

Mini projet d'électronique – capteurs de température - EL121

Les capteurs sont des instruments dont le but est de mesurer/enregistrer une grandeur physique et de la transformer en donnée analogique/numérique. Cette mesure est destinée à ensuite subir un traitement. Au cours de ce mini-projet, nous allons étudier le circuit de conditionnement d'un capteur thermique : la sonde PT100.

Ce compte rendu s'organisera de la manière suivante : à chaque étage du circuit, nous répondrons aux questions théoriques du sujet, puis nous afficherons le circuit réalisé sur P Spice ainsi que les courbes de simulation. Le tout en suivant la répartition en 10 parties que voici :

SOMMAIRE :

- 1) La sonde PT100 (recherches personnelles)
- 2) Etage générateur de courant constant
- 3) Etage d'amplification
- 4) Etage référence
- 5) Etage décalage
- 6) Etage correction du gain
- 7) Synthèse
- 8) Equation linéaire de la tension
- 9) Schéma complet du circuit
- 10) Propositions de modifications et conclusion du mini projet

1) La sonde PT100 :

Il s'agit d'un capteur de température RTD, pour détection de température à résistance. Cette sonde a la particularité d'avoir une résistance fabriquée en platine. En effet l'élément du tableau périodique Pt100 possède une résistance de 100 Ohm à 0°C. C'est le capteur de température le plus utilisé.

Si la température augmente, la résistance du métal augmente également et inversement. La variation est linéaire. Il suffit donc de faire passer un courant dans la résistance pour relever la tension et déterminer ainsi la température.

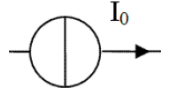
Ici, on aura sur Pspice une résistance nommée RPT100 pour représenter la sonde. Celle-ci est munie de deux paramètres, correspondant aux deux extrêmes de température estimés par les scientifiques.

En appliquant la formule donnée dans le sujet, on aura donc $RPT100_{min} = 84.3 \text{ Ohm}$ et $RPT100_{max} = 175.9 \text{ Ohm}$

2) Etage générateur de courant constant :

Le composant D1 est une diode, un dipôle qui ne laisse passer le courant que dans un sens. D2 est une diode zener, et les deux ne sont pas dans le même sens car la seconde se comporte comme une diode classique lorsqu'elle est dans le sens du courant. UD1 et UD2 sont les tensions mesurées aux bornes de chacun des deux composants.

On fait ici usage d'un générateur de courant. Un générateur qui délivrerait un courant I_0 se noterait ainsi :



Les générateurs de courants constants sont idéaux. Ils délivrent un courant continu et sans variation, car on suppose qu'il ne contient pas de résistance interne. Il sert ici à délivrer un courant permettant de générer une tension aux bornes des résistances qu'il traverse, à savoir R1 et RPT100

2.1) On applique la loi des mailles dans celle correspondante. On obtient l'équation :

$$U_{D1} - U_{D2} - V_{EB} + R2 * i = 0, \text{ i le courant circulant dans cette maille du circuit}$$

$$\text{On peut en déduire } R2 * i = -U_{D1} + U_{D2} + V_{EB} \Leftrightarrow i = \frac{-U_{D1} + U_{D2} + V_{EB}}{R2}$$

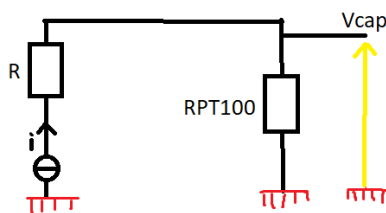
Par application numérique, on obtient $i = 1.64 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 1.64 \text{ mA}$

2.2) Le courant dans RPT100 est égal au courant dans R2. RPT100 est reliée à la masse et est seule avant la mesure de tension Vcap. On en déduit : $V_{cap} = RPT100 * i$.

Etant donné que nous disposons de deux extremums de température, et donc deux extremums de résistance, on peut appliquer et écrire : $V_{cap_{min}} = 84.3 * 0.00164 = 0.138 \text{ V}$, $V_{cap_{max}} = 175.9 * 0.00164 = 0.289 \text{ V}$

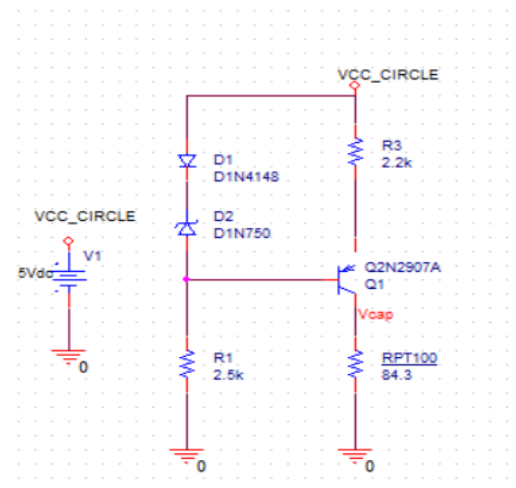
2.3) Un schéma équivalent du montage en faisant apparaître un générateur de courant donnerait :

Montage équivalent

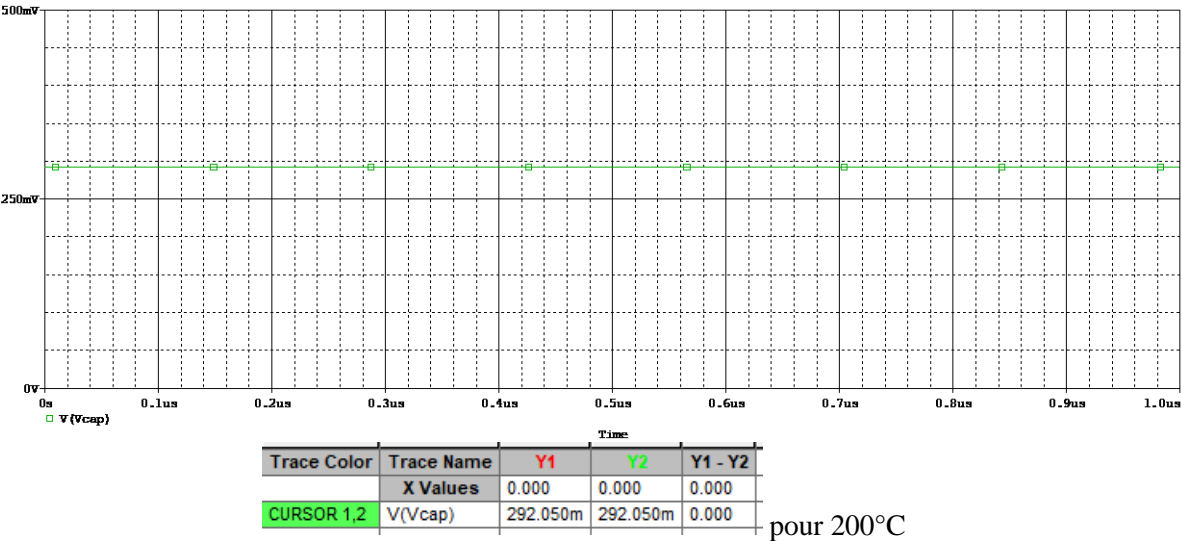
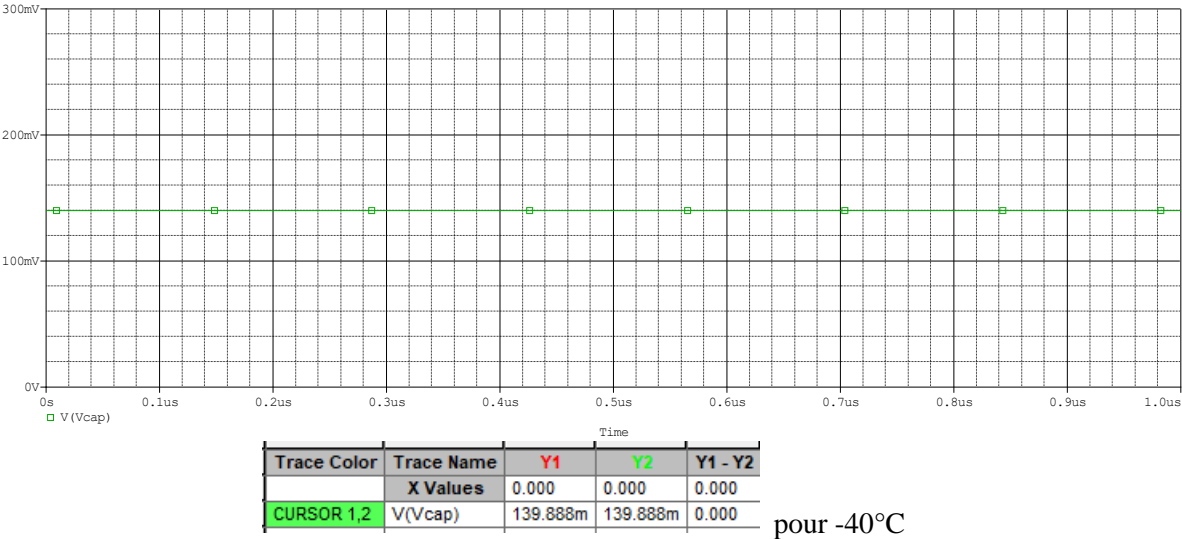


Le montage de l'étage réalisé sur PSpice est le suivant :

On réalise un profil de simulation pour pouvoir le lancer. A noter qu'on ne met pas de marqueur, on préfère ici l'usage d'alias, attachés au fil pour directement renseigner de la tension entre le lieu de fixation et la masse. Nous procéderons ainsi pour le relevé de chaque tensions du projet.



La simulation nous donne bien les résultats attendus théoriquement :



3) Etage d'amplification :

3.1) V- est reliée à la sortie. Les deux entrées V+ et V- sont donc égales. Or on a :

$$V+ = V_{cap}, V- = V_a * \left(\frac{R_{13}}{R_{13} + R_{14}} \right) \quad (\text{application du pont diviseur de tension})$$

$$\text{On réécrit donc } V_{cap} = V_a * \left(\frac{R_{13}}{R_{13} + R_{14}} \right) \Leftrightarrow V_a = V_{cap} * \left(\frac{R_{14} + R_{13}}{R_{13}} \right) = V_{cap} * \left(1 + \frac{R_{14}}{R_{13}} \right)$$

On effectue l'application numérique avec les valeurs de chaque résistance :

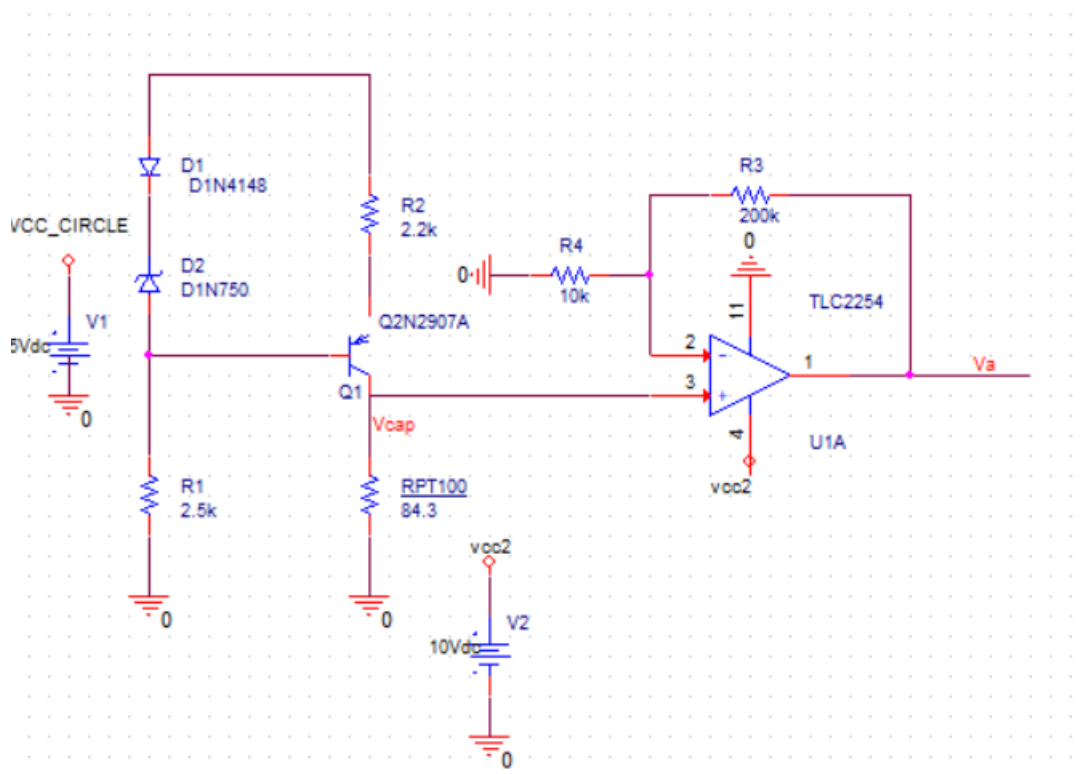
$$V_a = V_{cap} * \left(1 + \frac{200k}{10k} \right) = V_{cap} * (1 + 20) = 21 * V_{cap}$$

3.2) Le montage est de type amplificateur non-inverseur. L'amplification de la tension se déduit de l'écriture précédente : on a ainsi : $\frac{V_a}{V_{cap}} = 21$

La tension V_a varie entre un minimum de tension et un maximum de tensions, qui ont été démontrés précédemment. On peut en déduire que la tension amplifiée V_a est comprise entre $21 * V_{cap}(\min)$ et $21 * V_{cap}(\max)$. Ainsi :

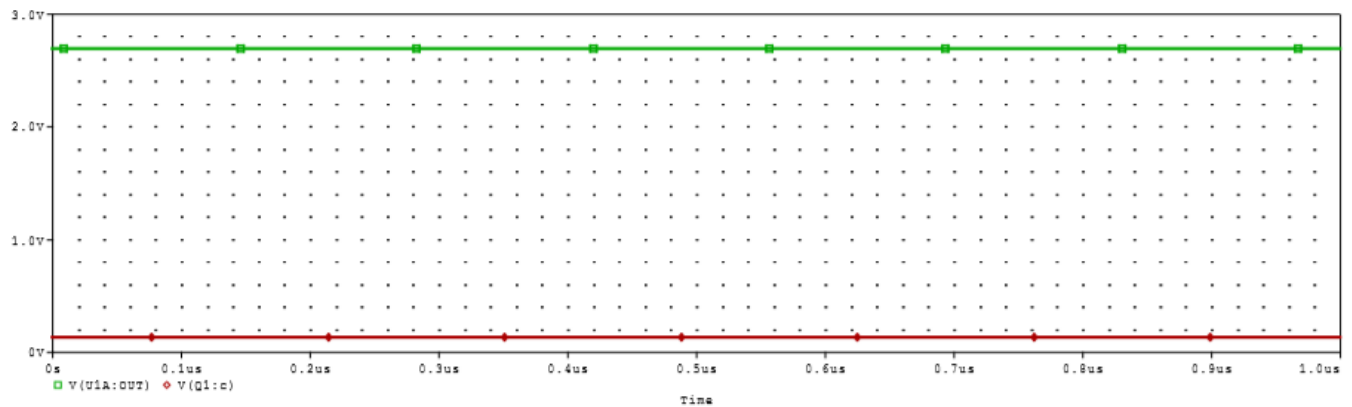
$$V_{a_{\min}} = 21 * 0.138 = 2.900 \text{ V}, V_{a_{\max}} = 21 * 0.289 = 6.067 \text{ V}$$

On reproduit ensuite le circuit sur PSpice. l'AOP est polarisé grâce à une tension VDC 10V reliée par vcc2 en + et une masse à la borne -, le potentiel nul 0V :

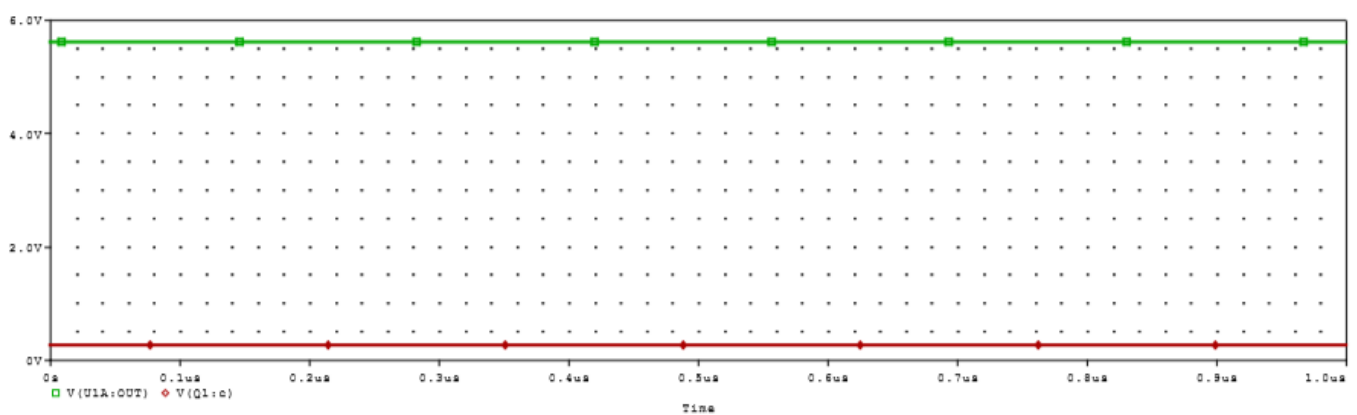


On procède ensuite à la simulation : on change les valeurs de RPT100 à 84.3 puis 176 Ohm, et on observe ce qui s'affiche par rapport aux valeurs théoriques attendues.

Pour une température de -40°C , soit une résistance RPT100 de 84.3 Ohm :



Et pour une température de 200°C , soit $R_{PT100} = 176\text{ Ohm}$:



2.68 V et 5.71V au lieu de 2.9 et 6.07 attendus. On note que les pertes sont assez importantes, par rapport aux résultats théoriques. Ces derniers ne prennent pas en compte la résistance interne des fils, faible mais non nul, et les

4) Etage référence V_r :

4.1) On utilise le pont diviseur de tension entre UD3 et V_+ :

$$V^+ = \frac{R_{10}}{R_{10} + R_{11}} * UD3 \Leftrightarrow R_{10} = \frac{V^+ * R_{11}}{UD3 - V^+}. \text{ L'application numérique avec } V^+ = 2,8 \text{ nous donne :}$$

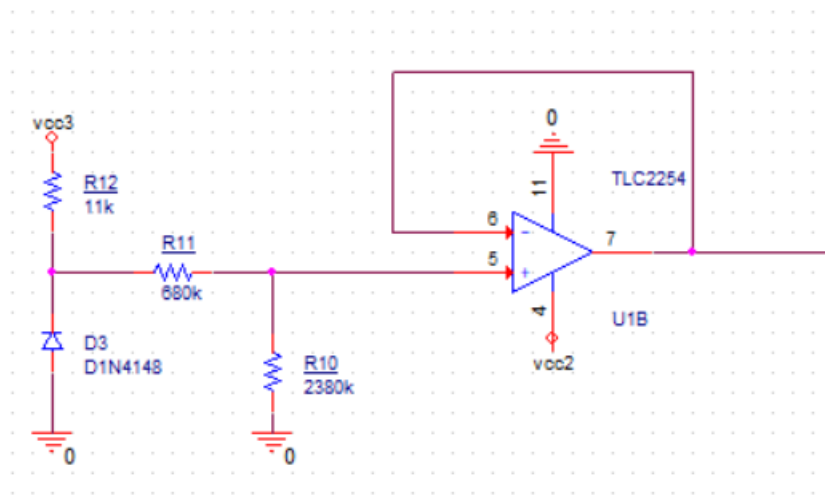
$$R_{10} = \frac{2.8 * 680 * 1000}{3.6 - 2.8} = 2,38 \text{ M}\Omega$$

3.2) La borne - est reliée à la sortie. On a donc l'égalité $V_+ = V_-$ et $V_- = V_r$.

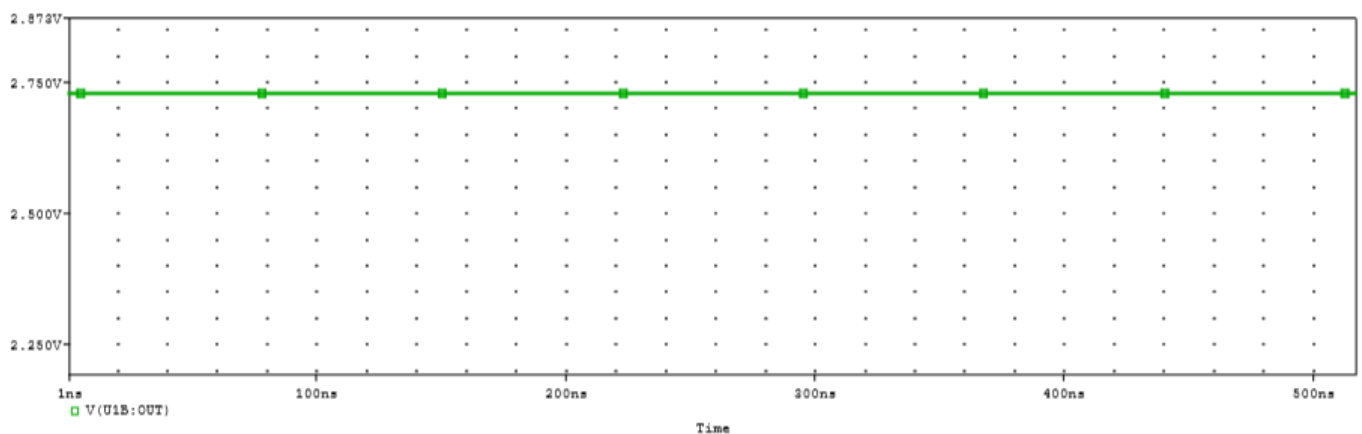
On a donc $V_+ = V_- = V_r = 2.8 \text{ V}$

4.2) Le montage de l'amplificateur est un montage suiveur. Il a pour rôle d'isoler le circuit.

On réalise l'étage sur PSpice, à noter que la diode D3 (de tension UD3) est du même type que la diode D1 du premier montage. On le positionne en haut de la structure précédente :



On lance ensuite la simulation :



Le résultat est de nouveau légèrement plus bas : $V_r = 2.746 \text{ V}$ au lieu des 2.8 V attendus après étude théorique.

5) Etage décalage

5.1) L'AOP est supposé parfait, on a ainsi : $i_+ = i_- = 0$. Le régime est linéaire. On a donc $V_+ = V_-$.

Par application du pont diviseur de tension : $V^+ = \frac{R_9}{R_8 + R_9} * V_a$

Et par le théorème de Millman : $V^- = \frac{\frac{V_d}{R_6} + \frac{V_r}{R_7}}{\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7}} = \frac{V_r * R_6 + V_d * R_7}{R_6 + R_7}$.

On peut ensuite mettre en relation les deux par l'équation $V_+ = V_-$.

$$\frac{V_r * R_6 + V_d * R_7}{R_6 + R_7} = \frac{R_9}{R_8 + R_9} * V_a$$

$$V_d = \frac{R_6 + R_7}{R_7} * \left(V_a * \frac{R_9}{R_8 + R_9} - \frac{R_6}{R_6 + R_7} * V_r \right)$$

On a donc exprimé la tension de sortie V_d en fonction des composants et tensions du montage.

5.2) Toutes les résistances sont égales. On a alors :

$$V_d = 2 * \left(V_a * \frac{1}{2} - \frac{1}{2} * V_r \right) = V_a - V_r$$

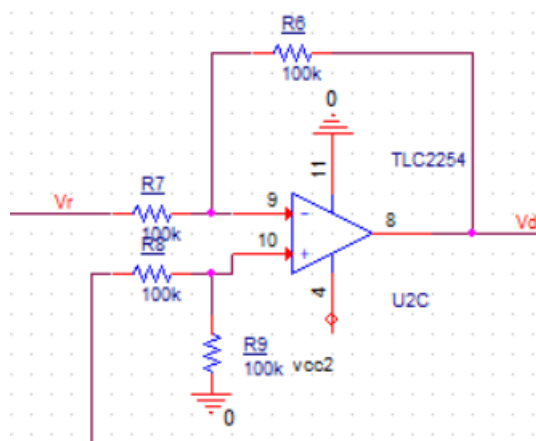
5.3) Il s'agit là d'un montage différentiel.

On calcule la tension V_d dans les deux conditions de température

Pour -40°C : $V_d = 6.069 - 2.8 = 3.269 \text{ V}$

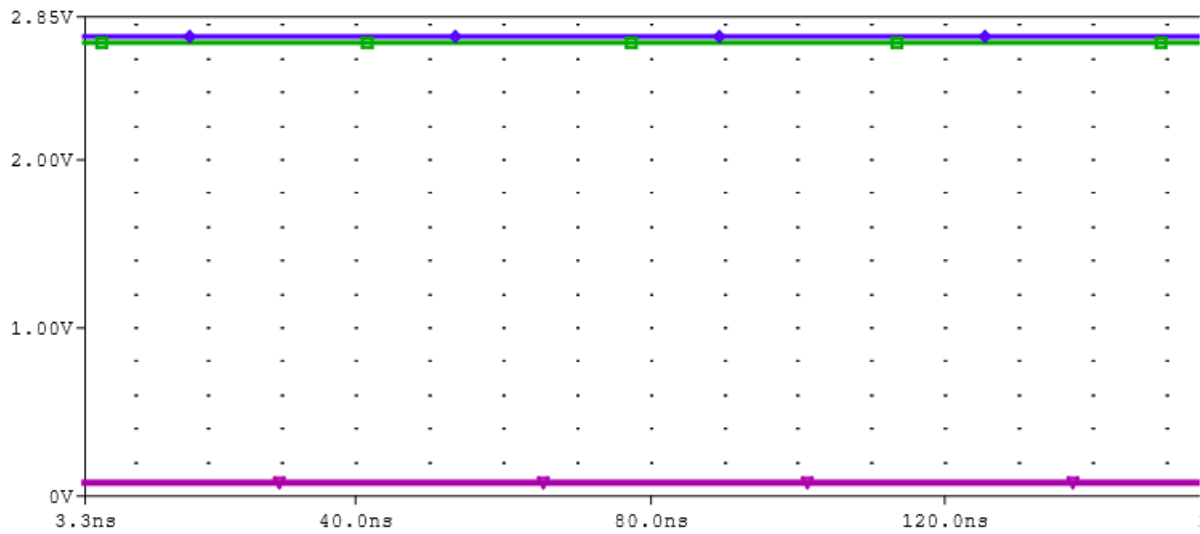
Pour 200°C : $V_d = 2.898 - 2.8 = 0.098 \text{ V}$, V_d doit donc être comprise entre ces deux valeurs.

On reproduit le montage sur Pspice. Les tensions d'entrée de l'AOP V_r et V_a sont les tensions de sortie des deux étages précédents. On le relie donc aux précédents :

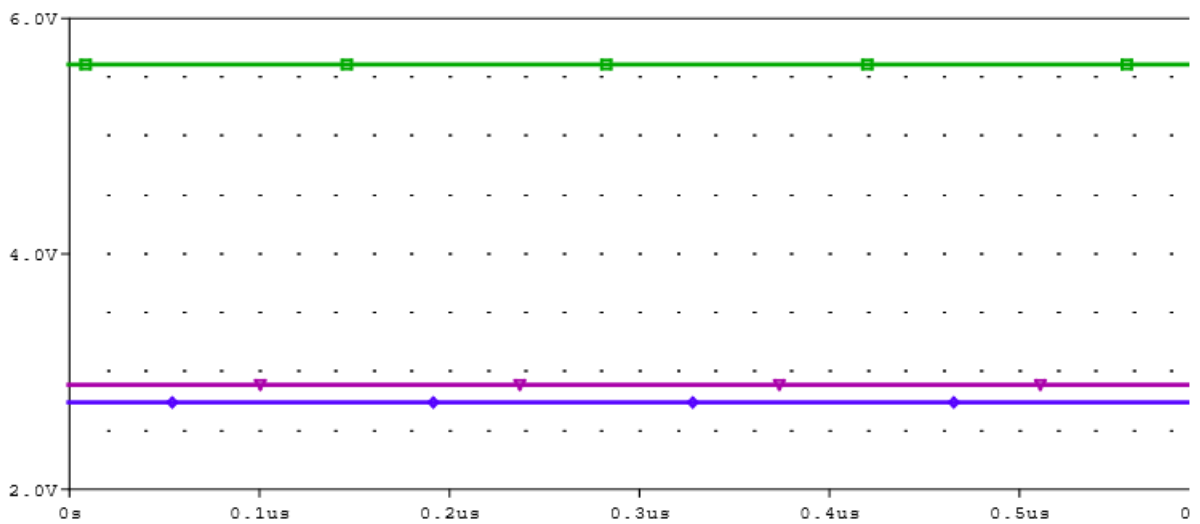


Comme à chaque fois, on lance ensuite la simulation à nos deux valeurs de résistances, correspondant aux deux températures extrêmes (Sur les deux graphiques, c'est la courbe violette qui représente la tension V_d , les deux autres étant respectivement V_a en bleu et V_r en vert. On les laisse pour justifier notre résultat théorique précédent) :

A -40°C :



A 200°C :



La tension V_d dépend de la tension V_a , elle-même dépendante de la tension V_{cap} . Les incertitudes sont ainsi plus élevées. On a ainsi 0.084 au lieu de 0.098 et 2.95 au lieu de 3.269

6) Etage correction du gain :

6.1) Pour ce dernier étage du circuit, on a de nouveau affaire à un montage linéaire : $V^+ = V^-$

Or on détermine V^- par un pont diviseur de tension : $V^- = \frac{R4}{R4+RV1} * V_{out} = V^+ = V_d$

$$\text{On a donc : } \frac{R4}{R4+RV1} * V_{out} = V_d \Leftrightarrow V_{out} = V_d * \frac{R4+RV1}{R4}$$

6.2) Le montage est non-inverseur.

6.3) On souhaite que la résistance RV1 soit réglée de telle sorte que l'amplification soit de 1.5. Avec l'équation précédente, on ressort :

$$\frac{V_{out}}{V_d} = \frac{R4+RV1}{R4} = 1 + \frac{RV1}{R4}$$

On isole ensuite la résistance RV1 :

$$RV1 = R4 * \left(\frac{V_{out}}{V_d} - 1 \right)$$

On effectue enfin l'application numérique, et on remplace le quotient par l'amplification souhaitée, soit 1.5 :

$$RV1 = (1.5 - 1) * 100\,000 = 0.5 * 100\,000 = 50\,000\,Ohm = 50k\,Ohm$$

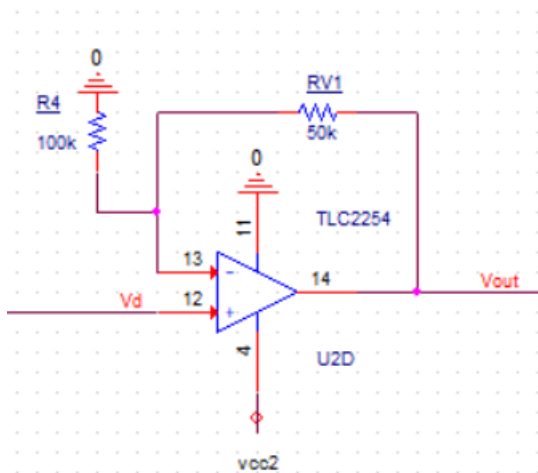
On doit donc régler RV1 à 50k Ohm pour amplifier 1.5 fois la tension de sortie.

6.4) Avec l'expression littérale de V_{out} déterminée en 5.1), on peut déterminer les deux cas extrêmes de V_{out} :

$$\text{Pour } T = -40^\circ\text{C} : V_{out} = 0.098 * 1.5 = 0.147\,V$$

$$\text{Pour } T = 200^\circ\text{C} : V_{out} = 3.269 * 1.5 = 4.904\,V$$

Voici le montage réalisé sur Pspice :



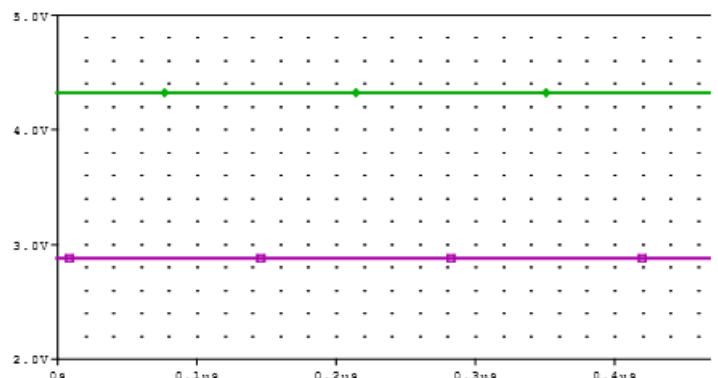
Il s'agit de la dernière partie du circuit.

Nous allons désormais lancer la simulation et afficher les tensions V_{out} et V_d , puis calculer leur rapport pour voir s'il est bien égal, ou du moins très proche, de l'amplification x 1.5 attendue d'après l'étude théorique.

On obtient les courbes ci-dessous pour $T = 200^\circ\text{C}$:

Avec 4.32V en V_{out} et 2.89V en V_d , on en déduit le quotient $\frac{4.32}{2.89} = 1.49 \approx 1.5$

L'amplification est proche de celle attendue



7) Synthèse :

On rentre les résultats expérimentaux dans un tableau :

Température extérieure (°C)	V _{cap} (V)	V _a (V)	V _r (V)	V _D (V)	V _{out} (V)
-40 °C	0.128	2.829	2.75	8.4*10 ⁻²	0.358
+200 °C	0.267	5.992	2.75	3	4.328

Pour que le convertisseur analogique traite les données, la tension de sortie doit être comprise entre 0 et 5V, en s'approchant de 0 pour le minimum et de 5 pour le maximum de température. C'est le cas ici : la tension de sortie V_{out} est relativement proche de 0 aux faibles températures, et peu éloignée de 5V pour les températures les plus chaudes. Le cahier des charges est donc bel et bien respecté.

8) Equation linéaire de la tension :

8.1) La tension de sortie V_{out} varie en fonction de la température T, soit V_{out} = f(T)

Il s'agit d'une fonction affine, d'une droite linéaire de type V = aT + b.

Pour déterminer son équation, on détermine son coefficient directeur a, puis son ordonnée à l'origine b :

Coefficient directeur a :

On peut déterminer son coefficient directeur avec ses points d'abscisses et d'ordonnées sur [-40 ; 200]

Les abscisses sont -40 et 200, les ordonnées sont 0.358 et 4.328

On a le quotient : $\frac{4.328 - 0.358}{200 - (-40)} = 1.65 \cdot 10^{-2}$, très faible mais cohérent, car la tension n'augmente 5 volts pour une variation de 240°C. On a donc a = $1.65 \cdot 10^{-2}$

Ordonnée à l'origine b :

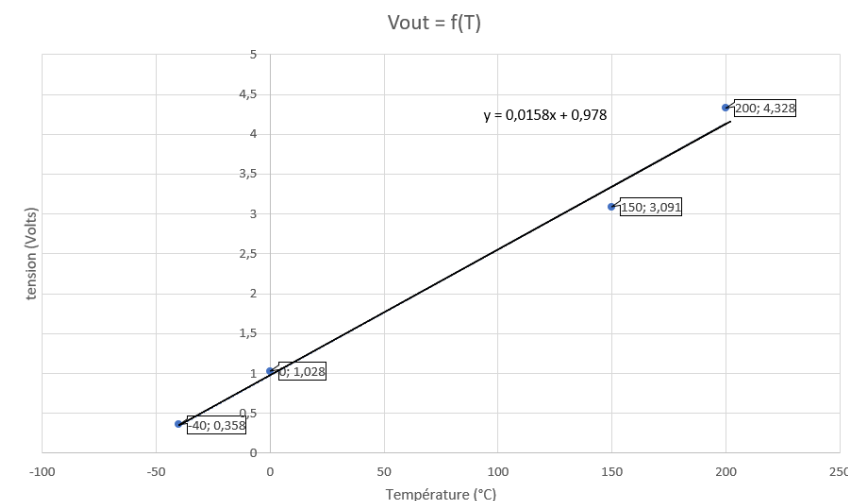
On calcule l'ordonnée à l'origine b grâce au coefficient directeur A et à une valeur particulière de la droite. On prend ici le point de coordonnée $\left(\begin{smallmatrix} 200 \\ 4.328 \end{smallmatrix}\right)$

$$4.328 = 1.65 \cdot 10^{-2} \cdot 200 + b \Leftrightarrow b = 4.328 - 1.65 \cdot 10^{-2} \cdot 200 = 1.028$$

On a donc b = 1.028

L'équation décrivant la variation de la tension en fonction de la température est donc la suivante :

$$V = 1.65 \cdot 10^{-2}T + 1.028$$



Grâce à Excel, on peut tracer cette droite (voir figure ci-contre)

L'équation est effectivement relativement proche de celle calculée

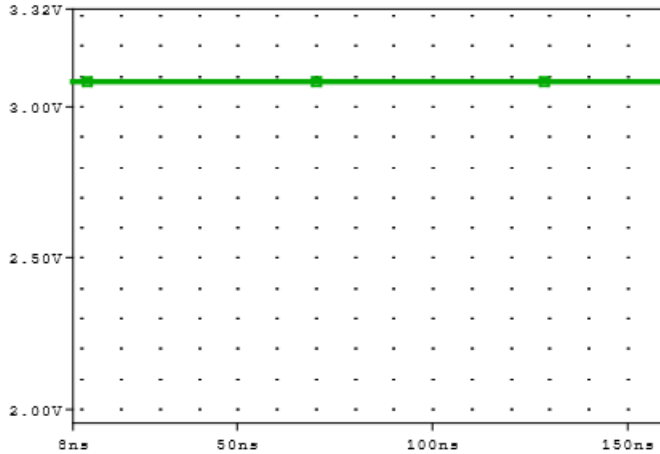
8.2) A l'aide de l'équation précédente : $T = \frac{3.5 - 1.028}{1.65 \times 10^{-2}} \approx 150^{\circ}\text{C}$

On recalcule alors la valeurs de la résistance RPT100 pour une température de 150°C avec la formule du sujet:

$$RPT100 = 100 * (1 + 3.9083 * 10^{-3} * 150 - 5.775 * 10^{-7} * 150^2)$$

$$\Leftrightarrow RPT100 = 100 * (1.5862 - 0.0123)$$

$$\Leftrightarrow RPT100 = 158.62 - 1.23 = \mathbf{157.39\ \Omega}$$



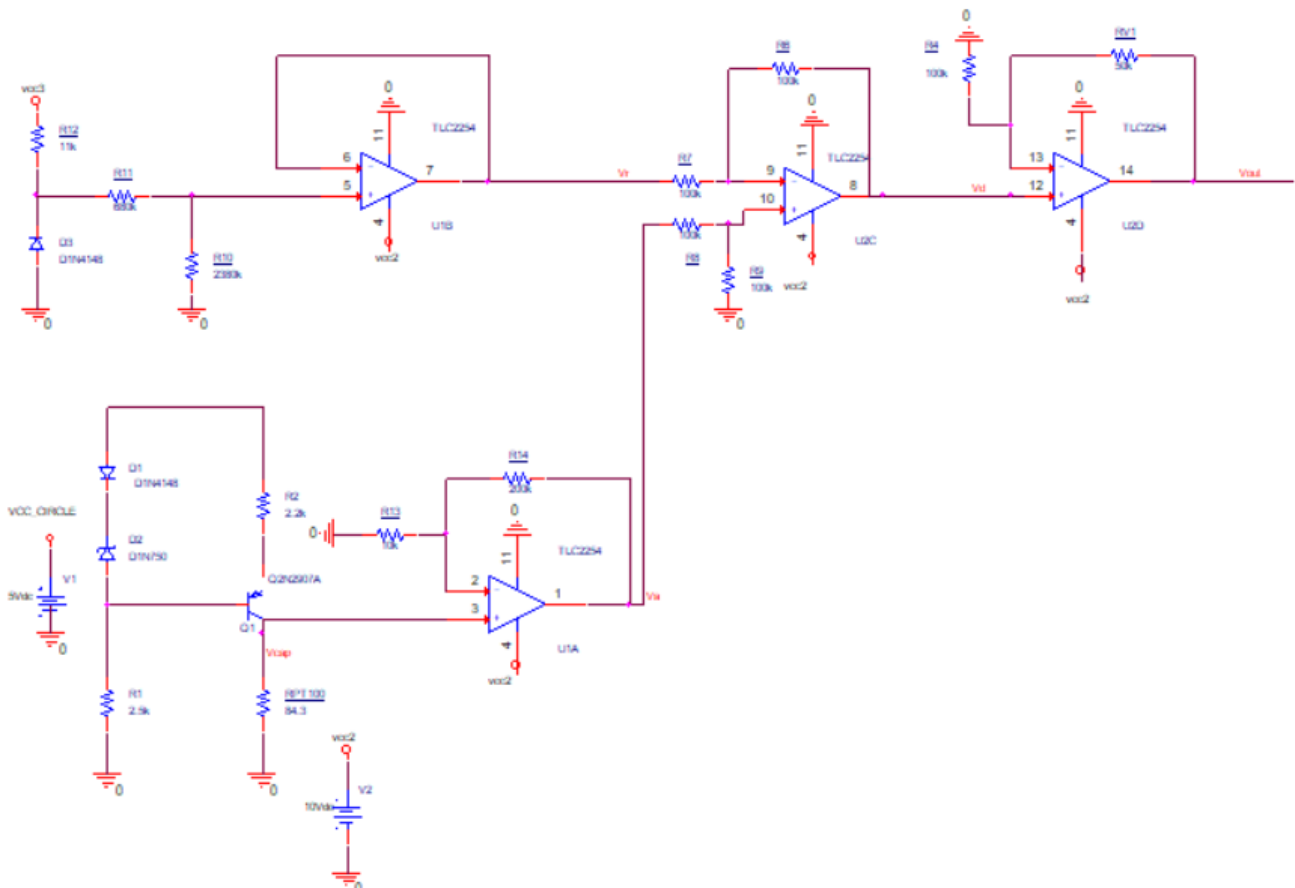
On remplace alors la valeur de 157.39 Ohm dans le circuit (étage 1) et on lance la simulation pour voir si effectivement, nous retombons sur la bonne valeur de tension (à savoir 3.5 V)

Le résultat est pourtant moins élevé, 3.09 V (voir profil de simulation ci-contre)

A cette échelle du circuit, les incertitudes sont d'autant plus grandes. En effet la tension de sortie et la résistance étudiée se trouvent à bonne distance, ce qui pourrait expliquer l'écart observé.

9) Schéma P-Spice :

Voici le schéma complet de tout le circuit réalisé sur P-Spice :



10) Proposition de modification et conclusion du mini projet:

La sonde PT100 pourrait tout à fait être substituée à une sonde à thermistance NTC (pour Negative Temperature Coefficient en anglais). Ce sont des résistances à coefficient de température négatif, autrement dit, la résistance diminue lorsque la température augmente. Ce modèle est toujours linéaire, mais inversé, d'où le coefficient négatif. Ils sont principalement utilisés comme capteurs de température résistifs et dispositifs limiteurs de courant. De plus, leur sensibilité à la température est environ dix fois supérieure à celle des capteurs RTD dont notre sonde PT100 fait partie. Une sonde à thermistance CTN serait donc (par exemple) plus efficace. Par ailleurs, les capteurs NTC sont généralement utilisés sur une plage de -55 à 200° C. Or notre plage d'étude est de -40 à 200° C, qui est un intervalle inclus dans le précédent. Avec ce capteur, l'étude pourrait donc être élargie à des températures encore plus froides.

A travers ce mini projet, nous avons pu développer nos compétences en électronique, tant l'aspect théorique, à travers les calculs, que la simulation, en réalisant les étages du circuit sur P Spice. De plus, les recherches que nous avons dues effectuées sur les capteurs de température ont enrichies nos connaissances en ingénierie. Nous avons amélioré nos capacités tant théoriques que pratique ou même intellectuelles.

Bibliographie (sources) :

- Mini Projet Electronique – sujet
- <https://blog.microjoe.org/2015/thermistance-ntc>.
- <https://www.ni.com/fr-fr/innovations/white-papers/06/overview-of-temperature-sensors.html>

Auteurs :

PEYRIDIEUX Bastien,

DECRENISSE Romain,

Aero 1U2

11/05/2020