

TP 1 : Amplificateur d'instrumentation et application : « la balance électronique »

Le but de ce TP est :

- de définir le rôle et les caractéristiques techniques d'un amplificateur de différence de tension réalisé, soit par un montage simple à base d'un amplificateur, soit à base d'un amplificateur d'instrumentation.
- d'utiliser l'amplificateur d'instrumentation pour amplifier une différence de tension issue d'une balance commerciale afin d'en réaliser une courbe d'étalonnage.

Les photos ci-dessous illustrent la balance commerciale Terrailon (dont on a ôté le plateau pour visualiser le processus de mesure) et la maquette des deux amplificateurs.

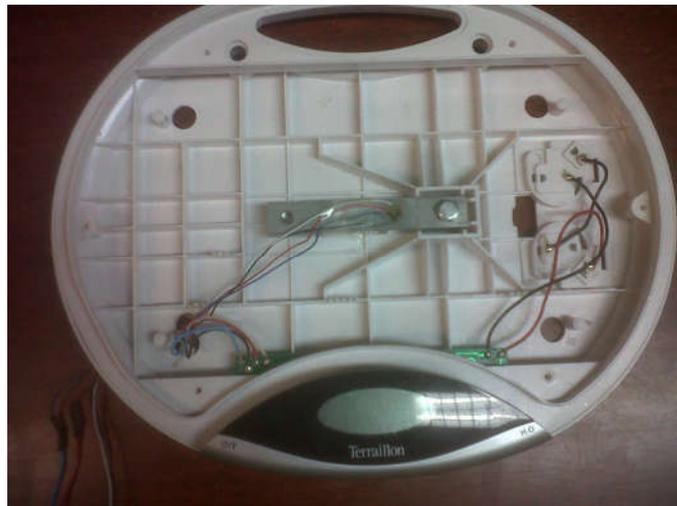


Photo 1 : Balance Terrailon quartz L



Photo 2 :Maquette des 2 amplificateurs de la Balance

L'annexe 1 présente la notice de la maquette.

Le déroulement du TP est le suivant :

- Simulation avec LTSPICE de l'amplificateur de différence réalisé à base **d'un amplificateur opérationnel** : mesures des gains, du taux de rejection de mode commun, des résistances d'entrée et de la bande passante du montage.
- Simulation avec LTSPICE **d'un amplificateur d'instrumentation** à trois amplificateurs : mesures des gains, du taux de rejection de mode commun, des résistances d'entrée et de la bande passante du montage.
- Simulation de la balance électronique commerciale et de son amplificateur d'instrumentation afin d'établir la courbe d'étalonnage (masse / tension de sortie)
- Comparaisons Simulation /Expérience grâce aux résultats de mesures donnés en annexe 3.

I Amplificateur de différence à un amplificateur opérationnel

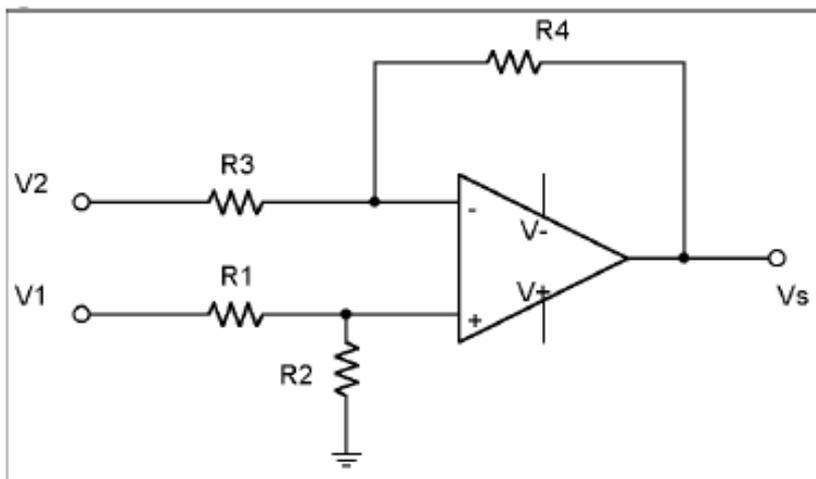


Figure 1: schéma électrique de l'amplificateur de différence

a) Cas idéal

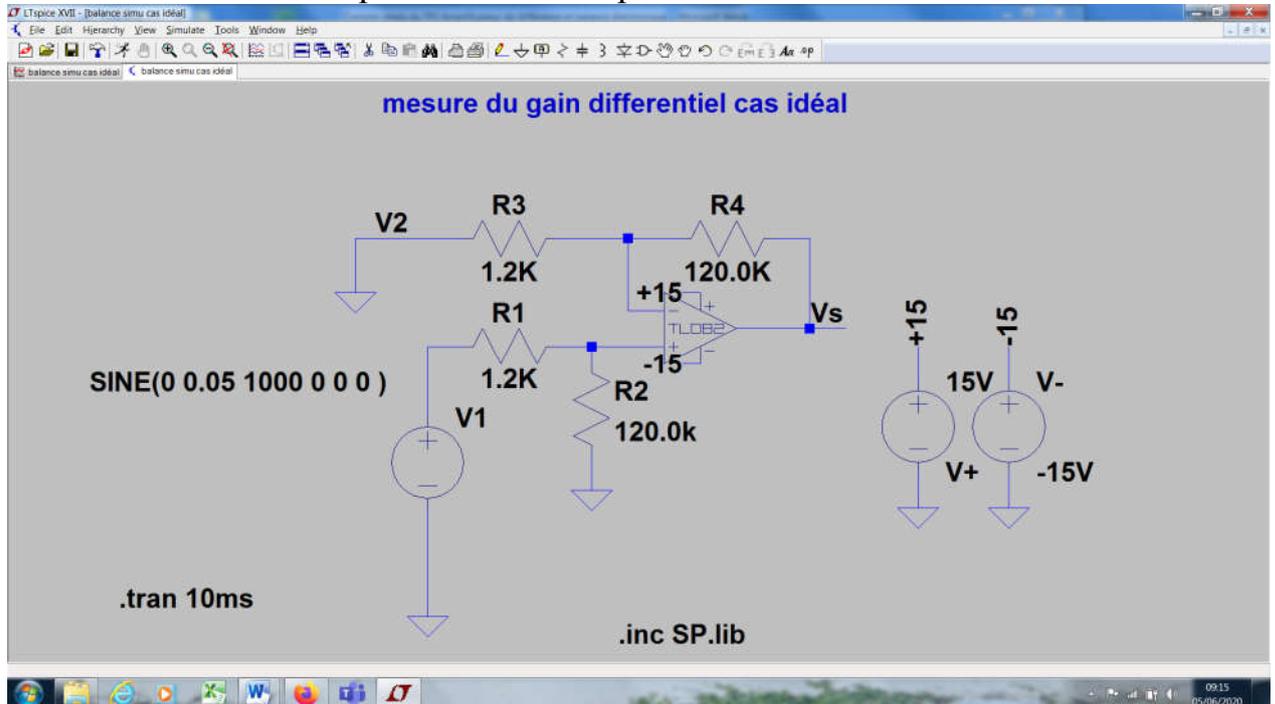
On posera $R1 = R3$ et $R2 = R4$ et on supposera que l'amplificateur opérationnel est parfait (Cas idéal). Trouvez la relation liant Vs en fonction des deux tensions d'entrée V1 et V2.

La relation est de la forme : $V_s = G_d (V_1 - V_2)$ (1).

- 1) Exprimer G_d en fonction de R2 et R1. On pose $R1 = 1.2 \text{ Kohms}$ et $R2 = 120 \text{ kohms}$. calculer G_d .

2) *Simuler le montage amplificateur de différence dans le cas idéal*

On utilisera l'amplificateur opérationnel TL082. On se place en mode sinusoïdal à une fréquence de 1 KHz pour V1 et V2 = 0 V.



Mesurer le gain Gd et comparer le avec la valeur théorique prévue.

On souhaite désormais définir le taux de rejection du mode commun (TRMC) (CMRR en anglais : Common Mode Rejection Ratio). On introduit les tensions V_{mc} et V_d respectivement tension de mode commun et tension différentielle définies ci-dessous :

$$V_{mc} = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad \text{et} \quad V_d = V_1 - V_2$$

On peut désormais écrire la tension V_s en fonctions des nouvelles entrées V_d et V_{mc} comme suit : $V_s = G_d V_d + G_{mc} V_{mc}$ (2)

3) En identifiant les relations (1) et (2) déduire le gain en mode commun G_{mc} dans le cas idéal.

Le taux de réjection du mode commun TRMC exprimé en décibel est défini par la relation suivante :

$$T_{RMC} = 20 \text{ Log} \left(\left| \frac{G_d}{G_{mc}} \right| \right)$$

4) Calculez le taux de réjection du mode commun du montage dans le cas idéal.

NB : Le terme « $G_{mc} V_{mc}$ » est non nul dans le cas réel et il entraîne des erreurs de mesure surtout si V_d est égal 1 mV et V_{mc} égal à 1.65V comme dans le cas de la balance commerciale.

b) Cas réel

Ce qui peut créer un terme « $G_{mc} V_{mc}$ » non nul est le fait que les résistances ne sont pas rigoureusement égales.

On posera $R_1 \approx R_3$ et $R_2 \approx R_4$ et on supposera que l'amplificateur opérationnel est parfait.

En fait, en raison des tolérances sur les composants (5%), l'égalité entre les résistances R_1 et R_3 d'une part et R_2 et R_4 d'autre part est irréalisable. On posera $x = \Delta R/R$ la tolérance pour chacune des résistances.

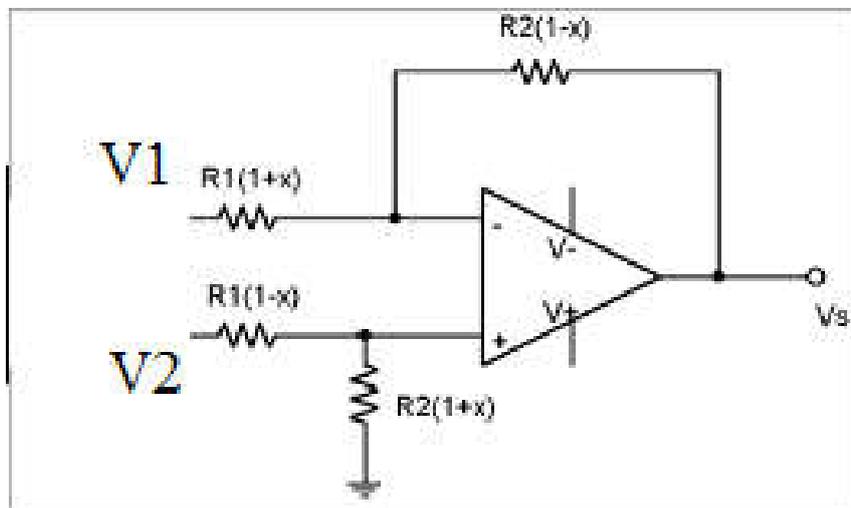


Figure 2: schéma électrique de l'amplificateur de différence compte tenu des dispersions sur les résistances.

- 5) Calculez dans le pire des cas, représenté sur la figure 2, le gain en mode commun G_{mc} . Pour cela, on se placera dans le cas $V_1 = V_2$.
d'où $V_s = G_{mc} V_{mc} = G_{mc} V_1$
Calculer V_s en fonction de V_1 grâce à la figure 2 et en déduire G_{mc} . On utilisera l'approximation suivante ($x \ll 1$) en fin de calcul. On supposera G_d inchangé.

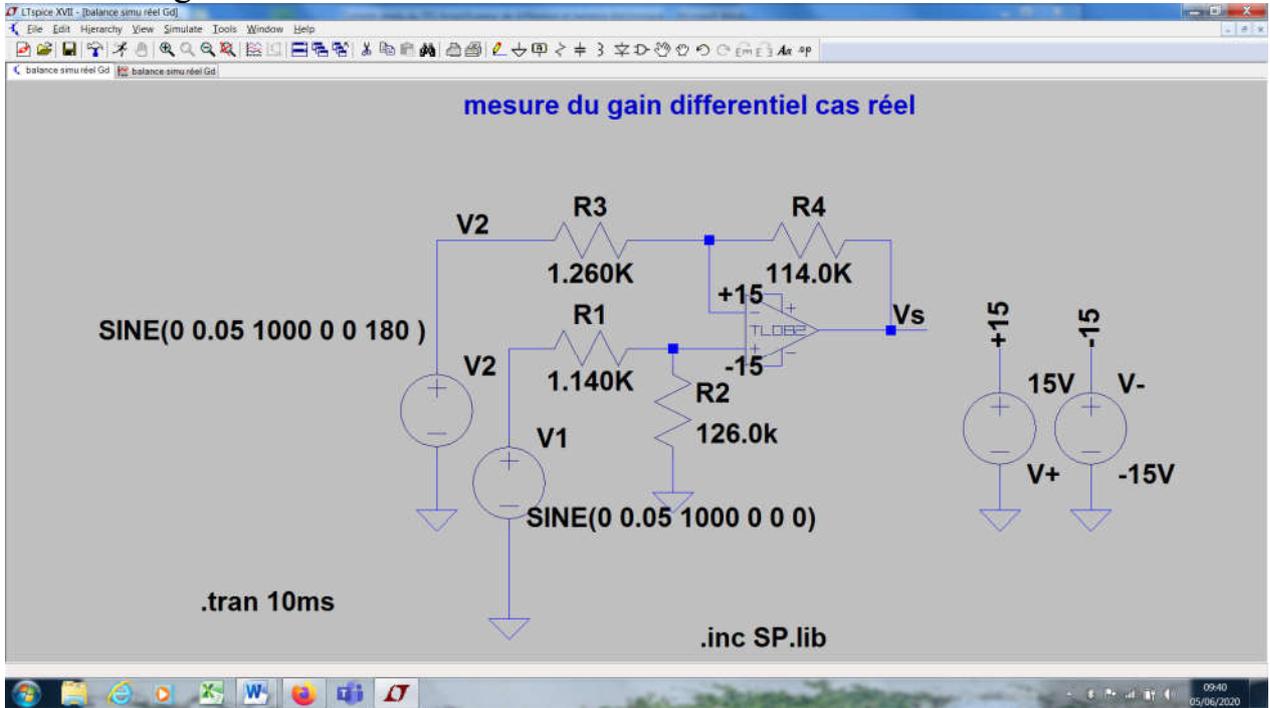
Vérifier que vous trouvez le résultat suivant :

$$G_{mc} = 4x * G_d / (G_d + 1) \quad (3)$$

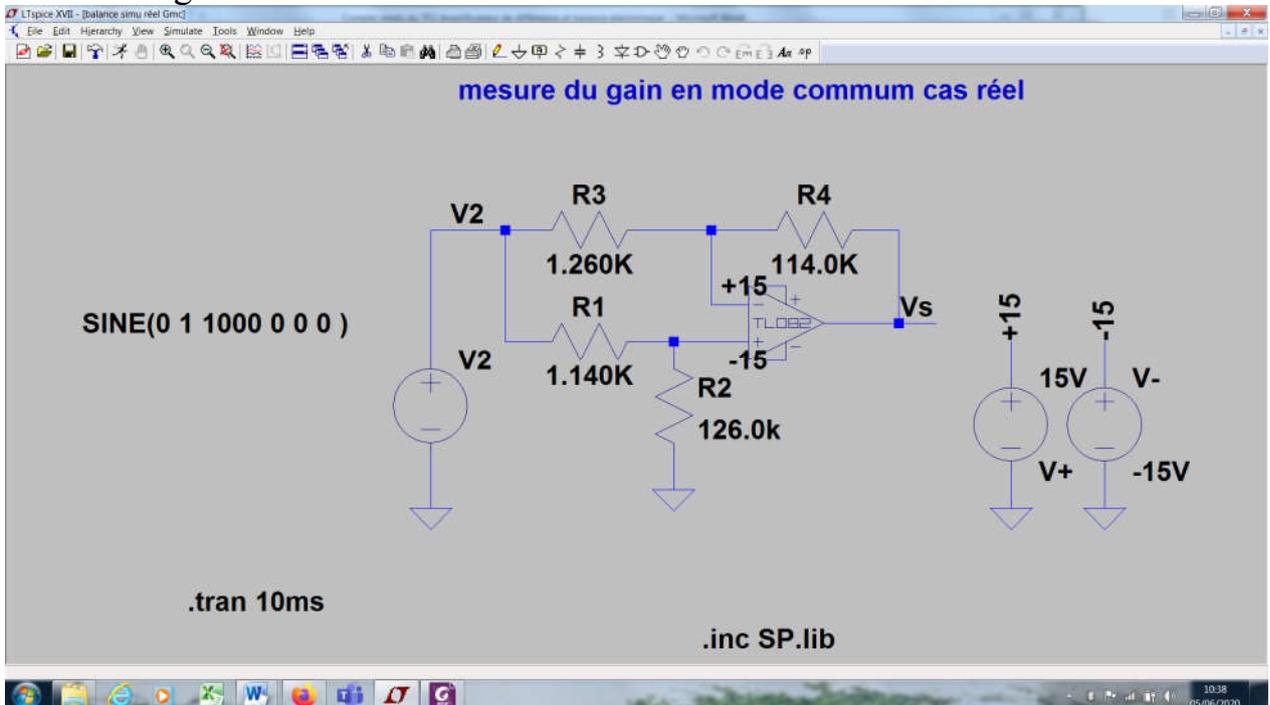
- 6) Exprimer et calculer le nouveau taux de réjection du mode commun TRMC de ce montage pour $x = 0.05$. Calculer et conclure quant à l'erreur de mesure « $G_{mc} V_{mc}$ » par rapport à « $G_d V_d$ » terme utile de la balance.(on pose $V_d = 1\text{mV}$ et $V_{mc} = 1.65\text{V}$)

7) *simuler le montage amplificateur de différence dans le cas réel.*

Mesure du gain différentiel



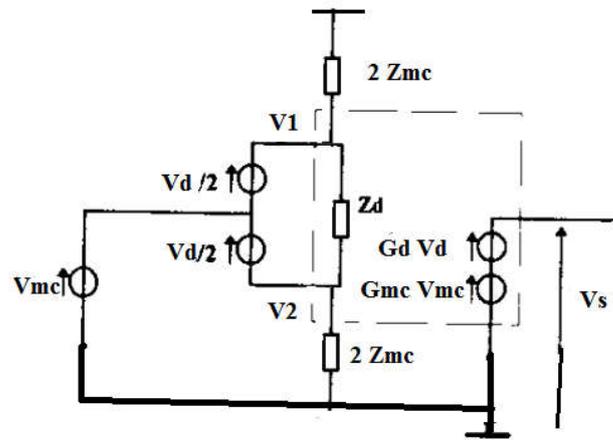
Mesure du gain en mode commun



En déduire le TRMC. Comparez le taux de réjection en mode commun trouvé par la simulation à la valeur théorique (question 6) compte tenu de la tolérance des composants. Conclure.

8) mesures des impédances d'entrée

Le schéma équivalent de l'amplificateur différentiel est donné ci-dessous :

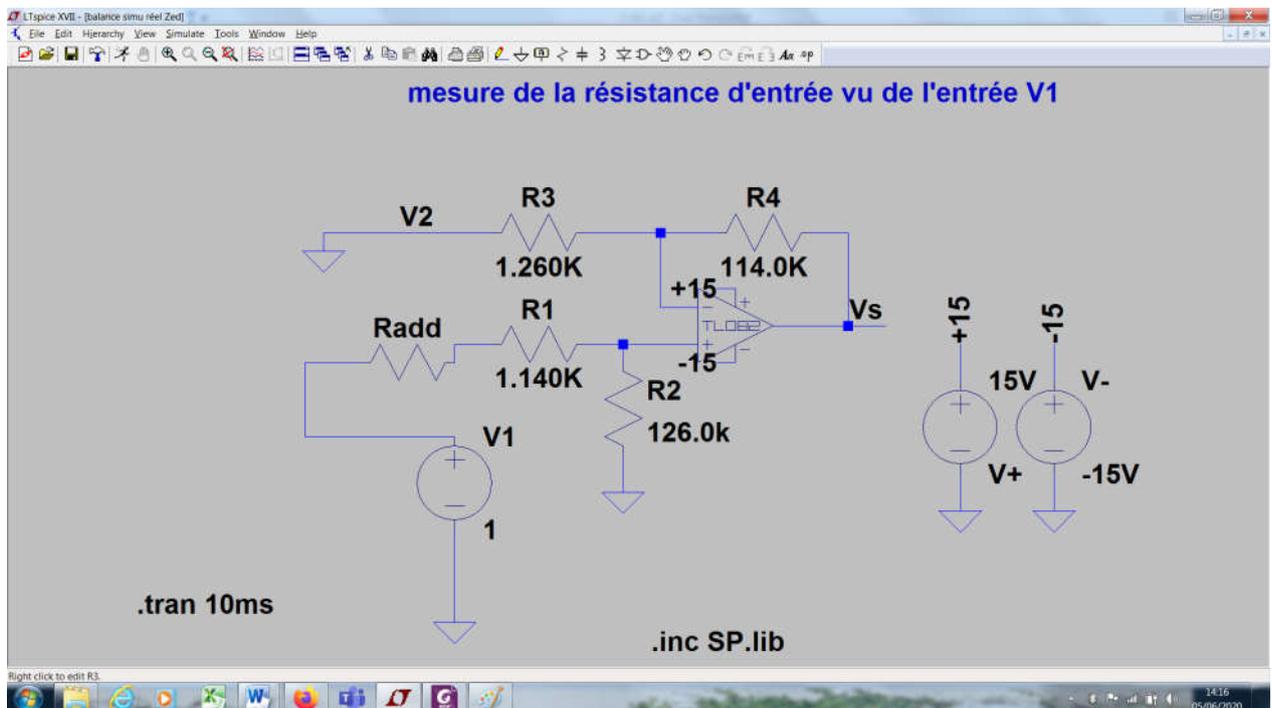


Modèle équivalent de l'amplificateur d'instrumentation (Ampli. Différentiel)

On mesure l'impédance d'entrée vue de l'entrée 1 d'une part ($V_2 = 0$) et d'autre part l'impédance d'entrée vue de l'entrée 2 d'autre part. Elles doivent être infinies et égales.

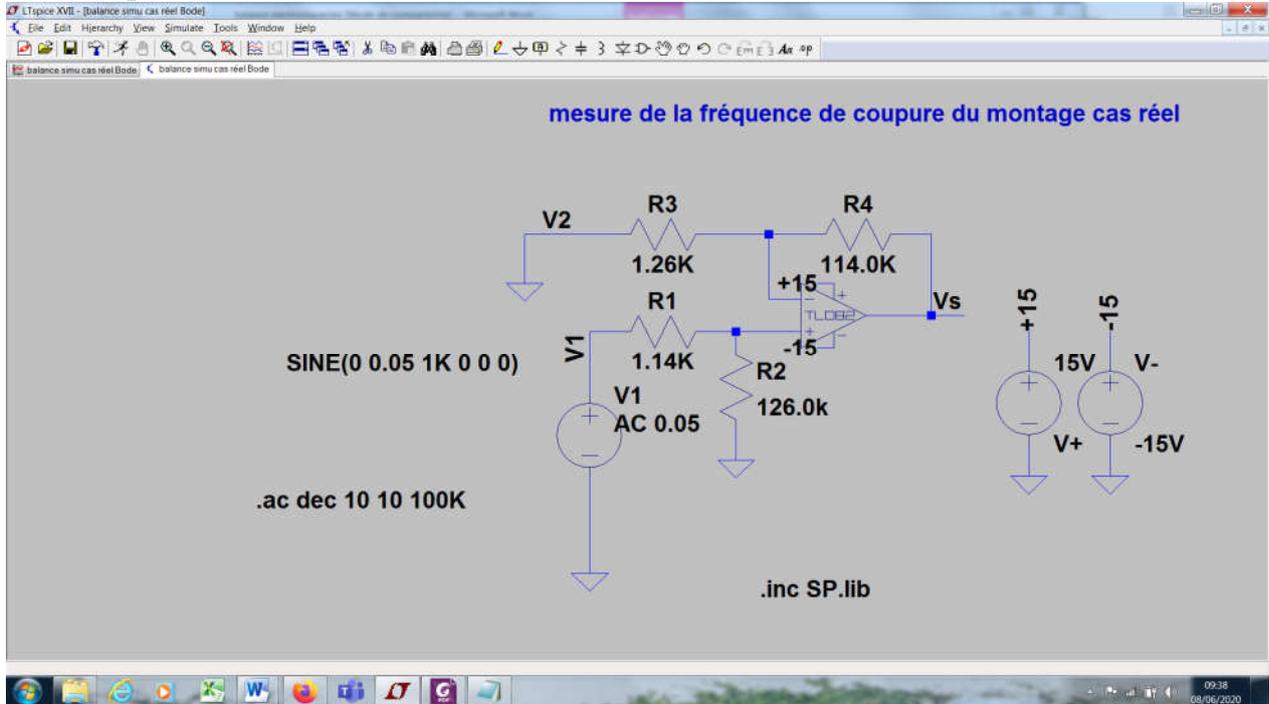
Faites les deux simulations et conclure.

Pour cela on rajoute R_{add} en série avec le générateur d'entrée dont on varie la valeur jusqu'à ce que la tension après R_{add} soit égale à la moitié de la tension avant R_{add} .



9) **mesure de la fréquence de coupure de l'amplificateur différentiel (filtre passe bas)**

Placer V2 à la masse et connecter sur V1 un générateur sinusoïdal. Faites varier la fréquence de ce générateur et tracer le diagramme de Bode en gain et en phase de l'amplificateur. *Faites la simulation*



On obtient un filtre passe bas de fréquence de coupure f_c pour lequel le gain est atténué de -3db .

Mesurez la fréquence de coupure du montage. A l'aide du produit (gain * f_c) donné par la documentation technique du TL082(gain bandwidth product), comparez votre mesure à la fréquence de coupure théorique.

10) Compléter le tableau dans l'annexe 2.

11) Conclure sur les avantages et inconvénients d'un tel montage dans le cadre de l'application Balance.

A la place de l'amplificateur de différence on étudie désormais l'amplificateur d'instrumentation.

II Amplificateur d'instrumentation à trois amplificateurs : INA 114

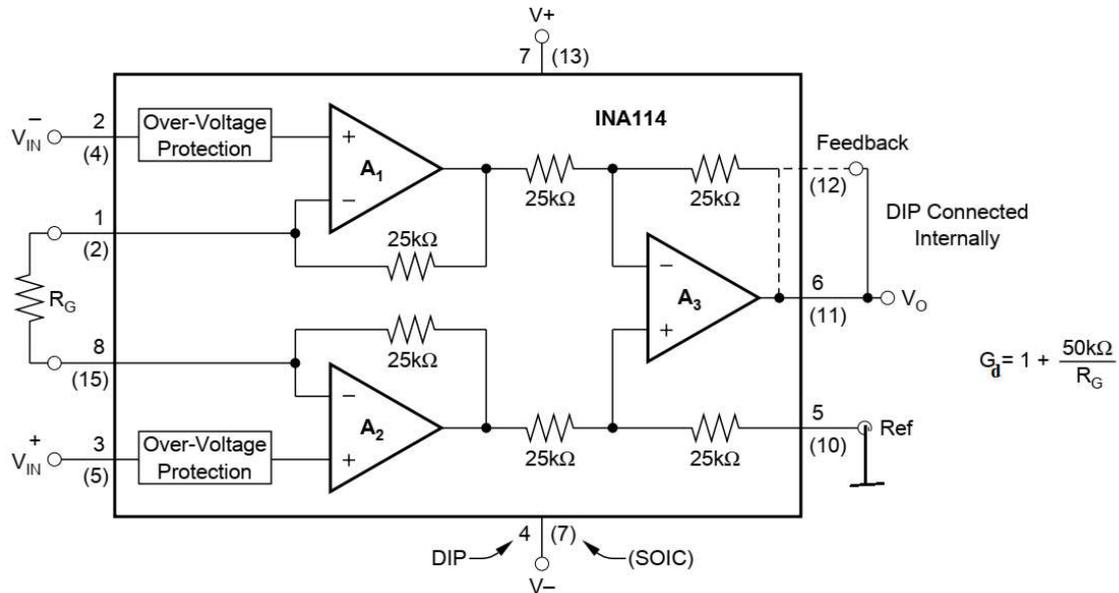


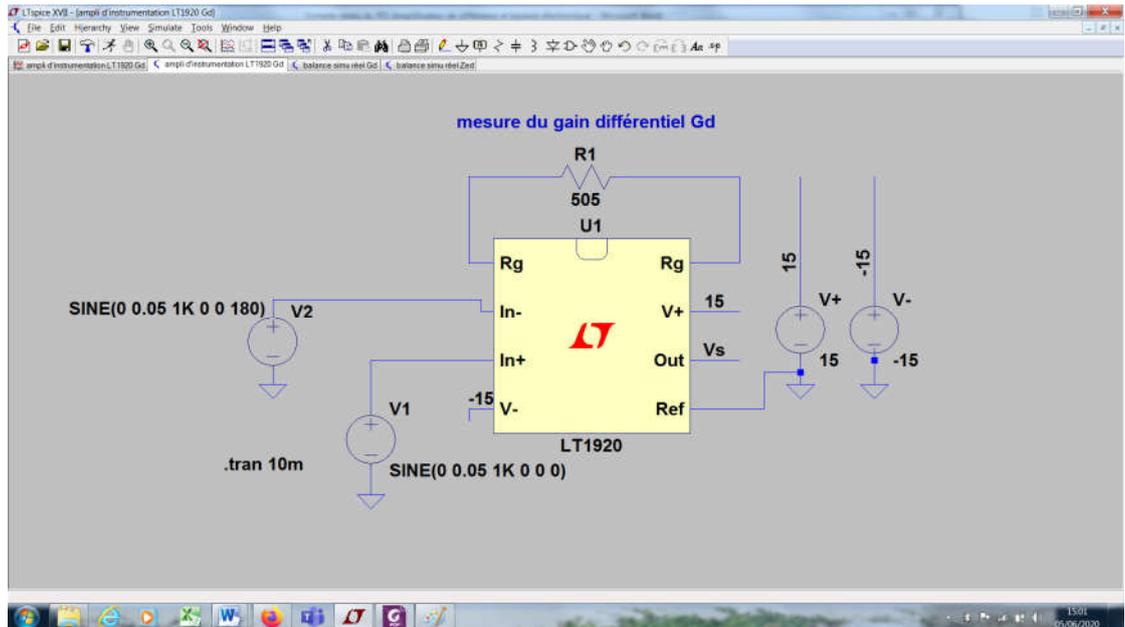
Figure 3: schéma électrique de l'amplificateur d'instrumentation à trois amplificateurs (INA 114)

- 1) A l'aide de la figure 3, déterminer quels sont les éléments extérieurs et intérieurs au circuit intégré.
- 2) Grâce à la figure 3 démontrer que $V_s = G_d (V_1 - V_2)$ avec

$$G_d = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G}$$

Pour un gain G_d égal à 100 calculer R_g ? Le gain en mode différentiel est-il facilement ajustable ? Les impédances d'entrées vues de V_1 (V_{in+}) et de V_2 (V_{in-}) sont-elles infinies et égales ?

- 3) *refaites les simulations* pour l'amplificateur d'instrumentation permettant de mesurer le gain différentiel, le gain en mode commun, les impédances d'entrée et la fréquence de coupure f_c du montage. On prendra un amplificateur d'instrumentation équivalent au INA 114 : **LT1920** (dont on dispose le modèle LTSPICE).



Exemple de simulation pour la mesure du gain différentiel.

- 4) Comparez toutes ces valeurs à celles données dans la documentation technique et compléter le tableau de l'annexe 2.
- 5) Conclure sur les avantages et inconvénients d'un tel montage pour l'application « Balance ».
- 6) Comparer les deux montages « Amplificateur de différence et amplificateur d'instrumentation ». Conclure .
- 7) Comparer les prix des deux composants : <https://fr.rs-online.com>

III Application : la balance électronique

1) principe

Sur la photo 1 de la balance apparaît une barre métallique (poutre) appelé corps d'épreuve. Lorsque l'on place une masse sur la poutre, cette dernière est contrainte et se déforme dans le sens de la longueur en s'affaissant.

Une jauge de contrainte collée sur la « poutre » permet de mesurer cette déformation. La jauge de contrainte est un capteur résistif ($R_0 + \delta R$) et est câblée dans un pont de Wheasthone selon la figure 4.

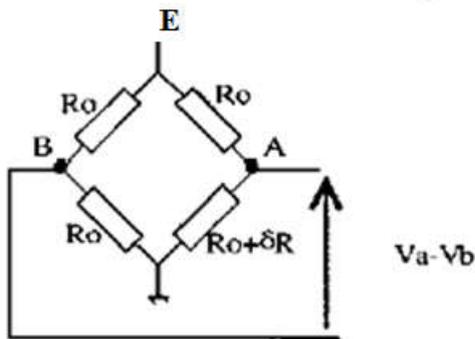


Figure 4: schéma électrique du pont de Wheastone ($E = 3.3 V$ $R_0 = 120 Ohms$ $\delta R = k \cdot m$)

En posant une masse sur la poutre, on obtient en sortie du pont de Wheastone une tension ($V_a - V_b$) proportionnelle à la masse mesurée. C'est le principe de mesure de la balance électronique.

On admet que :

$$V_a \approx E/2 + E\delta R / 4R_0 \text{ et } V_b = E/2$$

Avec $\delta R \ll 1$

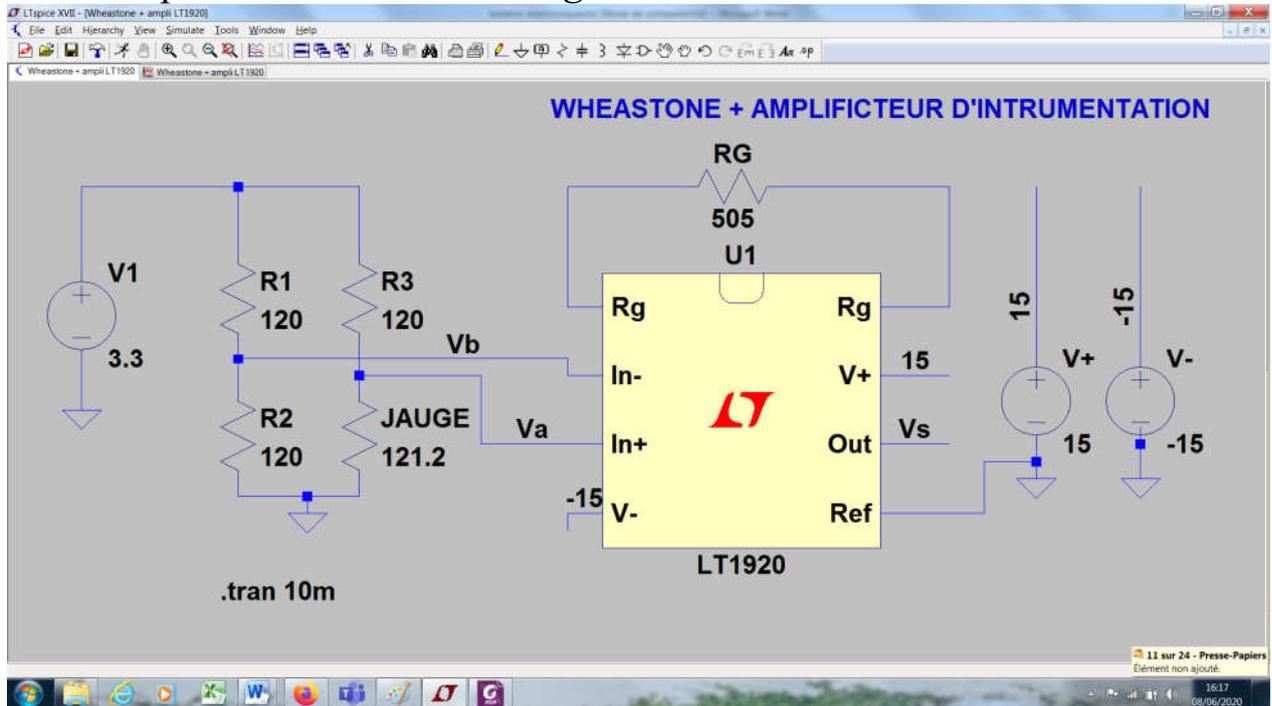
2) Calculer $V_d = V_a - V_b$ dit terme utile à la mesure. Est-il proportionnel à la masse m ? Pour $m = 1 \text{ kg}$, $V_d = 8.95 \text{ mV}$. Déterminer k . Comme V_d est de l'ordre du mV, il faudra amplifier cette tension.

3) Calculer $V_{mc} = (V_a + V_b)/2$ dit terme d'erreur. Conclure

Sachant que la tension en mode commun V_{mc} est très importante devant la tension différentielle V_d , un **amplificateur d'instrumentation** est indispensable pour amplifier V_d afin de diminuer le terme d'erreur « $G_{mc} V_{mc}$ » dans la mesure de la masse m .

4) *Faites la simulation du montage complet Pont de Wheastone + amplificateur d'instrumentation.*

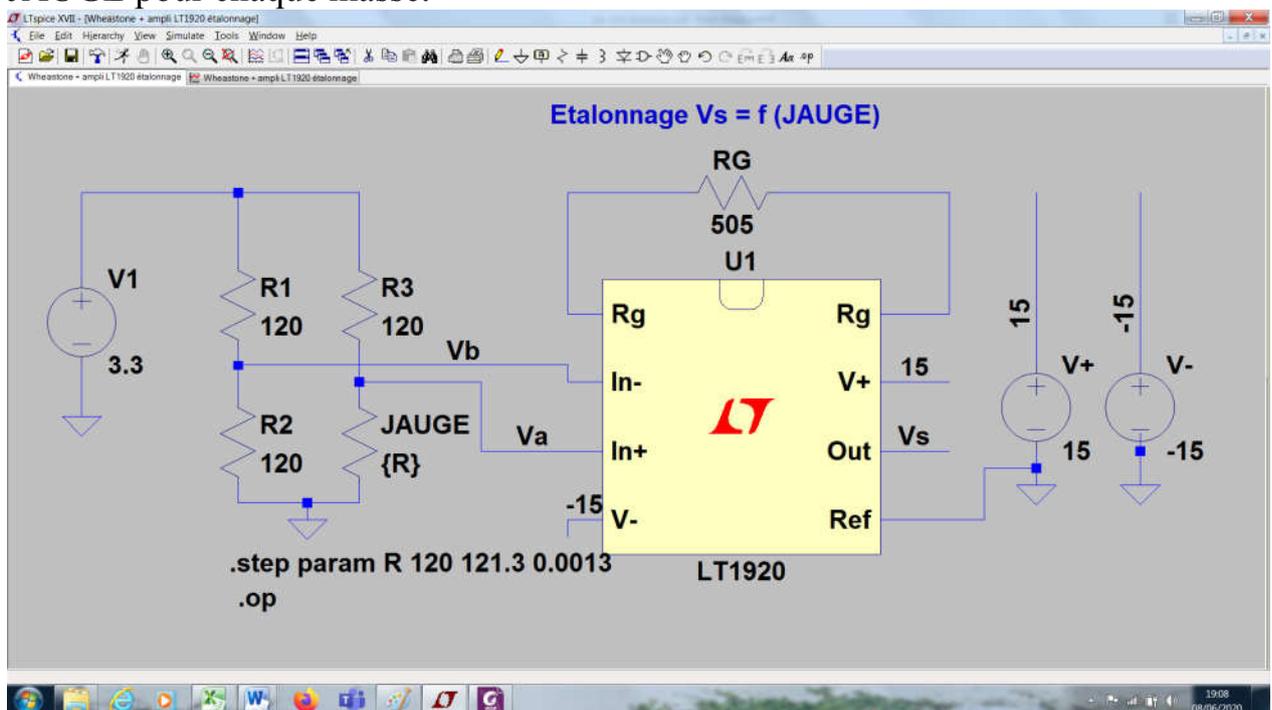
On pose $k = 1.302 \cdot 10^{-3} \Omega/g$



Donnez la valeur V_s tension de sortie de l'amplificateur d'instrumentation LT1920 pour une masse posée sur la balance égale à 1kg.

Tracez la caractéristique $V_s = f(m)$ pour m variant de 0 à 500g.

Déterminer l'expression mathématique : $V_s = f(m)$. Il faut calculer la valeur de JAUGE pour chaque masse.



Dans l'annexe 4, se trouvent les données expérimentales relevées par un binôme d'étudiants.

Comparer les résultats de simulation et leurs données expérimentales en traçant les graphes sous Excell. Conclure. Quelles sont les erreurs de mesures ?

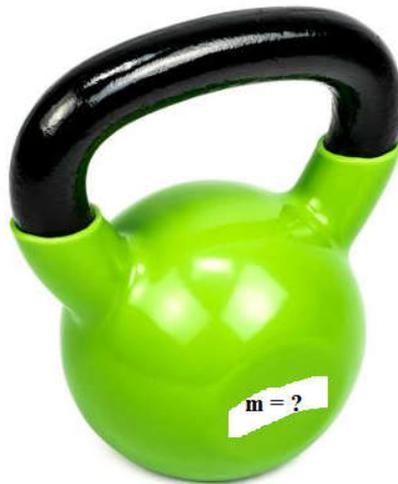
5) Incertitudes de mesure

Déterminer les différentes sources d'incertitudes (opérateur, instruments de mesure, grandeurs d'influence...) et classer les en deux catégories : erreurs aléatoires et erreurs systématiques.

Cherchez la cause de ces erreurs. Proposez et mettez en œuvre des solutions permettant de diminuer ces erreurs ou de les estimer.

6) Ecriture du résultat de mesure d'un objet de masse inconnue

Un objet de masse inconnue est posé sur la balance au centre par le même binôme d'étudiants. Le Voltmètre donne la valeur de V_s égale à 1.002 V.



Objet de masse inconnue

Quelle est la masse de l'objet pesé ? Donner son incertitude en ne considérant que l'erreur sur le Voltmètre. Ecrire le résultat de façon cohérente en respectant le nombre de chiffres significatifs.

Facultatif : Pour aller plus loin Bibliographie :

*La maîtrise du Pesage Peser correctement avec des balances de laboratoire Mettler Toledo
<https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=La+maitrise+du+Pesage+Peser+correctement+avec+des+balances+de+laboratoire+Mettler+Toledo+fr.mt.com>

*Comment choisir votre instrument de pesage ?

<https://www.mesurez.com/choisir-balance-professionnelle.html>

* Jauges de contraintes ou capteurs à compensation électromagnétique

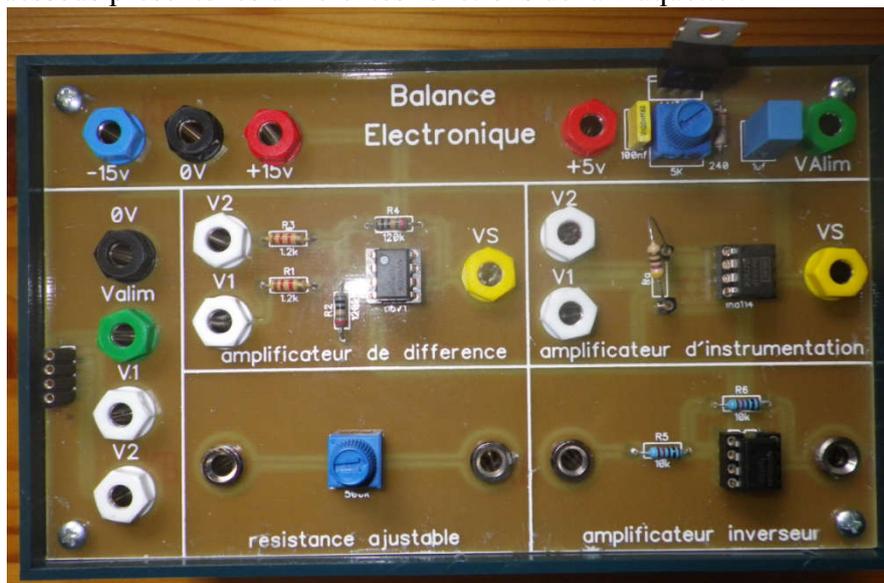
<https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=jauges+de+contraintes+ou+compensation+electromagnetiques>

Annexe 1 : Notice de la maquette Amplificateurs

Cette maquette permet :

- dans un premier temps d'étudier deux types d'amplificateurs différentiels : amplificateur de différence à base d'un amplificateur opérationnel TL071 et l'amplificateur d'instrumentation à base de l'INA 114.
- puis dans un deuxième temps de réaliser une balance électronique en amplifiant par l'INA 114 une différence de tension issue d'un pont de Wheastone à 1 jauge de contraintes.

La photo ci-dessous présente les différentes fonctions de la maquette :



-les alimentations **-15V** **0V** et **+15V** des amplificateurs.

-l'alimentation **Valim** du pont de Wheastone réalisée à partir du **5V** et du régulateur LM 311. Le potentiomètre de 5 K permet d'ajuster Valim à une valeur de 3.3 V.

- le bloc « **amplificateur de différence** » : il comporte deux entrées **V1** et **V2** et une sortie **Vs**. Son schéma électrique est donné dans la figure 1

-le bloc « **amplificateur d'instrumentation** » : il comporte deux entrées **V1** et **V2** et une sortie **Vs**. Son schéma électrique est donné dans la figure 3

-le bloc « **résistance ajustable** » : c'est une résistance variable de 0k à 500K. Elle peut être utilisée pour réaliser une mesure d'impédance d'entrée de l'amplificateur de différence.

-le bloc « **amplificateur inverseur** » : il comporte une entrée et une sortie.

- le bloc « **connectiques du pont de Wheastone** » : il permet de relier à la maquette les quatre bornes du pont de Wheastone (tensions d'alimentation : **valim (fil rouge)** , **0V(fil blanc)** et les potentiels de mesures **V1(fil bleu)** , **V2(fil noir)**). Le pont de Wheastone est issu d'une balance de cuisine commercialisée sous la marque « Terrailon quartz L » dont le schéma électrique est disponible sur la figure 4.

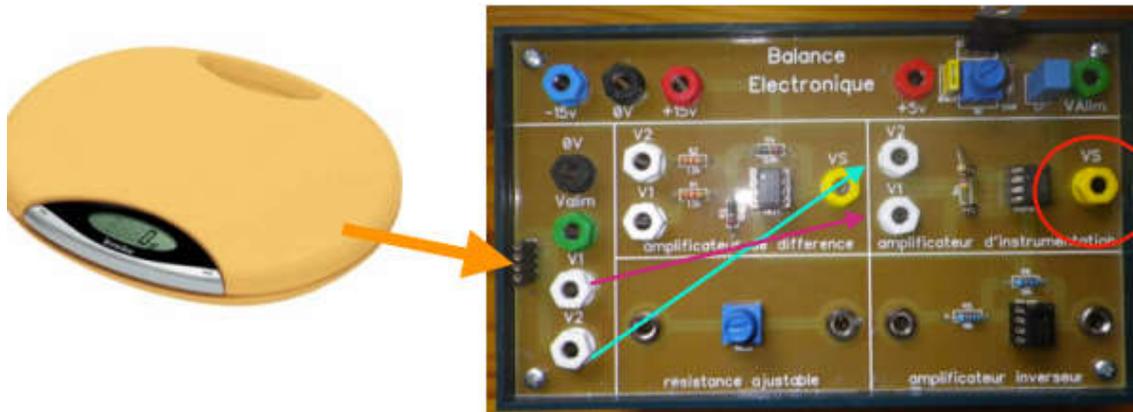
ANNEXE 2 : Bilan des résultats de la simulation et de la documentation technique.

	Ampli différence simulation	Ampli différence valeur attendue	LT1920 simulation	LT1920 Valeur attendue
Gd gain différentiel				
Gmc Gain en mode commun				
TRMC Taux de rejection en mode commun				
Rin1 et Rin2 Impédances d'entrée				
Fréquence de coupure à -3db				
Prix				

Annexe 3 : Compte rendu de TP : mesures expérimentales de Mrs GARRABE et SENET

Partie 4 : Poids mystère : Balance électronique

Pour cette manipulation, nous allons mesurer la différence de potentiel à la sortie d'une balance (Terraillon Quartz L) en la branchant à notre AOP d'instrumentation INA 114 pour trouver la masse d'un « poids mystère ».



On choisit un gain de 100 pour amplifier la mesure de la balance.
On s'aide à nouveau de la relation donnée par le constructeur et on donne $R_g = 505 \text{ Ohms}$



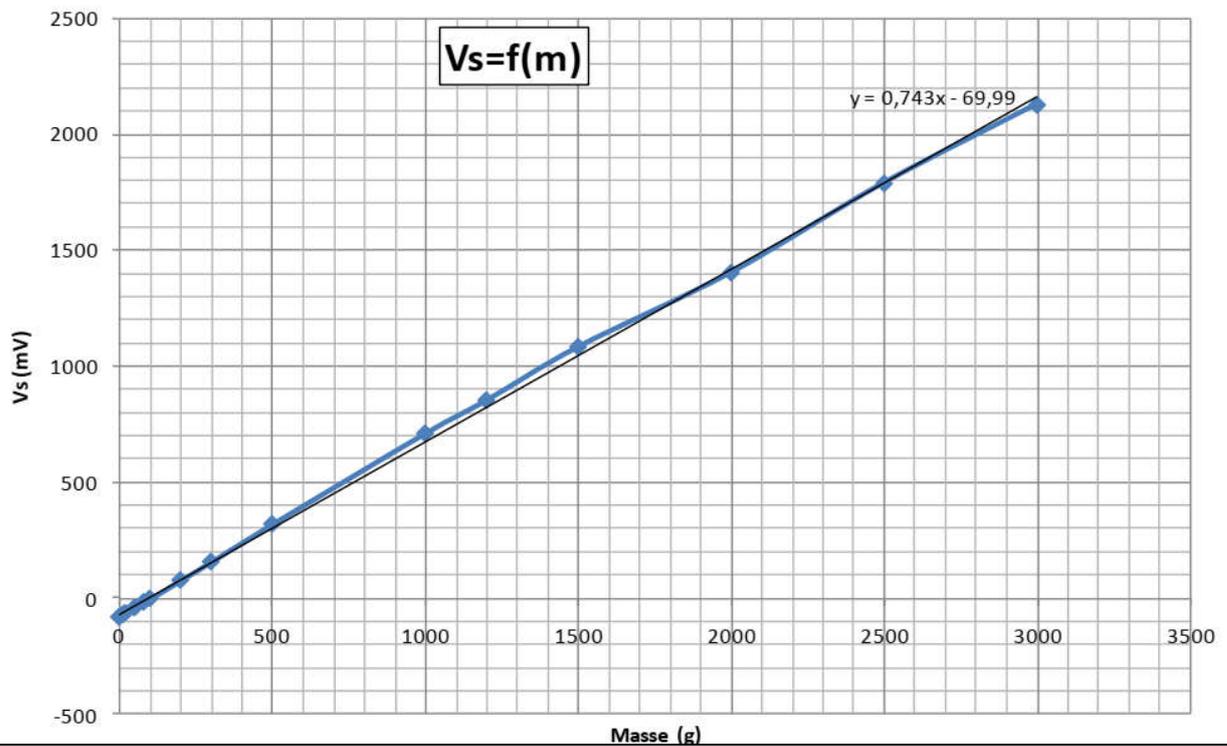
Pour utiliser la balance, il faut l'étalonner à l'aide de poids dont nous connaissons déjà la masse (voir image ci-contre).

Il faut aussi s'assurer que les poids que nous utilisons pour étalonner la balance soient les bons.
On utilise pour cela une balance très précise (voir image ci-dessous).
Les poids étaient neufs et étaient bien égaux aux poids indiqués.



Voici les mesures qui ont été effectuées dans le tableau ci-dessous :

Masse (g)	V _s (mV)	Masse (g)	V _s (mV)
0	-83,84	1000	709,10
10	-75,25	1200	852,40
20	-66,13	1500	1083,10
50	-44,10	2000	1403,50
80	-19,39	2500	1788,90
100	-4,63	3000	2128,00
200	75,09		
300	154,70		
500	317,60		



D'après la documentation technique du voltmètre, celui-ci a une imprécision de + ou - 0,5% et +1 sur le dernier digit.

DeltaV = 0,5/100 x (???) + 0,001 = ...
 ??? -> Volt mesuré pour la masse