

# MP04 - CAPTEURS DE GRANDEURS MÉCANIQUES

4 février 2016

Nicolas Chaix & Pierre Adroguer

*Itineris, je ne te capte plus.*  
ARCHITECTE ÉGYPTIEN

## Commentaires du jury

Les candidats peuvent choisir d'étudier tous types (sic) de capteurs qui mesurent des grandeurs mécaniques : accéléromètres, jauges de contrainte, capteurs de position, de vitesse... Lors de l'étude d'un capteur, le candidat doit s'intéresser aux qualités de fidélité, de sensibilité et de justesse qui permettent d'utiliser ce capteur comme instrument de mesure. Par ailleurs, certaines grandeurs mécaniques varient dans le temps, et il n'est pas obligatoire de se limiter aux grandeurs stationnaires.

## Bibliographie

- *Dynamique générale des vibrations*, **Rocard** → Dynamique de la verge encastrée
- *Théorie de l'élasticité*, **Landau** → Vibration de la barre encastrée
- *Expériences d'électricité à l'agrégation*, **Duffait** → Jauge de contrainte et détection synchrone
- *Dossiers Techniques de l'Ingénieur, r400, r401 et r1861* → Doc sur les capteurs et jauge de contrainte

## Prérequis

## Expériences

- ☛ Mesure d'une vitesse de rotation
- ☛ Mesure d'une vitesse instantanée
- ☛ Mesure de module d'Young

## Table des matières

|          |   |          |
|----------|---|----------|
| <b>1</b> | <b>Mesure de vitesse de rotation</b>    | <b>2</b> |
| <b>2</b> | <b>Mesure d'une vitesse instantanée</b> | <b>3</b> |
| <b>3</b> | <b>Mesure d'un module d'Young</b>       | <b>4</b> |
| 3.1      | A la jauge de contrainte . . . . .      | 4        |
| 3.2      | A l'accéléromètre . . . . .             | 6        |

## Introduction

Un capteur est un instrument qui transforme une grandeur que l'on souhaite mesurer en une grandeur que l'on sait mesurer. Ainsi, un pèse personne transforme une force en un signal électrique que l'on sait traiter, ou un baromètre une pression en une élévation de liquide que l'on sait mesurer.

Lors d'une expérience, le physicien a à sa disposition plusieurs types de capteurs pour mesurer la grandeur d'intérêt, chacun ayant des propriétés différentes qui font qu'il sera plus ou moins adapté à chaque situation. Parmi ces propriétés, il est utile de mentionner :

- l'étendue de mesure : un double décimètre est moins utile qu'un grande règle pour mesurer ma taille
- la précision : le double décimètre est gradué plus régulièrement, sa réponse est donc plus proche de la valeur "réelle"
- la justesse : est-on loin de la valeur "réelle" ?
- la fidélité : à quel point trouve-t-on des résultats proches pour différentes mesures de la même quantité ?
- le temps de réponse

## 1 Mesure de vitesse de rotation

### Mesure d'une vitesse de rotation



J'ai bricolé un manège que j'ai monté sur un moteur pour mesurer la vitesse de rotation en sortie du moteur. Pour la mesurer, je vais utiliser 3 capteurs différents, dont je vais essayer de comparer les propriétés. Le premier, et le plus simple est un tachymètre électronique. J'ai par ailleurs monté sur le bras une noix pour fixer un anémomètre à fil chaud, et une pièce de bois qui me permettra d'observer l'écho d'un signal ultrasonore à chaque passage. Je dois avouer que le côté bricoleur a ses limites, et il peut être possible que le jury soit moyen chaud. Insister sur le fait que le moteur ne va pas aller vite, et qu'on a équilibré l'arbre peut être une bonne chose.

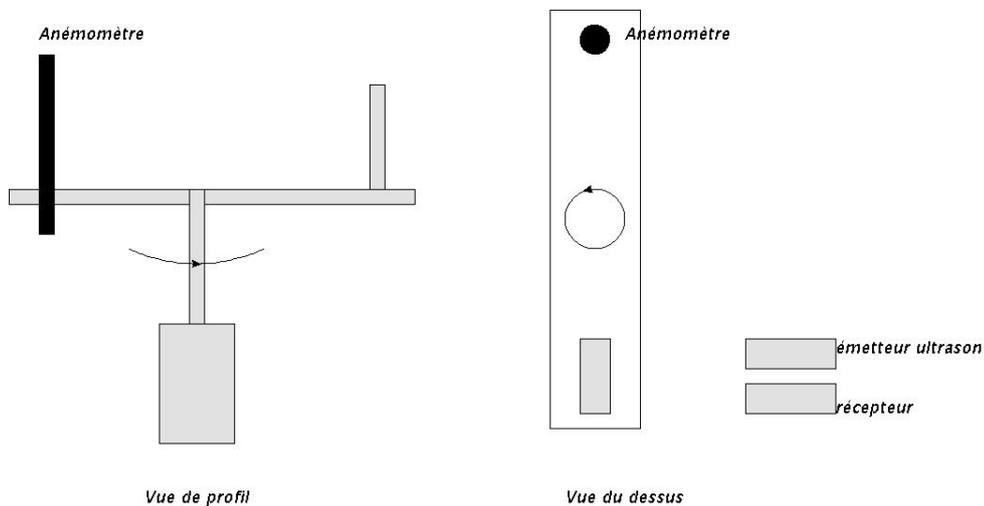


FIGURE 1 – Schéma du bricolage (Fred et Jamy©)

### Principe de fonctionnement du tachymètre

Une petite fenêtre sur le devant émet de la lumière, qui est réfléchi à chaque passage d'un témoin blanc sur l'axe. Le boîtier compte le nombre de changement de réflexions par minute. Il faut donc bien faire attention au nombre de changements de couleur par tour (diviser s'il y en a plusieurs, et il en faut au moins un...).

### Principe de fonctionnement de l'anémomètre à fil chaud

Un fil de platine est alimenté par un générateur. La puissance Joule est dissipée par transfert conducto-convectif à l'air, dont on connaît la température. La mesure de  $U$  et  $I$  aux bornes du fil permet de remonter à sa résistivité, et donc à sa température qui est fixée par rétroaction. On peut donc remonter au coefficient  $h$  qui dépend de la vitesse, et lire la vitesse sur le boîtier. On trouve alors la vitesse de rotation  $\omega = v/r$ , où  $r$  est la distance entre l'axe du moteur et l'anémomètre.

### Principe de fonctionnement de l'écho sonar

On règle émetteur et récepteur ultrasons pour avoir une réponse quand le réflecteur en bois passe à proximité. En particulier, leur bande passante est assez étroite, donc y faire attention (réponse max vers 41 kHz). On regarde à l'oscillo les période de rotation  $T$ . On a alors  $\omega = 2\pi/T$ .

### Discussion des incertitudes

Le calcul d'incertitude pour l'anémomètre me paraît intéressant pour faire un budget d'incertitudes bien propre, puisqu'en plus de l'incertitude due à l'appareil, j'ai une assez grande incertitude sur la distance à l'axe de rotation, et même une erreur systématique due au fait que je mesure la vitesse du bras par rapport à l'air, et non par rapport au moteur. J'ai inclus comme source d'incertitude :

- la définition de la distance entre l'axe et l'anémomètre  $l = 195 \pm 2$  mm
- la précision de la règle (négligeable)
- la dispersion des mesures de l'anémomètre
- les précisions constructeur ( $\pm 3\% \pm 0,05$  m/s)
- les corrections relativistes, qui techniquement ne sont pas une incertitude mais une erreur, mais de toute façon elles sont (heureusement) négligeables :  $v^2/c^2 \simeq 10^{-17}$

On trouve donc pour la vitesse de rotation :

- au tachymètre  $\omega = 40,7 \pm 0,4$  rpm ( $k=1$ , 67%)
- à l'anémomètre  $\omega = 41 \pm 3$  rpm ( $k=1$ , 67%)
- avec l'écho  $\omega = 41,8 \pm 0,5$  rpm ( $k=1$ , 67%)

Comme on vient de le voir, certains capteurs sont meilleurs que d'autres dans une situation donnée. Est-ce que cette meilleure performance est intrinsèque ?

## 2 Mesure d'une vitesse instantanée

### Mesure d'une vitesse instantanée



J'ai bricolé à nouveau, mais moins. On fixe une plaque sur une table traçante, et un anémomètre à fil chaud sur celle-ci. On prend le calibre le plus rapide de la table traçante (10 cm/s). En regard de la plaque, on met à nouveau l'émetteur et le récepteur à ultrasons (encore dans leur domaine de réponse idoine). Les signaux d'excitation et réception passent par un multiplieur, puis un filtre pour ne garder que les fréquences plus faibles que 50 Hz (et donc éliminer le bruit du réseau EDF). On mesure à l'oscillo la fréquence du signal filtré.

### Principe de la vélocimétrie par effet Doppler

L'onde émise à la fréquence  $f$  est réfléchiée par la plaque, et captée par le récepteur à une fréquence  $f'$  différente en fonction de la vitesse  $f' = f(1 + 2v/c)$  où  $v$  est la vitesse de la plaque,  $c = 340$  m/s celle du son dans l'air, et le facteur 2 vient du rebond. On a donc  $v = \frac{\Delta f}{2f}c$  et on trouve  $\Delta f$  facilement avec le montage de détection synchrone.

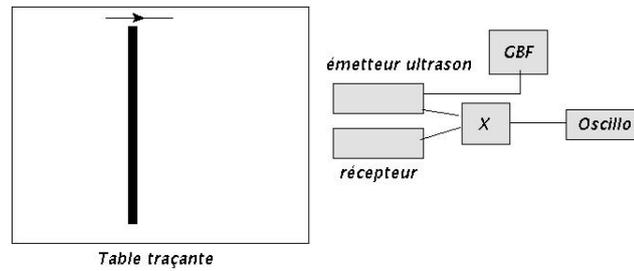


FIGURE 2 – Schéma du bricolage, le retour (Effet Doppler et analyse synchrone)

On trouve :

- à l'anémomètre (moyenne sur 10 mesures)  $v = 0,11 \pm 0,06$  m/s ( $k=1$ , 67%)
- par effet Doppler  $v = 0,094 \pm 0,001$  m/s ( $k=1$ , 67%)

### Discussion

- l'anémomètre a une énorme dispersion : son temps de réponse est plus grand que le phénomène qu'on souhaite observer. C'est un des effets du compromis entre les différentes propriétés d'un capteur, ici, entre son temps de réponse et sa fidélité.
- le conditionnement joue sur un capteur : avec les mêmes émetteur-récepteur on peut mesurer des grandeurs différentes, en changeant le traitement que l'on effectue sur les grandeurs que l'on sait mesurer.

Il est donc faux de croire qu'un capteur est intrinsèquement meilleur. Avec ce souci en tête, essayons de mesurer une autre grandeur mécanique en introduisant de nouveaux capteurs.

## 3 Mesure d'un module d'Young

### 3.1 A la jauge de contrainte

#### Mesure d'un module d'Young avec une jauge de contrainte



Normalement, la jauge de contrainte sert à déterminer la contrainte, connaissant le module d'Young du matériau sur lequel elle est fixée. Ici, on va fixer la contrainte, et en déduire le module d'Young.

### Principe de fonctionnement de la jauge de contrainte (Duffait)

Il s'agit en fait de deux jauges de contraintes : un fil de cuivre qui fait plusieurs aller-retours et que l'on colle de chaque côté de la lame de scie. Lorsque celle-ci est en flexion, chaque fil est allongé ou contracté. Avec un pont de Wheatstone on peut alors mesurer la variation de leur résistance électrique, et donc en déduire l'allongement de la lame de scie. On a au labo deux boîtiers déjà câblés avec le pont de Wheatstone et l'amplification nécessaire qui donnent directement la flèche en mm.

La formule liant la flèche d'une barre de dimensions  $L, l, h$  à la force exercée fait intervenir le module d'Young (cf. Landau ou la notice du boîtier) :

$$e = \frac{mgL^3}{3EI} \quad (1)$$

en introduisant le moment d'inertie  $I = h^3l/12$ .

On obtient donc :

$$E = \frac{4gL^3}{h^3l} \frac{m}{e} \quad (2)$$

Les dimensions de la lame sont données :

- $L = 139,0 \pm 0,2$  mm
- $l = 12,3 \pm 0,2$  mm
- $h = 0,62 \pm 0,01$  mm

On fait la mesure de la flèche pour différentes masses puis une régression linéaire et on trouve :

$$E = 310 \pm 30 \text{ GPa (k=1, 67 \%)}$$

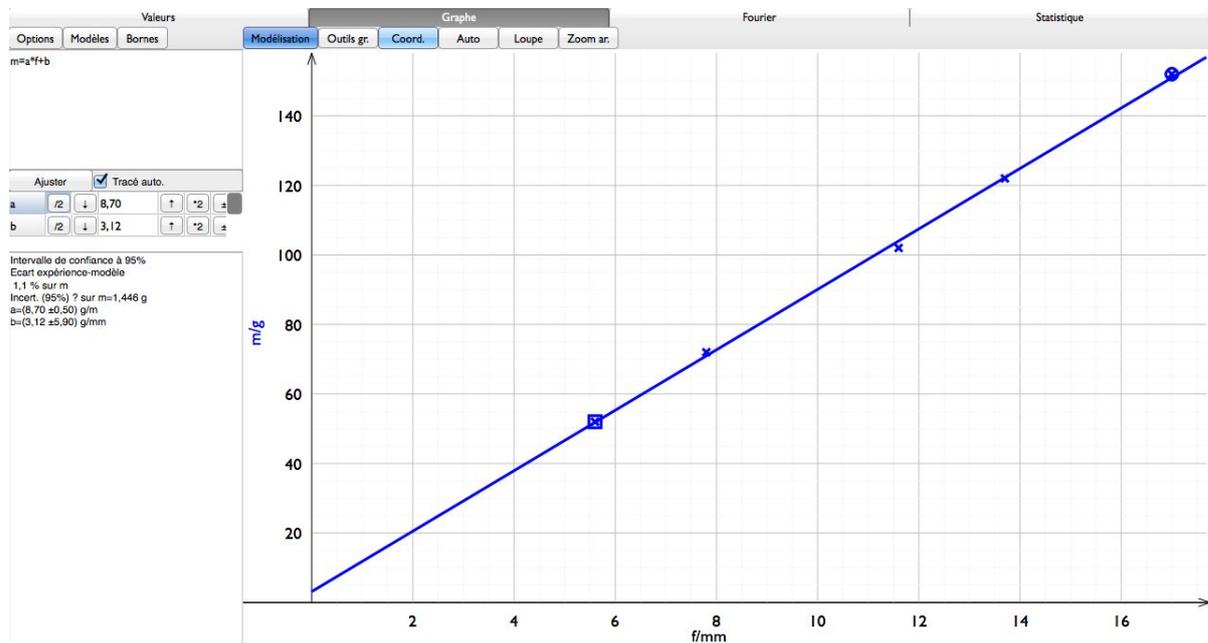


FIGURE 3 – Mesure de la flèche en fonction de la masse et modélisation affine.

### Discussion

La valeur annoncée sur la lame est de 200 GPa et on en est très loin. Ceci peut-être dû au fait que la lame a été déformée non élastiquement par les masses que nous avons mises (même si cela semble peu probable, puisque les points semblent bien être alignés). Peut-être que cette même lame a été déformée entre le moment de la mesure et l'expérience d'aujourd'hui.

## 3.2 A l'accéléromètre



### Mesure d'un module d'Young avec un accéléromètre



On prend la même lame que précédemment, on fixe un accéléromètre dessus (le plus près possible du point d'encastrement), on fait vibrer et on mesure la fréquence à l'oscilloscope.

#### Principe de fonctionnement de l'accéléromètre

L'accéléromètre que j'ai utilisé est un accéléromètre uniaxe, constitué d'un piezo-électrique solidement fixé à la coque extérieure du capteur, et à une masse sismique. Lors d'une accélération, la masse sismique, à cause de son inertie exerce une contrainte sur le piezoélectrique, et donc une tension mesurable, ici variant linéairement avec l'accélération.

#### Modèle de la verge encastrée (Rocard ou Landau)

La fréquence d'oscillation est fonction du module d'Young et des dimensions de la scie :

$$2\pi f = \omega = \frac{3,515}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \quad (3)$$

ce qui donne le module d'Young en fonction des paramètres géométriques de la barre et de la fréquence d'oscillation :

$$E = \frac{48\pi^2 \rho f^2 L^4}{3,515^2 h^2} \quad (4)$$

On trouve, en prenant pour la densité massique la valeur tabulée de l'acier  $\rho = 7,8 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$  (elle dépend fortement de la composition) :

$$E = 141 \pm 7 \text{ GPa (k=1 , 67 \%)}$$

#### Discussion

On a pas vérifié la bande passante de l'accéléromètre. La raison est que la manipulation que j'imagine pour la vérifier consisterait à mettre l'accéléromètre en question sur un pot vibrant, et faire un diagramme de Bode. Le hic, c'est qu'il semble que le pot vibrant limite cette étude, et qu'en fait on fait plus le diagramme de Bode du pot vibrant. Bon, vu que les vibrations se font vers 10 Hz et sur 1 cm environ, je pense qu'on est large, tant au niveau de la fréquence que de l'étendue de mesure : la notice constructeur donne une étendue en fréquence de 1 à 10 000 Hz, et en accélération de  $\pm 10 \text{ g}$ , ce qui est 100 fois plus grand que ce qu'on mesure.

En plus, on a essayé de mettre l'accéléromètre le plus loin possible de l'extrémité libre pour ne pas perturber la mesure, mais sa masse de 10 g est loin d'être négligeable comme on l'a fait ici, et ceci peut expliquer la différence entre le module d'Young mesuré ici, et celui mesuré précédemment. On touche ici du doigt une nouvelle propriété intrinsèque d'un capteur qui est sa finesse (ou sa discrétion) : à quel point sa présence perturbe le phénomène que l'on souhaite étudier ?

## Conclusion

Je vous ai présenté ici quelques capteurs de grandeurs mécaniques, en vous montrant que lors d'une manipulation, il est nécessaire de se soucier de la manière d'effectuer une mesure, en particulier de vérifier si le capteur est adapté aux grandeurs que l'on va mesurer, et que le conditionnement est lui aussi en adéquation. De plus, il faut garder à l'esprit qu'il n'existe pas de capteur idéal, et que par construction il s'agit d'un compromis entre différentes propriétés (certains capteurs vont privilégier la fidélité au temps de réponse, d'autre la précision au détriment de l'étendue de mesure, etc).

Questions, remarques, calculs d'ordres de grandeur,...