CAPTEURS : CARACTERISTION, UTILISATION

Bibliographie :

Georges Hasch : Capteurs en instrumentation

I INTRODUCTION

Un capteur est dispositif permettant de convertir une grandeur physique non électrique (la mesurande notée m) en grandeur électrique (notée V) afin de la quantifier à l'aide d'appareils électriques ou électroniques :

$$\boxed{V = Sm}$$

La relation doit être univoque, monotone et reproductible.

Les propriétés permettant la conversion se regroupent en 2 familles :

- variation d'une impédance (résistance, capa …) → capteurs passifs
- la génération d'un courant / d'une tension / d'une charge } capteurs actifs

En bout de chaîne, le signal mesuré peut-être de deux sortes :

- une fréquence (le conditionneur est alors un oscillateur)
- une tension (multiples possibilités de conditionnement)

Tout capteur étant soumis à des grandeurs d'influence (la température notamment), il faut vérifier que leur effet est négligeable pour valider en pratique son utilisation.

Finalité du montage :

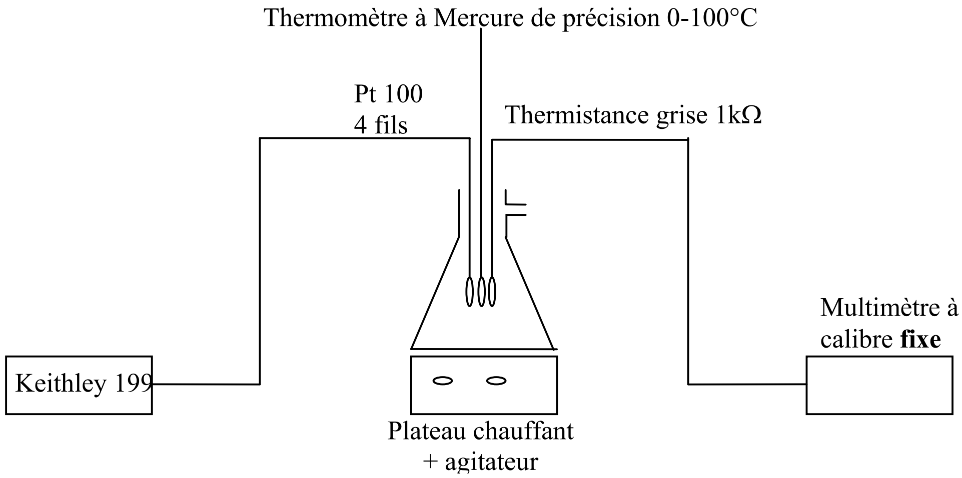
Expliciter les différents principes énoncés ci-dessus sur l'étude de plusieurs capteurs en explorant :

- différentes grandeurs mesurées (T°, E, déformation …)
- différentes conversions (R, C, i, v, Q)
- différents conditionnements.

II MESURE D'UNE TEMPERATURE : SENSIBILTE, FIDELITE

Les capteurs proposés reposent sur la variation de la résistivité ρ en fonction de T → On mesure l'évolution d'une résistance.

2.1 Montage



A préparer en plus :

bain d'eau + glace
ballon d'eau à T ambiante

Mesures à faire en préparation :

Courbes d'étalonnage

T°c	0	ambiante	T_1	T_2	T_3	….	100
R_{pt} (Ω)							
R_{th} (Ω)							

une mesure tous les 10° environ

1.2 Mesures avec la résistance de platine

1.2.1 Intérêt du montage 4 fils

Mesurez R_{pt} à 0°C

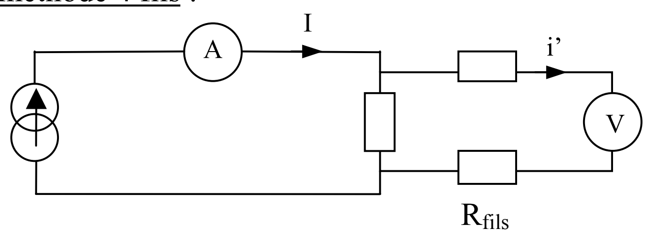
en 4 fils : $R_o \cong 100\ \Omega$
en 2 fils : $R'_o > R_o$

Chiffrez l'incertitude sur les mesures (cf. doc. Du Keithley et de la résistance de Platine) ⇒ montage 4 fils plus précis.

Explication :

Le multimètre envoie un courant connu et mesure la d.d.p. à ses bornes pour en déduire R. Le courant passant dans les fils de mesure, la mesure de V tient compte alors de la chute de tension dans les fils.

Avantage de la méthode 4 fils :



$Z_{voltmètre} \approx \infty \Rightarrow i' = 0$

⇒ mesure indépendante des fils de liaison

1.2.2 Mesure d'une température

Mesurez R_{Pt} entre $0 < T < 100$ °C

Comparez à la courbe d'étalonnage
aux valeurs d'étalonnage
$\Rightarrow$ Très bonne reproductibilité.

Remarques :

Si la valeur mesurée, compte tenu de l'incertitude sur la mesure, ne recoupe pas la valeur dans les tables, vérifiez si le coefficient d'autoéchauffement de la R_{pt} (0,25°C / mW $\rightarrow RI^2$) est compatible avec le courant de mesure du Keithley (cf. sa doc). Cet effet peut être source d'erreur **sauf** aux points fixes (équilibre monovariants). Illustration du phénomène $\rightarrow$ cf. poly ENS 3 p 51.

Cette manip doit être effectuée avec un multimètre de précision $\rightarrow$ Keithley calibre 300 Ω : incertitude 0,012% !

1.2.3 Réponse du capteur - Sensibilité

Pour un métal, la résistivité suit une loi du type : $\rho = \rho_o (1 + aT + bT^2 + \ldots)$

Valeurs des coef. $\rightarrow$ Cf. Quaranta II p. 278 ou montage Thermométrie.

Quand T augmente, les vibrations du réseau augmentent la probabilité de choc avec les électrons qui circulent $\Rightarrow$ ρ augmente : CTP (coefficient de température positif).

$R = \rho \frac{\ell}{S}$ $\Rightarrow$ Si la dilatation thermique est négligeable (ℓ, S = ctes), R suivra l'évolution de ρ.

Courbe d'étalonnage :

Pour 0< T<100° C réponse ≅ linéaire $\rightarrow$ on peut calculer le coefficient a dans l'expression de ρ. Les autres coefficients sont négligeables dans la gamme de température explorée.

Calculez la sensibilité : $\boxed{S = \frac{\Delta R}{\Delta T}}$

Inconvénients - Avantages :

La sensibilité de ce capteur est faible. Par contre la reproductibilité est excellente. De plus, le Platine est insensible à la corrosion

$\Rightarrow$ c'est pour ces raisons qu'on a choisit la résistance de Platine comme instrument légal d'interpolation dans l'échelle internationale de température (EIT 1990)

Applications :

Mesures de température de précision.

1.3 Mesures avec la thermistance

Ce capteur est constitué d'oxydes semi-conducteurs frittés. L'augmentation de température provoque la création de paires e^-/trou qui participent à la conduction.

R diminue quand T augmente : CTN (coefficient de température négatif). Le gap doit être relativement faible pour avoir un capteur sensible.

Loi de variation approchée :

$$\boxed{R = A\ e^{\frac{Eg}{2kT}}}$$

A dépend aussi de la température

Remarque :

Les thermistances CTN sont les plus courantes. Il faut cependant savoir qu'il existe aussi des thermistances CTP. Comment marchent-elles à votre avis ?

1.3.1 Influence de l'appareil de mesure

Mesurez R_{th} dans d'air ambiant :

$$\left.\begin{array}{l}\text{avec différents multimètres}\\ \\ \text{avec le même multimètre sur des calibres différents}\end{array}\right\} \Rightarrow \text{R varie}$$

Refaire la même manipulation mais à un point fixe cette fois-ci → différence ?

Explication :

Pour mesurer une résistance, un multimètre envoie un courant et mesure V. Or, suivant le multimètre ou le calibre, le courant n'est pas le même (cf. doc Keithley par exemple).

La thermistance étant conçue pour être extrêmement sensible aux variations de températures, elle est alors plus sensible à l'autoéchauffement dû au courant de mesure (c'est l'inconvénient de l'avantage !).

Conclusion :

La courbe d'étalonnage R = f (T) doit être faite sur un même calibre ; Elle n'a de sens que pour l'ensemble capteur + instrument de mesure .

Remarques :

On illustre ici l'effet d'une grandeur d'influence.

Etant donné la sensibilité de la thermistance, il est inutile de faire une mesure 4 points (ça l'est pour le platine car les ΔR sont faibles).

1.3.2 Mesure d'une température

Mesurez R_{th} à $0 < T < 100°$ C. Evaluez l'incertitude (appareil de mesure + stabilité de la lecture). Comparez la valeur obtenue à celle de la courbe d'étalonnage et à la température mesurée avec le thermomètre à mercure de précision.

→ Thermistance plus sensible mais moins bonne reproductibilité.

Remarque :

Pour avoir une valeur la plus stable possible de la lecture, prendre un bon appareil de mesure (bonne source de courant) et faire la mesure dans un milieu homogène (agitation non turbulente → éviter l'ébullition).

1.3.3 Réponse du capteur sensibilité

L'analyse de la courbe R = f (T) permet les constatations suivantes :

- la réponse est non linéaire → nécessité d'un système de linéarisation si on veut s'en servir pour des mesures (peu pratique).
- ce capteur possède une grande sensibilité ; pour s'en convaincre, calculez S(0°C), S(50°C) et S(100°C) Comparez avec R_{pt}
- il est en revanche moins précis ; estimez l'incertitude due à l'instabilité des mesures (> incertitude des appareils).

Tracez la courbe lnR = f(1/T) (utilisez Excel par exemple) : elle doit être linéaire → en accord avec la théorie. Calculez la pente → estimation de Eg ≅ 0,5 eV (faible) → explique la sensibilité.

1.3.4 Application

On peut faire une régulation de température en tout ou rien (cf. Quaranta III p. 451-452).

II MESURE D'UN ECLAIREMENT : LINEARISATION DE LA REPONSE

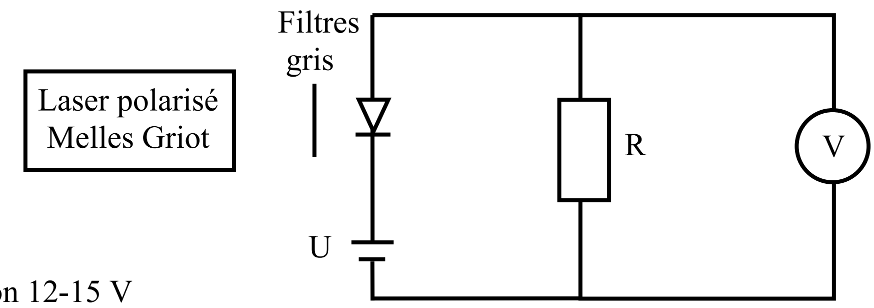
Photodiode = source de courant

2.1 Principe

La lumière crée des porteurs dans une jonction PN. Pour que ces porteurs puissent contribuer à un courant, ils ne doivent pas se recombiner. Ceci n'est possible que dans la zone de déplétion. Le courant photoinduit est donc un courant inverse de même sens que le courant lié aux porteurs minoritaires. Ce courant étant faible, on ne le mesure pas directement. On mesure plutôt la ddp qu'il produit aux bornes d'une résistance.

Le mode photovoltaïque ne fournissant pas une réponse linéaire, on utilise un montage en polarisation inverse (le plus répandu).

2.2 Photodiode en détecteur de lumière linéaire



U : alimentation 12-15 V
Photodiode : OSD5T
R : potentiomètre 0-100 kΩ → le régler ≅ au maximum

Remarques :

Prendre un laser polarisé. Un laser normal risque de subir une polarisation partielle au passage du filtre (si incidence oblique) → fluctuation importante de la puissance (cf. Sextant p 68 et 199).

Recouvrir l'ensemble d'un drap noir pour éliminer les lumières parasites.

Prendre une photodiode au silicium sans filtre de correction de sensibilité (comme c'est le cas pour la BPW21 par exemple) → on a alors un maximum de sensibilité dans l'IR or le laser émet dans le rouge.

Manipulation 1 :

Sans filtre (éclairement donné) → vérifiez que V prop à R ⇒ Le courant mesuré est indépendant des caractéristiques du circuit : on mesure bien le photocourant.

Manipulation 2 :

Mesure du courant inverse d'obscurité → cf. Sextant p 64, paragraphe II.2.2 (prendre un Velleman comme voltmètre Ze = 10MΩ).

Manipulation 3 :

Influence de l'éclairement.

On modifie la quantité de lumière reçue en employant des filtres gris calibrés en densité optique : $ND = \log \frac{\Phi_{inc}}{\Phi_{trans}}$: neutral density $\rightarrow \Phi_t = \Phi_i \, 10^{-ND}$

Notez la réponse de la photodiode en fonction de la densité optique :

ND	
VV	
I	
log I	

$$\left.\begin{array}{l} 1^{er} \text{ filtre} : \Phi_t = \Phi_i \, 10^{-ND1} \\ 2^{ème} \text{ filtre} : \Phi_t = \Phi_i \, 10^{-ND2} \end{array}\right\} \text{Comme I prop } \Phi \Rightarrow \boxed{\log I = f(ND) = \text{droite}}$$

Remarque :

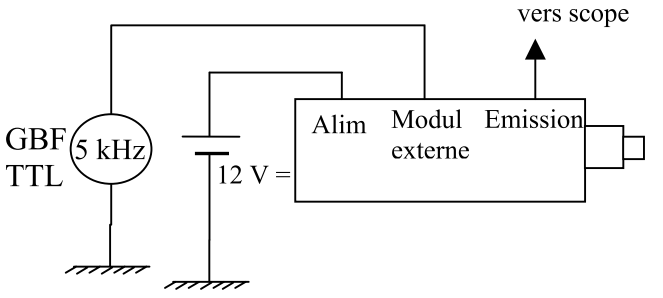
La précision des filtres est environ 0,1 en densité soit 25% en transmission !

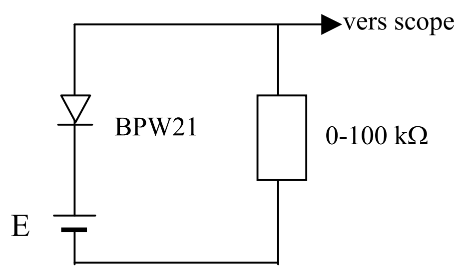
Sensibilité de la diode :

Cf. Sextant p 69.

Eclairez la photodiode avec le laser seul. En déduire sa sensibilité dans le rouge en $A.W^{-1}$ (la puissance émise par le laser est notée dessus - on peut aussi la mesurer avec une thermopile). Comparez aux données Radiospares.

2.3 Temps de réponse

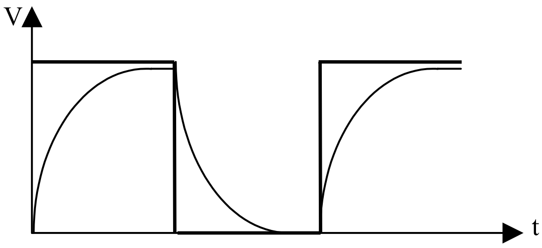




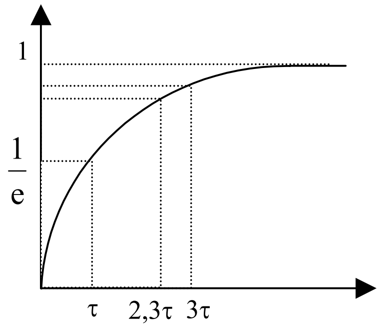
E < à 15 V (prendre 5 V pour la mesure)

2.3.1 Type de réponse

Elle ressemble à celle d'un système du 1^{er} ordre.



Pour le vérifier, on peut dilater la réponse à un échelon sur la totalité de l'écran (on peut aussi utiliser synchronie et comparer la courbe acquise à un modèle exponentiel).



Si $\left.\begin{array}{l} t_r(10\ \%) = 2,3\ \tau \\ t_r(5\ \%) = 3\ \tau \end{array}\right\}$ $\boxed{\Rightarrow \text{Réponse du premier ordre}}$

Explication :

La diode est équivalente à une capacité ; la zone de déplétion est en effet équivalente à un diélectrique puisqu'elle ne contient pas de porteurs de charge libre → associée à la résistance de mesure du photocourant, l'ensemble équivaut à un filtre RC.

Mesure :

Mesurez τ avec un oscillo à curseurs ou en utilisant Synchronie (on peut alors comparer la courbe obtenue à un modèle exponentiel) → en déduire une estimation de C.

Comparez à la valeur annoncée par le constructeur (170 pF sous 5 V →cf doc Radiospares I p 1.1400).

2.3.2 Influence de E sur le temps de réponse

Modifiez E de part et d'autre de 5 V → plus E augmente, plus la diode répond vite.

Explication :

La diode est polarisée en inverse par la tension E. Plus cette tension est forte, plus on augmente la largeur de la zone de déplétion.

Comme $C = \varepsilon \dfrac{S}{e}$ ⇒ si e augmente, C diminue ⇒ RC diminue ⇒ on gagne en rapidité.

Temps de montée :

Par convention, le temps de montée correspond au temps nécessaire pour passer de 10 à 90% du signal (cf. Hasch p 37).

On peut le mesurer rapidement à l'aide de l'oscillo HP 54603B ("Time Mesure" → "Rise Time" ou "Fall Time") et le comparer avec les données constructeur (cf Radiospare, tome I , p. 1400).

→ prendre E = 5 V et R = 1 kΩ

Remarque :

Notez l'incompatibilité entre rapidité et sensibilité. Si on veut privilégier la vitesse, il faut prendre E maximum et R minimum ; on a alors un détecteur rapide mais peu sensible. Pour privilégier la sensibilité, il faut prendre E minimum et R maximum → on perd en vitesse.

2.3.3 Application

Il existe un dispositif permettant de mesurer la vitesse de la lumière (on rappelle que dorénavant, la vitesse de la lumière a été posée comme une constante définitive). La manipulation consiste à moduler un faisceau laser, envoyer ce faisceau vers un miroir et détecter le retour de ce faisceau sur une diode. Connaissant la longueur du trajet du faisceau, il suffit de mesurer le temps qu'il a mis pour en déduire c.

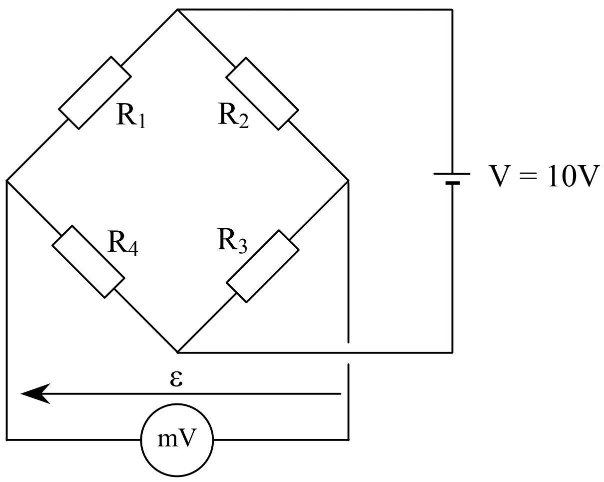
Cette mesure est délicate en pratique car il faut disposer d'une photodiode très rapide. On améliore son temps de réponse en appliquant les principes précédents.

→ Visualisez les signaux issus des deux photodiodes ; vous devez constater qu'ils sont extrêmement faibles.

III MESURE D'UNE DEFORMATION - COMPENSATION D'UNE GRANDEUR D'INFLUENCE

Le capteur est une jauge de déformation (et non de contrainte comme il est commun d'appeler ces composants). Il met à profit la variation de R avec ρ, ℓ et S → cf. Hasch p 378-379.

3.1 Montage



V : alimentation continue très stable
A Rennes, prendre l'alimentation Konstanter

$R_1 = R_2 = 1000\ \Omega$ AOIP
Les sélectionner à l'aide d'un multimètre précis.

R_3 : 350 Ω (cf. ci-dessous)

R_4 : jauge 350 Ω bloquée du coté sans trou

mV : Métrix MX 54-56 ou Keithley 199

Remarque :

Essayez d'avoir des résistances R_1 et R_2 égales à l'ohm près pour valider les formules en 3.2, 3.3, 3.4

Pour R_3 deux solutions sont possibles :

La réaliser à partir de boites AOIP ×100 Ω, ×10 Ω, ×1 Ω, ×0,1 Ω. Ajustez au mieux leur valeur de façon à avoir ε = 0,00 mV. En général, on ne réalise jamais parfaitement cette condition.

La réaliser avec des boites AOIP ×100 Ω, ×10 Ω, ×1 Ω, et le fil métallique de longueur réglable (matériel Eurosap Eyrolles). Dans ce cas, si le contact glissant est correct, on arrive à avoir ε = 0,00 mV. La valeur à cependant tendance à fluctuer légèrement (surtout si on mesure ε avec le Keithley) à cause probablement des parasites électromagnétiques.

3.2 Effet d'une déformation

Fléchir manuellement la poutre et notez l'ordre de grandeur des variations Δ R de la jauge à l'aide d'un ohmmètre numérique affichant au moins 4 digits (Keithley 199 à Rennes).

$$\rightarrow \quad \boxed{\Delta R_4 \text{ de l'ordre de } 0{,}1\ \Omega}$$

L'emploi du pont se justifie pour sa grande sensibilité (les jauges fonctionnent dans un domaine de déformation $\Delta \ell / \ell$ typique < à 1%).

Variation de ε :

Partant du pont équilibré, rajoutez des masses M à l'extrémité de la poutre.

On a alors : $\boxed{\varepsilon = V \frac{R_1}{(R_4 + R_1)^2} \Delta R}$ cf. calculs en annexe

Mesures :

M(g)	0	100	200	300	400	500
ε (mV)						

Pour de faibles déformations, ΔR doit être proportionnel à M $\Rightarrow$ ε proportionnel à M.

3.3 Doublement de la sensibilité

Remplacez R_3 par la jauge située au-dessous de la poutre. La encore, il faut rééquilibrer le pont sans déformation. Pour ce faire, rajoutez à l'une des jauges une résistance variable ×1 Ω, ×0,1 Ω ou une résistance variable ×1 Ω + le fil métallique de longueur réglable. Une fois l'équilibre obtenu, rajoutez des masses.

On a alors : $\boxed{\varepsilon = V \frac{2R_1}{(R_4 + R_1)^2} \Delta R}$ cf. calculs en annexe

$\Rightarrow$ Pour une même masse M, le signal doit être deux fois plus fort qu'auparavant. Vérifiez le par une série de mesure :

M(g)	0	100	200	300	400	500
ε (mV)						

3.4 Compensation en température

La résistance d'un métal est fonction de la température (cf. I). Or $\Delta R_T > \Delta R_{déformation}$ $\Rightarrow$ nécessité de compenser en T°.

Remplacez R_3 par la jauge située du même côté que R_4 mais collée perpendiculairement → celle-ci subit ΔR_T mais pas ΔR_{def} ; on a alors :

$$\boxed{\varepsilon = V\frac{R_1}{(R_4 + R_1)^2}\Delta R_1} \qquad \text{cf. annexe}$$

<u>Manipulation</u> :

- partant du montage 3.2 équilibré, ajoutez une masse M. Notez ε.
- chauffez la jauge (sèche cheveux ou QI décalotté près la de la poutre) → ε augmente.
- remplacez R_3 par la jauge supérieure perpendiculaire. Equilibrez le pont.
- ajoutez la masse M. Notez ε.
- réchauffez les jauges → ε inchangé.

<u>Remarque</u> :

Cette manipulation est délicate (si le refroidissement est imparfait entre les deux manipulations, ε varie) → Attendre que la poutre se refroidisse entre les deux manipulations. Pour le savoir, attendre que le signal revienne à sa valeur d'origine avant de passer au 2ème montage.

L'autre difficulté de cette manipulation est d'avoir un échauffement homogène dans la barre → c'est la source d'erreur la plus difficile à éliminer.

IV AUTRES EXPERIENCES POSSIBLES

4.1 Réalisation d'un capteur inductif

Une idée simple de capteur de position basé sur l'induction est proposée dans le montage M 18 (Milieux magnétiques), § 5.4.2. S'y reporter pour plus de précision.

4.2 Réalisation d'un capteur capacitif

Une idée simple de capteur de niveau basé sur les lois élémentaires du condensateur est proposée dans le montage M 16 (Condensateurs), § 4.2. S'y reporter pour plus de précision.

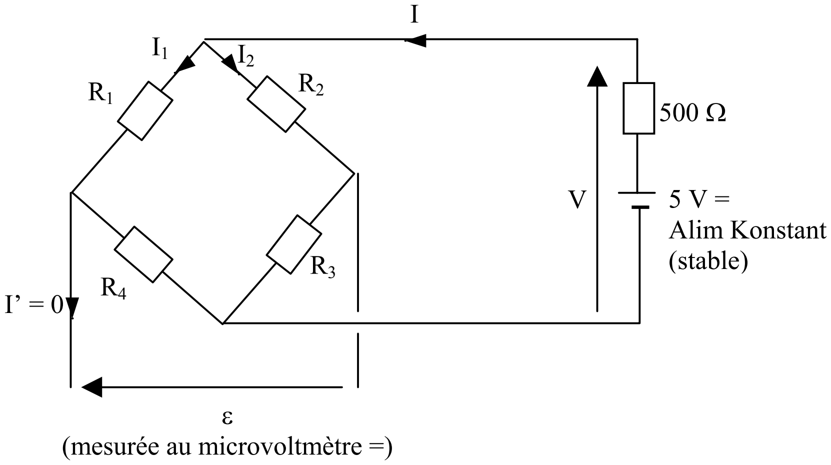
4.3 Capteur de champ magnétique

On peut faire l'étude d'un capteur de champ magnétique tel que le fluxmètre électronique par exemple. Se reporter au montage M 20 (Production et mesure d'un champ magnétique), § 1.2 pour le montage. On peut montrer alors les problèmes qu'apporte le système de conditionnement du signal (dérive du montage du aux courants de polarisation et à l'offset de l'AO) et les solutions à mettre en œuvre pour les minimiser.

ANNEXE :
JAUGE DE DEFORMATION - CALCULS

I MONTAGE

Prendre la barre métal de chez Vishay Micromesures. Celle-ci comporte 3 jauges de ≅ même résistance (350 Ω) deux sur une face en croisé, une en dessous.



R_4 : jauge // barre au-dessus

$R_1 = R_2$

$R_3 = R_4$

II EXPRESSION DE ε SANS DEFORMATION

$\varepsilon = R_2 I_2 - R_1 I_1 = R_4 I_1 - R_3 I_2$
$V = (R_1+R_4)\, I_1 = (R_2 + R_3)\, I_2$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\varepsilon = V\left(\frac{R_4}{R_1+R_4} - \frac{R_3}{R_2+R_3}\right)}$$

Lorsque l'on annule ε, on a alors :

$$R_4\,(R_2+R_3) = R_3\,(R_1+R_4) \Leftrightarrow R_2R_4 + R_3R_4 = R_1R_3 + R_3R_4$$

$$\boxed{\begin{aligned}\varepsilon = 0 \ &\Leftrightarrow \frac{R_4}{R_1+R_4} = \frac{R_3}{R_2+R_3} \\ &\Leftrightarrow R_1R_3 = R_2R_4\end{aligned}}$$

L'extrême sensibilité du montage permet de calculer directement R_4 avec une très bonne précision si on a pour R_1, R_2 et R_3 de très bons étalons.

III EXPRESSION DE ε AVEC DEFORMATION

$$\varepsilon = V\left(\frac{R_4 + \Delta R}{R_1 + R_4 + \Delta R} - \frac{R_3}{R_2+R_3}\right)$$

or $\frac{R_3}{R_2+R_3}=\frac{R_4}{R_1+R_4}$ suite à l'équilibrage du pont

$$\Rightarrow \quad \varepsilon = V\left(\frac{R_4+\Delta R}{R_1+R_4+\Delta R}-\frac{R4}{R_1+R4}\right).$$

En mettant le même dénominateur puis en développant le numérateur, on obtient :

$$\left.\begin{array}{l} \varepsilon = V\left(\dfrac{R_1\Delta R}{(R_1+R_4+\Delta R)\ (R_1+R4)}\right) \\ \text{Or } \ \Delta R \cong 0{,}1\ \Omega \ \Rightarrow \ R_1+R_4+\Delta R \cong R_1+R_4 \end{array}\right\} \quad \boxed{\varepsilon = V\frac{R_1}{(R_1+R_4)^2}\Delta R}$$

<u>Remarque</u> :

Si vous vous amusez à refaire le calcul, il faut faire attention à ne pas simplifier trop vite le quotient en prenant à partir de la deuxième ligne l'hypothèse $R_1 + R_4 + \Delta\ R_4 \approx R_1 + R_4$; en effet, on obtient dans ce cas : $\varepsilon = V\frac{\Delta R}{(R_1+R_4)^2}$

Cela revient alors à négliger deux fois ΔR au lieu d'une. De plus, si on identifie les deux expressions obtenues pour ε, cela revient à faire l'hypothèse $R_1 + R_4 \cong R_1$.

IV <u>DOUBLEMENT DE LA SENSIBILITE</u>

On remplace R_3 par une jauge de même nature située en dessous de la barre.

Avec déformation : $R_4 \to R_4 + \Delta R$

$R_3 \to R_3 - \Delta R$

$$\Rightarrow \varepsilon = V\left(\frac{R_4+\Delta R}{R_1+R_4+\Delta R}-\frac{R_3-\Delta R}{R_2+R_3-\Delta R}\right)$$

En mettant de nouveau au même dénominateur, puis en développant le numérateur, on obtient :

$$\varepsilon = V\left(\frac{R_2R_4+R_2\Delta R-R_1R_3+\Delta R R_1}{(R_1+R_4+\Delta R)\ (R_2+R_3-\Delta R)}\right)$$

Or, à l'équilibre : $R_2R_4 = R_1R_3$ $\Rightarrow$ $\varepsilon = V\left(\frac{(R_1+R_2)\,\Delta R}{(R_1+R_4+\Delta R)\ (R_2+R_3-\Delta R)}\right)$

or $R_2 = R_1$ (cf. page 1) $\Rightarrow$ $\varepsilon = V\left(\frac{2R_1\,\Delta R}{(R_1+R_4)\ (R_2+R_3)}\right)$

Comme $R_2R_4 = R_1R_3$
et $R_2 = R_1$ $\Bigg\}$ $\Rightarrow$ $R_4 = R_3$ $\Rightarrow$ $\varepsilon = V\left(\dfrac{2R_1}{(R_1+R_4)^2}\right)\Delta R$

Par rapport à l'expression précédente établie pour ε, on voit ici que la sensibilité est doublée par deux.

V COMPENSATION EN TEMPERATURE

On ne traite que le cas le plus simple ; celui où R_3 est une jauge de même nature que R_4, soumise à la grandeur d'influence mais pas à la déformation (jauge collée perpendiculaire à la déformation).

Avec déformation et grandeur d'influence $R_4 \rightarrow R_4 + \Delta R + \Delta R_T$
$R_3 \rightarrow R_3 + \Delta R_T$

$$\varepsilon = V\left(\frac{R_4 + \Delta R + \Delta R_T}{R_1 + R_4 + \Delta R + \Delta R_T} - \frac{R_2 + \Delta R_T}{R_2 + R_3 + \Delta R_T}\right)$$

$$\varepsilon = V\left(\frac{(R_2R_4 + +R_2\Delta R + R_2\Delta R_T - R_1R_3 - R_1\Delta T}{(R_1 + R_4 + \Delta R + \Delta R_T)\ (R_2 + R_3 - \Delta R_T)}\right)$$

$$\varepsilon = V\left(\frac{(R_2R_4 + +R_2\Delta R + R_2\Delta R_T - R_1R_3 - R_1\Delta T}{(R_1 + R_4)\ (R_2 + R_3)}\right)$$

Suite au premier équilibrage $R_2R_4 = R_1R_3$ $\Rightarrow$ $\varepsilon = V\left(\dfrac{R_2\Delta R + (R_2 - R_1)\Delta R_T}{(R_1 + R_4)\ (R_2 + R_3)}\right)$

$$\varepsilon = V\left(\frac{R_2\Delta R}{(R_1 + R_4)\ (R_2 + R_3)}\right)$$

Comme alors $R_1 + R_4 = R_2 + R_3$

$$\varepsilon = V\left(\frac{R_1\Delta R}{(R_1 + R_4)^2}\right)$$

On retrouve la même expression → la grandeur d'influence ne modifie pas le résultat avec cette configuration.

Remarque :

On pourrait démontrer qu'en prenant pour R_3 la jauge collée au-dessous, on aurait doublement de la sensibilité et compensation en température. Pour ce faire, il suffit de faire les permutations suivantes :

$R_3 \rightarrow R_3 + \Delta R + \Delta R_T$
$R_4 \rightarrow R_4 + \Delta R + \Delta R_T$

Vous pouvez faire le calcul si vous avez des doutes !