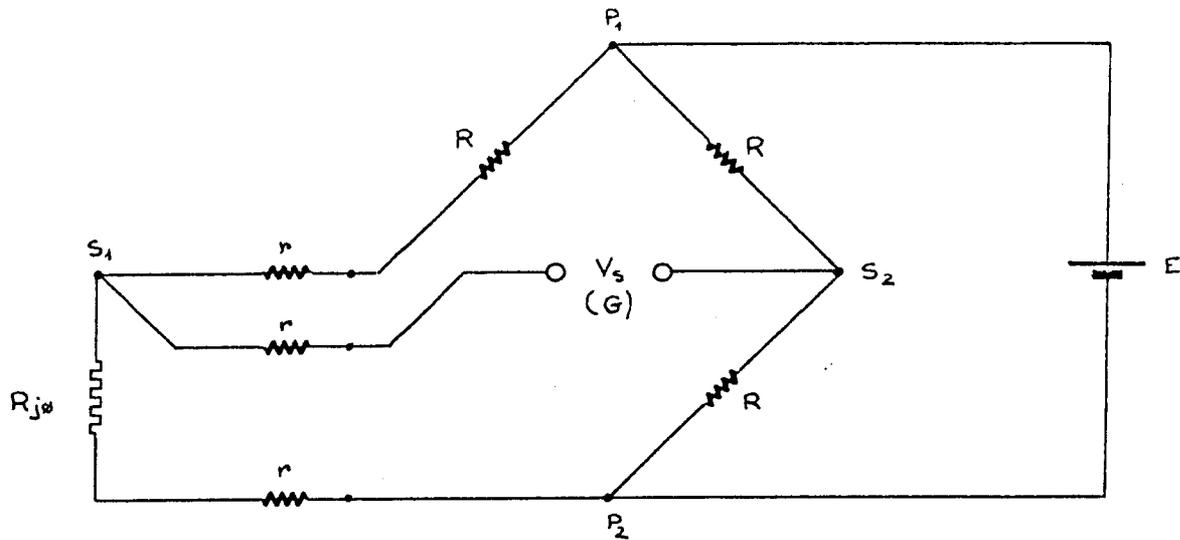


C'est le montage le plus simple . Il présente toutefois quelques inconvénients .

1/ La résistance de la branche S_1/P_2 n'est plus $R_{j\phi}$ mais $R_{j\phi}+2r$: le pont n'est plus équilibré .

2/ Les effets parasites d'origine thermique (effets de thermocouple par exemple peuvent perturber les mesures et de ce fait fausser les résultats .

- Cablage en 3 fils -



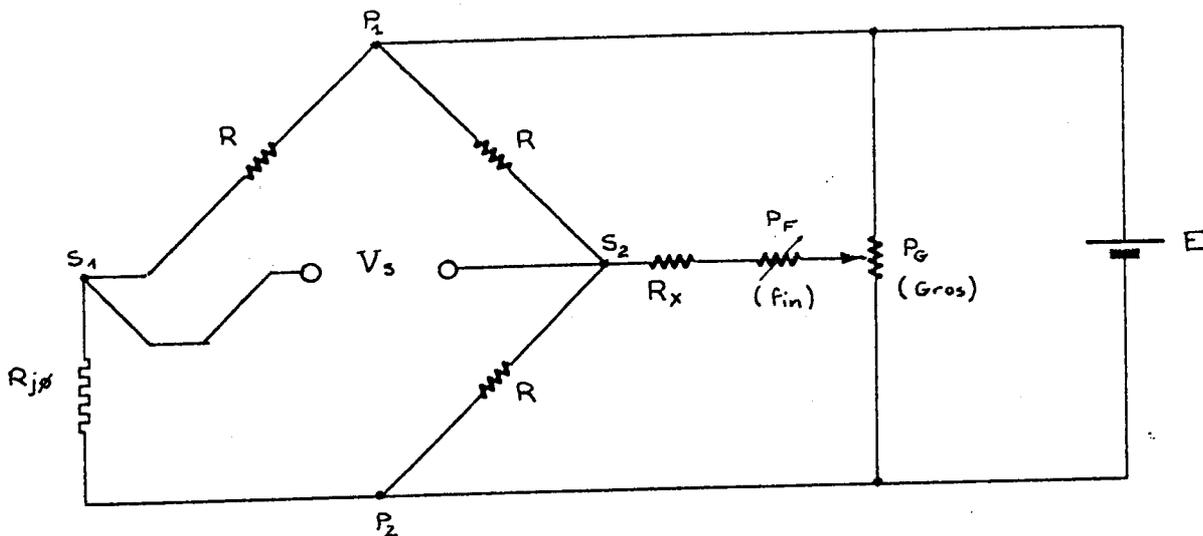
Les branches P_1/S_1 et S_1/P_2 ont une résistance équivalente de $R+r$ et $R_{j0}+r$: le pont est équilibré . La résistance r en série avec l'indicateur (G) est sans influence puisque sa résistance interne est très grande .

Le cablage en 3 fils est le plus utilisé . Il permet de ne pas déséquilibrer le pont par les cablages de liaison et d'éliminer non seulement les effets thermiques mais également les effets résultant d'autres perturbations dus à différents phénomènes physiques sur les cables , compte tenu de leurs longueurs .

Remarque 1 : - Une fois collée et câblée , une jauge équipée présente une valeur de résistance légèrement différente de la valeur nominale (tolérance de fabrication , contraintes au moment du collage , dissymétrie dans les cablages) . Par

suite , le pont n'est jamais parfaitement équilibré .

Le montage suivant est alors utilisé pour obtenir une tension nulle en sortie .



Remarque 2: - Un pont de Wheatstone (pour un cablage de jauges en 1/4 de pont) fournit une tension linéaire pour de faibles allongements relatifs (métaux dans leur domaine élastique). Par contre, dans le domaine plastique (et même élastique pour les matériaux de faible module) la non linéarité ne peut plus être négligée. Les relations mathématiques complètes du montage permettent d'effectuer les corrections nécessaires compte tenu de la précision souhaitée.

PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX USUELS

| | Module d'Young (E (1000 kg/mm ²)) | Coefficient de Poisson μ (s.d.) | $\frac{E}{1+\mu}$ | $\frac{E}{1-\mu}$ | $\frac{E}{1-\mu^2}$ | σ_f | σ_e | $\frac{\sigma_e}{\sigma_c}$ | Massa volumique 1000 kg/m ³ | Dilatation 10 ⁻⁶ /°C |
|--------------------------------|---|--|-------------------|-------------------|---------------------|------------|------------|-----------------------------|---|------------------------------------|
| Acier de Construction ... | 21,0 | 0,285 | 16,34 | 29,37 | 22,87 | | 20 à 60 | 1 | 7,80 | 13 |
| Acier 45 SC D 6 | 22,0 | 0,285 | 17,12 | 30,77 | 23,97 | | 145 | 1 | 7,80 | 13 |
| Aciers résistants usure .. | 22,0 | 0,29 | 17,06 | 30,99 | 24,02 | | | 1 | 7,82 | 25 |
| Acier inoxydable 18-10. . . | 20,3 | 0,29 | 15,74 | 28,59 | 22,16 | | 18 à 22 | 1 | 7,90 | 16,5 |
| Invar | 14,1 | 0,29 | 10,93 | 16,86 | 15,39 | | 40 à 55 | 1 | | < 0,9 |
| Fontes grises courantes .. | 9 à 12 | 0,29 | 7,0 à 9,3 | 12,7 à 16,9 | 9,8 à 13,1 | 7 à 9 | 18 à 25 | 3,3 | 7,1 à 7,2 | 9 à 11 |
| Fontes grises auto | 10 à 13 | 0,29 | 7,7 à 10,0 | 14,1 à 18,3 | 10,9 à 14,2 | 10 à 15 | 22 à 35 | 3,4 | 7,1 à 7,4 | 9 à 11 |
| Fontes grises lingotières .. | 5 à 8 | 0,29 | 3,9 à 6,2 | 7,0 à 11,2 | 5,4 à 8,7 | | 8 à 12 | 3,5 | 7,1 à 7,2 | 9 à 11 |
| Fonte graphite sphéroïdal .. | 16 à 18 | 0,29 | 12,4 à 14,0 | 22,2 à 25,4 | 17,5 à 19,6 | 17 à 36 | 26 à 60 | 1,2 | 7,1 à 7,3 | 11 à 12 |
| Fontes blanches non alliées .. | 16 à 20 | 0,29 | 12,4 à 15,5 | 22,2 à 28,2 | 17,5 à 21,8 | | 20 à 40 | 5 | 7,5 à 7,8 | 9 à 11 |
| Fontes malléables | 17 à 19 | 0,17 | 14 à 16 | 20,5 à 22,9 | 17,5 à 19,5 | 16 à 38 | 20 à 60 | 1 | 7,2 à 7,4 | 9 à 11 |
| Titane | 10,55 | 0,34 | 7,87 | 15,98 | 11,93 | 10 à 25 | 20 à 47 | 1 | 4,51 | 8,9 |
| Alliage titane 6AL4V | 10,9 | 0,34 | 8,13 | 16,52 | 12,33 | | | 1 | | |
| Alliage titane TA6V | 10,5 | 0,34 | 7,83 | 15,91 | 11,88 | 60 | 90 | 1 | 4,42 | 8,0 |
| Aluminium | 7,05 | 0,34 | 5,26 | 10,68 | 7,98 | | | | | |
| Alliage alu AU 4 G | 7,5 | 0,33 | 5,63 | 11,19 | 8,41 | 12 | 20 | 1 | 2,8 | 23,5 |
| Alliage alu AU 2 GM | 7,5 | 0,34 | 5,60 | 11,36 | 8,48 | 12 | 37 | 1 | 2,8 | 22 à 24 |
| Alliage alu AU 6 GT | 7,0 | 0,34 | 5,22 | 10,61 | 7,92 | 10 | 22 à 26 | 1 | 2,8 | 23 |
| Zircal AZ8GU | 7,2 | 0,34 | 5,37 | 10,91 | 8,14 | | 55 | 1 | 2,8 | 23,5 |
| Cuivre | 10,0 | 0,33 | 7,51 | 14,92 | 11,22 | | 18 | 1,3 | 8,9 | 17 |
| Laiton | 9,2 | 0,33 | 6,92 | 13,73 | 10,33 | | 20 | 1,4 | 7,30 | 18 |
| Bronze ordinaire | 10,6 | 0,31 | 8,09 | 15,36 | 11,73 | | 24 | 3 | 8,40 | 17,5 |
| Bronze au beryllium | 13 | 0,34 | 9,70 | 19,70 | 14,71 | | 80 | 3 | 8,25 | 17 |
| Beryllium | 30,0 | 0,05 | 28,57 | 31,58 | 30,08 | 20 | 30 | 1 | 1,85 | 12,4 |
| Magnésium | 4,60 | 0,34 | 3,43 | 6,97 | 5,20 | | | | 1,74 | 25,6 |
| Marbre | 2,6 | 0,3 | 2,00 | 3,71 | 2,86 | | 50 | 15 | 2,8 | 8 |
| Béton | 1,4 à 2,1 | 0,3 | 1,1 à 1,6 | 2,0 à 3,0 | 1,5 à 2,3 | | 30 | 11 | 1,9 | 14 |
| Verre | 8 | 0,2 à 0,3 | 5,0 à 4,6 | 7,5 à 8,6 | 6,2 à 6,6 | | 3 à 8 | 10 | | |
| Plexiglass | 0,29 | 0,4 | 0,207 | 0,483 | 0,345 | | 8 | 1,2 | 1,8 | 80 à 90 |
| Araldite | 0,30 | 0,4 | 0,214 | 0,500 | 0,357 | | 5 à 8 | 1,2 | 1,15 | 90 à 130 |

E , $\frac{E}{1+\mu}$, $\frac{E}{1-\mu}$, $\frac{E}{1-\mu^2}$ sont exprimés en 1/1000 de kg/mm².

σ_f = limite de fatigue
 σ_e = limite élastique en traction (rupture pour corps fragiles)
 σ_c = limite élastique en compression.

Voici quelques ordres de grandeurs de caractéristiques mécaniques et physiques de matériaux. Il est impensable de pouvoir établir une liste universelle même des corps les plus courants. C'est pourquoi un tel tableau ne peut être utile que si le lecteur inscrit lui-même, dans les colonnes blanches laissées à cette intention, les grandeurs caractéristiques des matériaux qu'il utilise. L'expérience prouve, que pour une profession donnée, le nombre de matériaux utilisés est généralement limité, mais qu'il importe d'en connaître les propriétés avec le maximum de précision possible.

