

## Capteurs de grandeurs mécaniques

**Bibliographie**

- [1] Technique de l'ingénieur. *Capteurs : R400; Accéléromètre : R1812; Jauge de contrainte R1860.*
- [2] Roger Duffait. *Expérience d'électronique p103.*
- [3] BUP 920 et 937.
- [4] BUP 607 649 et 954.
- [5] Quaranta. *Electricite IV p 574.*
- [6] Rocard. *Vibration.*

**Plan du montage**

<b>1</b>	<b>La jauge de déformation [2] [1]</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Etude d'un cristal piézoélectrique [4]</b>	<b>3</b>
2.1	Effet direct : capteurs [2] . . . . .	3
2.2	Effet inverse : actionneur [5] . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Etude d'un accéléromètre [3] [1]</b>	<b>6</b>
3.1	Modélisation et type d'accéléromètre . . . . .	6
3.2	Etalonnage statique . . . . .	7
3.3	Etude dynamique . . . . .	8
3.4	Utilisation de l'accéléromètre . . . . .	8

**Introduction**

**Capteur :** Un capteur est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable, telle qu'une tension électrique, une hauteur de mercure, une intensité ou la déviation d'une aiguille. Attention à la confusion entre capteur et transducteur : le capteur est au minimum constitué d'un transducteur.

La mesure des grandeurs mécaniques est un enjeu important pour s'assurer de la qualité d'un process et donc d'un produit. Parmi elles, la position, la vitesse, l'accélération, la force, le couple ou encore la puissance nécessitent d'être connues très précisément.

Dans ce montage nous allons étudier différents capteurs de grandeurs mécaniques utilisés actuellement : la jauge de déformation, le cristal piézoélectrique et l'accélérateur. Nous tenterons de les caractériser au mieux et de montrer leur utilisation et leur fonctionnement.

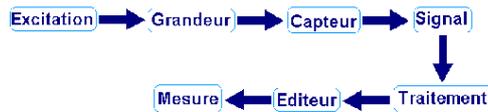
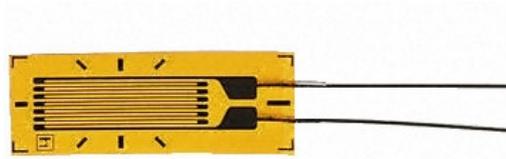


FIGURE 1 – Chaîne de mesure présentant la place du capteur

## 1 La jauge de déformation [2] [1]

Un des techniques de mesure des déformations est l'extensiométrie. Elle permet à partir de capteur appelé jauge de déformation de déterminer l'allongement relatif en surface d'une structure. Ces capteurs fonctionnent en mesurant la déformation en surface afin de connaître le niveau de contrainte. Les extensomètres à fils résistants, que l'on désigne aussi sous le nom de jauges de contraintes (cette expression n'est pas tout à fait correcte, mais usuelle), furent inventés pour mesurer les déformations des structures en vue d'en évaluer l'état de contraintes. Il s'agit de petits circuits électriques très fins (1) qui, collés sur les pièces à étudier, en subissent les déformations, ce qui entraîne une variation de leur résistance électrique. Les mesures électriques peuvent être très précises et très sensibles puisque l'on atteint facilement des déformations de l'ordre du micromètre par mètre. Ils utilisent le principe de piézorésistivité.

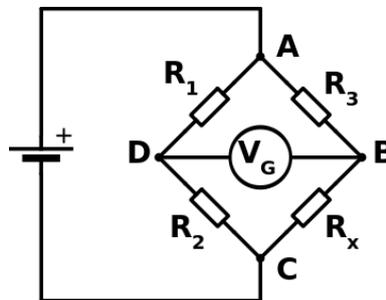
$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$



Etudions donc le principe de fonctionnement de ces jauges de déformation et la méthode de mesure avec les jauges de déformation.

Pour mesurer la variation de résistance de la jauge de déformation lorsqu'elle est soumise à une déformation il faut utiliser un pont de Wheastone car la tension de sortie est proportionnelle à  $\Delta R$ .

$$V_s = \frac{V_e}{4} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2)$$



### Expérience :

#### Lame de scie avec jauge de contrainte

On soumet l'extrémité de la lame de scie à différentes masses et on utilise le pont de Wheatstone tout monté qui nous donne la valeur de la flèche directement. On mesure la tension en sortie du passe bas qui suit le pont.

On trace la tension mesurée en fonction de la masse et la tension en fonction de la flèche

Interprétation : On montre la linéarité du capteur (avec  $V=f(\text{masse})$ ) et on calcule le facteur de jauge grâce à la courbe  $V=f(x)$  avec  $x = \frac{3.G.u.e.l.h.fleche}{4.L^3}$  (voir notice, lié au cricuit du boitié). En modélisant par une fonction linéaire on obtient une constante de jauge de  $k = 2.01 \pm 0.02$ . A comparer avec la notice  $k = 2.135$ .

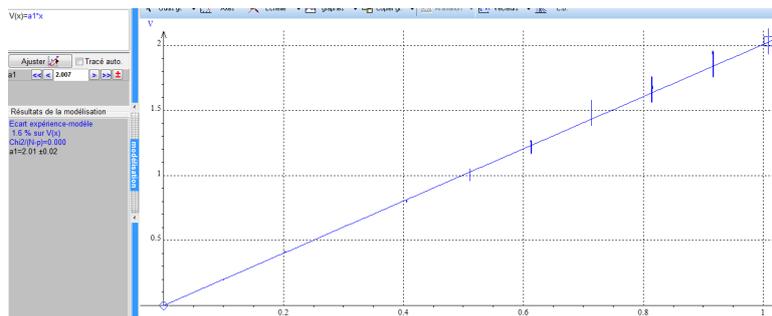


FIGURE 2 – Résultat donnant sensibilité de la jauge

On sait que le métal se déforme plus ou moins avec la température donc on se doute que la température va jouer un rôle important pour ce capteur.

Transition : Cette dépendance en la température peut être gênante, nous allons donc maintenant étudier un autre capteur qui permet aussi de mesurer la pression : le cristal piézoélectrique.

## 2 Etude d'un cristal piézoélectrique [4]

C'est un capteur qui utilise l'effet piézoélectrique. La piézoélectricité (du grec "piézein" presser, appuyer) est la propriété de certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une force : des charges apparaissent sur les faces du cristal, et réciproquement de se déformer lorsqu'on applique un champ électrique. Le premier est appelé effet piézoélectrique direct et le second effet piézoélectrique inverse.

Pour qu'un composé, matériau possède des propriétés piézoélectriques il ne doit pas posséder de symétrie dans sa structure cristallographique. Il existe différents matériaux piézo :

- cristaux naturels : quartz (horloge), topaze
- oxydes ferroélectriques
- céramiques
- polymères...

Celui étudié est une céramique, composé de plusieurs couches (appelé stacks)

### 2.1 Effet direct : capteurs [2]

L'effet direct est utilisé pour faire des capteurs, c'est exactement le cadre du montage. Grâce à la capacité des piézoélectriques de créer une tension dès qu'une force leur est appliquée, ils sont utilisés pour une grande variété de capteurs.

### Expérience :

#### Etude de l'effet direct

Pour étudier cet effet et montrer le coté capteur on va déposer des masses sur le cristal et acquérir la tension qui en résulte à ses bornes.

Observation : Que voit-on ?

On voit un pic lors du dépôt de la masse puis une relaxation.

Analyse

- L'analyse de ces observations va nous permettre de caractériser le capteur on peut tracer la courbe de la valeur du pic en fonction de la masse déposée et vérifier la linéarité du capteur. On peut aussi obtenir la sensibilité  $s$  du capteur avec la pente

$$s = 2,2 \pm \dots kg/V$$

On peut convertir ce facteur de proportionnalité en déformation  $d$  en fonction de la tension, en  $m/V$ . Pour cela on modélise la force appliquée :

$$F = mg = \frac{E.S.d}{L} \quad (3)$$

avec  $E = 4,4.10^{10} N/m^2$  le module d'Young,  $L = 1,81 \text{ cm}$ ,  $S = 0,61*0,61 \text{ cm}^2$ . On a  $d = \alpha U_0$  Le calcul nous  $\alpha = \frac{s.L.g}{E.S} = 1,1.10^{-7} * s = 0,24 \pm \dots \mu m/V$  qui est la sensibilité du capteur.

A comparer avec la valeur donnée dans la datasheet,  $\alpha = 0,15 \mu m/V$ .

Cette expérience nous donne juste l'ordre de grandeur mais pas la bonne valeur.

- On peut aussi analyser la partie relaxation la courbe en modélisant par  $U_0 \exp -\frac{t}{\tau}$ . On voit ainsi que ce temps caractéristique du capteur  $\tau$  est invariant de la masse appliquée. On voit que le fait que de retirer la masse donne un signal strictement symétrique. On obtient en prenant la moyenne  $\tau = 1,90 \pm 0,15$

Interprétation : Pour interpréter ces résultats notamment le dernier, on peut faire une analogie entre le cristal piézoélectrique et la charge/décharge d'un circuit RC. Le fait de poser (ou d'enlever) une masse correspondrait à charger brutalement le condensateur (pic en tension) puis la relaxation correspondrait à sa décharge (le piézo revient à l'équilibre). Cette décharge viendrait du fait que le matériau piézo n'est pas idéal et il existerait une résistance de fuite  $R$ . On assimile le temps caractéristique à  $\tau = \frac{1}{RC}$ .

On a vu que ce temps était à peu près constant quelque soit la masse. Ce qui correspond bien au fait le produit RC est indépendant de la charge électrique avec un condensateur.

De cette valeur du temps caractéristique peut nous donner accès à la valeur de  $R$  connaissant la valeur de  $C = 1600 \pm 320 nF$  Donc une résistance de

$$R = \frac{\tau}{C} = 1.2 \pm 0.3 M\Omega$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau}\right)^2}$$

Les principales sources d'incertitudes sont la pose de la masse (sans vitesse initiale) et la présence de bruit dans le signal, il y aurait une source qui déformerait rapidement et légèrement le cristal.

Application :

- Accéléromètres
- Capteurs de vibration
- Capteurs de vibrations sonores
- Capteurs d'impact

Transition : On peut maintenant étudier l'effet inverse, qui montre le principe d'un actionneur.

## 2.2 Effet inverse : actionneur [5]

Ici nous allons étudier l'effet inverse, c'est à dire la déformation consécutive à l'application d'une tension électrique.

Les déformations des matériaux piézoélectriques sont très faible (de l'ordre du  $\mu m$ ). L'observation à l'oeil nu n'est pas envisageable, nous allons donc utiliser un interféromètre de Michelson pour mesurer les déformations. On remplace le miroir déplaçable par un miroir attaché au cristal piézoélectrique (fixé avec du double face). On relie le cristal à un générateur de tension continu. Cette tension continue va déformer le cristal piézo.

### Expérience :

#### Observation de l'effet inverse

On règle le Michelson (avec la plaque optique c'est plus facile), on se place en lame d'air. Lorsqu'on modifie la tension des cercles d'interférence vont disparaître sur l'écran. On place une photodiode au centre de l'écran et on le relie à la carte d'acquisition.

Pour modifier la tension on applique une rampe avec le GBF que l'on amplifie pour parcourir une plage plus importante.

Observation : On observe une oscillation du signal qui correspond à une alternance des cercles brillant et sombre au centre.

Interprétation : A partir des résultats précédents on remonter à la différence de marche et donc au déplacement du miroir.

Nous savons que pour un déplacement  $d$  du miroir (du piézo), la différence de marche est  $\delta = 2d$ . L'ordre d'interférence est donnée par  $p = \frac{\delta}{\lambda}$ , on en déduit qu'entre 2 taches il y a une déformation de cristal de

$$d = p \frac{\lambda}{2}$$

On considère que le cristal est linéaire comme précédemment  $d = \alpha U$

On peut ainsi réaliser une régression linéaire de  $U = a.p + b$  avec  $a = 1,38 \pm 0,02V$

On a donc  $d = \alpha U = \alpha a \cdot \frac{2d}{\lambda}$ , donc

$$\alpha = \frac{\lambda}{2.a} = 520.10^{-9} / (2 * 1,38) = 0,19 \pm 0,03 \mu m / V$$

Incertitude :  $\Delta a = 0,02$  (modélisation sur Regressi) et donc  $\Delta \alpha = \alpha \cdot \frac{\Delta a}{a} = 0,03 \mu m / V$

On compare ce résultat avec l'expérience précédente et la valeur de la notice ( $1,5.10^{-7} m/V$ )  
Ave cette expérience on retrouve bien la valeur attendue, elle est donc plus précise.

Conclusion : Conclure sur la linéarité, la sensibilité du capteur

### Pas sur de le présenter

Tentons maintenant d'obtenir le temps de réponse du capteurs

### Expérience :

#### Temps de réponse

Pour cela on applique un créneau au piézo (attention pas de tension négative) et on regarde la réponse (sans photodiode pour commencer) et on espère pouvoir mesurer le temps de réponse. Pour cela il faut que lors de l'application du créneau, il y ait une oscillation autour d'un cercle, détectable par la photodiode.

On voit à l'œil nu que cela ne sera pas possible car les oscillations du piézo ne permettent pas de voir ceci (il n'y a pas d'oscillation sur les cercles, on reste centré sur le même cercle)

On ne peut pas utiliser le piézo de façon dynamique, de même pour la réponse en fréquence (on n'a pas le matériel adéquat)

Transition : L'étude et la caractérisation en dynamique n'est pas possible avec le capteur piézoélectrique, pour cela étudions maintenant un accéléromètre.

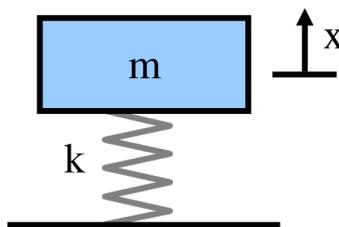
## 3 Etude d'un accéléromètre [3] [1]

Un accéléromètre est un capteur qui comme son nom l'indique, fixé à un mobile ou tout autre objet, permet de mesurer l'accélération linéaire de ce dernier.

### 3.1 Modélisation et type d'accéléromètre

Un accéléromètre peut être schématisé par un système masse-ressort. Si le support subit une accélération verticale, vers le haut, ce support va se déplacer vers le haut et le ressort à se comprimer d'autre part.

On applique le PFD  $ma_x + kx = 0$ , il apparaît clairement que cette accélération est proportionnelle à  $x$ . En mesurant simplement le déplacement de la masse  $m$  par rapport à son support, on peut connaître l'accélération subie par ce dernier.



Il existe différents types d'accéléromètres suivant la détection :

- détection piézoélectrique
- détection piézorésistive
- jauge de contrainte/extensométrie (proche du type piézorésistif, dans son principe)
- détection capacitive
- détection inductive (ou réluctance variable)
- détection optique

Celui que nous étudions ici est à détection capacitive. (voir 3.1). La masse mobile est en équilibre dans un cadre (modélisé avec des ressorts comme précédemment). Lors d'une accélération la masse bouge et se rapproche du cadre et la détection se fait grâce à 2 lamelles en regard dont le déplacement modifie la valeur de la capacité. La capacité étant inversement proportionnelle à la distance séparant

les 2 armatures on peut dire qu'elle dépend de l'accélération.  
L'accéléromètre étudié est un accéléromètre 3 axes.

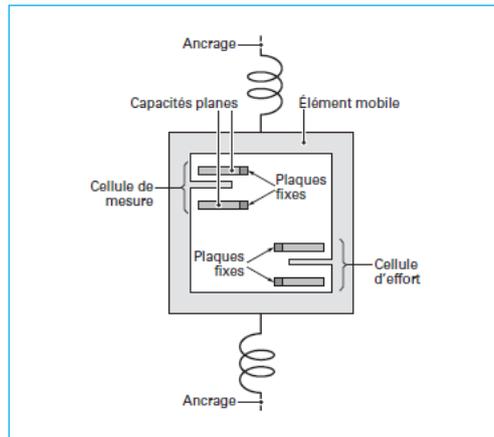


Figure 13 - Schéma de principe d'un accéléromètre à peignes capacitifs interdigités (Doc. Analog Devices)

Applications : Utilisé dans les téléphones portable, airbag des voitures, télécommande Wii

### 3.2 Etalonnage statique

Pour étudier ce capteur nous allons tout d'abord faire un calibrage statique et vérifier sa linéarité (et sensibilité)

#### Expérience :

#### Etalonnage statique

Plusieurs étapes à faire :

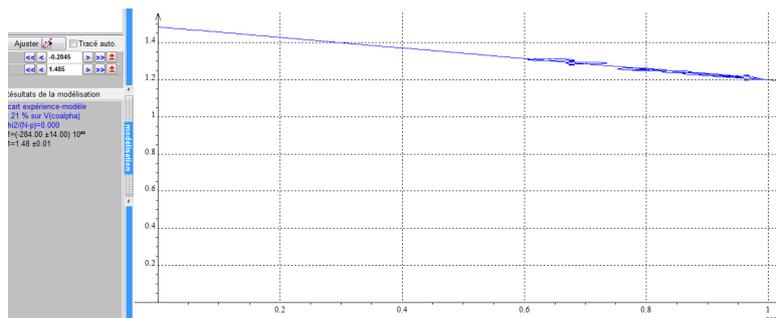
- Alimenter l'accéléromètre avec 5V
- Mesurer la tension que nous donne l'accéléro lorsqu'il est posé à plat
- Pour le calibrage statique, on va placer l'accéléromètre sur un support que l'on va incliner, on mesure l'angle  $\alpha$  que l'on donne. On mesure la tension donné sur Z, donc l'image de  $a_z$ .
- On trace  $V_z$  en fonction de  $\cos(\alpha)$ .

On voit directement que la relation est bien linéaire, on vérifie donc la linéarité du capteur et la sensibilité du capteur (valeur absolue de la pente (figure 3.2))

On obtient  $s = 284 \pm 14 mV$  par g. On compare avec la valeur attendue 300mV. On a la bonne valeur

On regarde la valeur d'ordonnée à l'origine qui doit être l'équivalent de g. On a  $1,49 \pm 0,01V$

On compare avec la notice qui donne l'équivalent de g une tension de 1,5.



Transition : Passons maintenant à une étude dynamique dans un repère tournant.

### 3.3 Etude dynamique

Pour faire une étude dynamique, on va faire mesurer au capteur l'accélération dans le repère tournant nous pouvons maîtriser la rotation et donc connaître la valeur de l'accélération (accélération d'entraînement).

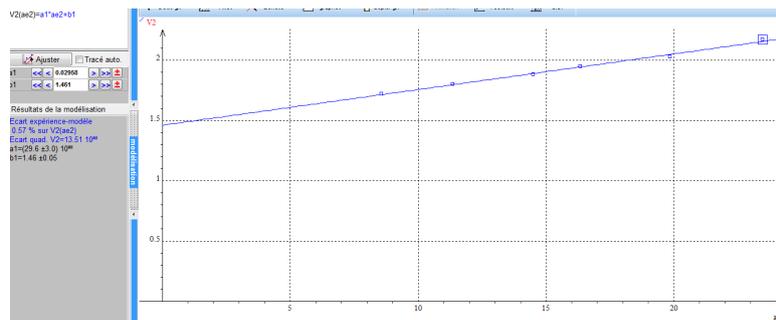
#### Expérience :

##### Etalonnage dynamique

Pour faire une mesure dans le repère tournant nous devons ruser : on utilise une caméra embarquée et on place le voltmètre, un appareil photo pour filmer l'affichage du voltmètre et l'alimentation (pile de 4,7 V) à l'intérieur du repère. On fera varier la vitesse de rotation du repère tournant, que l'on mesure grâce à la sortie correspondante sur le boîtier que l'on place sur un oscillo. On analysera ensuite la vidéo pour obtenir la valeur de la tension.

Résultats On trace la tension mesurée en fonction de l'accélération d'entraînement et on vérifie la linéarité et sensibilité comme précédemment (figure 3.3)

Avec ces résultats on peut aussi obtenir la valeur de g en regardant la valeur de l'accélération correspond à la valeur de la tension mesurée à plat sur z (soit 1,2 V ou 1,8 V suivant le sens). On obtient  $g = \dots \pm \dots$



Transision : Nous allons montrer comment ce capteur peut être utilisé pour mesurer d'autres grandeurs mécaniques, le module d'Young ici.

### 3.4 Utilisation de l'accéléromètre

[6]

Nous allons utiliser l'accéléromètre pour mesurer le module d'Young d'une poutre métallique. Pour cela on utilise le dispositif d'une poutre encastrée

#### Expérience :

##### Mesure du module d'Young d'une poutre

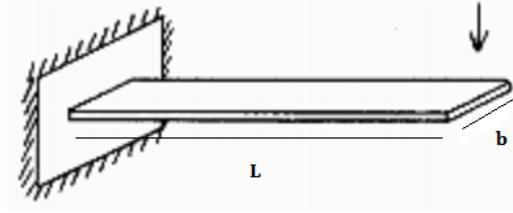
On place l'accéléromètre sur l'extrémité de la poutre. On excite la poutre à la main et l'accéléromètre sensible à l'accélération induit permet de remonter à la fréquence du mode excité (mode fondamental). On mesure la fréquence pour différentes longueurs de la poutre.

Résultats On trace la courbe de la  $f^2$  en fonction de la longueur  $\frac{3.515^2 \cdot E \cdot I}{(2 \cdot \pi)^2 \cdot S \cdot L^4}$  de pente E (voir [6] pour la formule) avec I le moment d'inertie,  $I = \frac{a^3 \cdot b}{12}$  et  $\rho$  la masse volumique,  $\rho = \frac{m}{a \cdot b \cdot L}$  avec  $a = 0,51 \pm 0,02$  cm,  $b = 10,79 \pm 0,01$  cm,  $L = 68,6 \pm 0,1$  cm

Finalement  $I = 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  et  $\rho = 2744,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Et

$$E = 30 \text{ GPa} \pm 2$$



À comparer avec la valeur tabulée, la poutre est un alliage composé principalement d'acier dont le module d'Young est  $E = 200 \text{ GPa}$ .

On est assez éloigné de la valeur tabulée cela doit être dû au fait que l'on ne connaît pas le matériau donc la valeur n'est pas exactement celle de la poutre étudiée. On peut aussi critiquer le modèle de la poutre encastree, l'encastrement n'est pas forcément bon, et on excite pas forcément que le fondamental mais aussi ces autres modes longitudinaux et transversaux.

## Conclusion

Ce montage a été l'occasion d'étudier les caractéristiques d'un certain nombre de capteurs de grandeurs mécaniques (ici force, accélération, déplacement) utilisés actuellement dans beaucoup de systèmes. On aurait aussi pu étudier des systèmes à détection magnétique notamment pour la mesure du module d'Young ou de vitesse.

Ces dispositifs sont aussi utilisés actuellement par exemple pour les détecteurs de proximité et en général pour les détections de partie mobile.