



AGA Amel
BOUCHEFAA MOHAMED

Projet thermomètre

Compte rendue



Sommaire :

1) Introduction

- Présentation du projet
- Cahier des charges

2) Choix des capteurs

- Etudes des capteurs
- Raisons du choix du capteur

3) Conditionneur

- Etude théorique
- Etude expérimentale et théorique de la référence et de ses intérêts
- Intérêt d'un montage 4 fils et raison du choix de la solution
- Etude expérimentale du montage choisi

4) Amplification et mise en forme

- Amplification différentielle
- Sortie 0 à 5V
- Alarme

5) Synthèse et affichage de la température

- Affichage sur l'ordinateur

6) Conclusion

- L'organisation
- Les difficultés rencontrées
- Les améliorations à apporter
- Les compétences acquises

1) Introduction

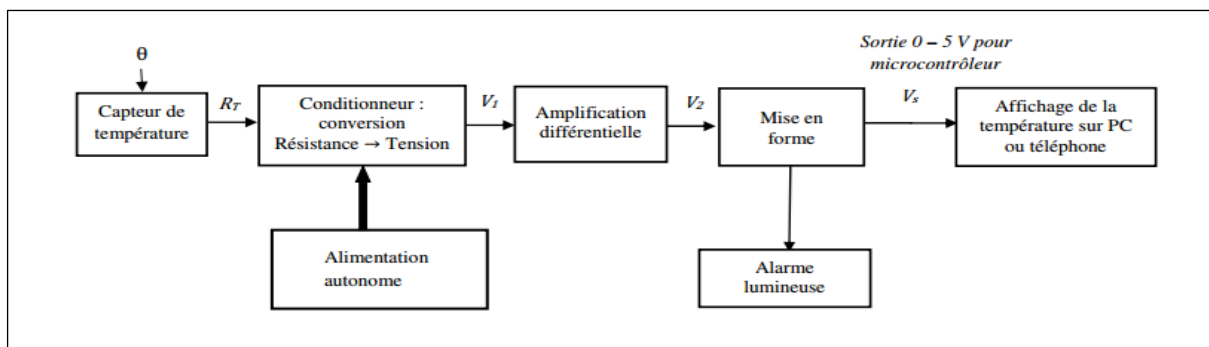
- **Présentation du projet :**

Ce projet d'étude de thermomètre s'est déroulé pendant 40 jours répartie sur 7 séances de 4h et d'un travail personnel fournis.

L'objectif étant de créer un thermomètre opérationnel nous avons eu recours à plusieurs ressources tel que des datasheets disponibles sur *Coursenligne* nous donnant accès des informations sur les différents composants, leurs installations sur des plaques labdec, des informations qui nous permettent de calculer différentes données etc.

Il faudra alors à la fin de ce projet pouvoir afficher sur un ordinateur ou un smartphone la température mesurée en direct par le thermomètre que l'on aura construit et cela par une connexion Bluetooth.

Le projet poursuivra l'organisation suivante et nous devons réaliser chaque élément du projet étape par étape :



- **Cahier des charges :**

Pour la réalisation de ce projet, nous devons également impérativement respecter un cahier des charges fournis.

Tous nos calculs, montages et résultats doivent être en cohérence avec celui-ci.

- Alimentation : -15 V, + 15 V
- Mesure de températures θ comprises entre 0 °C et 100 °C
- Utilisation d'un capteur de température passif : 2 capteurs au choix
- 1 sortie analogique : sortie 0 – 5 V pour numérisation et traitement des données par microcontrôleur Arduino
- Affichage de la température sur PC ou sur téléphone
- Améliorations possibles : alarme lumineuse, alimentation autonome

2) Choix des capteurs

- **Etudes des capteurs :**

Nous avons deux capteurs de températures passif à notre disposition que nous pouvons utiliser pour la suite du projet, le *TD5A* et le *PT100*.

Nous allons donc étudier les deux capteurs pour déduire lequel d'entre eux correspond le mieux au résultat souhaité ainsi qu'au cahier des charges.

Capteur TD5A :

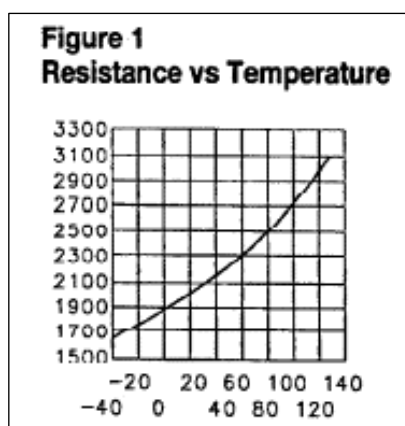
Les datasheets de ce capteur nous donnent les informations suivantes :

- Sa gamme de température se situe entre -40 à 150 °C, cela correspond parfaitement au cahier des charges car la gamme de température minimal demandé est de 0 à 100 °C.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS	
Operating Temperature	-40 to +150°C (-40 to +302°F)
Storage Temperature	-55 to +170°C (-67 to +338°F)
Voltage	10 VDC Continuous (24 hours)

- La résistance varie en fonction de la température et voici son équation :

$$R_t = R_0 + (3,84 \times 10^{-3} \times R_0 \times T) + (4,94 \times 10^{-6} \times R_0 \times T^2)$$



Equation for computing resistance:

$$R_T = R_0 + (3.84 \times 10^{-3} \times R_0 \times T) + (4.94 \times 10^{-6} \times R_0 \times T^2)$$

R_T = Resistance at temperature T

R_0 = Resistance at 0°C

T = Temperature in °C

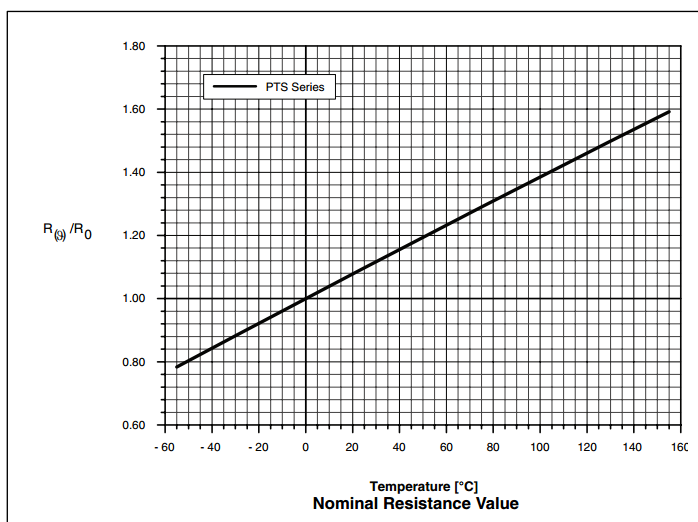
Capteur PT100 :

- Sa gamme de température se situe entre -50 à 500 °C, cela correspond encore une fois au cahier des charges, nous remarquons que pour ce capteur la gamme de température est encore plus importante.

Specifications of elements	
Sensor type:	Pt100 (100 Ohms @ 0°C)
Construction:	Thin film, 10mm tails
Temperature range:	-50°C to +500°C
Ice point resistance:	100Ω
Fundamental interval (0°C to 100°C):	38.5Ω (nominal)
Self heating:	<0.5°C/mW
Thermal response:	0.1s
Stability:	±0.05%

- Encore une fois, la résistance varie en fonction de la température et son équation est donné :

$$R(t) = R_0 \times (1 + A \times t + B \times t^2)$$



and for the temperature range of 0 °C up to + 155 °C:

$$R_{(t)} = R_0 \times (1 + A \times t + B \times t^2)$$

$R_{(t)}$: resistance as a function of temperature

R_0 : nominal resistance value at 0 °C

t : temperature in °C

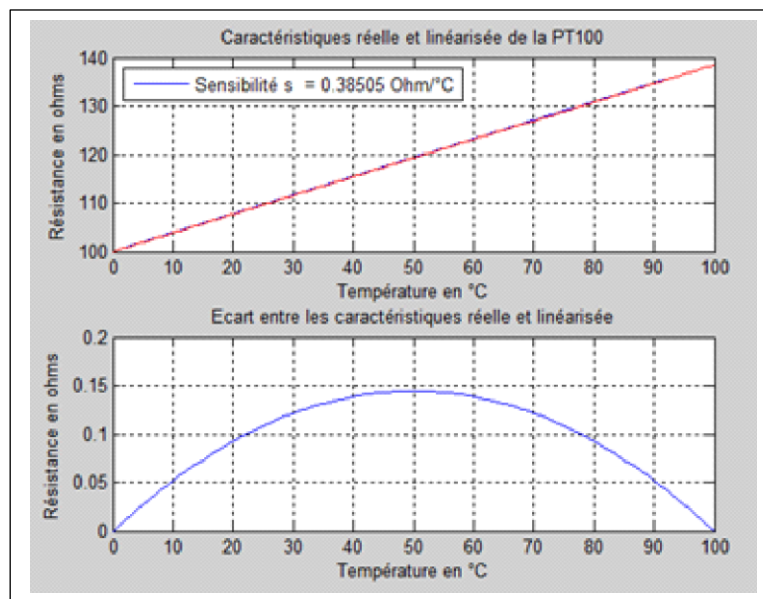
Avec toutes ces informations que nous venons d'obtenir cela ne nous permet toujours pas de choisir un capteur car les deux correspondent pour l'instant parfaitement au cahier des charges et aucun des deux n'a un élément qui le rend meilleur que l'autre.

Pour pouvoir choisir nous devons donc faire une étude plus approfondie, nous allons donc utiliser le logiciel mathématique *Matlab*.

En effet, nous cherchons à ce que la courbe représentative de l'évolution de la résistance en fonction de la température soit la plus linéaire possible.

Nous allons donc créer une courbe d'équation linéaire pour la comparer avec la courbe réelle des différents capteurs et ainsi trouver leurs écart maximum pour voir celui qui est le plus petit et donc en déduire le meilleur capteur.

Nous écrivons donc le programme et commençons à afficher la courbe du capteur *PT100* :



Elle est représentée par la courbe rouge et on peut remarquer que c'est effectivement une courbe linéaire comme souhaité mais malgré qu'elle soit très proche elle ne correspond pas totalement à la courbe bleu (courbe d'équation linéaire) et nous donc calculer son écart maximum.

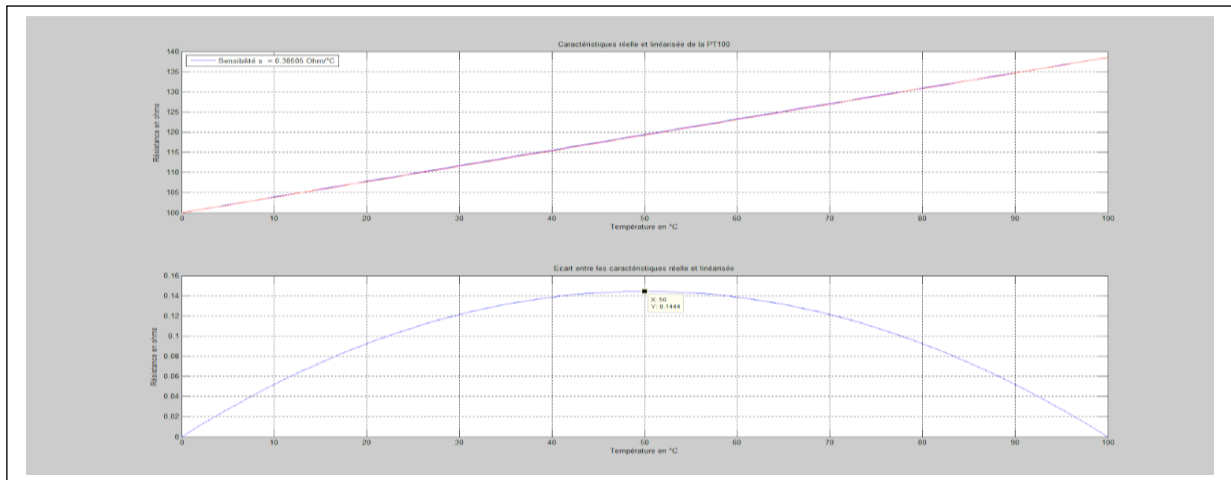
Pour cela nous allons de nouveau utiliser un programme *Matlab* :

```

Thermo.m  thermo2.m  +
1 - clear all
2 - C:\Users\42001423\OneDrive\Thermo.m
3 -
4 - % Définition des grandeurs physiques et calcul de RT
5 - teta=0:1:100;
6 - R0=100;
7 - R=R0*(1+3.9083e-3*teta - 5.775e-7*teta.^2);
8 -
9 - %Calcul de la sensibilité en supposant la sonde linéaire
10 - RT100 = max(R);
11 - s = (RT100-R0)/100
12 -
13 - %Equation de la caractéristique linéarisée
14 - Rlin = R0 + s*teta ;
15 -
16 - %Tracé des 2 caractéristiques : réelle et linéarisée
17 - figure(1)
18 - subplot(2,1,1)
19 - plot(teta, R, 'b')
20 - hold on
21 - grid on
22 - plot(teta, Rlin, 'r')
23 - legend(['Sensibilité s = ' num2str(s) ' Ohm/°C'], 'Location', 'northwest')
24 - title ('Caractéristiques réelle et linéarisée de la PT100')
25 - xlabel ('Température en °C')
26 - ylabel ('Résistance en ohms')
27 - %Tracé de l'écart entre les caractéristiques réelle et linéarisée
28 - subplot(2,1,2)
29 - Ecart = R - Rlin;
30 - plot(teta, Ecart)
31 - grid on
32 - title ('Ecart entre les caractéristiques réelle et linéarisée')
33 - xlabel ('Température en °C')
34 - ylabel ('Résistance en ohms')

```

Ce programme nous permet alors d'obtenir les courbes suivantes :



Nous observons donc que l'écart max est de 0,144 Ω .

Grâce aux informations précédentes on peut donc calculer l'écart de linéarité grâce à la formule suivante :

$$\epsilon = \frac{\Delta r_{\max}}{\Delta R_T}$$

$$= \frac{0,144}{138,5 - 100} \times 100 = 0,36 \%$$

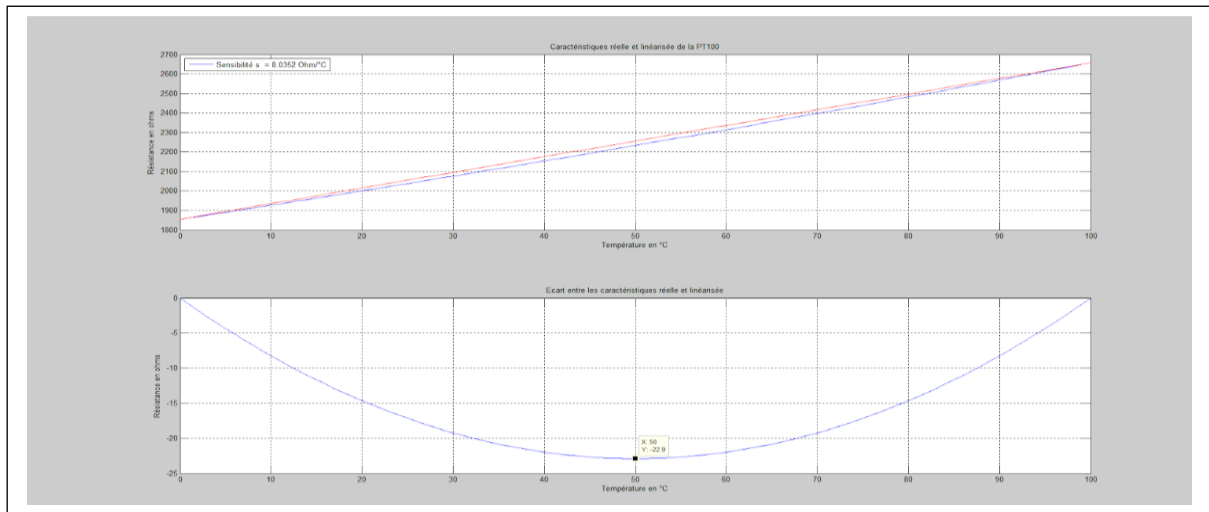
Nous reproduisons la même manipulation pour le capteur TD5A et écrivons le programme suivant sur *Matlab* :

```

Editor - C:\Users\42001423\OneDrive\thermo2.m
Thermo.m  thermo2.m  +
1 ~ clear all
2 ~ close all
3
4 ~ Définition des grandeurs physiques et calcul de RT
5 ~ teta=0:1:100;
6 ~ R0=1854;
7 ~ R=R0+(3.94e-3*R0*teta)+(4.94e-6*R0*teta.^2);
8
9 ~ Calcul de la sensibilité en supposant la sonde linéaire
10 ~ RT100 = max(R);
11 ~ s = (RT100-R0)/100;
12
13 ~ Equation de la caractéristique linéarisée
14 ~ Rlin = R0 + s*teta;
15
16 ~ Tracé des 2 caractéristiques : réelle et linéarisée
17 ~ figure(1)
18 ~ subplot(2,1,1)
19 ~ plot(teta, R, 'b')
20 ~ hold on
21 ~ grid on
22 ~ plot(teta, Rlin, 'r')
23 ~ legend(['Sensibilité s = ' num2str(s) ' Ohm/°C'], 'Location', 'northwest')
24 ~ title('Caractéristiques réelle et linéarisée de la TD5A')
25 ~ xlabel('Température en °C')
26 ~ ylabel('Résistance en Ohms')
27 ~ Tracé de l'écart entre les caractéristiques réelle et linéarisée
28 ~ subplot(2,1,2)
29 ~ Ecart = R - Rlin;
30 ~ plot(teta, Ecart)
31 ~ grid on
32 ~ title('Ecart entre les caractéristiques réelle et linéarisée')
33 ~ xlabel('Température en °C')
34 ~ ylabel('Résistance en Ohms')

```


Cela nous permet d'obtenir la courbe suivante :



Nous remarquons que l'écart max est de 23 Ω ce qui nous permet de réaliser les calculs suivants :

$$\epsilon = \frac{\Delta r_{\max}}{\Delta R_T}$$

$$= \frac{23}{2658 - 1854} \times 100 = 2,9 \%$$

Maintenant que l'on possède ces informations nous allons pouvoir déterminer quel est le capteur le plus adapté à notre utilité et donc choisir un capteur.

- **Raisons du choix du capteur :**

Nous venons donc de calculer l'écart de linéarité des deux capteurs et on remarque que l'écart max du capteur *PT100* moins grand (0,36 %) que celui du *TD5A* (2,9 %), cela veut dire que le capteur *PT100* est plus 'précis' pour mesurer une température que le capteur *TD5A* (l'idéal serait que l'écart max soit de 0 %).

Cette information nous permet enfin de choisir notre capteur et nous optons logiquement pour le ***PT100***.

Nous savons maintenant quel capteur nous allons utiliser nous devons donc l'étudier de façon plus poussée afin de connaître ses caractéristiques, nous calculons d'abord la sensibilité du capteur :

$$S = \frac{\Delta R_T}{\Delta \theta}$$

$$S = \frac{138,5-100}{100-0} = 0,385 \, \Omega / ^\circ\text{C}$$

Sachant que l'écart max du capteur est très petit on peut en conclure que la sensibilité du capteur sera toujours d'environ $0,385 \, \Omega / ^\circ\text{C}$.

Il faut également noter qu'il y a une possibilité d'erreur causé par l'auto-échauffement qui se définit par le fait qu'un capteur est passif et donc qu'il y a du courant qui traverse le composant, cela va entraîner l'échauffement du courant ce qui peut être source d'erreurs de mesures.

La valeur maximum du courant conseillé par le constructeur est de 0,1 à 1 mA.

Nous calculons alors l'élévation de température :

$$P = U \times I$$

$$P_{\max} = R_{\max} \times I_{\max}^2$$

$$P_{\max} = 138,5 \times (1 \cdot 10^{-3})^2 \text{ A}$$

$$P_{\max} = 1,385 \cdot 10^{-1} \text{ mW}$$

$$\text{Élévation de température : } 0,8 \times 1,385 \times 10^{-1} = 0,11 \text{ K}$$

L'élévation de température n'est pas très élevée il y aura pour 1mA seulement une différence de $0,1^\circ\text{C}$.

Valeur auto-échauffement : 0,8 K pour 1 mW.

Nous allons pour finir passer de la théorique à l'expérimentale en testant le capteur à l'aide notre souffleur qui va augmenter la chaleur que va mesurer le capteur ce qui nous permettra de voir l'évolution de la résistance face à la chaleur.

Nous obtenons dans une température ambiante (0°C donc et non $\approx 22^{\circ}\text{C}$) que $R_t = 108\ \Omega$, cela convient aux documentations constructrices qui demande que $R_t = 100\ \Omega$ pour 0°C .

<i>Specifications of elements</i>	
Sensor type:	Pt100 (100 Ohms @ 0°C)
Construction:	Thin film, 10mm tails
Temperature range:	-50°C to $+500^{\circ}\text{C}$
Ice point resistance:	$100\ \Omega$
Fundamental interval (0°C to 100°C):	$38.5\ \Omega$ (nominal)
Self heating:	$<0.5^{\circ}\text{C/mW}$
Thermal response:	0.1s
Stability:	$\pm 0.05\%$

Nous augmentons comme prévu artificiellement la température mesurée jusqu'à 85°C et nous obtenons que $R_t = 130\ \Omega$.

On peut en conclure que cela correspond aux datasheets car on remarque que plus la température augmente plus la résistance augmente.

3) Conditionneur

- **Etude théorique :**

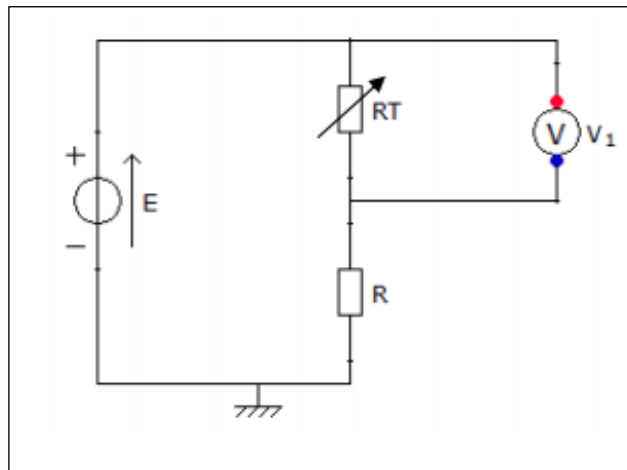
Dans cette partie nous allons chercher à étudier la tension aux bornes de la résistance du capteur afin de récupérer une tension analogique V_1 image de la résistance du capteur de température, donc image de la température.

Pour cela, nous avons à notre disposition 2 méthodes que nous allons étudier :

- Montage passif
- Montage à amplificateur opérationnel

Montage passif :

Ce montage est défini par le schéma électrique suivant :



On remarque que comme la résistance à l'entrée du voltmètre est infinie cela veut dire que l'intensité qui passe par le voltmètre est nul et on peut définir les calculs suivants :

$$I_2 = 0$$

$$\Leftrightarrow I_1 = I_3$$

$$E = U_1 + U_2$$

$$E = R I_1 + R_t I_1$$

$$I_1 = \frac{E}{(R_t + R)}$$

1 mA est la valeur maximum du courant autorisé.

$$E = 5V \quad \& \quad I = 1 \text{ mA}$$

$$R_t = 138 \text{ ohm}$$

$$R = \frac{E}{I} - (R_t)$$

$$R = \frac{5}{0,01} - 138,5$$

$$R = 4862 \text{ Ohm}$$

La valeur la plus proche de l'I.U.T est de 5,1 Ohm c'est donc la valeur de la résistance que nous allons choisir ($R_t \ll R$, R_t est négligeable)

On peut alors considérer que ce courant est constant car si R_t est négligeable, l'équation de I_1 passe de :

$$I_1 = \frac{E}{R_t + R} \quad \text{à} \quad I_1 = \frac{E}{R} \quad \text{donc le courant est constant si } E \text{ est constant et } R \text{ est constant.}$$

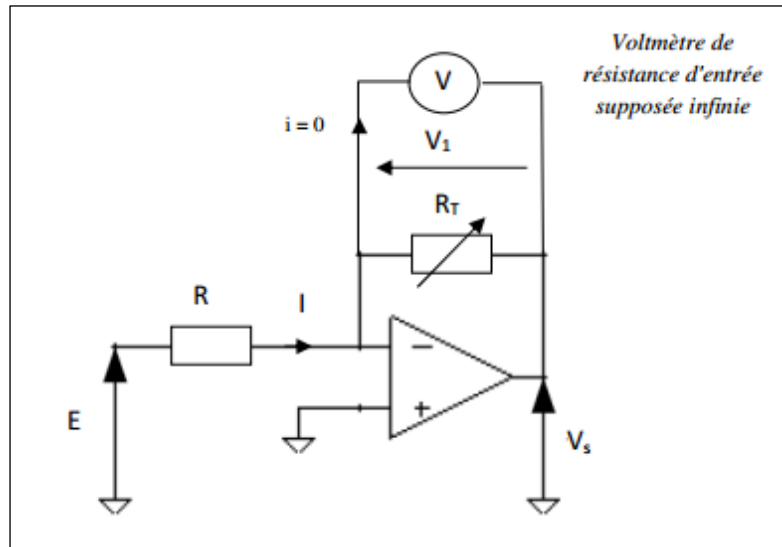
$$V_1 = R_t I$$

$$\Leftrightarrow V_1 = R_t \frac{E}{R}$$

La fonction conversion Résistance-Tension est bien réalisée, c'est un rapport entre la tension et la résistance.

Montage à amplification opérationnel :

Ce montage ci est définis par le schéma électrique suivant :



$$E = -\varepsilon + U_1$$

$$\varepsilon = 0$$

$$E = R \times I$$

$$I = \frac{E}{R}$$

Donc le capteur est alimenté par un courant constant.

$$R = \frac{E}{I}$$

$$R = \frac{5}{0,001}$$

$$R = 5 \text{ k}\Omega$$

La valeur disponible à l'I.U.T la plus proche est de 5,1 kOhms c'est donc la valeur de la résistance que nous allons retenir.

$$V_1 = R_T I$$

$$V_1 = \frac{R_T E}{R}$$

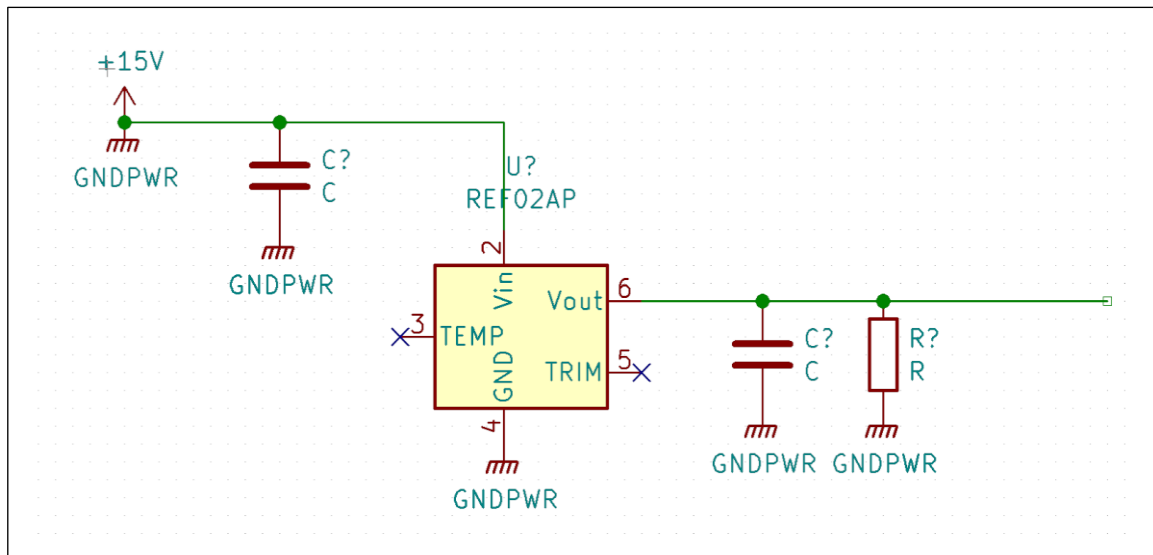
- **Etude expérimentale et théorique de la référence et de ses intérêts :**

Nous commençons par déterminer à l'aide de la documentation constructeur de la référence de tension la plage de variation de la tension E qui est de 7V à 36V en entrée.

La valeur maximale du courant de sortie est-elle de 10mA.

Résistance de charge min que l'on peut câbler en sortie : 4,985V – 5,015V

Nous proposons maintenant le schéma de câblage suivant :

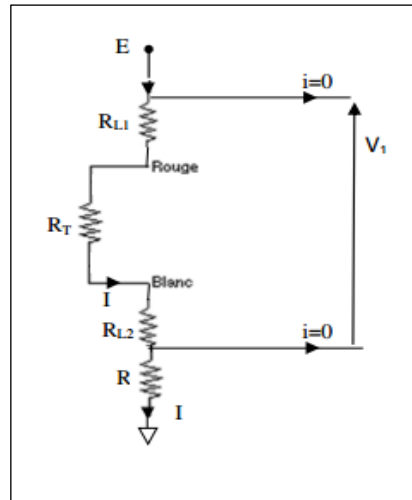
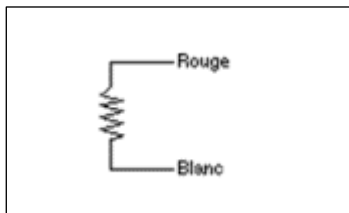


On vérifie si la valeur de tension reste constante en changeant la valeur de R_L .

Le rôle des condensateurs placés en entrée et en sortie du circuit est d'assurer que la charge ne dépasse la plage de variation de la tension E (4,985V – 5,015V).

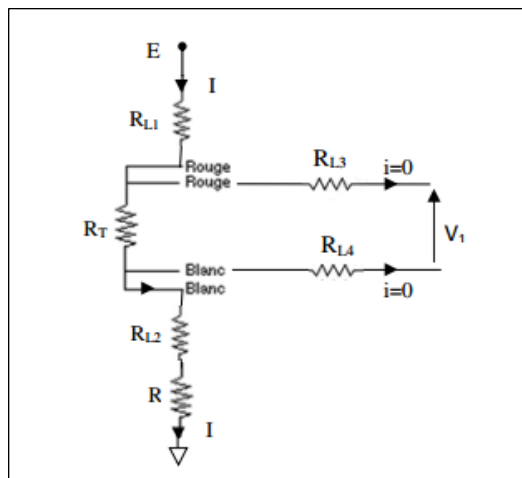
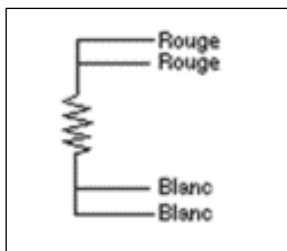
- **Intérêt d'un montage 4 fils :**

Le montage 2 fils est défini par les schémas ci-dessous :



Le montage 2 fils est un montage plus simple que le montage 4 fils mais la précision est plus faible car elle est influencée par la résistance de la ligne.

Le montage 4 fils est lui défini par les schémas ci-dessous :



Ce montage est certes plus complexe que celui à 2 fils mais il est bien plus précis et permet de supprimer totalement les erreurs dues à la résistance de ligne ainsi qu'aux variations de température des conducteurs.

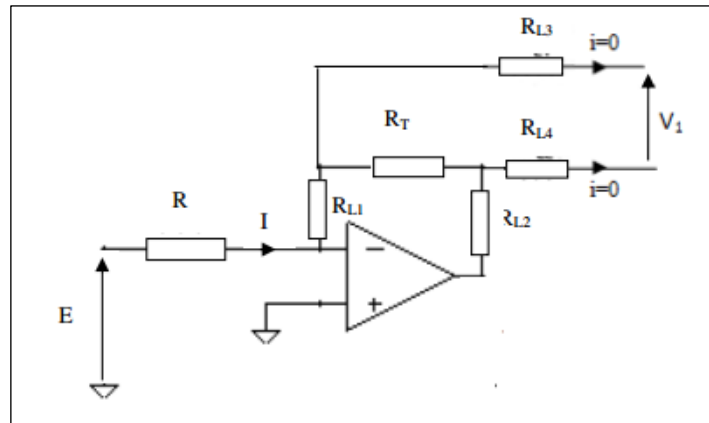
Sa précision est prouvée par le fait que c'est ce montage qui est utilisé dans les laboratoires.

Son avantage est donc principalement sa précision, si l'on souhaite à acquérir des résultats rigoureux il est préférable d'utiliser un montage 4 fils qui va nous permettre d'éviter certaines erreurs de mesures ce qui ne seraient pas possible avec le montage 2 fils.

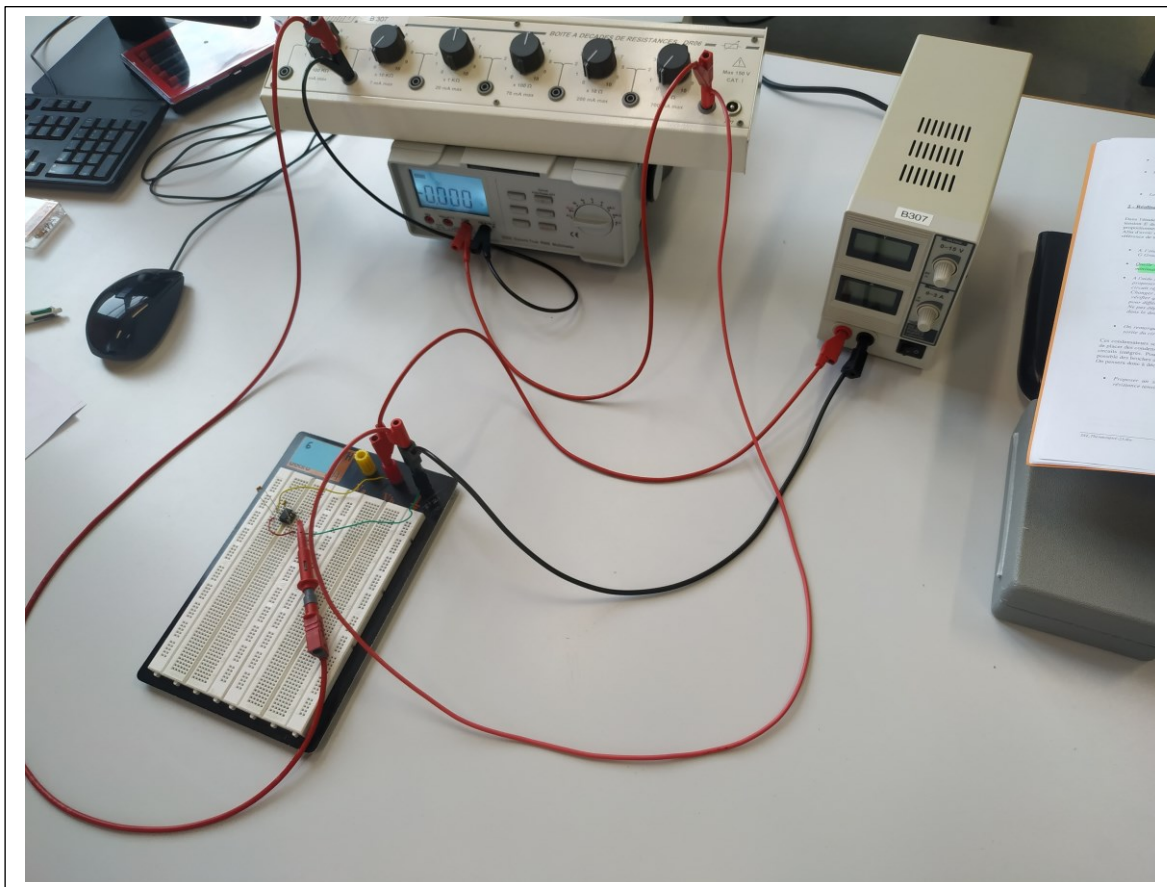
Puisque nous sommes dans cette situation, nous allons choisir pour la suite de nos expérimentations d'utiliser un montage 4 fils.

- **Etude expérimentale du montage choisi**

Le montage ci-dessus est un montage 4 fils, il permet de mesurer réellement la tension aux bornes de la résistance R_T car il dispose d'une meilleure précision lors des relevés :



A partir de ce schéma nous pouvons réaliser le câblage ci-dessous :

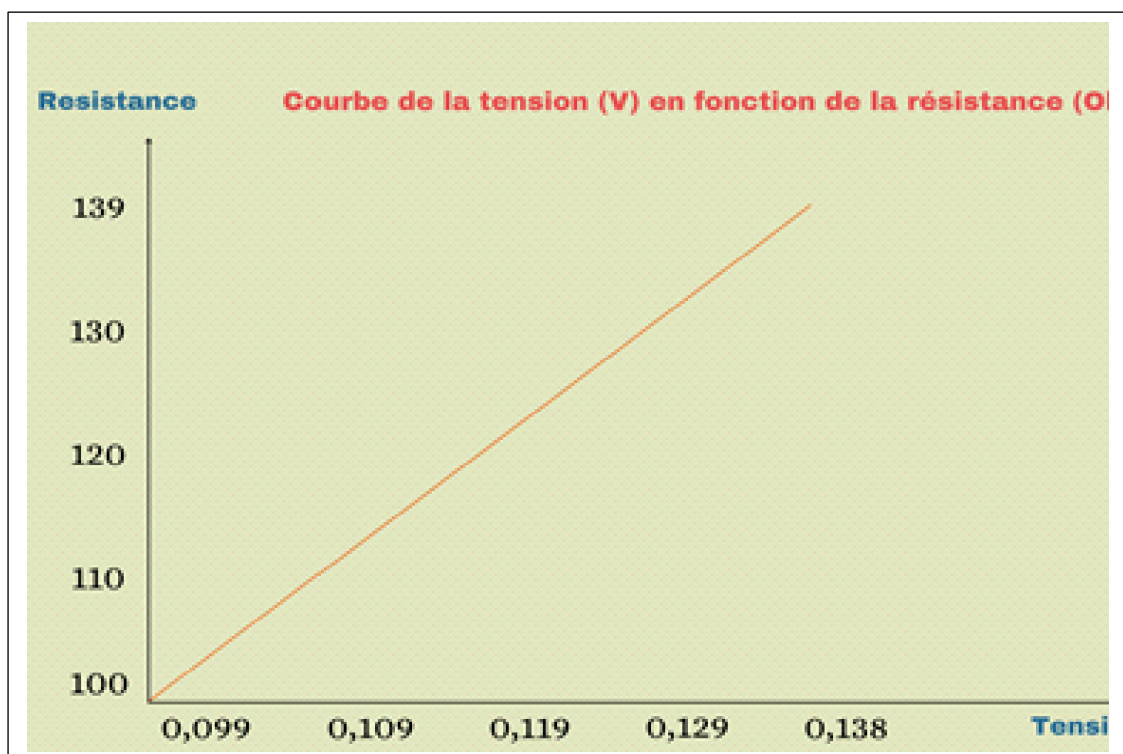


Pour mesurer la tension nous faisons varier grâce à la boîte à décades les valeurs de la résistance de $100\ \Omega$ à $139\ \Omega$.

Ci-dessous les valeurs relevées de la tension en fonction de la résistance :

Ohm	Volt
100	0,099
110	0,109
120	0,119
130	0,129
139	0,138

Nous traçons ensuite la courbe reprenant la tension en fonction de la résistance :



Nous constatons donc que les valeurs de la tension en fonction de la résistance que nous relevons sont trop faibles pour satisfaire le cahier des charges, elles varient entre 0.09V et 0.15V. Il faut donc utiliser un amplificateur opérationnel permettant d'atteindre les valeurs correspondant au cahier des charges.

4) Amplification et mise en forme

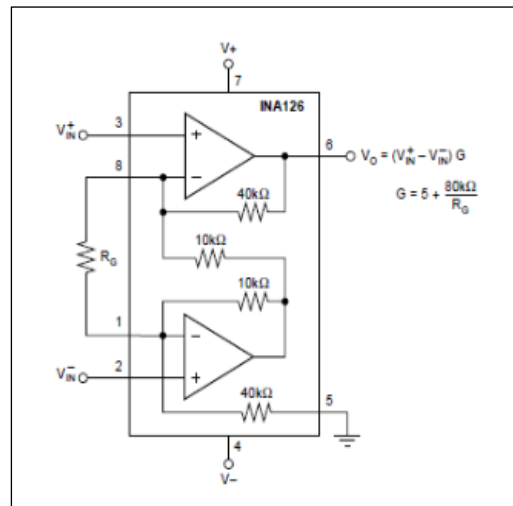
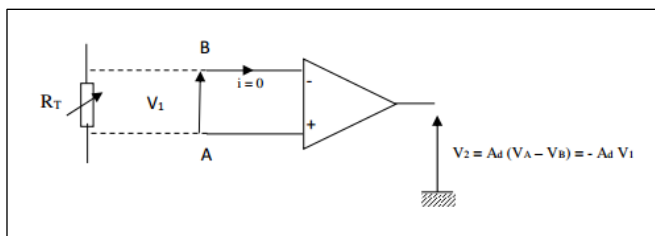
- **Amplification différentielle**

Nous réalisons maintenant un montage d'amplificateur opérationnel 4 fils pour amplifier le signal issu du conditionneur correspond à la différence de potentiel aux bornes du capteur car cette tension est trop faible et inutilisable.

Ce sera un amplificateur différentiel car aucun des potentiels n'est égal à 0V.

Il faut donc amplifier la tension différentielle $V_1 = V_B - V_A$.

L'amplificateur différentiel est défini par le schéma ci-dessous :

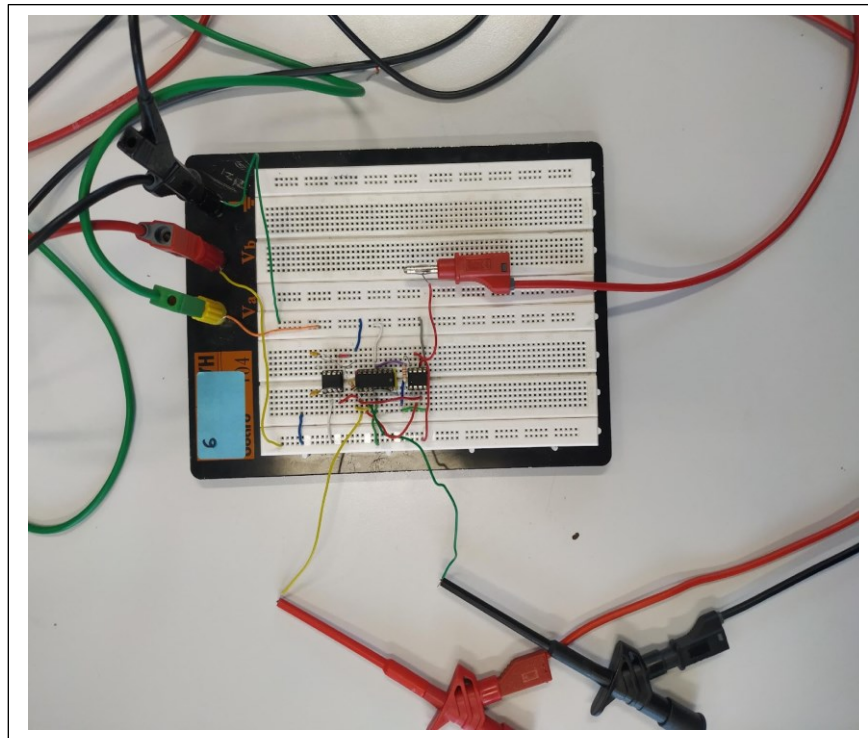


En utilisant la formule suivante : $\text{Gain} = 5 + \frac{80k\Omega}{R_G} = 36,23 \text{ DB}$

Nous calculons ensuite la valeur de la résistance R_G avec la formule suivante : $R_G = \frac{80000(36-5)}{2580.64\Omega}$

Nous choisissons alors une résistance de valeur $2.7k\Omega$ c'est la résistance qui a la valeur la plus proche de ce que nous souhaitons.

Nous établissons ensuite le schéma de câblage sur plaque d'expérimentation :

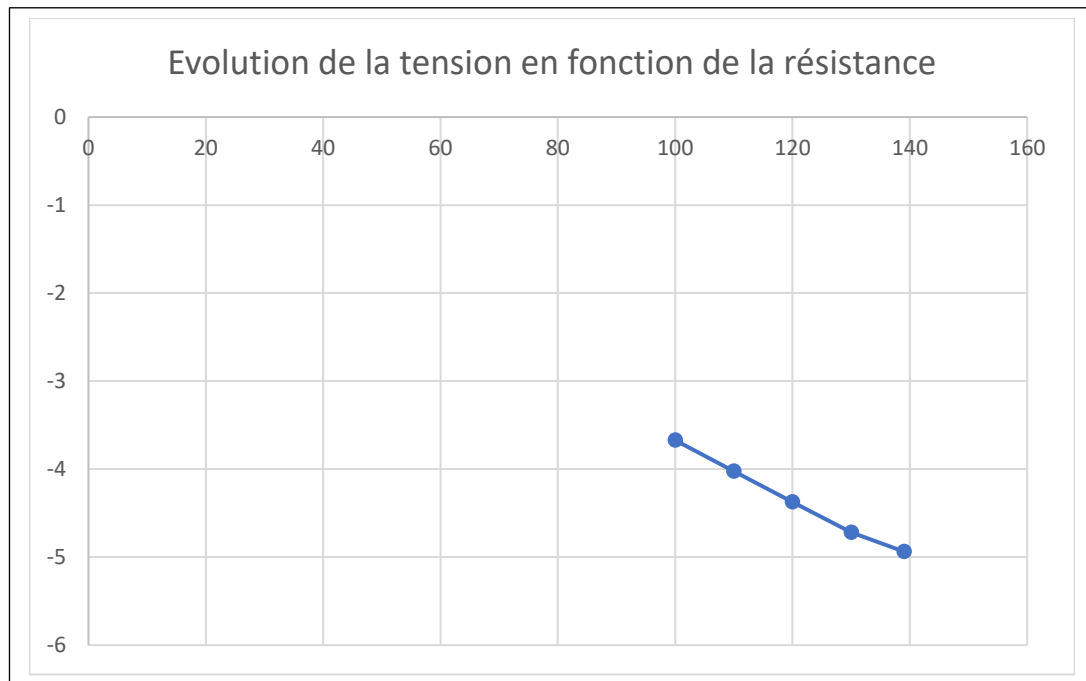


Puis à partir de ce montage nous relevons les valeurs de V en fonction de la résistance équivalente que nous faisons varier de 100Ω à 139Ω .

Nous traçons ensuite la courbe représentative des valeurs que nous venons d'obtenir (donc la tension en fonction de la résistance), nous obtenons donc la courbe ci-dessous :

100	-3,672
110	-4,024
120	-4,372
130	-4,72
139	-4,937

Grâce à ces valeurs nous obtenons la courbe ci-dessous :

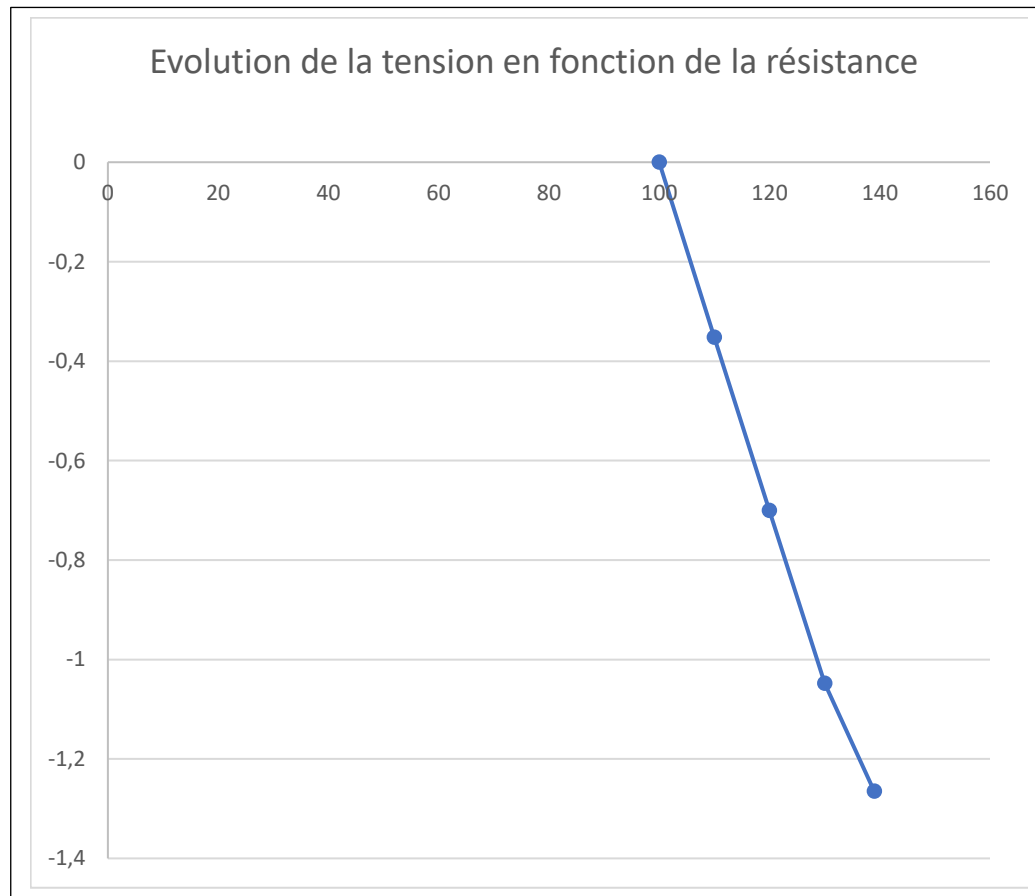


Nous remarquons que cette courbe est négative mais également qu'elle ne commence pas à 0V mais à -3,672V, afin de la faire commencer à 0V nous devons utiliser un décalage sur la courbe à l'aide de la valeur REF qui correspond donc par déduction à 3,672.

Nous obtenons alors les valeurs suivantes :

Ohm	V
100	0
110	-0,352
120	-0,7
130	-1,048
139	-1,265

Et nous obtenons la courbe ci-dessous :



Cette courbe commence bien à 0V et est dégressif, cela nous convient.

- **Sortie 0 à 5V :**

On cherche maintenant à introduire dans notre montage une fonction amplification variant de 0V à 5V pour une température variant de 0°C à 100 °C.

Pour cela nous allons utiliser un montage amplificateur non inverseur qui va nous permettre de ne pas retenir les valeurs en dessous.

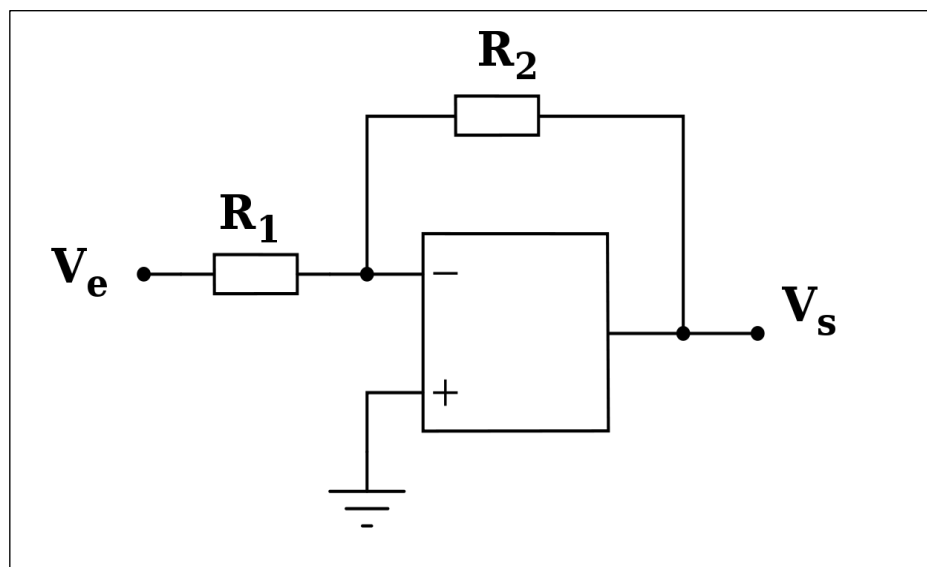
On cherche donc à amplifier de sorte que V_s soit 5V.

AN :

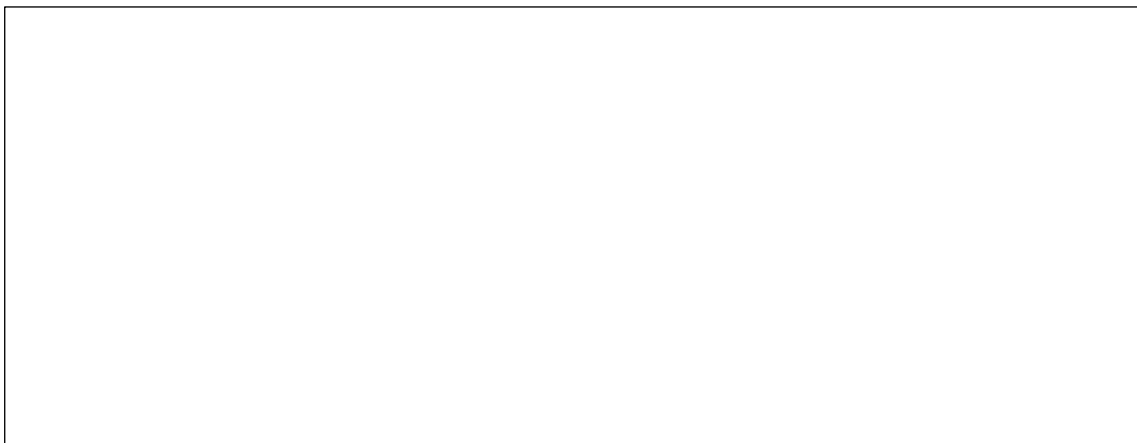
$$A = \frac{V_s}{V_e}$$

$$A = \frac{5}{1,36} = 3,67$$

Il faut donc utiliser un amplificateur inverseur représenté par le schéma ci-dessous :



Nous devons maintenant tracer la caractéristique théorique de V_s en fonction de la température Teta :



Grâce à la documentation technique on peut déterminer que la relation liant V_1 et V_{Ref} est : $V_2 = V_1 + V_{Ref}$.

Donc l'entrée V_{Ref} va servir à

Et nous savons que $V_{Ref} = 3,372$.

Nous allons donc réaliser le schéma de câblage suivant qui permet de réaliser la fonction décalage souhaité :



- **Alarme :**

5) Synthèse et affichage de la température

- **Affichage sur l'ordinateur :**

6) Conclusion

- **L'organisation :**

Notre organisation de travail a évolué durant le projet car aucune organisation claire et précise n'a été mise en place au début du projet ce qui nous a énormément ralenti.

Nous avons donc mis en place une réelle organisation très tardivement (vers la 4^{ème} séance), notre organisation consistait à acquérir le maximum d'informations en TP que l'on ne peut acquérir chez nous comme les manipulations physiques.

Nous prenions donc un maximum de ressources (captures d'écrans, photos, notes...) puis nous les mettions en formes chez nous le soir.

Nous avons également pris quelques vidéos de l'a ou l'on s'est arrêté à la fin du TP pour ne pas trop perdre de temps à la prochaine séance.

- **Les difficultés rencontrées :**

Nous avons rencontré de nombreuses difficultés dans ce projet tel qu'un manque d'organisation au début du TP qui nous a fait perdre beaucoup de temps.

Nous également eu du mal à faire valider certains montages qui nous prenait un temps qu'on n'avait pas prévus ce qui nous a également ralenti.

Également nous avons eu des difficultés à savoir où l'on se positionnait par rapport au TP et à quelle étape nous étions car parfois nous avançons sur ce que demandé le professeur sans même se fier à notre TP ce qui nous faisait perdre le fil et nous amenait parfois même à faire des erreurs.

A cause de toutes ces raisons nous n'avons malheureusement pas réussi à finaliser le projet.

- **Les améliorations à apporter :**

Néanmoins, grâce aux erreurs que nous avons faites nous savons maintenant comment faire pour les éviter.

Tout d'abord nous pensons que ce qui nous a le plus manqué est une bonne organisation, pour le prochain projet nous définirons donc une organisation précise avant le début du projet que l'on écrira sur feuillet et on préparera une « sous organisation » pour chaque séance de TP du projet afin d'avancer correctement.

Nous allons également faire un travail personnel plus complet afin de ne pas oublier certains éléments essentiels au cours des séances.

Enfin, nous réaliseront avant chaque câblage un schéma papier et le feront valider afin de mieux les réussir.

- **Les compétences acquises :**

Ce projet nous a permis d'acquérir différentes compétences tel que :

- Le fonctionnement d'un télémètre
- L'utilisation de datasheets
- Comment répondre à un cahier des charges
- A quoi servent concrètement les amplifications différentielles
- Améliorations sur les câblages
- Pourquoi et comment utiliser un décalage
- Comparer des composants
- L'utilité d'un montage 4 fils et comment s'en servir
- Comment brancher des composants amplificateurs
- L'utilisation de *Matlab* pour tester les capacités d'un capteur