

# MP04 - Capteur de grandeurs mécaniques

Clément (de la Salle et Colléaux)

15 avril 2020

Niveau : L3

## Bibliographie

↗ Duffait <i>Elec</i>	La seule biblio pratique...
↗ Asch	Théorie des capteurs
↗ BUP 920	Explications sur l'accéléromètre à peigne

## Prérequis

➤

## Expériences

👤

## Table des matières

Table des matières	1
<b>1 Capteurs de position</b>	<b>2</b>
1.1 Capteur potentiométrique . . . . .	2
1.2 Capteur capacitif : mesure d'un niveau d'eau . . . . .	3
<b>2 Capteurs d'accélération</b>	<b>5</b>
2.1 Étalonnage statique . . . . .	5
2.2 Étalonnage dynamique : étendue de mesure . . . . .	6
<b>3 Capteur de force</b>	<b>6</b>
3.1 Jauge de contrainte . . . . .	7

# Introduction

✦ *Duffait*

Les capteurs sont essentiels dans le monde de la physique, sinon on ne pourrait pas faire un montage de 30 minutes essentiellement là-dessus. En gros un capteur c'est un composant qui va traduire une grandeur (température, angle, vitesse...) en une tension électrique (analogique dans les cas étudiés ici mais qui peut très bien être directement numérique). On peut également séparer les capteurs en deux groupes :

- Les capteurs actifs qui doivent être alimentés
- Les capteurs passifs sur lesquels il faut souffler trois fois en se pinçant le nez

Le but du montage va être de présenter la plus grande variété possible de capteurs en s'intéressant à leur caractérisation :

**Sensibilité** Si on cherche à mesurer  $x$  et que le capteur renvoie  $u$ , normalement il doit exister une zone pour laquelle la réponse est linéaire. Dans cette zone on définit la sensibilité comme :

$$s = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\Delta u}{\Delta x}$$

On cherche évidemment à ce qu'elle soit le plus élevé possible.

**Étendue de mesure** C'est lié à la zone de linéarité... Il faut qu'elle soit élevée. On comprend qu'on ait besoin de deux outils différents pour mesurer une même grandeur mais dans deux domaines éloignés (genre peser une voiture avec une balance de chimie).

**Fidélité** Capacité à renvoyer une même tension pour une même grandeur d'entrée (en gros diminution des erreurs accidentelles)

**Justesse** Capacité à être proche de la vraie valeur (diminution des erreurs systématiques).

**Précision** Le résultat donné doit être le plus proche de la vraie valeur. Il faut diminuer les erreurs systématiques et accidentelles (fidélité + justesse)

**Rapidité** Bon bah tmtc

On va essayer d'illustrer différents types de mesures en méca (position, accélération et force) tout en mettant en avant le plus de propriétés (citées précédemment)

## 1 Capteurs de position

But

Calibrer un capteur de position et donner sa sensibilité (choisir l'un des deux seulement)

### 1.1 Capteur potentiométrique

✦ *MP01*

✦ *MP25*

Le capteur potentiométrique est le capteur qui permet de renvoyer, pour le pendule, une tension en sortie fonction de l'angle du pendule  $\theta$ . Pour faciliter l'interprétation de cette tension, on souhaite qu'elle soit linéaire en l'angle, ie on veut que le potentiomètre soit un capteur linéaire. Le petit nom complet du potentiomètre est potentiomètre résistif de déplacement angulaire

Principe du potentiomètre résistif

Comme son nom l'indique, il s'agit d'une résistance fixe  $R_n$  sur laquelle peut se déplacer un contact électrique à l'aide d'un curseur. La position de ce curseur dépend linéairement de la valeur de l'angle.

La résistance est lue entre une extrémité fixe et le contact électrique mobile. La résistance lue  $R$  dépend donc directement de l'angle, et selon la formule :

$$R = \frac{\theta}{\theta_m} R_m$$

, avec  $\theta_m$  l'angle maximal ( $\simeq P^\circ$ ). Par construction, la résistance est donc directement linéaire en l'angle. Comme vous le voyez, on ne lit pas une résistance mais une tension. Cette tension est obtenue par un pont diviseur de tension et est toujours proportionnelle à l'angle.

### EN FAIT NON

Nan sérieux comment on relie la tension de sortie à la résistance variable? Y a seulement 3 AO et 10 résistances entre les deux sur le schéma électrique de la notice. cf la notice (c'est un lien). **Demander à Hervé.**

#### Expérience : Vérification de la linéarité du potentiomètre

☞ ?

☹ ?

- Commencer par régler le 0 du potentiomètre du pendule P79.14 et attendre genre 10 minutes que ça chauffe
- En préparation prendre des couples  $(\theta, U)$  tous les  $10^\circ$  en prenant soin de mesurer à  $\pm\theta$  pour limiter l'erreur systématique (on reste conscient que c'est imprécis/20)
- Faire 1 ou deux points devant le jury stupéfait devant tant de maîtrise expérimentale
- Tracer  $U(\theta)$  et vérifier avec une modélisation affine que c'est bien linéaire
- Conclure avec la sensibilité  $s$  à comparer à  $s_{constructeur} \simeq 57,4\text{mV}/^\circ$  et la linéarité vérifiée jusqu'à environ  $120^\circ$

Maintenant que c'est bien étalonné on peut remonter à  $J_0$

#### Expérience : Mesure du moment d'inertie du pendule

☞ MP01

☹ ?

☞ *MP01*

## 1.2 Capteur capacitif : mesure d'un niveau d'eau

☞ *Asch p.365 : capteurs capacitifs*

Utiliser l'éprouvette P68.14/2 recouverte de papier alu... Elle agit comme deux condensateurs en parallèle (un dans l'eau et un dans l'air)

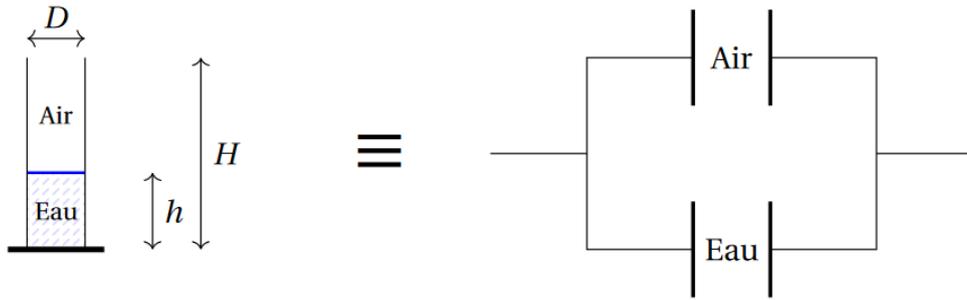


FIGURE 1.1 – Modélisation de l'éprouvette par deux condensateurs en parallèle

Sa capacité est alors

$$C = C_{eau} + C_{air} \propto \epsilon_r^{eau} h + \epsilon_r^{air} (H - h)$$

L'idée est donc de mesurer la capacité pour remonter à  $h$ .

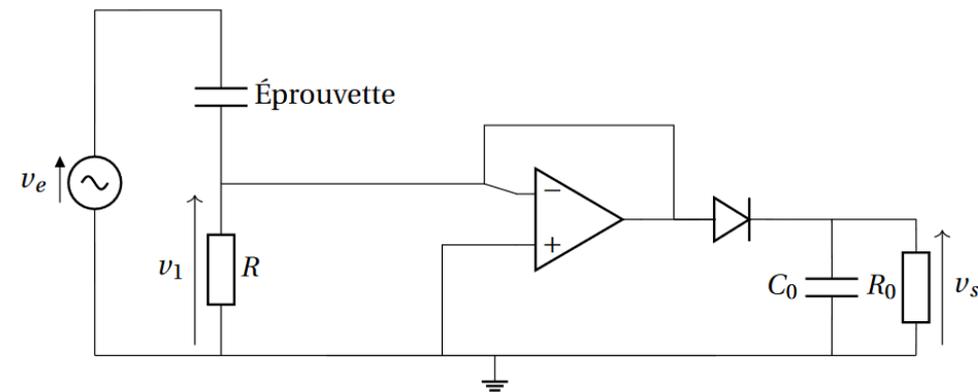


FIGURE 1.2 – Schéma du circuit permettant la mesure de  $C$

Alors on a

$$v_1 = \frac{jRC\omega}{1 + jRC\omega} v_e \underset{RC\omega \ll 1}{\sim} jRC\omega v_e$$

Pour  $RC\omega \ll 1$  on a alors un simple dérivateur qui nous donne une amplitude proportionnelle à  $C$ .

On voit apparaître ensuite un suiveur ainsi qu'un détecteur de crête afin de ne garder que l'amplitude des oscillations.

### Expérience : Étalonnage du capteur capacitif

Asch!?

⊖ 10 min

**Principe** Bon bah c'est juste un étalonnage hein... On accède à  $h$  en lisant directement sur l'éprouvette le volume d'eau que l'on convertit en hauteur. On mesure la tension de sortie pour différentes valeurs de  $h$  et on se fait une belle petite droite.

#### Choix

- Il y a un compromis pour  $RC\omega$ ... On doit rester dans la limite  $RC\omega \ll 1$  mais la sensibilité est directement proportionnelle à  $RC\omega$  donc faut pas prendre trop faible. Mesurer  $C$  au RLC-mètre pour une éprouvette pleine afin d'avoir un ordre de grandeur, ceci permet normalement de choisir  $R = 200 \text{ k}\Omega$  et  $f = 1 \text{ Hz}$
- Pour le détecteur de crête, toujours le même délire : un temps  $R_0 C_0$  pas trop grand mais pas trop court. Ici pour ce qui nous intéresse, prendre un truc comme  $R_0 = 1 \text{ k}\Omega$  et  $C_0 = 1 \mu\text{F}$

## Amusons-nous

On peut s'amuser à foutre un comparateur qui allume une LED P29.25 lorsque le niveau dépasse une valeur critique... Au delà de l'amusement c'est intéressant car ça permet de faire le chemin inverse : une fois étalonné, on peut choisir une valeur de tension de référence et vérifier que la hauteur critique correspond bien à ce qui était attendu !

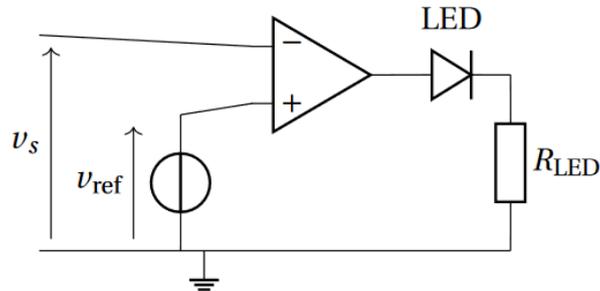


FIGURE 1.3 – À insérer à la fin, prendre  $R_{LED} \sim 1\text{ k}\Omega$

## 2 Capteurs d'accélération

### But

Encore une fois, on va calibrer le capteur... Mais cette fois-ci, il s'agit d'un modèle que l'on ne fabrique pas nous même. On pourra aller plus loin en proposant une étude dynamique.

### 2.1 Étalonnage statique

🚩 *Asch p.517*

🚩 *BUP 920*

L'accéléromètre P96.67 est un accéléromètre à peigne capacitif 3 axes (voir 🚩 *BUP 920* pour les explications). Attention on alimente l'accéléromètre avec 5V et faut vérifier de temps en temps au voltmètre que cette tension ne varie pas !

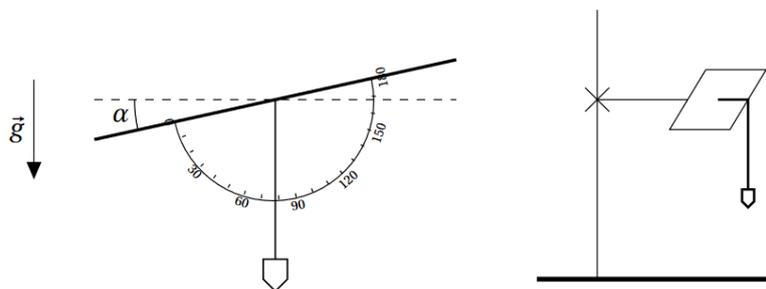


FIGURE 2.1 – Réaction de CANNIZARO

### Expérience : Calibrage de l'accéléromètre

🔧 No need

⌚ 5 min

Faire la régression de  $u$  en fonction de  $\cos \alpha$  en prenant comme d'hab' les valeurs en  $\pm \alpha$  pour s'affranchir d'une erreur systématique. On pourra comparer la sensibilité à la valeur donnée dans la notice (clicable) ( $330 \text{ mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ ).

#### Incertitudes

Pour la tension délivrée, se référer à la notice (clicable). Pour les angles, l'évaluer soit-même.

## 2.2 Étalonnage dynamique : étendue de mesure

### But

Tracer le diagramme de BODE du précédent accéléromètre et déterminer une fréquence de coupure.

Pour ça, il suffit de le placer sur un pot vibrant et de mesurer l'amplitude des oscillations pour différentes fréquences... On est censé voir une bande passante : pour des fréquences trop élevées, l'accéléromètre ne suit plus.

On a alors un problème : On ne peut pas juste faire confiance au pot vibrant car lui aussi possède une bande passante (on espère juste qu'elle est plus grande que celle de l'accéléromètre!)... Voici plusieurs solutions :

- Selon le fascicule : Faire plutôt le capteur inductif en première partie afin de le caractériser dynamiquement de la même manière. Pour l'étude de l'accéléromètre, on mesure en même temps la position et ainsi on peut espérer s'affranchir de la bande passante du pot vibrant. Pour moi ça fonctionne pas car dans tous les cas, l'étude dynamique du premier capteur se fait aussi avec le pot vibrant.
- Utiliser un meilleur accéléromètre dont on connaît la bande passante... Et là c'est le même problème que la construction d'une sonde à effet HALL avec une sonde à effet HALL.

Les deux méthodes présentent leurs désavantages mais pour rien au monde je ne lâcherai le détecteur de niveau d'eau ! On utilise donc l'accéléromètre P96.61 (clicable) dont la fréquence de coupure se situe vers 10 kHz.

### Expérience : Étude de la bande passante de l'accéléromètre

🔧 ??

⌚ 5 min

Pour différentes fréquences du pot, prendre l'amplitude (voltmètre) de l'accéléromètre d'étude et la tracer dans un diagramme de BODE (derniers points en live comme d'hab'). Vérifier au passage grâce au deuxième accéléromètre que la décroissance n'est pas due au pot vibrant mais bien à l'accéléromètre (le premier, celui qui est pas ouf).

## 3 Capteur de force

### 3.1 Jauge de contrainte

#### But

Ici c'est encore la détermination de la sensibilité qui est importante... On pourra pas faire grand chose d'autre d'ailleurs.

↪ *Duffait p.103*

↪ *Asch p.410*

La résistance d'un matériau est liée à sa géométrie (ici cylindrique)

$$R = \rho \frac{l}{\pi r^2}$$
$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - 2 \frac{dr}{r}$$

Or la variation de la résistivité d'un piézo est telle que

$$\frac{d\rho}{\rho} = C_i \frac{dV}{V} \quad \text{avec } C_i \sim 1$$

Et en notant  $\epsilon$  la déformation et  $\nu$  le coefficient de POISSON

$$\frac{dl}{l} = \epsilon \quad \frac{dr}{r} = -\nu\epsilon$$

Alors finalement on a

$$\frac{dR}{R} = K \frac{dl}{l} \quad \text{avec } K = (1 + C_i) + 2(1 - C_i)\nu$$

$$R = R_0(1 + K\epsilon)$$

#### Définition : Facteur de Jauge

C'est le petit nom de  $K$ . Il vaut typiquement 2, mais sa valeur exacte est donnée par le constructeur.

Bon maintenant je vais arrêter de recopier le ↪ *Duffait* parce que je me rend compte que c'est plutôt con. Signalons juste que la sensibilité d'un tel capteur est très faible (quelques  $0.1 \Omega^{-1}$ ). Donc inutile d'espérer faire des mesures à l'ohmmètre... D'où le montage du pont de WHEASTONE.

On suppose que l'on place ces capteurs de part et d'autre d'une poutre de sorte que leur allongement soient opposés  $\pm\epsilon$ . Ensuite on les place dans un pont de WHEASTONE et alors la tension délivrée est proportionnelle à l'allongement !

$$V_p = \frac{KV_a}{2} \epsilon$$

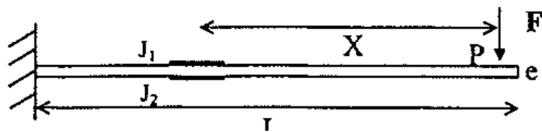


FIGURE 3.1 – Flexion d’une poutre et position des capteurs  $J_1$  et  $J_2$

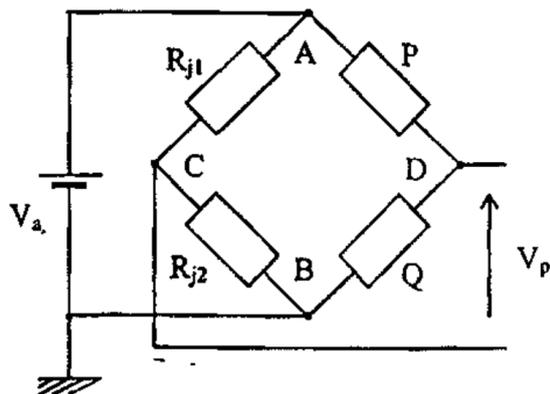


FIGURE 3.2 – Schéma du circuit électrique

### Expérience : Étalonnage de la jauge de contrainte

➤ Duffait p.103

⊖ 10 min

- Mesurer à vide  $R_0$  à l’ohmmètre
- Placer différentes masses au bout de la poutre, on a alors

$$\epsilon = \frac{6L}{Ee^2} mg$$

Et récupérer la valeur de  $V_p$  pour chacune ( $E$  le module d’YOUNG,  $L$  et  $e$  respectivement la longueur et l’épaisseur)

- Remonter à  $K$  par régression linéaire (pente  $\alpha$ )

$$K = \frac{\alpha E l e^2}{3 L g V_a}$$

On s’attend à  $K_{tab} = 2.135$  (à chercher !)

On remonte alors à la sensibilité en  $\Omega^{-1}$ ... Il peut être intéressant de signaler une limite importante : le matériau peut se déformer avec la température.

## Conclusion

On remarquera la diversité des expériences dans ce montage :

Capteur	Mesure quoi ?	Actif / passif	Construit nous-même
Capteur capacitif	Position	Actif (AO)	Oui
Accéléromètre	Densité de porteurs de charges	Actif	Non
Jauge de contrainte	Constante de BOLTZMANN	Passif	Oui