

---

## Capteurs de grandeurs mécaniques

---

- Sextant, *Optique expérimentale*.
- Duffait, *Expériences d'électronique*.
- Daniel Aubert, éditions Pierron, *Dictionnaire de physique expérimentale, Tome 3 : électronique*.
- Georges Asch, éditions Dunod, *Les capteurs en instrumentation industrielle*.

Les expériences proposées ici peuvent être utilisées entre autres dans les montages Dynamique newtonienne (M01), Capteurs de grandeurs mécaniques (M04), Effets capacitifs (M19), et Mesure de longueurs (M26).

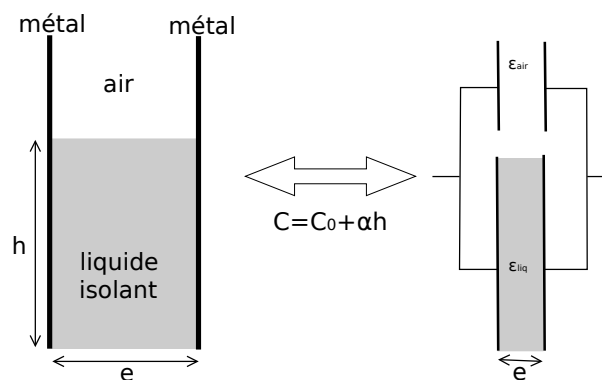
## I) Capteur de niveau d'eau capacitif

La mesure du niveau d'un liquide contenu dans une cuve opaque peut être réalisée à l'aide de capteurs capacitifs. Deux cas sont à envisager selon que le liquide est électriquement isolant ou conducteur. Dans le cas d'un liquide isolant la variation de capacité est due au changement de diélectrique dans le condensateur formé de deux conducteurs métalliques. Dans le cas d'un liquide conducteur, le condensateur est constitué d'un conducteur recouvert d'une fine couche d'un matériau isolant (diélectrique) ; le liquide joue alors le rôle de la seconde armature du condensateur. La variation de capacité résulte alors du changement de l'aire des armatures du condensateur.

La capacité  $C$  varie linéairement avec la hauteur de liquide  $h$ . La capacité  $C_0$  est la capacité du condensateur en l'absence de liquide. La pente dépend de la permittivité du vide  $\epsilon_0$ , de la constante diélectrique  $\epsilon_r$  du matériau isolant et de la géométrie (plane ou cylindrique) du capteur.

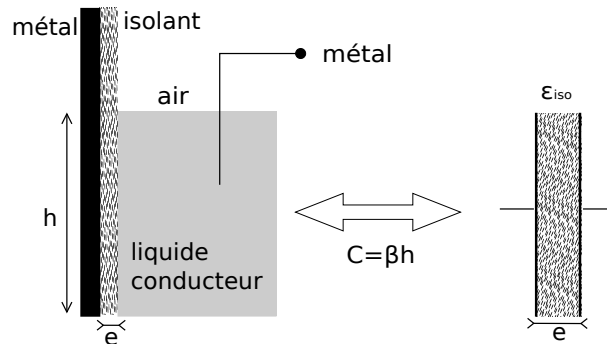
Dans la pratique, la géométrie cylindrique est la plus simple à mettre en oeuvre et permet de minimiser les effets de bord. Pour les liquides isolants, une tige conductrice cylindrique est introduite dans la cuve qui constitue souvent la seconde armature du condensateur. Pour les liquides conducteurs, une tige conductrice et cylindrique, recouverte d'une couche d'un matériau isolant, est introduite dans la cuve. Un second conducteur est plongé dans le liquide (seconde armature du condensateur) pour permettre la mesure de capacité.

Enfin, dans le cas d'un liquide isolant, la capacité risque d'être très faible ( $\epsilon$  est grand) et les effets de bords importants surtout si la cuve sert d'armature. Le capteur est alors utilisé comme détecteur de niveau en "tout ou rien". On détecte alors seulement une variation de capacité quand la sonde plonge dans le liquide isolant. Le capteur n'a donc pas besoin d'être linéaire.



### 1) Comportement électrique de l'eau

On considère un condensateur formé de deux conducteurs de surface  $S$  séparés par une épaisseur d'eau  $e_{eau}$ . Un tel condensateur est caractérisé par sa résistance  $R_{eau}$  en parallèle avec son impédance capacitive  $\frac{1}{jC_{eau}\omega}$ , où  $C_{eau}$  et  $\omega$  sont la capacité et la pulsation, respectivement. Le rapport de ces deux



impédances vaut en module <sup>1</sup>

$$a = R_{eau} C_{eau} \omega = \left( \frac{\rho e_{eau}}{S} \right) \left( \frac{\epsilon_0 \epsilon_{eau} S}{e_{eau}} \right) \omega = \rho \epsilon_0 \epsilon_{eau} \omega, \text{ avec } \epsilon_0 \text{ et } \epsilon_{eau} \text{ les permittivités du vide et de l'eau.}$$

Si  $a \ll 1$  le dipôle se comporte comme une résistance pure  $R_{eau}$ . Si  $a \gg 1$  le dipôle se comporte comme un condensateur de capacité  $C_{eau}$ .

Le tableau ci-dessous présente l'ordre de grandeur attendu pour le coefficient  $a = \rho \epsilon_0 \epsilon_{eau} \omega$  pour de l'eau contenant plus ou moins d'espèces dissoutes : eau pure, eau distillée (à l'abri du  $\text{CO}_2$ ) et eau du robinet. Les fréquences de test envisagées (100 Hz, 1 kHz et 10 kHz) sont celles généralement disponible sur les RLC-mètres.

résistivité ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	eau pure $\simeq 2 \times 10^5$	eau distillée $\simeq 10^4$	eau du robinet $\simeq 20$
f=100 Hz	0.1	$5 \times 10^{-3}$	$10^{-5}$
f=1 kHz	1	$5 \times 10^{-2}$	$10^{-4}$
f=10 kHz	10	0.5	$10^{-3}$

Le comportement capacitif est observé pour les valeurs de résistivité et de fréquences élevées. Le comportement résistif (c'est à dire conducteur) est observé pour les faibles valeurs de résistivité et de fréquence.

**Dans la suite, on suppose que l'eau a un comportement totalement résistif (ou de façon équivalente que l'eau est un liquide conducteur).**

## 2) Manipulation

### a) Description du dispositif

La sonde capacitive est constituée d'un fil de cuivre verni. Ce fil verni est courbé de façon à former un "U", l'extrémité du coeur en cuivre n'est donc pas en contact avec l'eau. Un second fil de même nature et dénudé permet d'établir un contact électrique avec l'eau. L'ensemble est protégé par un tube

<sup>1</sup>On peut montrer que  $a = \rho \epsilon_0 \epsilon_{eau} \omega$  reste significatif indépendamment de la géométrie du condensateur.

transparent en PMMA<sup>2</sup>. Une bande millimétrée transparente est collée sur le tube pour permettre la lecture des variations de hauteur d'immersion de la sonde capacitive.

### b) Utilisation

La sonde, tenue sur un support à l'aide d'une tige et d'une pince, est plongée dans un réservoir contenant de l'eau du robinet. Le niveau d'immersion est contrôlé en modifiant la hauteur du support ou en vidant le récipient progressivement avec un siphon (utiliser une pince à clamper pour déclencher et interrompre la vidange). Mesurer la capacité de la sonde à l'aide d'un RLC-mètre en fonction de la profondeur d'immersion. Pour améliorer la précision de la mesure, on peut utiliser des câbles BNC banane-banane sur les entrées + et -, et relier les masses de ces câbles BNC à la borne de garde du RLC-mètre. On peut réaliser un étalonnage, et chercher ensuite à déterminer une hauteur inconnue. On peut aussi déduire des résultats obtenus l'épaisseur de la couche de vernis recouvrant le fil de cuivre.

Pour aller plus loin, consulter la notice N.197.

## II) Mesure interférométrique de la déformation d'un piézoélectrique ("Michelson de poche")

Utiliser pour cette expérience la boîte «caractérisation d'un piézo-électrique». On se propose de tracer la caractéristique tension/élongation d'une cale piézoélectrique par une technique interférométrique. La cale est constituée d'un empilement de céramiques piézoélectriques, de façon à augmenter sa sensibilité.

Un laser a une grande longueur de cohérence temporelle, on peut donc fabriquer un interféromètre de Michelson qui permet d'obtenir de grandes différences de marche. On dispose d'un miroir fixe, d'un miroir monté sur une cale piézoélectrique, et d'un cube séparateur, avec des supports de miroirs sont très courts afin de minimiser l'influence des vibrations.

### 1) Montage

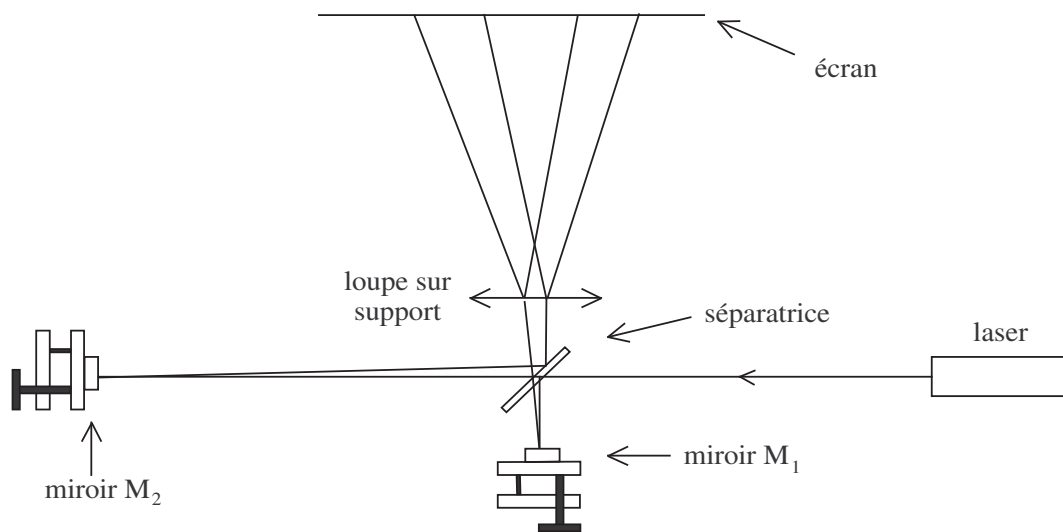
- Elargir le faisceau à l'aide du télescope afocal placé avant le Michelson.
- Placer le miroir  $M_1$  à une dizaine de centimètres du cube et régler son orientation pour qu'une partie du spot revienne juste au dessus de la sortie du laser (ne pas le faire revenir directement dans le laser, car le couplage entre les faisceaux «aller» et «retour» dans le tube peut induire des franges parasites et des instabilités).
- Placer le miroir  $M_2$  sensiblement à la même distance du cube. Pour le réglage de l'orientation, procéder comme pour  $M_1$ .

### 2) Détection des interférences

On peut détecter les interférences à l'infini de deux façons :

---

<sup>2</sup>Polyméthacrylate de méthyle (Plexiglas)



- **Méthode visuelle** : Observer sur l'écran les deux faisceaux étalés et retoucher l'orientation d'un des miroirs pour que ces deux faisceaux aient une région commune, on peut éventuellement utiliser une loupe pour projeter les interférences sur l'écran. Si vous n'observez pas de franges, cela peut être dû à une antioïncidence entre les différents modes longitudinaux du laser, déplacer  $M_1$  d'environ 10 cm et reprendre le réglage.

Charioter le miroir placé sur la cale piézoélectrique en changeant sa tension d'alimentation. Relever les minimum d'éclairement du centre des anneaux et en déduire ainsi la caractéristique tension/élongation de la cale piézoélectrique. Le constructeur annonce une course de  $10 \mu\text{m}$  pour 1000 V.

- **Avec une photodiode (facultatif)** : Après le même réglage que ci-dessus, placer une photodiode autonome sur le faisceau de sortie et balayer lentement le piézo à l'aide d'une rampe de tension générée par un GBF et l'ampli HT. Optimiser ensuite le contraste des «franges».

### III) Accéléromètres

Il est indispensable de **lire la notice**, et en particulier la section Sécurité, avant d'utiliser ou de transporter l'expérience. Cette notice contient de plus des photos de l'expérience, et toutes les données nécessaires à son exploitation quantitative.

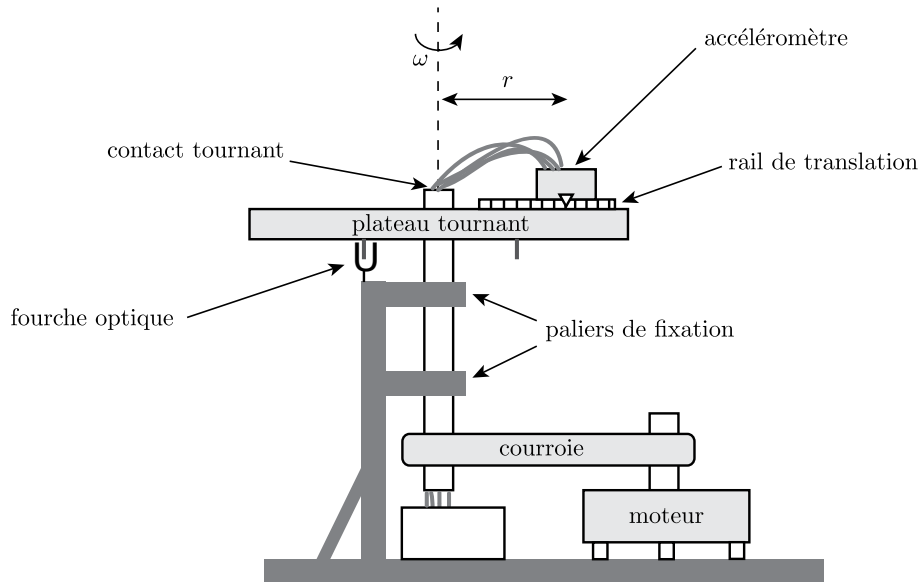
#### 1) Principe

Un accéléromètre est un capteur permettant de mesurer des accélérations selon un ou plusieurs axes. Il peut être modélisé par un système masse-ressort, le déplacement de la masse par rapport à sa position d'équilibre étant proportionnel à l'accélération appliquée d'après le principe fondamental de la dynamique. Plusieurs types d'accéléromètres existent : asservis ou non asservis, et plusieurs formes de détection du mouvement de la masse peuvent être mises en oeuvre : détection capacitive, piézoélectrique, inductive, optique, etc.

On dispose d'un accéléromètre Analog Devices ADXL335 (à détection capacitive), capable de mesurer sur trois axes des accélérations comprises entre  $3g$  et  $-3g$ . Ce capteur permet aussi bien de

mesurer l'accélération statique de la gravité que de mesurer l'accélération dynamique résultant de mouvements, chocs ou vibrations.

L'accéléromètre est monté sur un plateau tournant, avec un de ses axes selon la direction radiale, de façon à pouvoir quantifier la force centrifuge liée à la rotation du plateau.



## 2) Expérience

### Consignes de sécurité :

le dispositif expérimental consiste en un plateau tournant, qui peut s'avérer dangereux. Il est impératif :

- 1) de vérifier qu'il n'y a aucun objet mobile sur le plateau tournant.
- 2) de vérifier qu'aucun fil ne gêne le mouvement du plateau, de la courroie ou du moteur.
- 3) de vérifier que le chariot (situé sur le rail) est bien vissé, c'est-à-dire que la vis (Thorlabs) est vissée.
- 4) de vérifier que le potentiomètre d'alimentation du moteur est au minimum.
- 5) de vérifier que l'expérience est dans la boîte, et que celle-ci est bien fermée.

Le dispositif expérimental permet de comparer *sans paramètre ajustable* la force centrifuge à sa valeur théorique (à savoir). Cette expérience donne un accord quantitatif, si ce n'est pas le cas c'est qu'il y a un problème. Elle consiste en un plateau tournant, entraîné par un moteur à courant continu. La vitesse de rotation est mesurée grâce à une fourche optique. La force centrifuge est mesurée par un accéléromètre.

**Moteur.** Pour faire tourner le moteur, il est nécessaire d'utiliser une alimentation continue externe, non incluse dans le dispositif. Cette alimentation doit délivrer une tension de 12V, et doit pouvoir fournir une intensité de 5A. Le moteur est susceptible de ne pas fonctionner correctement si une alimentation moins puissante est utilisée. Par exemple, une alimentation ISO-TECH ENSP 4286 convient. Eteindre l'alimentation externe avant d'effectuer les branchements. Il faut ensuite brancher les sorties de l'alimentation externe sur les bornes rouge (positif) et noire (masse) du boîtier où se trouve le potentiomètre .

D'après les conseils de sécurité, le potentiomètre est initialement réglé au minimum. Il faut ensuite tourner progressivement le potentiomètre, pour augmenter la vitesse de rotation du plateau. Il est normal que la vitesse du plateau soit presque nulle sur une plage de valeurs du potentiomètre, puis qu'elle augmente rapidement.

**Alimentation de la fourche optique et de l'accéléromètre** La fourche optique et l'accéléromètre sont alimentés grâce à la prise à relier au secteur. Il faut ensuite que l'interrupteur situé sur la boîte près de l'axe de rotation soit sur la position 1.

**Fourche optique** La vitesse de rotation est obtenue à partir du signal de sortie de la fourche optique. Ce signal est obtenu à partir des sorties rouge et noire du boîtier noir situé près de l'axe de rotation. Il y a 2 vis sur le plateau tournant dont le passage à travers la fourche optique donne une impulsion de sortie. Pour mesurer la vitesse de rotation, il est conseillé d'utiliser un oscilloscope numérique et de mesurer soit avec des curseurs soit automatiquement le temps entre plusieurs impulsions. Il est conseillé de mesurer le temps qui correspond à un nombre entier de périodes de rotations parce que les temps entre deux impulsions successives (correspondant à des demi-rotations) ne sont pas tout à fait identiques à cause des imperfections du dispositif.

**Rail** La position de l'accéléromètre sur le plateau tournant peut être réglée à l'aide d'un rail de translation. La distance  $r$  entre le centre de l'accéléromètre et l'axe de rotation du plateau tournant est donnée par :  $r = l_0 - l$  où  $l_0 = 85 \pm 1$  mm et où  $l$  est la position de la partie externe du chariot sur le rail. La valeur de  $l$  est la valeur en mm inscrite sur le rail de translation, en considérant la position de la face du chariot la plus éloignée de l'axe de rotation.

Il faut toujours visser correctement la vis Thorlabs du chariot avant de mettre en marche le moteur.

**Accéléromètre** L'accéléromètre se trouve dans la boîte grise. Un de ses axes est dirigé dans la direction radiale notée  $y$ , un autre dans la direction verticale notée  $z$ . Le troisième axe n'est pas utilisé.

Les sorties des signaux de l'accéléromètre sont situées sur la boîte noire située près de l'axe de rotation, sur la face opposée à celle où se trouve la sortie de la fourche optique. La tension  $V_y$ , liée à l'accélération dans la direction radiale, est la tension entre l'embout bleu et la masse (embout noir). La tension  $V_z$ , liée à l'accélération dans la direction verticale, est la tension entre l'embout jaune et la masse. Ces tensions sont typiquement de l'ordre de 2V.

Le protocole expérimental consiste à mesurer les tensions  $V_y(0\text{Hz})$  et  $V_z(0\text{Hz})$  en l'absence de rotation (0 Hz). Ces mesures peuvent se faire à l'aide d'un voltmètre (par exemple les multimètres Agilent 34450A conviennent). Ensuite, il faut fixer une vitesse de rotation, et mesurer la tension  $V_y$  en régime permanent.

La tension mesurée par les capteurs varie proportionnellement à l'accélération (tant que la tension à leur bornes est inférieure à la tension d'alimentation de l'accéléromètre). Le coefficient de proportionnalité dépend de la tension d'alimentation de l'accéléromètre. En l'absence de rotation, la différence entre les tensions  $V_y(0\text{Hz})$  et  $V_z(0\text{Hz})$  correspond à l'accélération  $g$ . L'accélération selon  $y$   $a_y$  vaut donc :

$$a_y = \frac{V_y - V_y(0\text{Hz})}{V_z(0\text{Hz}) - V_y(0\text{Hz})} g.$$

Les variations de  $V_z$  avec la rotation sont dues aux imperfections du plateau tournant.

## IV) Jauge de contrainte

### 1) Principe

Une jauge de contrainte est constituée d'un fil métallique ou semiconducteur très fin dont **la résistance varie avec l'élongation**. Collée directement sur une structure, elle en subit les déformations ; en ce sens, il s'agit plutôt d'une jauge de déformation.

La variation relative de sa résistance est donnée par :

$$\frac{\Delta R}{R_0} = K \frac{\Delta l}{l_0},$$

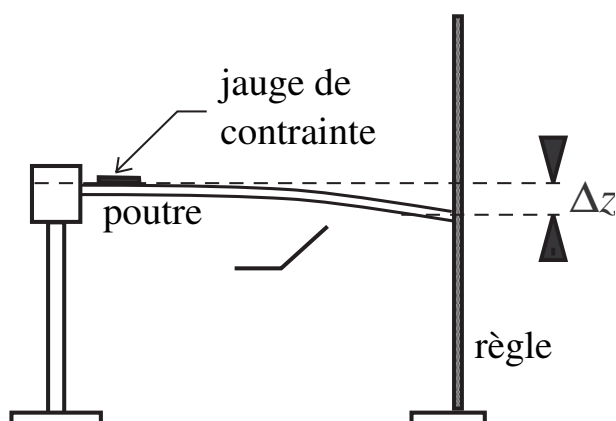
où  $K$  est le facteur de jauge et  $\Delta l/l_0$  est l'allongement relatif de la jauge.

La connaissance des propriétés élastiques de la structure permet de remonter aux contraintes appliquées. Une telle jauge est collée sur une poutre métallique encastrée à une extrémité.

Les lois de la résistance des matériaux montrent que l'allongement relatif de la jauge est relié au déplacement  $\Delta z$  de l'extrémité libre de la poutre par la relation (donnée dans la notice) :

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{3e}{2L^2} \Delta z,$$

où  $L$  et  $e$  sont respectivement la longueur et l'épaisseur de la poutre ( $e = 0,6$  mm).



### 2) Expérience

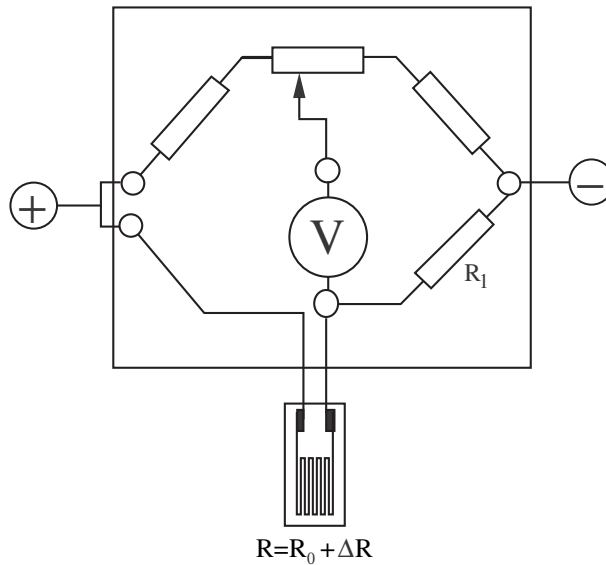
#### Références

- Duffait, p. 103
- Ichinose et Kobayashi, pp. 59-60
- Notices 13 et 542

#### Mesures

- Mesurer la résistance à vide  $R_0$  de la jauge à l'aide d'un ohmmètre numérique affichant au moins 4 digits.
- Fléchir la poutre ; noter l'ordre de grandeur et le signe des variations  $\Delta R$ .





**Montage en 1/4 de pont** Afin de ne mesurer que les variations significatives de  $R$ , la jauge sera incluse dans un pont de résistances (cf. figure ci-dessous).

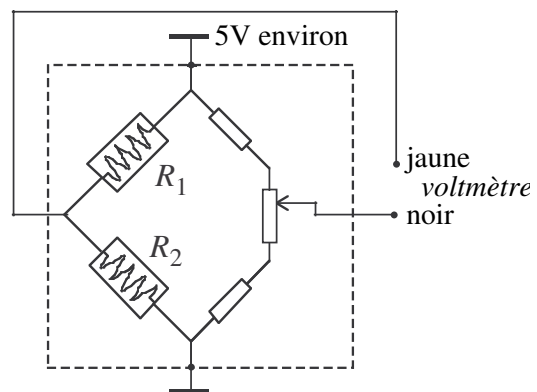
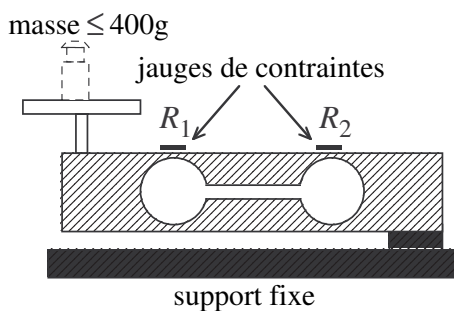
- Mesurer la résistance  $R_1$  (veiller bien à *ne* mesurer *que*  $R_1$ ).
- Alimenter le pont sous une tension continue  $E_0 \approx 20$  V.
- Équilibrer le pont à vide à l'aide du potentiomètre.
- Charger la poutre avec une masse (déviation maximale  $\Delta z \approx 3$  cm) et observer le signal  $\Delta E$  sur un voltmètre numérique.

Ce signal  $\Delta E$  est relié au déséquilibre du pont par la relation facile à retrouver :

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{R_1 \Delta R}{(R_0 + R_1)^2} \cdot$$

Étudier les variations de  $\Delta E$  en fonction de  $\Delta z$ . En déduire le facteur de jauge  $K$ . A cause de déformations irréversibles, sa valeur peut varier notablement par rapport à celle fournie par le constructeur :  $K = 2,070 \pm 0,5\%$  à  $T=24^\circ\text{C}$ .

### 3) Application à une balance électronique



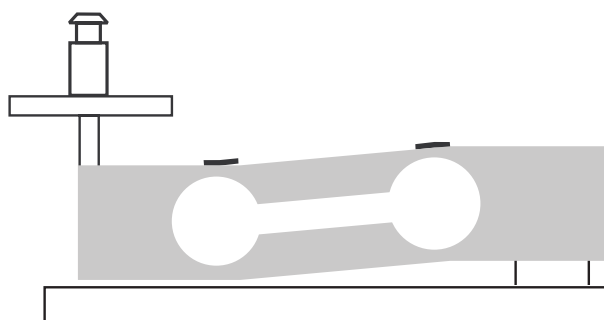
Il s'agit d'illustrer une application des jauges de contrainte au moyen de la partie mécanique d'une balance électronique (Notice n°13).

Les deux jauges de contrainte sont collées sur le bâti et mesurent ses déformations : si l'une des jauges s'allonge, sa résistance augmente (attention : dans la formule  $R = \rho L/s$  les trois paramètres  $\rho$ ,  $L$  et  $s$  varient, tous agissant dans le même sens sur la résistance).

Les variations de  $R_1$  et  $R_2$  sont mesurées au moyen d'un pont de Wheatstone, qui inclut deux autres résistances placées à l'intérieur du boîtier.

- Régler le zéro du pont lorsqu'aucune masse n'est posée sur la balance.
- Placer des masses, sans dépasser la valeur limite de 400 g, et vérifier la linéarité du signal électrique correspondant. Remarquer la faiblesse du signal (quelques mV), ce qui donne une idée de la performance de l'électronique incluse à l'origine dans cette balance, permettant de mesurer 400 g à 0.1 g près.

En interprétant le signe de la tension mesurée, identifier la jauge qui s'allonge :  $R_1$  ou  $R_2$  ? Vérifier que le schéma ci-dessous traduit bien la réalité.



On peut comprendre ce schéma de la façon suivante : dans une pièce mécanique soumise à une contrainte, c'est la partie la moins rigide qui se déforme le plus (ainsi, lorsqu'on tire deux ressorts en série, le plus souple s'allonge davantage). Ici, les 4 points faibles se comportent comme des articulations, avec rappel élastique, n'autorisant que le déplacement représenté sur la figure.