

MP 04 : Capteurs de grandeurs mécaniques

Elio Thellier

Session 2021

Introduction

Un capteur mesure une grandeur physique en la transformant en une autre grandeur que l'on sait exploiter, tension, courant etc... On va dans ce montage s'intéresser à des capteurs de grandeurs mécaniques (position, vitesse, masse) et on va essayer de les caractériser. Qualité métrologique d'un appareil de mesure donnée par :

- **Résolution** : La résolution d'un appareil est la plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible de l'indication délivrée par l'instrument. Elle peut être exprimée en points, qui sont alors le nombre de valeurs différentes que l'instrument peut afficher. Par exemple un multimètre de 2 000 points pour une étendue de 2 V peut afficher toutes les valeurs comprises entre 0,000 et 1,999 V, sa résolution est donc de 1 mV.
- **Sensibilité** : La sensibilité est un paramètre exprimant la variation du signal de sortie d'un appareil de mesure en fonction de la variation du signal d'entrée. Un appareil est d'autant plus sensible qu'une petite variation de la grandeur G à mesurer provoquera un changement plus grand de l'indication donnée par l'appareil de mesure.
- **Justesse** : L'erreur de justesse est l'erreur globale résultant de toutes les causes pour chacun des résultats de mesure pris isolément. C'est donc l'aptitude de l'appareil à donner des résultats qui ne sont pas entachés d'erreur.
- **Précision** : La fidélité définit la dispersion des résultats. Si on n'effectue qu'une seule mesure, la fidélité représente la probabilité qu'elle soit représentative du résultat moyen. Ce dernier aurait été obtenu en effectuant une infinité de mesures.

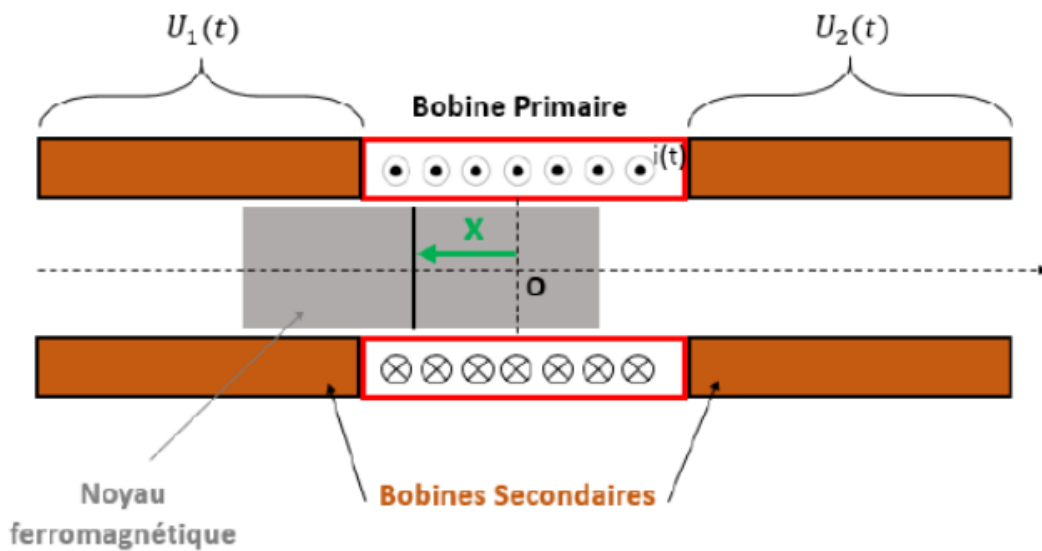
1 Capteur de position inductif LVDT

Matériel

- Oscilloscope 2 voies

- (Multimètre de précision)
- 3 bobines identiques de 250 spires
- Barreau en fer doux de 15 cm de long
- GBF
- Plaque multiplieur + passe bas (RC de fréquence de coupure 100 Hz) : attention certaines plaquettes "multiplieur" ajoutent un offset en sortie, il faut prendre une petite plaquette "multiplieur simple" ou bien prendre garde à mettre à la masse
- Réglet

Principe



La bobine du centre est alimentée par le GBF à 5kHz, 10Vpp, sinusoïdal, sans offset. Elle génère donc un champ magnétique variable qui passe dans les bobines d'à côté, en étant canalisé par le noyau de fer. Ce champ magnétique variable génère donc un flux variable et donc une fem dans les bobines périphériques d'après la loi de Faraday. Ajouter un noyau de fer doux canalise les ldc et permet donc d'envoyer plus de champs magnétique dans la bobine de gauche ou de droite selon sa position.

Calcul : on suppose que la tension induite dans chacune des bobines est proportionnelles aux nombres de spires induites c'est à dire traversées par le noyau, en négligeant les

effets de bord et en supposant que le matériau magnétique fonctionne en régime linéaire.

$$U_2 = -N_2 S \frac{dB}{dt}$$

$$U_1 = -N_1 S \frac{dB}{dt}$$

$$U_s = U_1 - U_2 = -S \frac{dB}{dt} (N_1 - N_2)$$

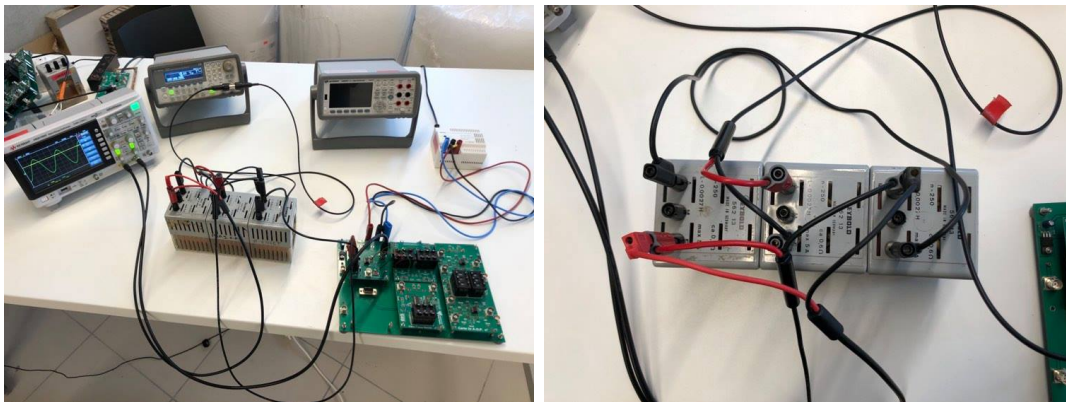
Or $N_1 + N_2 = cste$ d'où après calculs :

$$U_s = -S \frac{dB}{dt} (2N_1 + cste)$$

Donc on a une relation affine entre le nombre de spires et la tension U_s puis on suppose que la position du capteur est directement proportionnelle au nombre de spires.

Ensuite on s'intéresse seulement à l'amplitude de la différence de tension. Donc on utilise une détection synchrone pour obtenir une tension quasi continue après filtrage qui est directement proportionnelle à la position du noyau

Protocole



- Alimenter la bobine centrale par le GBF à 5kHz, 10Vpp, sinusoïdal, sans offset (signal U_e). Remarque : choix de la fréquence : ne pas monter trop haut sinon les bobines ont un caractère capacitif
- Relier les deux pôles - des bobines périphériques
- Prendre la tension $U_s = U_1 - U_2$ entre les bornes + des bobines périphériques
- Envoyer U_s et U_e en entrée du multiplieur, puis filtrer passe bas autour de 10 Hz

- On récupère la sortie de la détection synchrone qui est alors proportionnelle à l'amplitude U_s et on la visualise sur un multimètre de précision en mode VDC, et visualiser aussi le signal à l'oscillo pour vérifier
- On réalise alors l'étalonnage :
 - on mesure au préalable la longueur du barreau et la longueur totale des 3 bobines accolées
 - on place le barreau entre les bobines et on mesure la distance entre l'entrée de la première bobine et le bout du barreau, on en déduit l'écart entre le milieu du barreau et le milieu des bobines
 - Mesurer au voltmètre de précision la tension de sortie de la détection synchrone
 - On trace la droite d'étalonnage x en fonction de U_{out} , on vérifie qu'elle passe bien par 0 lorsque le barreau est au milieu
- Exploitation
 - Sensibilité : Pente de l'étalonnage : sensibilité s du capteur en m/V
 - Résolution : On utilise l'incertitude du voltmètre pour connaître l'incertitude sur la mesure de tension et la résolution est alors $r = s\sigma(U_{out})$ exprimée en m
 - Précision : on fait une mesure ponctuelle et on utilise l'étalonnage pour déterminer l'incertitude sur la position : $\frac{\sigma(x)}{x} = \sqrt{\left(\frac{\sigma(s)}{s}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(U_{out})}{U_{out}}\right)^2}$, puis la mesure est précise si l'incertitude relative est faible
 - Justesse : On compare avec la mesure au réglet, en prenant en compte les incertitudes des deux

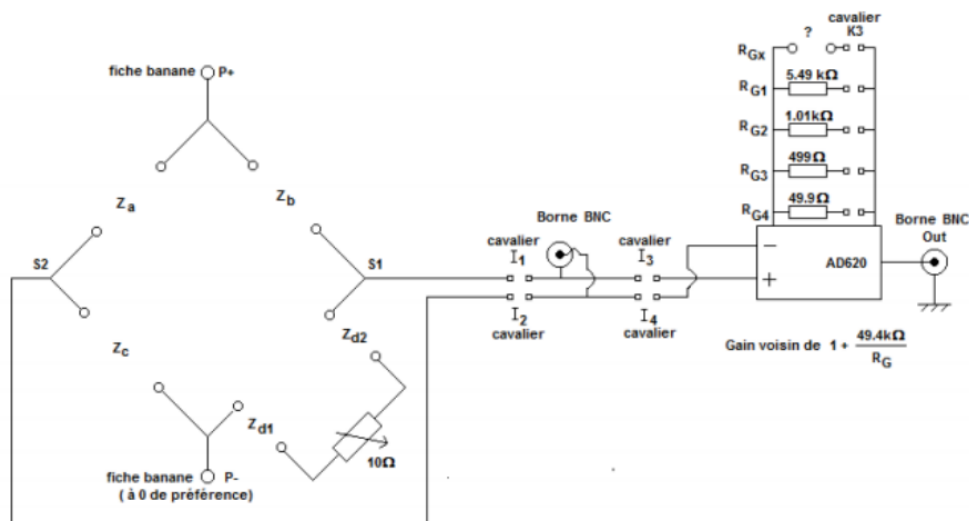
2 Balance à jauge de contrainte

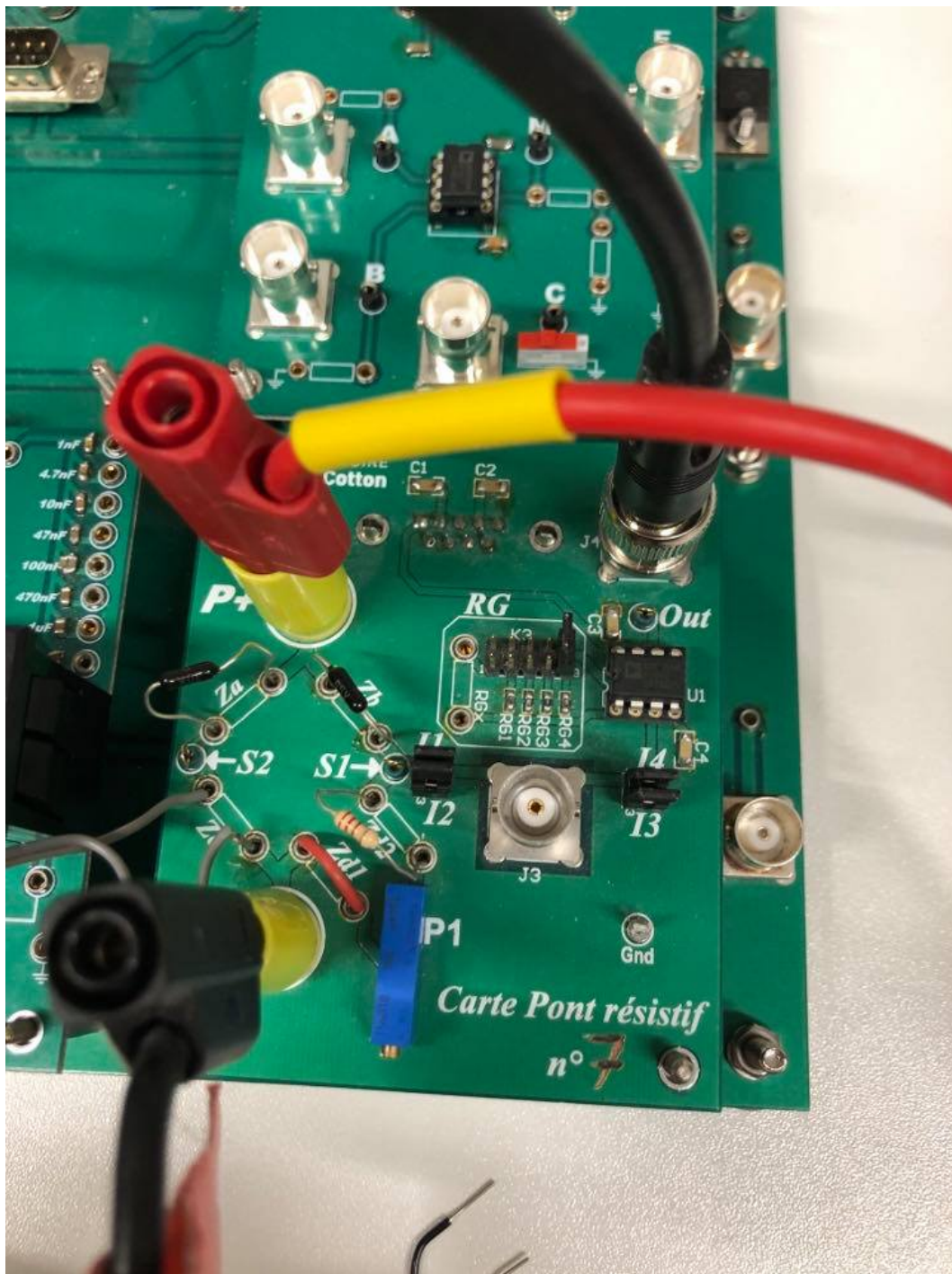
Matériel

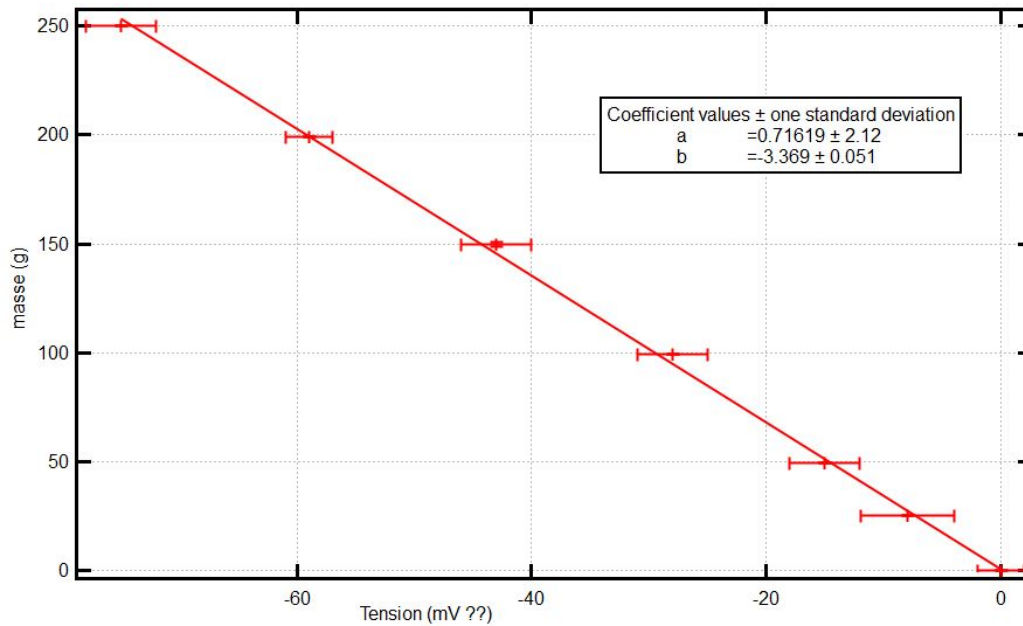
- Multimètre de précision
- GBF
- Multimètre de précision
- Jauge de contrainte
- Alim +15/-15V
- Plaquette multiplieur passe bas

- Carte mère
- Plaque de pont de Wheatstone avec ampli différentiel à grand gain (attention à bien vérifier que les petits ponts/cavaliers sont là!!!!)
- Résistances de 10 kOhm : permet de limiter la dérive par échauffement
- Une résistance de 120
- Petit tournevis pour faire varier la résistance variable
- Balance de précision et petites masses différentes avec système de suspension

Protocole







- On envoie avec le GBF une tension continue de 15V dans les brones jaunes de la plaquette
- Monter le pont sans contrainte : $Z_a = Z_b = 10k\Omega$, Z_c =jauge de contrainte, $Z_d = 120\Omega$ et ensuite on ajuste autour avec le petit tournevis, vérifier que les cavaliers sont placés à l'horizontale en I1 I2 I3 et I4 sinon le courant ne passes pas
- Ajuster R_v pour avoir une tension de sortie nulle
- Ajouter l'amplificateur
- Ajuster à nouveau
- Pour le choix du gain de l'amplificateur on cherche un compromis entre une bonne amplification mais pas de saturation.
- On observe la sortie au voltmètre de précision en mode statistique.
- On trace ensuite la tension lue au voltmètre en fonction de la masse. On a fabriqué une balance.

Exploitation

- **Sensibilité:** donnée par l'étalonnage : $m = sU$ d'où s en kg/mV
- **Résolution :** donnée par l'étalonnage et l'incertitude type de mesure sur U_{out} (qui est simplement l'incertitude du voltmètre. Ainsi : $R = s\sigma(U_{out})$)

- **Justesse:** On compare la mesure obtenue à partir de l'étalonnage avec celle obtenue avec la balance : si les intervalles d'incertitudes se recoupent on peut dire que le capteur est juste.

Questions et remarques

- Comment fonctionne une jauge de contrainte ? Le matériau est étiré, la section diminue, et $R = \frac{l}{\sigma S}$ augmente.
- On ne fait pas de détection synchrone car même si ça va améliorer la sensibilité, la pente d'étalonnage va être moins pentue, et donc la résolution va être moins bonne... Et en plus ça ne corrige pas le problème de dérive donc bon.
- Si jamais j'ai envie de refaire le calcul : deux diviseurs de tension simplement
- Aller vite car l'échauffement fait varier la valeur des résistances des ponts d'une manière qui n'est pas négligeable... D'ailleurs pour ça qu'on prends des résistances de 10 kOhm pour lesquelles l'influence relative de la température est moins importante (cf poly JBD)

3 Capteur de vitesse : banc Doppler

Principe

Un émetteur émet un signal ultrasonore à environ $f_e = 44kHz$. Un récepteur en mouvement sur un banc via un moteur reçoit ainsi un signal de fréquence $f_r = f_e + \Delta f$. Dans l'approximation $v \ll c_s$ on peut écrire : $\frac{\Delta f}{f_e} = \frac{v}{c_s}$, puis connaissant la célérité du son on remonte à la vitesse du récepteur par analyse de la fréquence reçue. L'écart en fréquence mesuré est d'environ 10 Hz pour des fréquences d'environ 44 kHz. On comprends bien que si on veut mesurer un tel écart en FFT il faut un pas de l'ordre du Hz et un fréquence d'échantillonnage de 100 KHz pour respecter le critère de Shannon ($F_e > 2F_{max}$) ainsi il nous faudrait $N = \frac{F_e}{\delta f} = 100000$ points ce qui n'est pas possible à l'oscilloscope. On effectue donc une translation de fréquence par détection synchrone : on multiplie le signal de l'émetteur par le signal du recepateur, ainsi on obtient en sortie une composante continue + un signal oscillant à la fréquence de la différence + un signal oscillant à la fréquence de la somme, puis après filtrage passe bas on a uniquement la différence, qui est tout ce qui nous intéresse.

Protocole

- Banc Doppler Jeulin avec canards noirs + boîtier
- Banc Jeulin avec rails
- Plaquette détection synchrone
- Filtre passe bas à 1 kHz, résistance 16k et 10 nF

- Potence noix pince
- Oscillo
- Chronomètre

Protocole

- On commence par mesurer la longueur d'onde émise par l'émetteur : on met le récepteur en face de l'émetteur, on visualise les signaux émis et reçu sur l'oscillo en mode XY. On déplace le récepteur de Δx pour faire passer une dizaine de longueurs d'ondes. On en déduit sa valeur et l'incertitude associée. On trouve 8,3mm.
- Réaliser le montage Doppler et la détection synchrone en discutant des choix pour la fréquence de coupure. Remarque : on alimente le canard ultrasonore avec 40 KHz parce qu'on cherche à avoir le maximum d'amplitude en sortie. Le banc de translation est un moteur pas à pas contrôlé par ordi avec module Arduino. 2 possibilités : soit le canard récepteur se déplace, soit un écran se déplace et on mets le récepteur à côté de l'émetteur. Cette dernière technique rajoute juste un facteur 2 dans la relation finale.
- Régler la base de temps de l'oscillo pour visualiser un signal pendant une durée correspondant au mouvement de la platine mobile, en prenant la plus grande possible pour avoir un meilleur pas en fréquence pour la FFT.
- Utiliser le mode monocoup de l'oscilloscope
- Mesure de fréquence du signal avec l'incertitude associée qui est prise comme le pas en fréquence de la FFT soit l'inverse du temps d'acquisition
- On en déduit $v = \lambda \Delta f$

Exploitation

- Sensibilité : $s = \lambda$
- Résolution : $r = \lambda \sigma(\Delta f)$ où l'incertitude est liée au pas en fréquence de la FFT à l'oscillo
- Justesse : est-ce que les incertitudes de la mesure avec le banc et avec un chrono se recoupent ?
- Précision/Fidélité : incertitude relative sur la mesure avec le banc doppler comparée à l'incertitude relative avec le chrono. On détermine l'incertitude simplement avec propagation sur la formule $v = \lambda \Delta f$

Remarque : longueur d'onde obtenue est de l'ordre de la taille du piézo à l'origine des ultrasons donc il y a diffraction donc ouverture angulaire. Le savoir au moins.

Remarque : deux possibilités pour l'évaluation des incertitudes : si on a le temps, faire une série de mesure puis une étude statistique des incertitudes, soit simple propagation, soit un Monte Carlo. A voir si y a pas moyen carrément de faire une droite en faisant varier f ?