

# TP : REALISER UN CAPTEUR D'EFFORT NUMERIQUE

*Modéliser les solides déformables de type "poutre droite"*  
*Modéliser et déterminer les performances des systèmes asservis*

Par M. Nierenberger

## Compétences associées :

A – Analyser	A3.04	Décomposer un système en sous systèmes, composants
C – Résoudre	C.17	Comparer les résultats obtenus aux grandeurs physiques réelles mesurées ou attendues
	C.18	Interpréter les écarts
D – Expérimenter	D1.06	Elaborer des indicateurs de performance relatifs aux fonctions auxquelles participe la pièce
	D2.01	Identifier les grandeurs à mesurer
	D2.02	Associer un principe physique à l'acquisition de la grandeur mesurée (en lien avec le cours de physique)
	D2.03	Choisir les réglages et les configurations matérielles sur le système ou la chaîne d'acquisition
	D2.04	Qualifier les caractéristiques d'entrée - sortie d'un capteur
	D2.05	Justifier le choix et les caractéristiques d'un capteur ou d'un appareil de mesure vis-à-vis de la grandeur physique à mesurer
	D3.04	Evaluer et commenter les écarts entre les résultats expérimentaux avec l'ordre de grandeur des résultats attendus (simulés ou définis au cahier des charges)
F – Réaliser	F.04	Définir l'ordonnancement des différentes phases
G – Communiquer	G1.04	Extraire les informations utiles d'un dossier technique
	G1.10	Représenter une solution pour visualiser les conditions fonctionnelles

## OBJECTIF

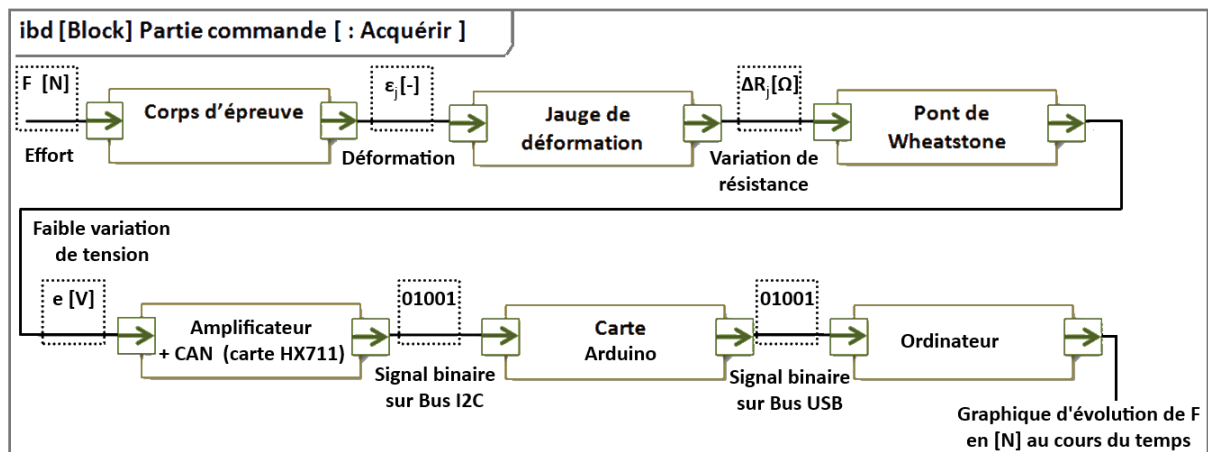
On propose dans ce TP d'utiliser une poutre en aluminium équipée d'une jauge de déformation pour réaliser un capteur d'effort. La lecture de la valeur de sortie du capteur se fera directement sur un ordinateur, par l'intermédiaire d'une carte Arduino. Une partie de la chaîne d'acquisition est donc numérique.

Vous pouvez utiliser cette méthode dans votre TIPE si vous avez un suivi précis d'un effort (ou d'une autre grandeur physique) à effectuer au cours du temps.



## INTRODUCTION : CHAÎNE D'ACQUISITION

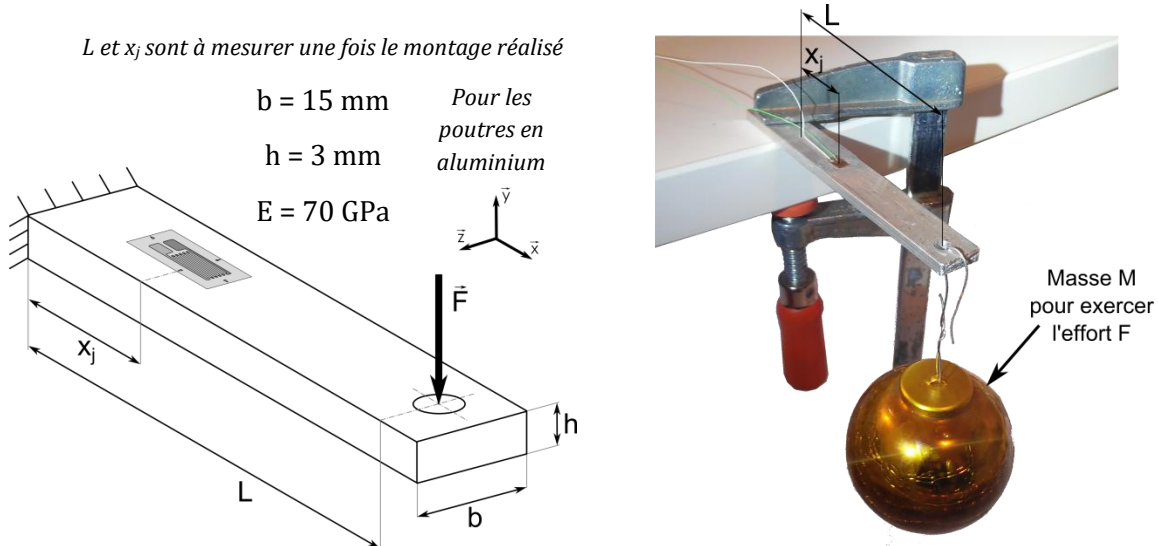
### STRUCTURE GLOBALE DE LA CHAÎNE D'ACQUISITION



Le diagramme de blocs internes (ibd) donné sur la page précédente présente la structure de la chaîne d'acquisition que nous envisageons d'utiliser. Nous avons vu lors de la dernière séquence de TP comment dimensionner un corps d'épreuve de capteur d'effort. On considère donc aujourd'hui que ce corps d'épreuve est correctement dimensionné.

### CORPS D'EPREUVE

Le corps d'épreuve est dans le cas présent une simple poutre de section rectangulaire en aluminium. Cette poutre est encastree en une de ses extrémités, et on applique un effort perpendiculaire à sa ligne moyenne à l'autre extrémité. En pratique, la poutre est encastree sur la table en utilisant un serre-joint. L'effort à mesurer est appliqué à la poutre en utilisant des masses suspendues dans le trou prévu à cet effet.



On rappelle que la contrainte maximale sur la face supérieure de cette poutre en flexion s'écrit, pour la section de la jauge d'abscisse  $x_j$  et d'après la théorie des poutres comme :

$$\sigma(x_j) = \frac{M f(x_j)}{I_{Gz}} \cdot \frac{h}{2} = \frac{6 \cdot F}{b \cdot h^2} \cdot (L - x_j)$$

Et comme la loi de Hooke lie la contrainte normale  $\sigma$  à la déformation longitudinale  $\varepsilon$ , on peut écrire la déformation longitudinale de la jauge  $\varepsilon_j$  comme :

$$\varepsilon_j = \frac{\sigma(x_j)}{E} = \frac{6 \cdot F}{E \cdot b \cdot h^2} \cdot (L - x_j)$$

On note que la déformation de la jauge de déformation  $\varepsilon_j$  est proportionnelle à l'effort F si les autres paramètres sont fixés (ce qui est le cas dans le montage que nous allons réaliser).

### JAUGE DE DEFORMATION

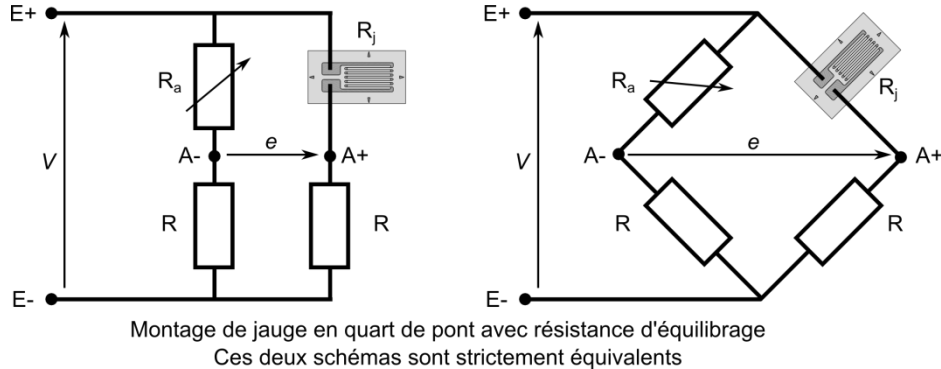
La jauge de déformation utilisée est de marque "Micro-Measurement Division". Ses caractéristiques sont à relever dans la documentation constructeur fournie en annexe ([page 13](#)). On distingue principalement deux caractéristiques de la jauge : sa résistance  $R_{j0}$  en configuration non étirée, et son facteur de jauge  $K_j$  lié au matériau résistif utilisé ( $K_j = 2,10$  pour les jauges utilisées). Ces deux grandeurs dépendent de la température comme le souligne la documentation constructeur. Lorsqu'une déformation longitudinale  $\varepsilon_j$  est appliquée à la jauge, sa résistance varie d'une quantité  $\Delta R_j$ , amenant ainsi la résistance de la jauge à  $R_j = R_{j0} + \Delta R_j$ , tel que :

$$\frac{\Delta R_j}{R_{j0}} = K_j \cdot \varepsilon_j$$

## PONT DE WHEATSTONE

On rappelle que le rôle du pont de Wheatstone consiste à transformer la petite variation de résistance  $\Delta R_j$  en une petite variation de tension  $e$ , plus facilement mesurable par le système d'acquisition. La variation de tension est de plus centrée autour de 0V (voir ci-dessous).

On utilise ici un montage en quart de pont pour raison de simplicité du montage. Le schéma du pont de Wheatstone utilisé est donné ci-dessous :



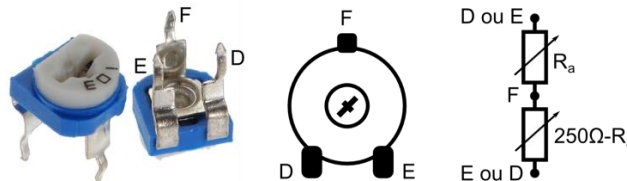
Ce pont de Wheatstone est alimenté avec une tension  $V$  constante, régulée par le module HX711 ( $V = 4V$  environ). On a ajouté à ce montage une résistance ajustable  $R_a$ , de manière à pouvoir équilibrer le pont, c'est-à-dire à s'assurer que  $e = 0V$  lorsque  $\varepsilon_j = 0$ .

On utilisera ici des résistances  $R = 120 \Omega$ , et un potentiomètre de  $130 \Omega$  à réglage fin (voir comment il est constitué dans l'annexe "[Réaliser une Résistance ajustable fine](#)") pour constituer la résistance ajustable  $R_a$ . Le montage est déjà réalisé sur une plaque de prototypage à souder.



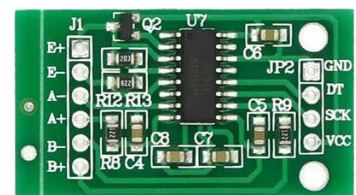
*Les variations de résistance  $\Delta R_j$  sont très faibles. Si l'on ajoute une variation de température, ou un branchement mal soigné, les résultats deviennent rapidement inexploitable ! Il n'est pas possible d'obtenir une mesure fiable en réalisant le montage sur une plaque de prototypage à emboîter (breadboard) car la résistance des contacts n'est pas négligeable.*

Rappels sur le fonctionnement d'une résistance ajustable, exemple avec une résistance de  $250 \Omega$  :



## MODULE HX711 : AMPLIFICATEUR + CAN

La carte proposée, basée sur un circuit intégré HX711 (documentation constructeur dans le fichier "hx711\_datasheet.pdf"), est prévue pour traiter les signaux issus de ponts de Wheatstone.



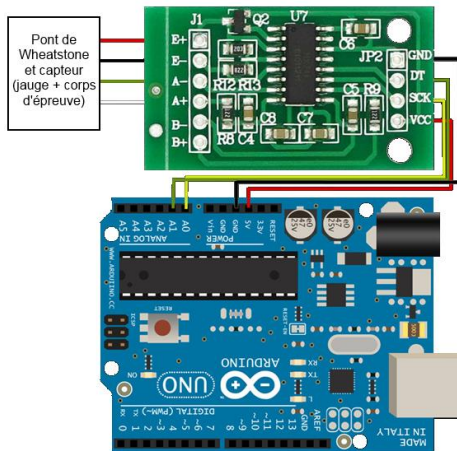
1. Elle est alimentée entre 0 (borne Vcc) et 5V (borne GND).
2. Elle génère la tension régulée  $V$  d'alimentation du pont entre les bornes E+ et E-.
3. Elle récupère les variations de la faible tension  $e$  entre les bornes A+ et A-.
4. Elle **traite la tension d'entrée en l'amplifiant**.
5. Elle **convertit la tension amplifiée en un signal numérique** codé sur 24 bits.
6. Elle renvoie une image numérique du signal mesuré via un bus de communication I2C (bornes Serial Data Line DT et Serial Clock Line SCK).

**Au final, tel qu'il est configuré pour ce TP, le module HX711 code sur 24bits un signal d'entrée compris entre -20mV et +20mV.**

## CONNECTION AVEC LA CARTE ARDUINO

La communication entre le module HX711 et la carte Arduino utilise un bus I2C (voir description du fonctionnement du bus dans le cours sur les Réseaux, vu en PTSI).

Le câblage sera effectué comme décrit sur la figure suivante :



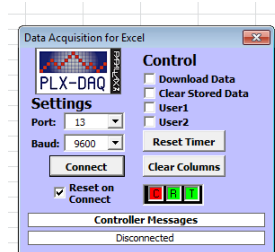
HX711	Arduino
Vcc	+5V
GND	GND
SCK	A0
DT	A1

Remarque : Le bus I2C fait intervenir des signaux numériques. On aurait donc pu utiliser des entrées Tout Ou Rien (TOR) pour la communication (mais elles sont situées de l'autre côté de la carte Arduino et rendent le câblage peu pratique).

## INTERFAÇAGE DE LA CARTE ARDUINO ET TRACE SUR L'ORDINATEUR

La carte Arduino comporte un microcontrôleur qu'il est nécessaire de programmer. Le programme à charger dans le microcontrôleur est donné dans le dossier du TP. Vous serez amené, au cours du TP, à l'ouvrir dans le logiciel Arduino, à le modifier, puis à le charger dans microcontrôleur.

Le programme en question envoie à l'ordinateur un signal sur le "moniteur série". Le pilote PLX-DAQ (<https://www.parallax.com/downloads/plx-daq>) a été installé sur les ordinateurs, et permet un tracé direct dans Excel des valeurs renvoyées par l'Arduino, sans post-traitement. Il permet également de lancer, de stopper, ou de remettre à zéro l'acquisition depuis Excel.



## ANALYSER LES CARACTERISTIQUES DU CAPTEUR ENVISAGE

- Chercher une poutre équipée d'une jauge de déformation et la monter avec un serre joint comme sur la figure de la page 2. Mesurer  $L$  et  $x_j$ .

Q1. Sachant que  $e$  peut varier entre  $-20\text{mV}$  et  $+20\text{mV}$  pour être compatible avec le module HX711, calculer les efforts  $F_{\min}$  et  $F_{\max}$  que peut mesurer le capteur. On supposera qu'avec cette gamme de mesure, on ne dépasse pas la déformation maximale admissible par les jauges de l'ordre de  $10^{-3}$ . On mesurera précisément  $L$  et  $x_j$  sur le montage. On supposera également que le pont de Wheatstone équilibré peut être modélisé par l'équation  $e = V \cdot \frac{\Delta R_j}{4.R}$  (équation linéarisée en supposant que  $e \ll V$ ).

On obtient ainsi la gamme de mesure du capteur.

On souhaite maintenant voir s'il est pertinent d'utiliser l'amplificateur + CAN HX711, ou si on pourrait mesurer la tension  $e$  directement sur une entrée analogique de la carte Arduino.

- La carte HX711 code sur 24 bits une tension comprise entre  $+20\text{mV}$  et  $-20\text{mV}$ .
- La carte Arduino code ses entrées analogiques sur 10 bits pour une tension comprise entre 0 et 5V.

Q2. Calculer les résolutions en tension (variation minimale de tension mesurable) de la carte Arduino et du module HX711. Leur associer une valeur de la résolution en effort du capteur en utilisant la formule utilisée à la question 1. Est-il intéressant d'utiliser le module HX711, ou serait-il possible de connecter directement le pont de Wheatstone à une entrée analogique de la carte Arduino ?

## REALISER LE CAPTEUR D'EFFORT ET SA CHAINE D'ACQUISITION

### FONCTIONNEMENT DU PONT DE WHEATSTONE

- Q3. *Ecrire deux relations de ponts diviseurs de tension sur le montage en pont de Wheatstone (schéma en page 3), et en déduire la valeur de la tension  $e$  en fonction de la tension  $V$  et des résistances  $R$ ,  $R_a$  et  $R_j$ . Quelle est la condition sur les valeurs des résistances pour que lorsque  $\varepsilon_j = 0$ ,  $e = 0$  ?*
- Chercher le matériel électronique nécessaire à la réalisation du montage :
    - Une carte Arduino
    - Une carte électronique soudée équipée d'un module HX711 et d'un pont de Wheatstone
    - Des fils permettant de relier la carte électronique à la carte Arduino

Q4. *A votre avis, les valeurs des résistances montées sur le pont de Wheatstone soudé sont-elles rigoureusement identiques ? Pourquoi est-il nécessaire de mettre en place un système d'équilibrage sur le pont de Wheatstone ?*

Q5. *Sachant que le module HX711 ne peut mesurer que des tensions  $e$  comprises entre -20 et +20mV, quel serait l'effet d'une tension  $0 \neq 0$  lorsque  $\varepsilon_j = 0$  (déséquilibre du pont) sur la gamme de mesure du capteur d'effort ?*

    - Réaliser le montage : relier la poutre, le pont de Wheatstone – HX711, la carte Arduino.
    - Brancher la carte Arduino à l'ordinateur : **ATTENTION, si les voyants de la carte Arduino ne s'allument pas, ou s'éteignent rapidement, DEBRANCHER IMMEDIATEMENT la carte, votre montage est en court-circuit !**
    - Patienter quelques instants (1 à 2 minutes) pour que les composants électroniques montent en température.
    - Mesurer à l'aide d'un multimètre réglé sur le calibre adapté (petit !) la tension  $e$  entre les bornes A+ et A- du module HX711. Régler minutieusement le potentiomètre de manière à ce que la valeur de  $e$  soit nulle (très petite en tout cas, bien inférieure à 20mV !).

On considérera pour la suite que la tension  $e$  s'exprime comme :

$$e = V \cdot \frac{R \cdot (R_a - R_{j0} - \Delta R_j)}{(R + R_j) \cdot (R + R_a)} \approx -V \cdot \frac{\Delta R_j}{4 \cdot R} \quad \text{car } R \approx R_a \approx R_{j0} \text{ lorsque le pont est équilibré}$$


### AMPLIFICATION ET CONVERSION EN NUMERIQUE

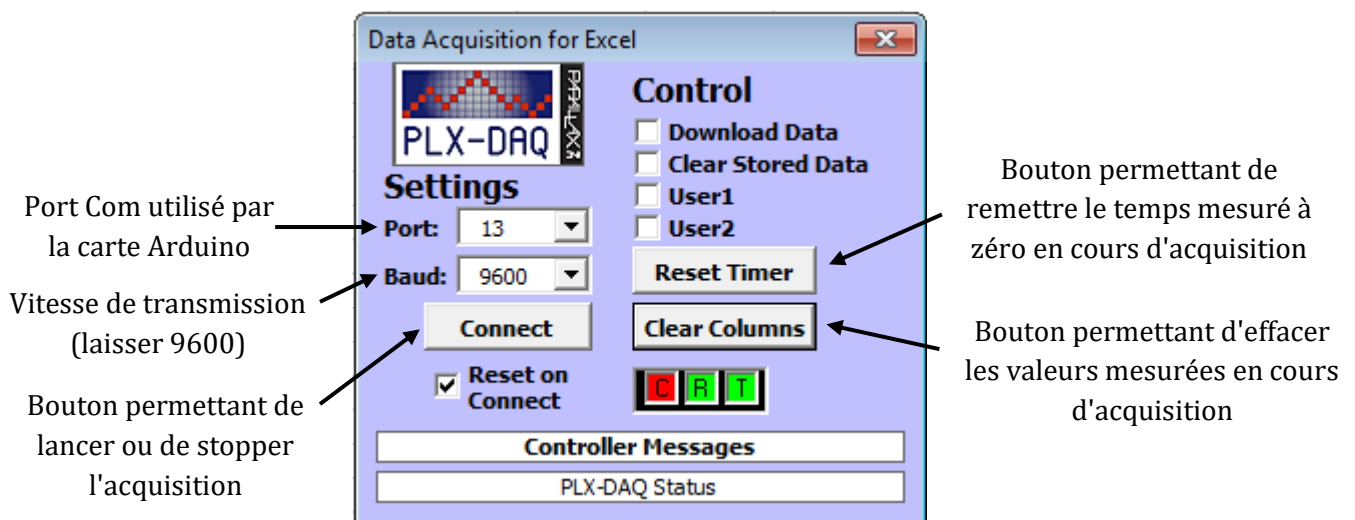
Le module HX711 renvoie à la carte Arduino via le bus I2C un signal numérique codé sur 24 bits, correspondant à une tension d'entrée  $e$  dans le module HX711 comprise entre -20 et +20mV.

On rappelle par exemple que la valeur décimale associée à la valeur binaire 011 est 3.

- Q6. *Donner les valeurs décimales  $s$  associées aux valeurs binaires renvoyées par le module HX711 pour les tensions  $e$  suivantes : -20mV, 0V, +20mV.*
- Q7. *Exprimer la relation entre  $s$  et  $e$  sous la forme  $s = K_{num} \cdot e + d$ . On calculera numériquement le gain  $K_{num}$  en [unités binaires/V], et l'offset  $d$  en [unités binaires] associés à l'amplification – conversion réalisée par le module HX711.*
- Q8. *Calculer la relation théorique entre  $s$  et  $F$  associée au fonctionnement de la chaîne d'acquisition. Donner l'expression sous forme littérale, puis sous forme numérique. On pourra continuer à considérer que  $R \approx R_a \approx R_{j0}$ . En déduire  $F$  en fonction de  $s$  et donner la formule sous forme analytique puis numérique ( $F = \alpha \cdot s + \beta$  avec  $\alpha$  et  $\beta$  sous forme numérique).*

On a ainsi obtenu la relation théorique entre force  $F$  appliquée au capteur et valeur  $s$  renvoyée.

- Nous allons vérifier que la bibliothèque servant à la communication en I2C entre la carte Arduino est bien installée : Ouvrir le programme Arduino. Aller dans Croquis\Include Library et vérifier dans le menu qui s'ouvre si la librairie "HX711-master" est bien présente. Si elle ne l'est pas, sélectionner Croquis\Include Library\Add .ZIP Library, et aller sélectionner le fichier "HX711-master.zip" disponible dans le dossier du TP.
- Copier le fichier "Acq\_Excel.xlsm" ainsi que le dossier "TP\_capt\_eff" dans un dossier libre en écriture (le fichier "TP\_capt\_eff.ino" doit être placé dans un dossier du même nom).
- Ouvrir dans le programme Arduino le fichier "TP\_capt\_eff.ino" qui est dans le dossier que vous avez copié. Analyser la structure du programme. Les lignes commençant par Serial sont uniquement destinées à renvoyer des informations vers l'ordinateur connecté à la carte Arduino. Repérer comment est définie la variable  $s$  (la même que dans cet énoncé !). Repérer également à quel endroit est définie la relation permettant le passage de  $s$  à  $F$  (cette relation sera à modifier ultérieurement).
- Vérifier que la carte Arduino est connectée à l'ordinateur et détectée (logiciel Arduino : Outils\Port COM). Téléverser (charger) le programme "TP\_capt\_eff.ino" dans la carte en cliquant sur le bouton .
- Ouvrir Excel. Aller dans Outil→Option→Onglet sécurité→Sécurité des macros, et sélectionner "Niveau de sécurité moyen".
- Ouvrir le fichier Excel "Acq\_Excel.xlsm". Valider l'utilisation des macros. La fenêtre de PLX-DAQ s'ouvre :



- Lancer une acquisition en cliquant sur Connect. Vérifier que les points de mesure sont bien enregistrés, et tracés directement sur la courbe. On notera que la courbe de  $F$  affiche pour l'instant la même valeur que  $s$ .
- Laisser l'acquisition enregistrer un signal pendant deux minutes sans appliquer d'effort sur le corps d'épreuve. Qu'observe-t-on ?

Q9. *A quoi est due la variation des signaux observée ? Est-ce un bruit de mesure ? Que faudra-t-il faire lors des mesures d'effort ultérieures avec ce capteur ?*

#### EFFET D'UN DESEQUILIBRE DU PONT, REGLAGE PRECIS DE L'EQUILIBRAGE

- Lancer une acquisition, vérifier que les courbes sont tracées en direct dans Excel, et attendre 1 à 2 minutes.
- Cliquer sur Reset Timer et sur Clear Columns dans la fenêtre PLX-DAQ, puis tout en observant les courbes, tourner le potentiomètre d'équilibrage successivement dans les deux sens jusqu'à visualiser les deux saturations.

Q10. Expliquer pourquoi on observe ces saturations.

- Comme il n'y a toujours aucun effort appliqué au capteur, on devrait lire sur le graphique, si le pont est équilibré,  $s = d$ , avec  $d$  la valeur calculée à la page précédente. Régler le potentiomètre pour lire cette valeur de  $s$  en l'absence d'effort. On notera que cette valeur correspond à la moyenne des deux valeurs de saturation.

**Le pont de Wheatstone est maintenant correctement et précisément équilibré.**

## EXPERIMENTER POUR CARACTERISER LE CAPTEUR

### MESURE D'UN EFFORT ET VERIFICATION DE L'ETALONNAGE

- Modifier l'expression de  $F$  en fonction de  $s$  dans le programme Arduino d'après les résultats obtenus à la question 8. Penser à enregistrer puis à téléverser le programme dans la carte Arduino.
- Relancer une acquisition et, sans appliquer d'effort, noter la valeur asymptotique obtenue au bout de quelques minutes.
- Si cette valeur n'est pas négligeable en absence d'effort sur le capteur, la corriger en modifiant l'expression de  $F$  dans le programme (et téléverser le programme !).

*Ça y est, nous allons enfin exercer un effort sur le capteur !*



- Relancer une acquisition, puis exercer manuellement un effort sur le capteur au niveau du trou prévu dans le corps d'épreuve. Observe-t-on bien une évolution du signal en sortie ?

Q11. Quel est la direction associée à une valeur d'effort mesuré positive ? Ceci est-il en accord avec vos attentes ?

- Suspendre une masse connue (un objet que vous pesez précisément) à l'extrémité du capteur d'effort. La valeur lue sur le graphique est-elle pertinente ?
- Faire des relevés de l'effort mesuré pour différentes masses  $m$  accrochées au bout du capteur.

Q12. Tracer la **courbe d'étalonnage du capteur** :  $F$  en fonction de  $m$ . Est-elle bien linéaire, et correspond-elle à ce que l'on peut attendre du capteur ?

- Si la courbe obtenue n'était pas satisfaisante, corriger dans le programme Arduino la relation entre  $s$  et  $F$  pour obtenir une mesure satisfaisante d'après vos relevés expérimentaux.

Q13. Pour quelles raisons possibles est-il nécessaire d'effectuer cette correction ?

### ANALYSE DU SIGNAL NUMERIQUE DE SORTIE

La mesure visualisée sur les courbes dans Excel est une mesure discrète, issue d'un signal numérisé. On rappelle que la numérisation d'un signal implique deux discrétisations :

- Une discrétisation temporelle : **L'échantillonnage**
- Une discrétisation en amplitude : **La quantification**

Q14. Déterminer la fréquence  $f_e$  et la période  $T_e$  d'échantillonnage du signal mesuré.

Q15. L'amplitude de quantification en effort  $F_q$  est-elle détectable sur une courbe mesurée ? Si elle l'est, la relever en expliquant la procédure. Si elle ne l'est pas, donner l'amplitude de quantification théorique de la chaîne d'acquisition.

Dans le programme Arduino "TP\_capt\_eff.ino", on définit la variable  $s$  comme :

$s = \text{scale.read\_average}(4);$

Ce qui veut dire que  $s$  renvoyé à l'Arduino est une valeur moyenne sur 4 valeurs du signal mesuré. La fréquence de mesure du module HX711 est fixe, et est de 10Hz environ.

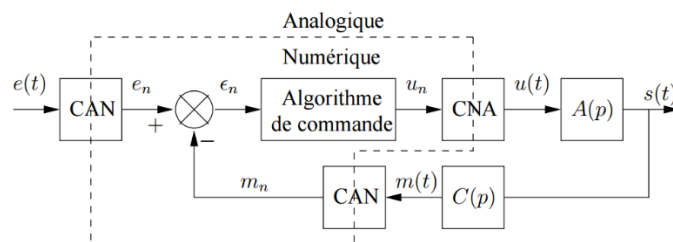
- Modifier la ligne en question pour que la valeur renvoyée corresponde à une seule mesure du module HX711.
- Q16. *Mesurer la nouvelle ou période d'échantillonnage. Y a-t-il bien un rapport 4 avec la valeur relevée précédemment.*
- Q17. *Expliquer quel peuvent être les avantages et inconvénients d'une mesure moyennée (sur 4 valeurs par exemple).*
- Q18. *Quel serait l'effet d'une fréquence d'échantillonnage trop faible (il est possible de tester en écrivant par exemple  $s = \text{scale.read\_average}(10)$  qui correspond en théorie à une mesure par seconde) ?*

## RESOLUTION ET PRECISION DU CAPTEUR

- Enlever toute masse présente sur le capteur. Lancer une acquisition (plus de moyenne sur les mesures, comme à la question 16), et laisser l'acquisition fonctionner pendant 5 minutes.
- Q19. *A partir de la courbe obtenue, évaluer la précision du capteur. Cette précision est-elle satisfaisante compte tenu de la gamme d'efforts mesurables par le capteur ?*
- Q20. *Rappeler la résolution en effort calculée à la question 2. Y a-t-il un écart entre la valeur de **précision mesurée** et celle de **résolution calculée** ? Expliquer la différence entre précision et résolution.*
- Q21. *Identifier les origines possibles de l'erreur de mesure du capteur. Comment pourrait-on améliorer la précision du capteur réalisé ?*

## CONCEVOIR L'INTEGRATION DANS UN SYSTEME ASSERVI

Un système physique fait toujours intervenir des grandeurs analogiques (une position par exemple). Si cette position est commandée par une transmission actionnée par un moteur électrique, l'ensemble de cette chaîne fonctionne en analogique. Le capteur (celui que l'on vient de réaliser par exemple) renvoie quant à lui un signal numérique. La commande du système est numérique. La structure d'un système asservi peut alors être décrite par le schéma-bloc suivant :



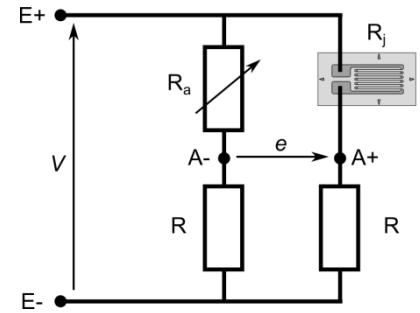
- Q22. *Si  $s(t)$  évolue linéairement ( $s(t)=t/4$  par ex.),  $C(p)=2$ , représenter l'allure de  $m(t)$ ,  $m_n(t)$ . On rappelle que le CAN effectue un échantillonnage ET une quantification.*
- Q23. *Si le signal numérique  $u_n$  évolue selon  $u_n(n.T_e)=2.n.T_e$  ( $T_e$  la période d'échantillonnage, et  $n$  un entier qui évolue au cours du temps). Représenter  $u_n(t)$  et  $u(t)$ . Expliquer quelles opérations sont à effectuer par le CNA (Convertisseur Numérique Analogique).*

Nous verrons dans un prochain TP comment se comporte un tel système à commande numérique.

## ANNEXE : REALISER UNE RESISTANCE AJUSTABLE FINE

## NECESSITE D'UNE RESISTANCE AJUSTABLE FINEMENT

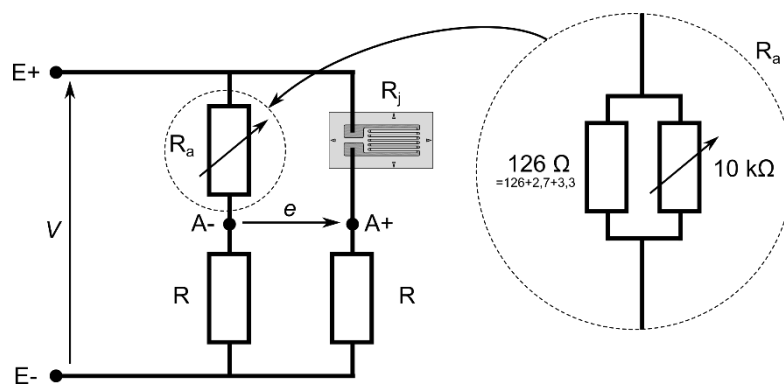
Dans le montage du pont de Wheatstone, les variations de résistance des jauges de déformation sont très faibles (quelques dixièmes d'Ohms). Or on montre dans le TP qu'il est nécessaire qu'en l'absence de déformations de la jauge, le pont soit équilibré :  $e = 0V$ .



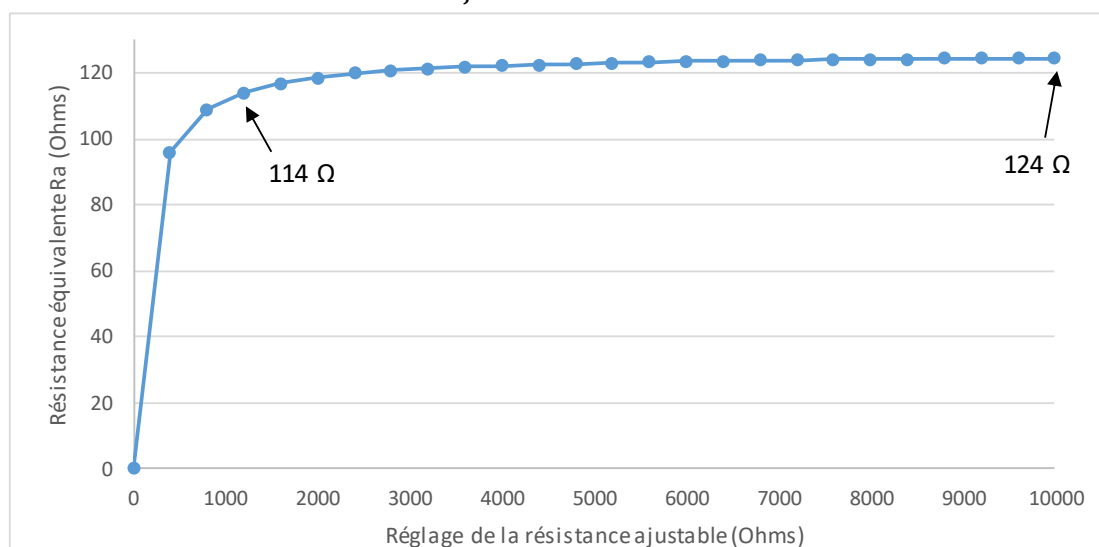
Pour cela, il est nécessaire de pouvoir régler le zéro du pont à l'aide d'une résistance ajustable finement. La résistance des jauges étant de  $120\ \Omega$  dans notre cas (cas courant), on souhaite donc avoir une **résistance  $R_a$  ajustable finement entre  $125$  et  $135\ \Omega$**  par exemple.

## REALISATION DE LA RESISTANCE

Il a ici été choisi de jouer sur la non-linéarité de la relation associée à deux résistances associées en parallèle pour obtenir cette la résistance souhaitée. Le montage remplaçant la résistance  $R_a$  est donc le suivant :



## COMPORTEMENT DE LA RESISTANCE AJUSTABLE FINE



**On obtient ainsi une résistance ajustable finement entre  $114$  et  $124\ \Omega$  environ.**

Nom :

## DOCUMENTS REPONSES

### ANALYSER LES CARACTERISTIQUES DU CAPTEUR ENVISAGE

Q1 : Gamme d'effort mesurable par le capteur :

Expression littérale :

Application numérique :

Q2 : Résolution en tension de la carte HX711 :

Carte Arduino :

HX711 :

Résolutions en effort associées :

Carte Arduino :

HX711 :

Est-il nécessaire d'utiliser le module HX711, et pourquoi ?

### REALISER LE CAPTEUR D'EFFORT ET SA CHAINE D'ACQUISITION

Q3 : Détermination de  $e$  en fonction de  $V$  :

Condition sur les résistances pour que lorsque  $\varepsilon_j=0$ ,  $e=0$  :

Q4 : Nécessité de l'équilibrage du pont de Wheatstone :

Q5 : Effet d'un déséquilibre du pont sur la gamme de mesure du capteur d'effort :

<p>Q6 : Valeurs s renvoyées par le module HX711</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>e = -20\text{mV} \rightarrow s =</math></li> <li>- <math>e = 0\text{V} \rightarrow s =</math></li> <li>- <math>e = +20\text{mV} \rightarrow s =</math></li> </ul>	<p>Q7 : Relation entre s et e :</p> <p><math>K_{\text{num}} =</math></p> <p><math>d =</math></p>
<p>Q8 : Relation théorique entre s et F : Expression littérale :</p> <p>Application numérique :</p> <p>F en fonction de s :</p>	
<p>Q9 : Cause de la variation des signaux observée :</p> <p>Préconisation pour les mesures ultérieures :</p>	
<p>Q10 : Pourquoi observe-t-on des saturations ?</p>	

## EXPERIMENTER POUR CARACTERISER LE CAPTEUR

Q11 : Direction associée à une valeur d'effort positive, et conformité aux attentes ?
Q12 : Courbe d'étalonnage du capteur :
Conclusions :



## CONCEVOIR L'INTEGRATION DU CAPTEUR DANS UN SYSTEME

Q22 : Allures de  $s(t)$ ,  $m(t)$  et  $m_n(t)$  :Q23 : Allures de  $u_n(t)$  et  $u(t)$ , et opérations à effectuer par le CNA :

## ANNEXE : DOCUMENTATION CONSTRUCTEUR DES JAUGES DE DEFORMATION UTILISEES

