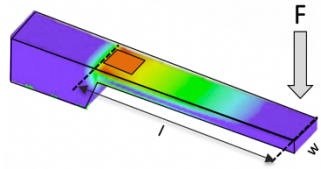


## Chapitre 7 – Exercices et questions

### Exercice 7.1 Jauges de déformation métalliques

Un capteur de force est constitué d'une poutre et d'une jauge de déformation métallique, d'après le dessin ci-dessous.



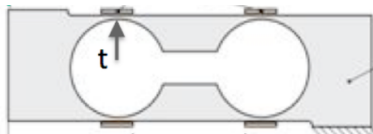
longueur= $L$ , largeur= $w$ , épaisseur= $t$ , module élastique= $E$

- 1) Calculer la tension mesurée sur un pont de Wheatstone, une seule jauge utilisée. Les trois autres résistances fixes ont la même résistance que la jauge.

$R_0=1\text{k}\Omega$ , facteur de jauge  $K=2$ ,  $l=2\text{cm}$ ,  $E=180\text{ GPa}$ ,  $w=1\text{cm}$ ,  $t=500\text{ }\mu\text{m}$   
tension d'alimentation  $V=5$ , force verticale de  $10\text{ N}$  (comme dessiné)

$$\varepsilon = F \frac{6l}{Ew \cdot t^2}$$

- 2) Calculer l'erreur de non-linéarité, exprimée en % (liée à la non-linéarité du pont de Wheatstone)
- 3) Est-ce que le capteur est sensible à une composante non-verticale de la force appliquée ? Et sur la structure ci-dessous ? pourquoi ?



### Exercice 7.2 Dérive des jauges de déformation métalliques

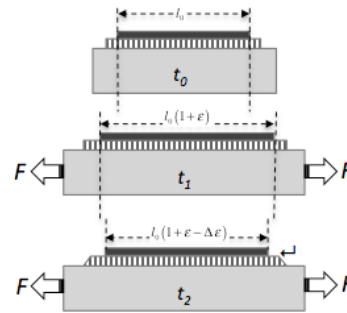
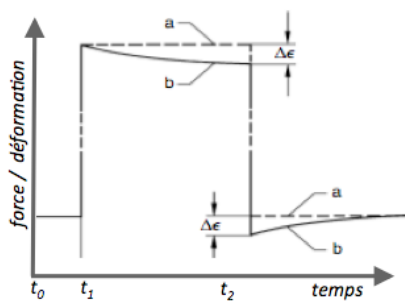
Sur une jauge de déformation collée sur un corps d'épreuve, une variation température (sans imposer de force externe) est mesurée comme une « déformation apparente ».

- 1) Est-ce que l'adaptation des coefficients de dilatation entre la jauge et le corps d'épreuve élimine le problème ? Pourquoi ?
- 2) Calculer la déformation apparente mesurée pour un écart de température de  $10^\circ\text{C}$  avec une jauge de déformation en Karma collée sur un corps d'épreuve en acier.

### Exercice 7.3 Fluage des jauges de contrainte métalliques

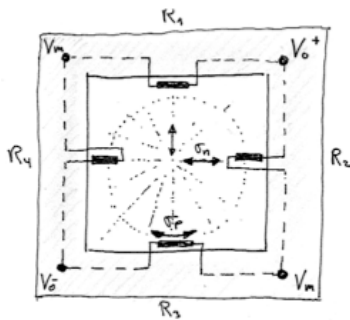
Lorsqu'une jauge est soumise à une déformation externe, il y a aussi un effet de fluage.

- 1) Expliquer la courbe ci-dessous (en pointillé : force appliquée en fonction du temps, ligne continue : réponse électrique de la jauge).



### Exercice 7.4 Capteur de pression piézorésistif

- 1) Justifier le choix de placement des jauges sur la membrane d'un capteur de pression piézorésistif en fonction de la répartition des contraintes radiales et tangentielles dues à la pression.
- 2) Un capteur de pression en silicium a une membrane carrée de 1 mm de côté et 10  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. Si la résistance nominale est de  $1\text{k}\Omega$  et  $\pi_{44} = 138 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ , calculer la variation de résistance pour une pression de 1 bar ( $10^5 \text{ N/m}^2$ )
- 3) Pourquoi additionne-t-on les carrés des valeurs des composantes de bruits pour le calcul bruit total ?



$$V_{\text{TotalNoise}} = \sqrt{V_{\text{thermal}}^2 + V_{1/f}^2}$$

### Exercice 7.6 Pavé tactile (à résoudre après avoir vu le chapitre 1)

Un pavé tactile d'un laptop est posé sur quatre jauges de déformation métalliques disposées sur un carré de 5 cm de côté. La résolution en force de chaque capteur est 0.1 N.

- 1) Quelle est la résolution en position lorsqu'on place un doigt au centre du carré et qu'on presse avec une force de 10N ou 1N?

### Exercice 7.7 Balance à force de compensation électromagnétique

- 1) En général, quel est l'intérêt de faire une balance avec un feedback électromagnétique ?
- 2) On pèse 100g d'une poudre (densité  $= 1.56 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) avec une balance de laboratoire. Quel est l'erreur induite par l'effet de la présence d'air ? (on mesure à 15°C, dans de l'air sec)
- 3) Est-ce qu'une mesure dans de l'air humide modifierait le résultat ?

### Exercice 7.1 Corrigé:

Déformation:  $\varepsilon = F \frac{6l}{Ew \cdot t^2} = 10 \frac{6 \cdot 0.02}{180 \cdot 10^9 \cdot 0.01 \cdot 0.0005^2} = 2.67 \cdot 10^{-3}$

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon = 5.33 \cdot 10^{-3}$$
$$V_m = \frac{V_o}{4} \frac{\Delta R}{R} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}\right) = 6.65 \text{ mV}$$

Non linéarité en tension  $\Delta V = -\frac{V_o}{8} \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 = 1.78 \cdot 10^{-5} \text{ V} = 17.8 \text{ } \mu\text{V}$

$$V_m = F \frac{V_o}{4} K \frac{6l}{Ewt^2}$$

$$V_m = F \cdot \text{constante}$$

donc  $\frac{\Delta F}{F} \approx \frac{\Delta V_m}{V_m}$

Non linéarité en Force  $\Delta F = F \cdot \frac{\Delta V}{V} = 10 \frac{0.0178}{6.65} = 2.67 \cdot 10^{-2} \text{ [N]}$

### Exercice 7.2 Corrigé:

a) Non, l'adaptation des coefficients de dilatation compense seulement l'effet de dilatation différentielle, mais ne compense pas la dérive de K en fonction de la température.

b)  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ ,  $K=2.1$ ,  $\alpha_R=2 \cdot 10^{-5}$ ,  $\alpha_j=1 \cdot 10^{-5}$ ,  $\alpha_e=1.1 \cdot 10^{-5}$

déformation apparente  $\frac{\Delta l_{app}}{l} = \left(\frac{\alpha_R}{K} + (\alpha_e - \alpha_j)\right) \Delta T$   $\Delta l/l = 1.05 \cdot 10^{-4}$

### Exercice 7.3 Corrigé:

Initialement (à  $t_1$ ), la déformation de la jauge suit la déformation du corps d'épreuve. Puis la jointure entre la jauge et le corps d'épreuve se relaxe (fluage sous contrainte). La déformation de la jauge diminue avec le temps  $\Rightarrow \Delta x$ .

Lorsqu'on relâche la force (à  $t_2$ ), la déformation de la jauge suit la déformation du substrat. Mais comme l'interface a « glissé » de  $\Delta x$ , on se retrouve avec cette déformation  $\Delta x$  négative (=hystérèse). L'interface jauge-corps d'épreuve flue à nouveau jusqu'à relaxer la contrainte résiduelle.

### Exercice 7.4 Corrigé:

1) Lorsque une pression uniforme est appliquée sur la membrane, la contrainte surfacique radiale à l'encastrement est négative et maximale. La contrainte tangentielle est nulle.

Les côtés de la membrane carrée en silicium sont orientés selon les directions [110] et [-110]. Si une piézorésistance est alignée selon la direction [110] on sait qu'une contrainte selon [-110] provoque la variation inverse d'une contrainte appliquée selon la direction [110].

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2} \pi_{44} \cdot \sigma_{[110]} \qquad \frac{\Delta R}{R} = -\frac{1}{2} \pi_{44} \cdot \sigma_{[-110]}$$

Les résistances R1 et R3 varient donc inversement des résistances R2 et R4. C'est la configuration idéale pour un montage en pont complet de Wheatstone, où les résistances de la même branche du demi-pont doivent varier de manière opposée.

2)  $R_0=1k\Omega$ ,  $\pi_{44}=138 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ ,  $p=1 \text{ bar}$  ( $10^5 \text{ N/m}^2$ ),  $a=1 \text{ mm}$ ,  $t=10 \mu\text{m}$

Contrainte  $\sigma_{r, x=a/2} = -0.62 \frac{a^2}{h^2} \cdot \Delta p$   $\sigma = 620 \text{ MPa}$

Variation de résistance  $\frac{\Delta R}{R} = -\frac{1}{2} \pi_{44} \cdot \sigma_{[110]}$   $\Delta R/R=43\%$

Attention : avec 1 bar, on dépasse largement la limite élastique du silicium qui est de 165 MPa : le capteur casserait. Ce cas n'est donc pas réaliste. Si on veut rester dans une limite raisonnable, on devrait rester au-dessous de 50 MPa. Ceci donnerait une variation de résistance (à pleine échelle) de 3.4% (pour une pression de 85 mbar). Ou changer les dimensions pour permettre une pression plus élevée.

### Exercice 7.6 Corrigé:

La position est donnée par  $\frac{x}{L} = \frac{a+c-b-d}{a+b+c+d}$

La force  $F = a + b + c + d$  est appliquée au centre, et donc :

$$a = b = c = d = f \quad f = \frac{F}{4} \quad x = \frac{L}{2}$$

$$\Delta a = \Delta f$$

Du chapitre 1, nous avons :  $\Delta A = \left| \frac{\partial f}{\partial B} \Delta B \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial C} \Delta C \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial D} \Delta D \right| + \dots$

$$\frac{\Delta x}{L} = 4 \left| \frac{\partial \left( \frac{a+c-b-d}{a+b+c+d} \right)}{\partial a} \times (\Delta a) \right|$$

$$\frac{\partial \left( \frac{a+c-b-d}{a+b+c+d} \right)}{\partial a} = \frac{1}{F} \quad \text{car la force est centrée, donc } x = 0$$

$$\frac{\Delta x}{L} = 4 \cdot \Delta a \cdot \frac{1}{F}$$

$$\Delta x = 4 L \frac{\Delta f}{F}$$

Pour  $F=10 \text{ N}$  et  $\Delta f=0.1 \text{ N}$   $L=5 \text{ cm}$   
 $\Delta x = 0.2 \text{ cm}$

Pour  $F=1 \text{ N}$  et  $\Delta f=0.1 \text{ N}$   $L=5 \text{ cm}$   
 $\Delta x = 2 \text{ cm}$

### Exercice 7.7 Corrigé:

- En général, quel est l'intérêt de faire une balance avec un feedback électromagnétique ?
  - a. Jusqu'à 1000x plus précis que balance à jauge de déformation
  - b. résolution  $10^{-7}$  de charge maximum
  - c. Mais c'est lourd et plus complexe il faut un aimant permanent et une bobine (ou 2 bobines), source de courant, etc.
- On pèse 100g d'une poudre (densité  $= 1.56 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) avec une balance de laboratoire. Quel est l'erreur induite par l'effet de la présence d'air ? (on mesure à  $15^\circ\text{C}$ , dans de l'air sec)

$$m_{air} = V_{obj} \rho_{air} = m_{obj} \cdot \frac{\rho_{air}}{\rho_{obj}}$$

$$= 0.1 \text{ kg} \cdot 1.22 \text{ kg/m}^3 / 1.56 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3 = 78 \text{ mg d'erreur}$$

- Est-ce qu'une mesure dans de l'air humide modifierait le résultat ?
  - a. Oui, car densité de l'air humide est plus faible que l'air sec