

# Rapport BE Electronique : Projet Balance

Cameron Bray

Xavier Bourlot

3IMACS-AE-C  
30 mai 2020

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Calcul des paramètres du montage</b>	<b>2</b>
2.1	Rappel des spécifications . . . . .	2
2.2	Calcul des caractéristiques de l'amplificateur . . . . .	2
2.2.1	Calcul du gain différentiel . . . . .	2
2.2.2	Calcul du gain de mode commun ou CMRR . . . . .	2
2.2.3	Calcul des tensions d'offset . . . . .	2
2.3	Tableau récapitulatif des caractéristiques . . . . .	3
2.4	Choix des amplificateurs opérationnels . . . . .	4
2.5	Réglage du gain . . . . .	4
2.6	Filtrage de la sortie . . . . .	4
2.7	Réglage de la tare . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Schéma complet du montage</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Mesures de performance</b>	<b>5</b>
4.1	Linéarité de la balance seule . . . . .	5
4.2	Linéarité de la sortie . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>7</b>
<b>A</b>	<b>Annexes</b>	<b>8</b>
A.1	Montage sur plaque d'essai . . . . .	8
A.2	Données des mesures de linéarité . . . . .	9

# 1 Introduction

Ce projet consistait à concevoir une balance permettant de mesurer des masses avec une précision de 2g. Pour ce faire nous avons dû concevoir le schéma du circuit que nous avons utilisé et dimensionner ce circuit en prenant en compte un certain nombre de contraintes comme le CMRR et les tensions d'offset des amplificateurs opérationnels.

## 2 Calcul des paramètres du montage

D'après les spécifications, nous avons pu déterminer les valeurs des différentes résistances du montage ainsi que des contraintes sur les amplificateurs opérationnels utilisés.

### 2.1 Rappel des spécifications

- Etendue de mesure : 600g
- Précision : 1g
- Tension de sortie : 6V, soit ( $1g = 10mV$ )
- Temps de stabilisation de la sortie : 1s à 0,1% de la mesure
- Alimentation symétrique  $\pm 15VDC$
- Erreur de sortie liée aux offsets limitée à 5g
- Erreur de sortie liée au CMRR limitée à 2g

### 2.2 Calcul des caractéristiques de l'amplificateur

#### 2.2.1 Calcul du gain différentiel

La jauge de contrainte possède un gain en tension de  $0.9mV/V$  à pleine charge, soit 600g. Etant alimentée en 12V via un régulateur linéaire, elle fournit une tension différentielle de  $0.9mV/V/600g * 12V = 10.8mV/600g$  soit  $18\mu V/g$ . Or, on veut obtenir en sortie  $10mV/g$ . Le gain différentiel nécessaire est donc de  $\frac{10mV}{18\mu V} = 555.5$ . Pour limiter l'amplification du mode commun (cf paragraphe suivant), on décide de répartir le gain sur les deux étages de la manière suivante :

- Etage 1 :  $\sim 277$
- Etage 2 :  $\sim 2$

Ces valeurs sont indicatives, on utilisera les valeurs de résistances E24 les plus proches. L'étage 1 sera muni d'un potentiomètre pour régler plus finement le gain.

#### 2.2.2 Calcul du gain de mode commun ou CMRR

Après avoir calculé le gain différentiel, nous avons calculé le gain de mode commun. Nous voulons une erreur de mode commun inférieur à 20mV, sachant que gain en mode commun de l'étage 1 vaut 1.

$$A_{MC} * (E_1 + E_2)/2 < 20mV$$
$$\text{Or } E_1 + E_2/2 = 6V \Rightarrow A_{MC} < 20/6 = 3.33$$

Nous pouvons en conclure que l'amplification du mode commun du montage et donc de l'étage 2 est de 3.33. Ayant le gain de mode commun, nous pouvons déduire le CMRR global.

$$CMRR_{global} = 20 * \log(A_{diff}/A_{MC}) = 20 * \log(555/3.33) = 44.44dB$$

#### 2.2.3 Calcul des tensions d'offset

Nous avons déterminé ici la valeur de la tension de sortie due aux offsets des amplificateurs opérationnels. L'offset maximal se produit si les tensions V01 et V02 sont opposées.

Démontrez  $V_s = f(V_d, V_{MC}, V_{01}, V_{02}, V_{03})$  pour l'amplificateur d'instrumentation seul.

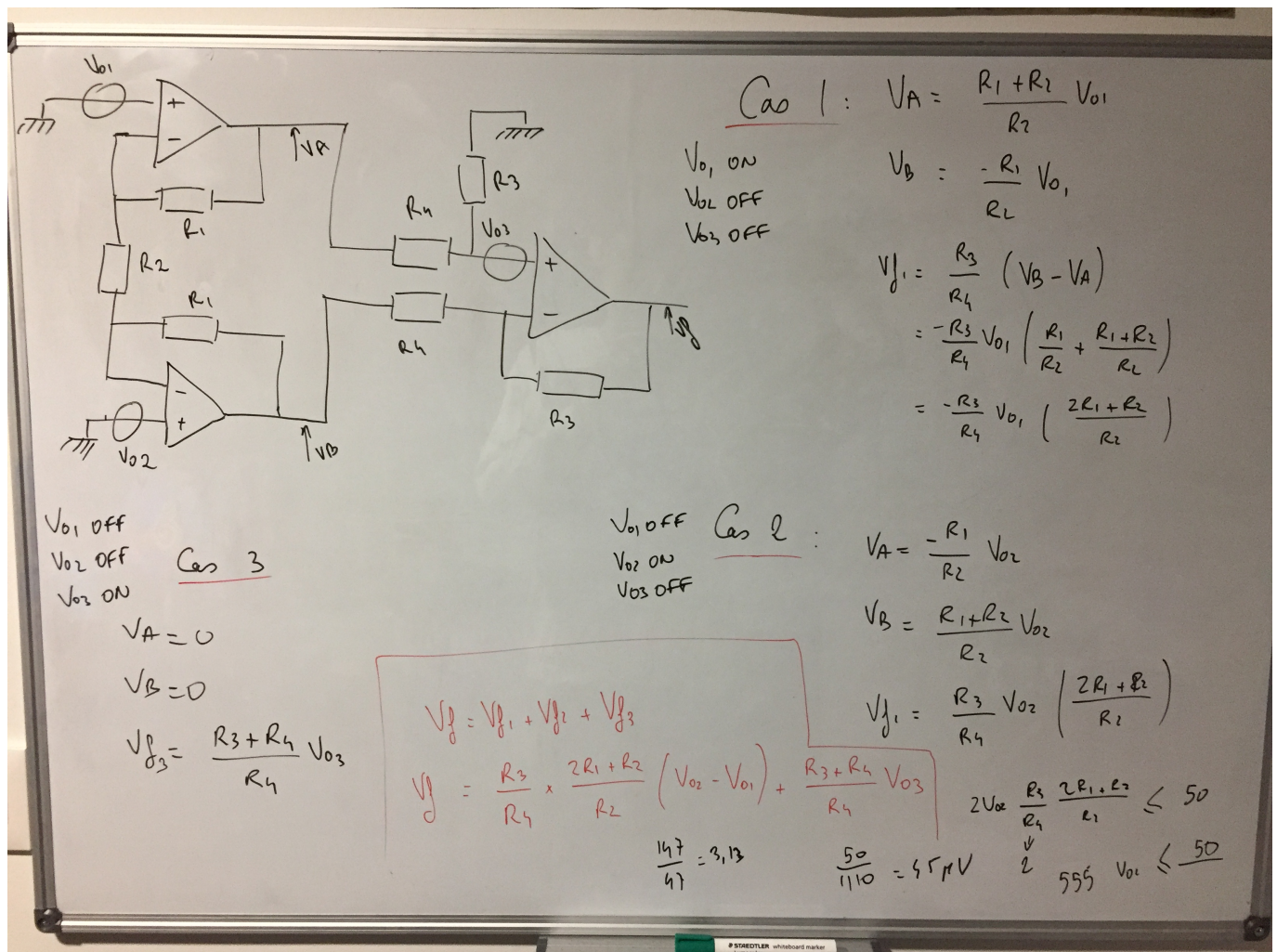


FIGURE 1 – Démonstration des valeurs d'offset

Sachant que nous cherchons à avoir un offset total de moins de 50mV, et que l'effet du gain du deuxième étage sur l'offset est négligeable devant celui du premier, nous pouvons déterminer les offsets maximums que peuvent avoir les amplificateurs. Dans notre cas, l'offset maximal du premier étage est de :

$$2 * V_{02} * \frac{R_3}{R_4} * \frac{2 * R_1 + R_2}{R_2} < 50mV \Rightarrow V_{02} < 0.045mV \text{ (voir valeurs de résistances chapitre 2.3)}$$

## 2.3 Tableau récapitulatif des caractéristiques

Les amplificateurs seront choisis en fonction des contraintes de CMRR et de tensions d'offset.

	Etage 1	Etage 2	Ampli complet
$Gain_{diff}$	277	2	555
$Gain_{modeCommun}$	1	3.33	3.33
$CMRR_{requis}(dB)$	0	44.44	44.44
$V_{offsetAOP}(mV)$	0.045	N/A	50

FIGURE 2 – Calcul des caractéristiques requises pour l'amplificateur d'instrumentation

On choisit des résistances dans une plage allant de quelques kΩ à quelques centaines de kΩ. Ainsi on limite les courants en jeu et on évite tout bruit généré par des résistances de valeurs élevées.

Pour atteindre ces valeurs de gain, nous choisissons les résistances suivantes :

$$G_{etage1} = \frac{2R_1 + R_2}{R_2} = 277 \Rightarrow R_1 = 150k, R_2 = 1.08k$$

$$G_{etage2} = \frac{R_3}{R_4} \approx 2 \Rightarrow R_3 = 100k, R_4 = 47k$$

## 2.4 Choix des amplificateurs opérationnels

Les calculs précédents posent des contraintes sur les tensions d'offset max de chaque ampli-op, ainsi que sur leur taux de réjection de mode commun. Un TL071 satisfait largement la demande en CMRR pour le deuxième étage ( $> 44dB$ ), comme l'on peut le voir sur la documentation du composant :

CMRR	Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICR(min)}$ $V_O = 0$ $R_S = 50 \Omega$	$T_A = 25^\circ C$	70	100	dB
------	-----------------------------	-----------------------------------------------------------	--------------------	----	-----	----

FIGURE 3 – CMRR du TL071

En revanche, les tension d'offset en entrée sont trop importantes pour les deux amplis-op du premier étage ( $> 45\mu V$ ) :

$V_{IO}$	Input offset voltage	$V_O = 0$ $R_S = 50 \Omega$	$T_A = 25^\circ C$	3	10	mV
			$T_A = \text{Full range}$		13	

FIGURE 4 – Offsets du TL071

Un offset de 10mV pour le deuxième étage est acceptable car il est faiblement amplifié (par 3 environ). On utilise donc un autre amplificateur pour l'étage d'entrée : le LT1097. Celui-ci possède une tension d'offset suffisamment petite :

$V_{OS}$	Input Offset Voltage		10	50	10	60	$\mu V$
----------	----------------------	--	----	----	----	----	---------

FIGURE 5 – Offsets du LT1097

On observera dans le pire des cas une erreur liée aux offsets de :

$$50\mu V * Gain_{diff} * 2 + 10mV * 3 = 85.5mV \text{ soit } 8.5g$$

En moyenne, l'erreur sera de :

$$10\mu V * Gain_{diff} * \sqrt{2} + 3mV * 3 = 16.8mV \text{ soit } 1.7g$$

## 2.5 Réglage du gain

La résistance R3, d'une valeur de  $1080 \Omega$ , fixe le gain de l'amplificateur. Dans le montage réel, cette résistance sera remplacée par un potentiomètre de  $1k\Omega$  en série avec une résistance fixe de  $500\Omega$ . L'intérêt d'introduire une résistance fixe est de limiter le gain maximum total lorsque le potentiomètre est en fin de course.

De plus, la faible valeur de potentiomètre permet un ajustement plus fin du gain par nombre de tours.

## 2.6 Filtrage de la sortie

On ajoute un filtre passe-bas en sortie du montage pour lisser la lecture sur le multimètre.

$R_{10}=10k\Omega$  et  $C_1=10\mu F$  d'où  $5\tau = 5 * 10k * 10\mu = 0.5s$

On note que  $R_{10} = 10k\Omega \ll 10M\Omega$  (impédance d'entrée du multimètre), pour limiter l'erreur causée par le filtre.

## 2.7 Réglage de la tare

On effectue le réglage de la tare via un potentiomètre, symbolisé par les résistances R8 et R9 sur le schéma. Placé entre les deux tensions d'alimentation, celui-ci permet de régler un potentiel proche de la masse, qui annule l'offset de la balance.

Il est important que ce potentiomètre présente une impédance de sortie faible face aux résistances du montage soustracteur, afin de ne pas le perturber. Cela impose le choix d'un potentiomètre d'environ  $2k\Omega$ , car  $2k\Omega \ll 100k\Omega$ .

Cependant, on peut regretter que le potentiomètre dissipe autant d'énergie alors que la place de réglage nécessaire est petite. Une solution employée ici est d'utiliser un amplificateur en mode suiveur qui permet d'utiliser un potentiomètre de plus grande valeur, sans perturber l'équilibre des deux branches.

### 3 Schéma complet du montage

Les amplificateurs figurant sur le schéma ne sont pas ceux choisis pour le design final.

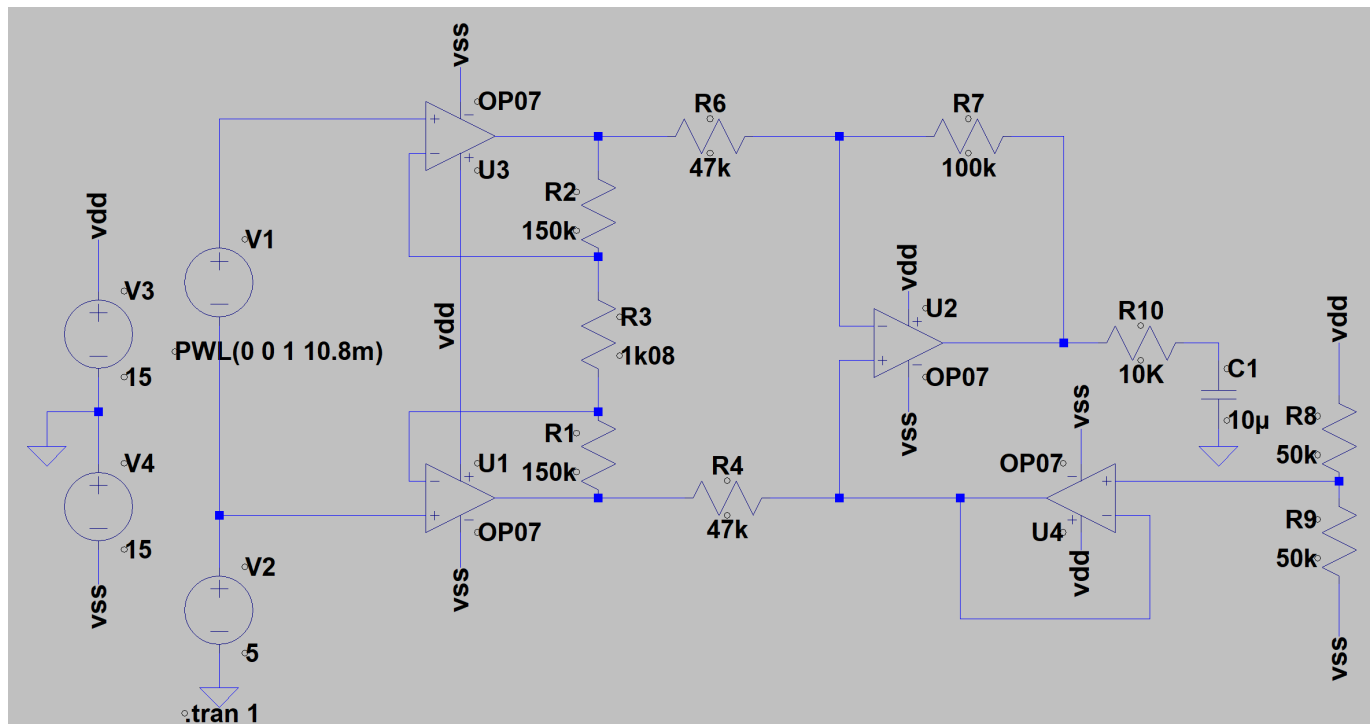


FIGURE 6 – Schéma du montage

### 4 Mesures de performance

Nous avons effectué quelques mesures afin de valider la performance de notre montage.

#### 4.1 Linéarité de la balance seule

On s'intéresse d'abord à la linéarité de la balance, afin d'identifier les sources d'erreurs propres à notre montage, et celles qui sont dues au capteur.

On obtient la réponse suivante en sortie de la jauge de contrainte :

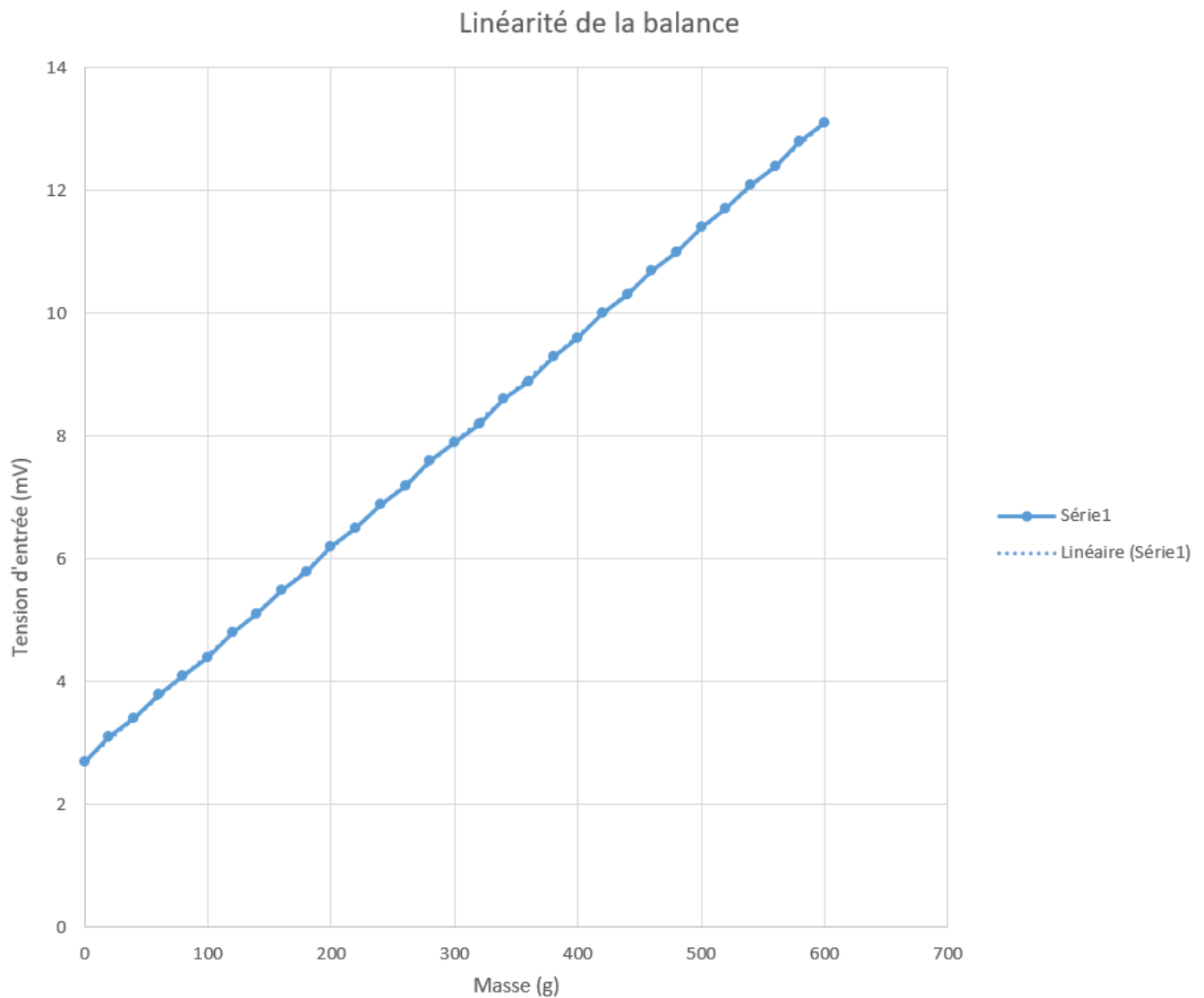


FIGURE 7 – Réponse de la jauge de contrainte

On observe la présence d'un offset d'environ 2.7mV à 0g, offset qui peut justement être calibré par le réglage de la tare implémenté.

La linéarité semble très bonne (cf droite de tendance ci-dessus), ainsi on peut supposer que toute erreur en sortie sera issue de notre montage et non du capteur lui-même.

## 4.2 Linéarité de la sortie

Nous avons répété le test en observant cette fois la tension de sortie.

On représente en orange la sortie théorique attendue en fonction de la masse (10mV/g), et en bleu les résultats expérimentaux.

## Linéarité de la sortie

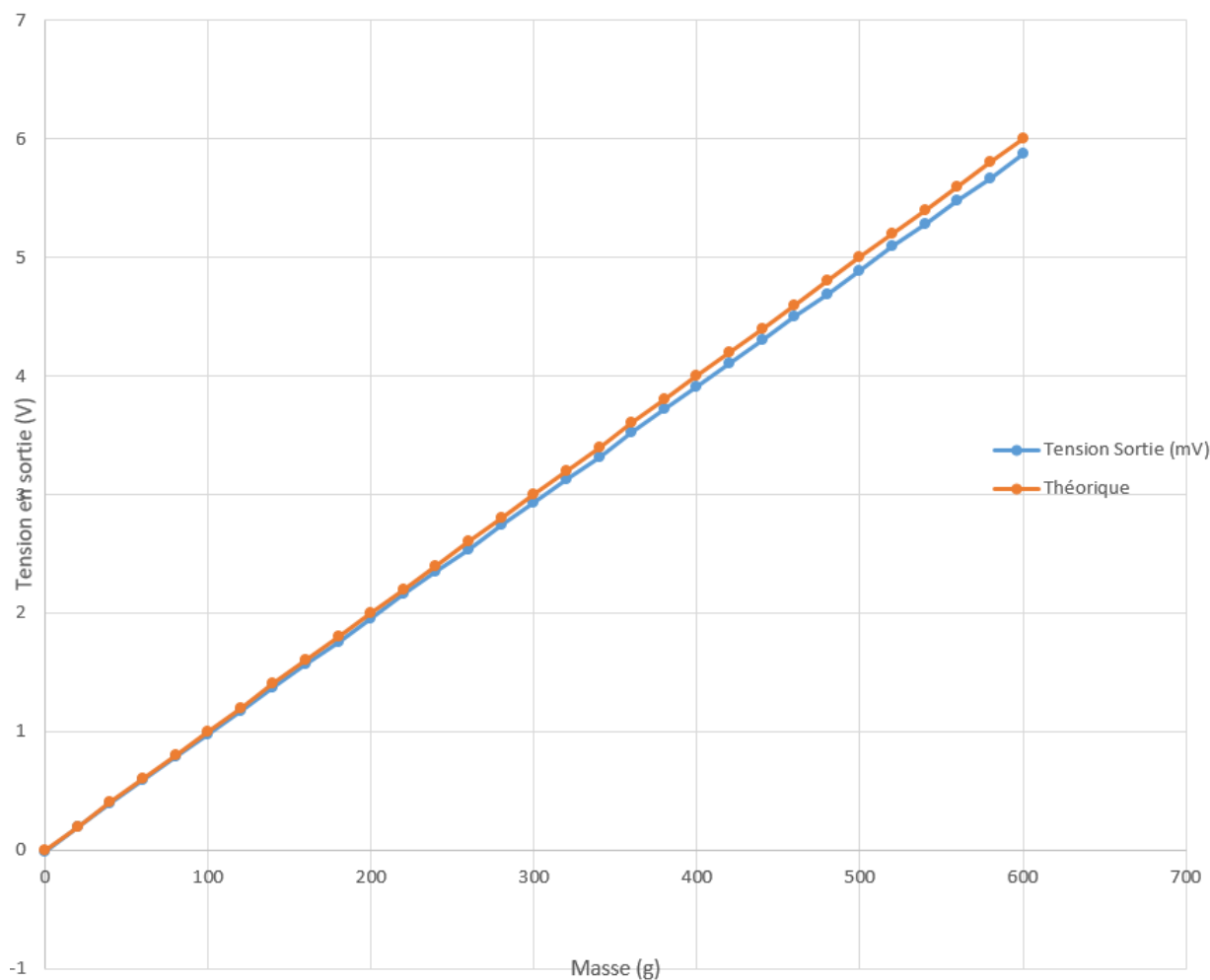


FIGURE 8 – Réponse de la jauge de contrainte

On observe une erreur de pente, de moins de 1.8%, soit 110mV pour 600g. Cette erreur est due à la calibration du gain, qui a été effectuée pour 200g. La précision de la calibration aurait été améliorée si le gain avait été ajusté à 600g. Une non-linéarité est également observable, la pente n'étant pas constante, mais ses effets sont négligeables. Ainsi, la balance semble tenir ses performances.

## 5 Conclusion

A travers cet exemple d'une balance électronique de précision, nous avons pu aborder des configurations d'amplificateurs d'instrumentation et prendre en considération des problèmes de précision : CMRR et offset, comme de coût. La réalisation, quoique bien simplifiée par la non-réalisation d'un affichage, a apporté une dimension concrète au projet, et nous a permis de valider les performances du montage.



## A Annexes

### A.1 Montage sur plaque d'essai

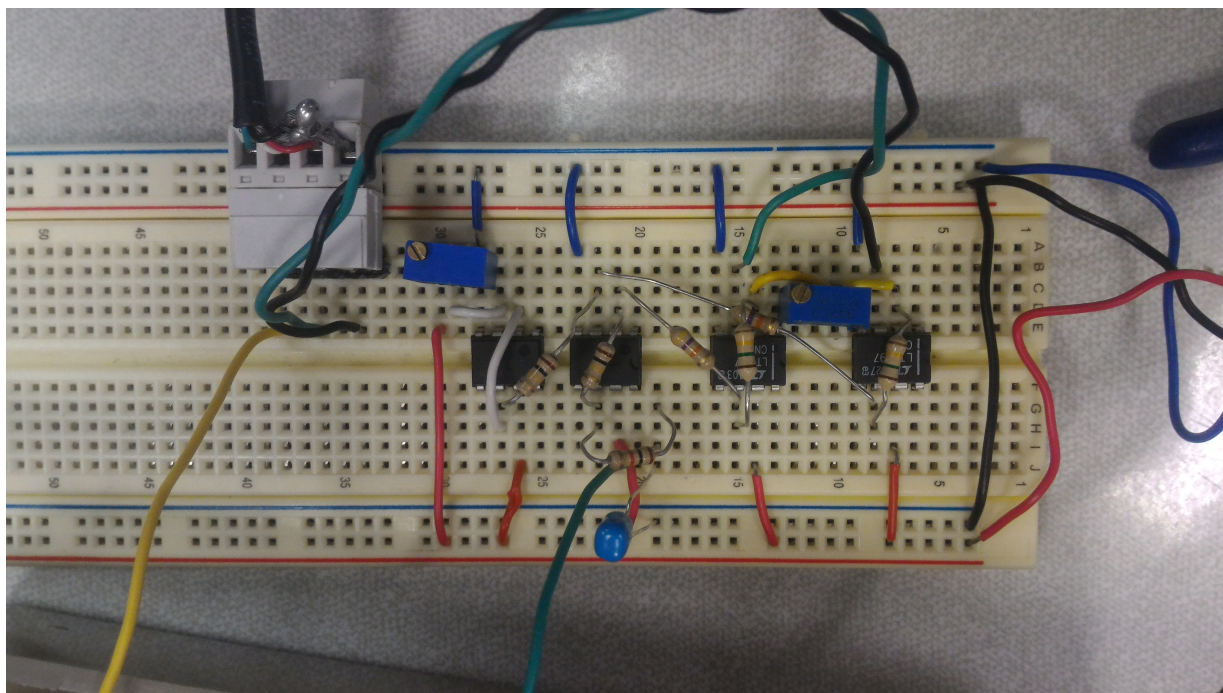


FIGURE 9 – Montage sur plaque d'essai



## A.2 Données des mesures de linéarité

Masse (g)	Tension jauge (mV)	Tension Sortie (mV)	Théorique (mV)
0	2.7	-0.01	0
20	3.1	0.196	0.2
40	3.4	0.392	0.4
60	3.8	0.587	0.6
80	4.1	0.783	0.8
100	4.4	0.978	1
120	4.8	1.174	1.2
140	5.1	1.37	1.4
160	5.5	1.565	1.6
180	5.8	1.76	1.8
200	6.2	1.958	2
220	6.5	2.16	2.2
240	6.9	2.35	2.4
260	7.2	2.54	2.6
280	7.6	2.74	2.8
300	7.9	2.93	3
320	8.2	3.13	3.2
340	8.6	3.32	3.4
360	8.9	3.52	3.6
380	9.3	3.72	3.8
400	9.6	3.91	4
420	10	4.11	4.2
440	10.3	4.3	4.4
460	10.7	4.5	4.6
480	11	4.69	4.8
500	11.4	4.89	5
520	11.7	5.09	5.2
540	12.1	5.28	5.4
560	12.4	5.48	5.6
580	12.8	5.67	5.8
600	13.1	5.89	6

FIGURE 10 – Données des mesures de linéarité