

Laboratoire 4

L'amplificateur d'instrumentation

Équipier:

Nom: Loïc Olivier Matricule: 536 898 399
Nom: Xavier Isabel Matricule: 536 892 061

Semaine 1 - Questions prélaboratoires et simulations SPICE

1. Configuration d'amplificateur d'instrumentation

1.1 Calcul du gain différentiel et du gain en mode commun

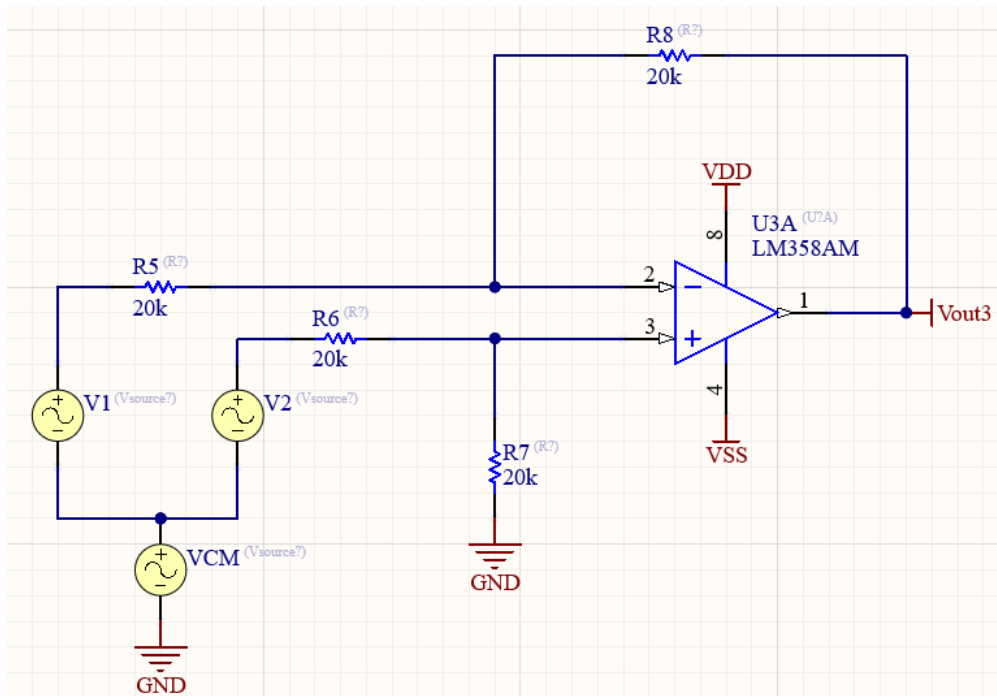


Figure 1: Montage de l'amplificateur différentiel à un ampli-op

Gain en mode commun

Afin de calculer le gain en mode commun, on annule les sources représentant le signal différentiel, V_1 et V_2 en les court-circuitant.

Ensuite, pour simplifier l'analyse, on procède par superposition en annulant d'abord la source commune connectée à R_6 . De cette façon, on retrouve la configuration inverseur de l'ampli-op et on obtient l'expression suivante :

$$V_{out1} = \frac{-R_8}{R_5} V_{CM}$$

Puis, on reconnecte la source annulée, et on court-circuite la source commune connectée à R_5 . On reconnaît la configuration non-inverseuse, avec toutefois un diviseur tension à l'entrée.

$$V_+ = \frac{R_7}{R_6 + R_7} V_{CM}$$

$$V_{out2} = \left(1 + \frac{R_8}{R_5}\right) V_+ = \left(1 + \frac{R_8}{R_5}\right) \frac{R_7}{R_6 + R_7} V_{CM}$$

$$V_{out} = V_{out1} + V_{out2} = V_{CM} \left[\frac{R_7}{R_6 + R_7} \left(1 + \frac{R_8}{R_5}\right) - \frac{R_8}{R_5} \right]$$

En prenant $R_5 = R_6 = 1k\Omega$ et $R_7 = R_8 = 8k\Omega$ on obtient le gain en mode commun théorique suivant :

$$\frac{V_{out}}{V_{CM}} = \frac{R_7}{R_6 + R_7} \left(1 + \frac{R_8}{R_5}\right) - \frac{R_8}{R_5} = \frac{8k}{1k + 8k} \left(1 + \frac{8k}{1k}\right) - \frac{8k}{1k} = 0$$

Gain en mode différentiel

Pour le calcul du gain en mode différentiel, on procède par superposition en annulant tout d'abord la source V_{CM} pour le raisonnement entier.

Le raisonnement est identique à celui utilisé pour le gain en mode commun avec la seule différence est que lors de l'analyse par superposition, la source d'entrée pour la configuration inverseuse est V_1 et est V_2 pour la non-inverseuse :

$$V_{out} = V_{out1} + V_{out2} = V_2 \left[\frac{R_7}{R_6 + R_7} \left(1 + \frac{R_8}{R_5}\right) \right] - V_1 \left[\frac{R_8}{R_5} \right]$$

En prenant $R_5 = R_6 = 1k\Omega$ et $R_7 = R_8 = 8k\Omega$ on obtient le gain en mode différentiel théorique suivant :

$$V_{out} = V_2 \left[\frac{8k}{1k + 8k} \left(1 + \frac{8k}{1k}\right) \right] - V_1 \left[\frac{8k}{1k} \right] = 8V_2 - 8V_1 = 8(V_2 - V_1)$$

$$\frac{V_{out}}{V_2 - V_1} = 8$$

1.2 Calcul théorique du gain différentiel de l'amplificateur (voir la figure ci-dessous en 1.3)

Ce montage à 3 amplificateurs opérationnels peut être divisé en deux étages. Le premier est constitué des deux amplis-op $U11A$ ainsi que $U11B$ et permet d'amplifier le signal différentiel, en conservant toutefois le signal commun (sans gain). Le second étage, constitué de l'ampli $U12A$ est identique au montage analysé en 1.1, pour cette raison, les résultats obtenus avec l'analyse du second étage seront réutilisés.

Premier étage.

Tout d'abord, les amplis-op ont une rétroaction négative effective qui assure un court-circuit virtuel.

$$V_{-A} = V_{in11}$$

,

$$V_{-B} = V_{in12}$$

La tension aux bornes de R_{12} est donc (pour une convention du courant allant du bas vers le haut)

$$V_{R12} = V_{in12} - V_{in11} = V_{din} = R_{12} I_{R12} \longrightarrow I_{R12} = \frac{V_{din}}{R_{12}}$$

On peut exprimer les valeurs de sortie de l'ampli-op $U11A$, V_1 et de l'ampli-op $U11B$, V_2 en fonction du courant dans $R12$.

$$V_1 = V_{11} - R_{11}I_{R12} = V_{11} - R_{11}\frac{V_{din}}{R_{12}} = V_{11} - 1k\frac{V_{din}}{180} = V_{11} - 5.55V_{din}$$

$$V_2 = V_{12} + R_{13}I_{R12} = V_{12} + R_{13}\frac{V_{din}}{R_{12}} = V_{12} + 1k\frac{V_{din}}{180} = V_{12} + 5.55V_{din}$$

Ces tensions constituent l'entrée du deuxième étage. Il suffit maintenant de récupérer l'expression du gain différentiel du montage à 1 ampli-op trouvée en 1.1 :

$$V_{out} = V_2 \left[\frac{R_{17}}{R_{15} + R_{17}} \left(1 + \frac{R_{16}}{R_{14}} \right) \right] - V_1 \left[\frac{R_{16}}{R_{14}} \right] = V_2 \left[\frac{1k}{1k + 1k} \left(1 + \frac{1k}{1k} \right) \right] - V_1 \left[\frac{1k}{1k} \right]$$

$$V_{out} = V_2 - V_1 = (V_{12} + 5.55V_{din}) - (V_{11} - 5.55V_{din}) = 12.1V_{din}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{din}} = 12.1$$

Gain commun du deuxième étage

En reprenant l'expression trouvée en 1.1 :

$$V_{out} = V_{out1} + V_{out2} = V_{CM} \left[\frac{R_7}{R_6 + R_7} \left(1 + \frac{R_8}{R_5} \right) - \frac{R_8}{R_5} \right] = V_{CM} \left[\frac{1k}{1k + 1k} \left(1 + \frac{1k}{1k} \right) - \frac{1k}{1k} \right] = 0$$

1.3 Schéma du circuit dans Altium Designer

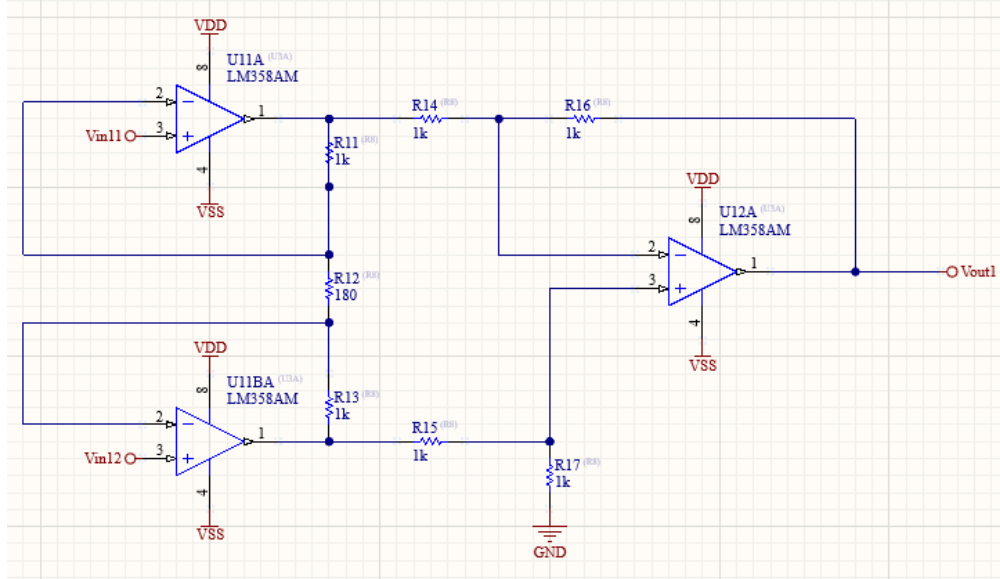


Figure 2: Schéma Altium de l'amplificateur d'instrumentation à trois ampli-op

1.4 Simulation temporelle du circuit avec $V_{d11} = V_{d12} = 16mV$ à 1kHz et $V_{cm1} = 120mV$ à 60 Hz

La sortie théorique attendu aurait été nulle selon les calculs. Toutefois, les amplis-op n'ont pas un comportement statique en fréquence et leur gain n'est pas infinie. Ces imperfections font en sorte que ce circuit d'amplification a un gain en mode commun non-nul, mais toutefois assez faible.

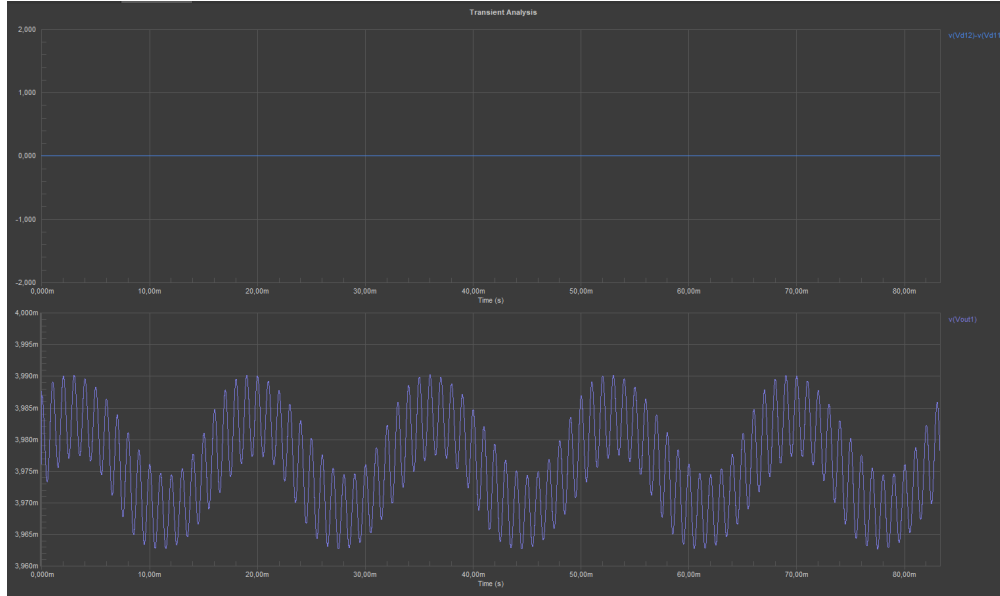


Figure 3: Entrée $V_{12} - V_{11}$ (première courbe) et sortie V_{out1} (deuxième courbe)

On observe un signal de sortie ayant une composante DC d'environ 3.98mV. Ceci est surprenant puisque que les sources n'ont pas de composante DC, ceci peut toutefois être expliqué par les imperfections petit signal des amplis-op. Il y a aussi la somme de deux ondes sinusoïdales aux fréquences respectives de 60Hz et de 1kHz des sources d'entrée. L'amplitude de l'onde à 60 Hz est plus grande que celle de l'onde à 1kHz.

1.5 Fréquence de coupure, gain différentiel et taux de rejection du mode commun (TRMC) :

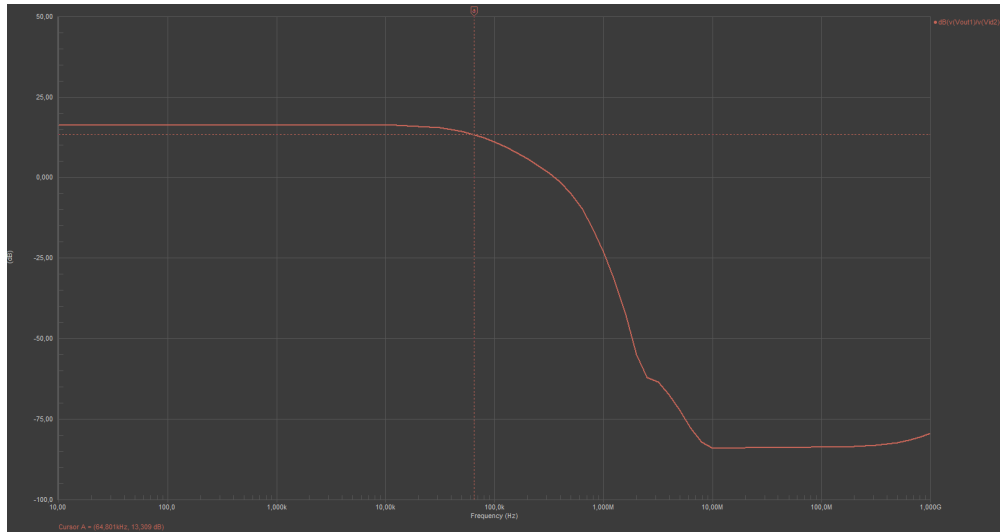


Figure 4: Réponse en fréquence (gain) en mode différentiel du montage à 3 amplificateurs

La fréquence de coupure à -3dB est de $\approx 64.8 \text{ kHz}$

$$TRMC = 20 \log \frac{A_{dmax}}{A_{cmin}} = 16.3dB - (-84.4dB) = 100.7dB$$

TRMC en fonction de la fréquence

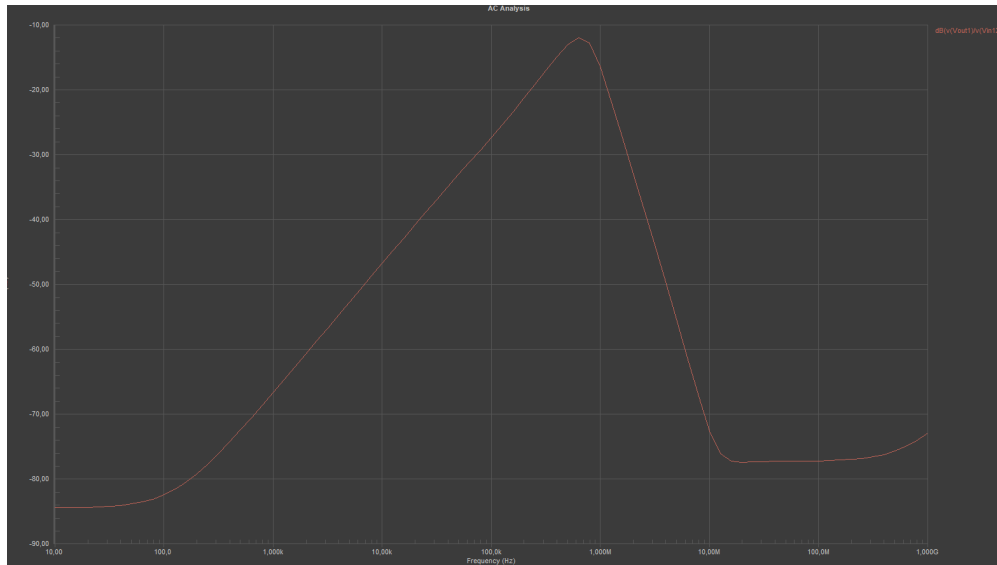


Figure 5: Réponse en fréquence (gain) en mode commun du montage à 3 amplificateurs

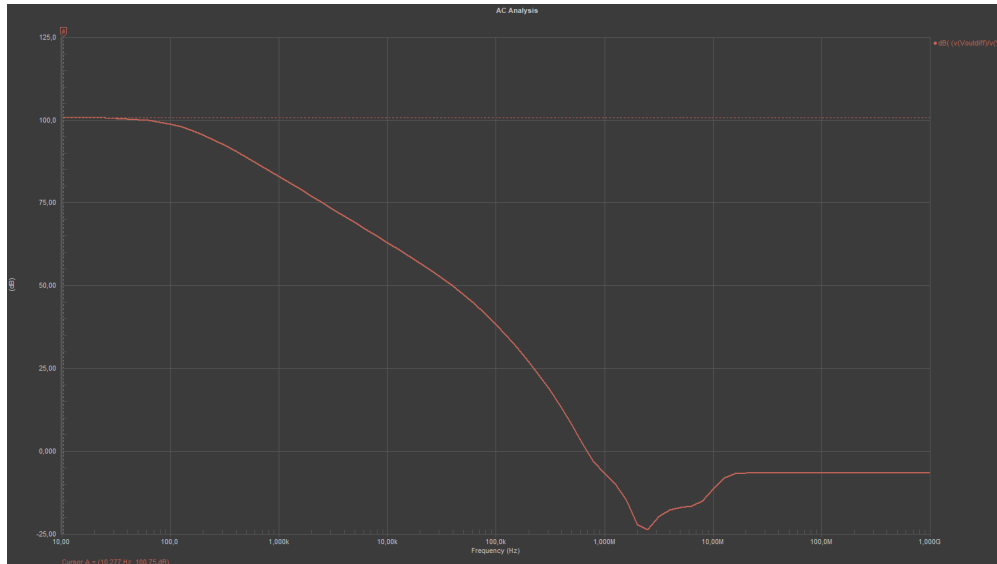


Figure 6: TRMC de l'ampli-op en fonction de la fréquence

À partir de cette courbe du TRMC obtenu à partir de altium (en doublant le montage, réponse en fréquence, division des gains en db), on constate que l'ampli-op a un TRMC maximal de 100 dB à basse fréquence. Sa valeur chute dramatiquement jusqu'à atteindre un minimum aux environ de 2.5 MHz ce qui révèle que l'amplificateur operationnel rejette très mal le signal commun lorsque la fréquence est trop élevée (au delà d'environ 280 kHz avec un TRMC de 20 dB).

Figure 7: Signaux V_{o+} et V_{o-} à l'oscilloscope

Semaine 1 - travaux à effectuer au laboratoire

1. Mesure de signaux bruités

1.1 ...

1.2 Captures des signaux V_{o+} et V_{o-} à l'oscilloscope

1.1 Conception du montage suivant :

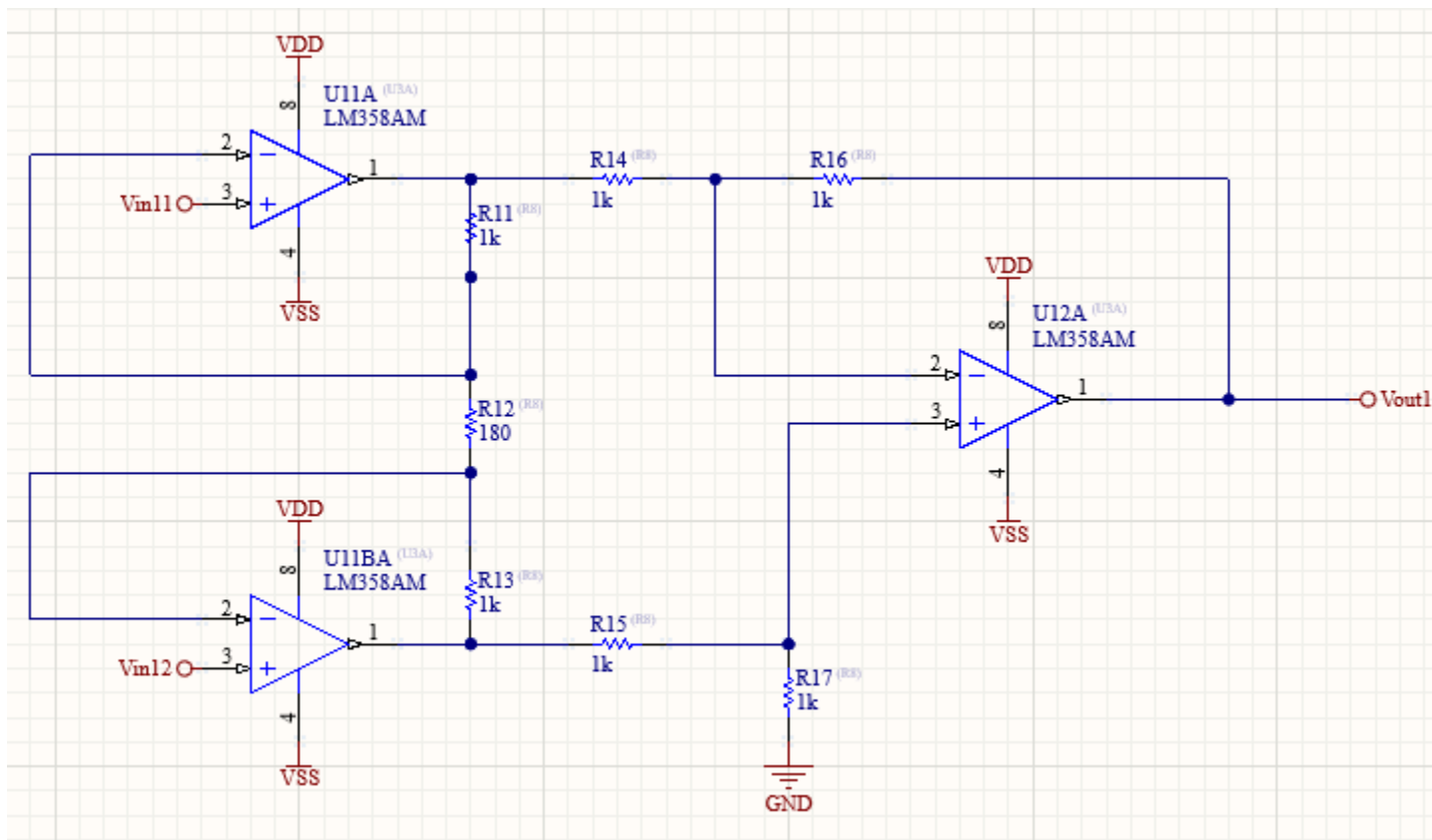


Figure 8: L'amplificateur d'instrumentation à trois amplis-op

1.2 **Signal** V_{out} à la sortie du montage d'amplificateur d'instrumentation avec pour entrée la source différentielle (V_{o+} et V_{o-}) :

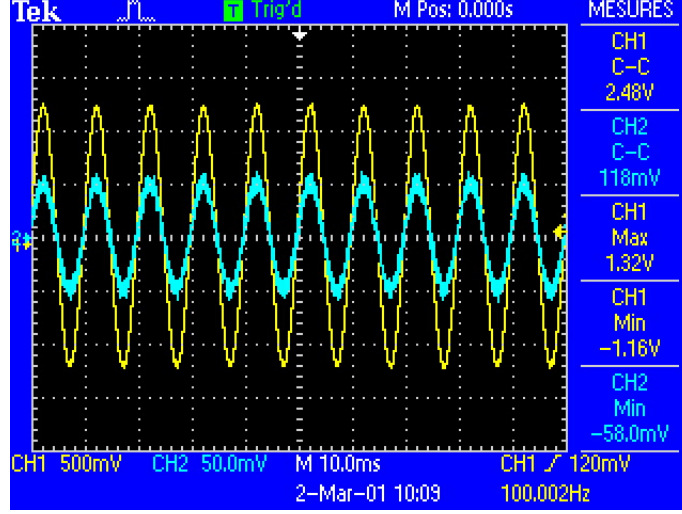


Figure 9: Signal V_{out} à l'oscilloscope

1.3 Calcul du TRMC du circuit

Pour ce faire, on calcule d'abord le gain en mode différentiel du montage en annulant le signal commun V_{cm} (au ground). On compare la sortie au signal différentiel et on obtiens le gain différentiel A_d .

$V_{out-id} = \dots$

$$A_d = \frac{V_{out-id}}{V_{o+} - V_{o-}} = \frac{V_{out-id}}{V_i d} = \frac{V_{out-id}}{V_i d}$$

On répète la même chose en annulant cette fois le signal différentiel V_{sin} (au ground). On compare la sortie au signal commun et on obtiens le gain commun

$$A_d = \frac{V_{out-cm}}{V_{cm}} = \frac{V_{out-cm}}{50mV}$$

Mode	V_{in}	V_{out}	Gain (A)
diff. (d)	122m	2.48	20.33
commun (cm)	1.90	50.8m	0.0267

Table 1: Mesures en mode commun et différentiel pour le calcul du TRMC

Calcul du TRMC :

$$TRMC = 20 \log \frac{A_d}{A_{cm}} = 20 \log \frac{20.33}{0.0267} = 57.62dB$$

1.4 Fréquence de coupure à -3dB du circuit. Mettre V_{d12} à la masse et $V_{d11} = 100mV_p - p$:

$$f_{-3dB} = 155kHz$$

Semaine 2 - Questions prélaboratoires et simulations SPICE

2.1. Calcul du gain différentiel du circuit de la figure 5

Selon la fiche technique, le gain G est décrit par l'équation suivante :

$$G = 5 + \frac{80k\Omega}{R_G}$$

où R_G correspond à la résistance R_{21} sur la figure 5.

$$R_G = R_{21} = 10K\Omega \longrightarrow A_{diff} = G = 5 + \frac{80k\Omega}{10k\Omega} = 13$$

2.2. ...

2.3. Simulation temporelle du circuit

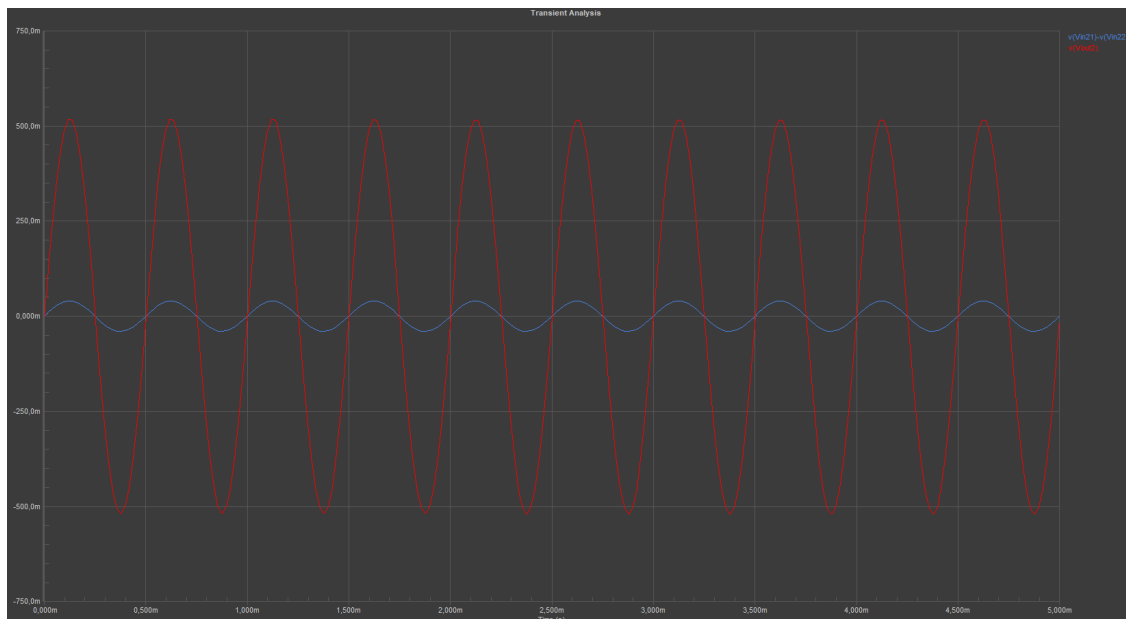


Figure 10: Signal d'entrée et de sortie du circuit.

Comparaison entre l'entrée et la sortie. La composante commune ne semble avoir été atténuée considérablement. On constate tout de même une certaine modulation de l'amplitude du signal de sortie à la fréquence de la source commune (120 Hz) lorsque la simulation temporelle est réalisée pour une période plus grande. Le gain entre le signal différentiel et la sortie est de 12.9 ce qui correspond très bien à la valeur obtenue à l'aide de l'expression fournie dans la fiche technique du *INA*.

2.4. Simulation fréquentielle du circuit

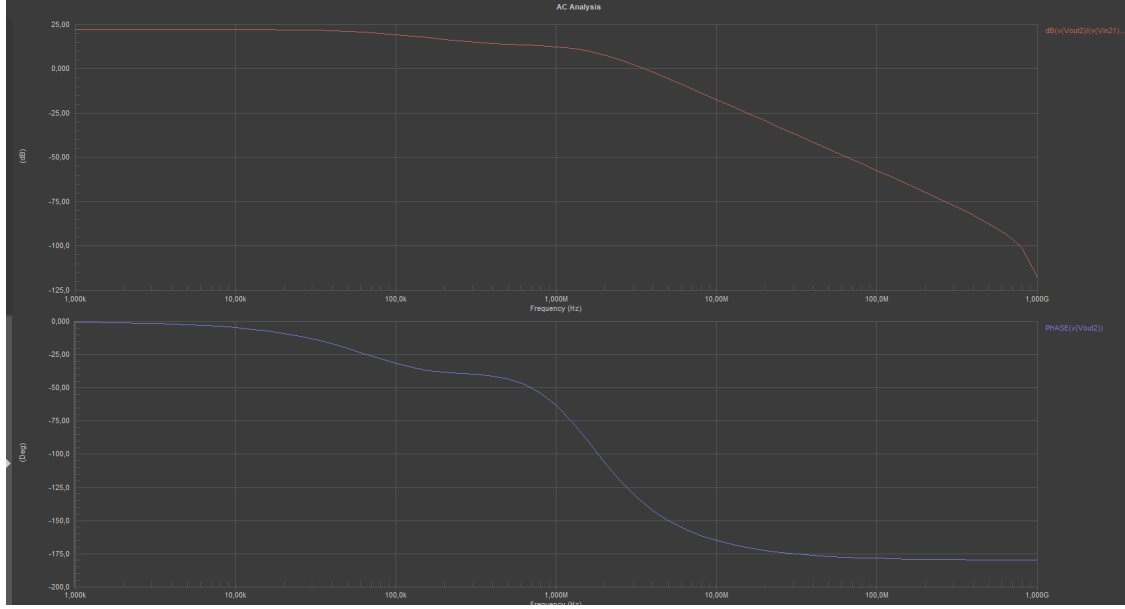


Figure 11: Diagramme de Bode en gain et en phase du circuit (en mode différentiel).

$$f_{-3dB} \approx 104.9kHz$$

$$A_{diff} = 12.99 = 22.275dB$$

$$A_{cm} = -37.7dB$$

$$TRMC = 20 \log \frac{A_{diff}}{A_{cm}} = 22.275 - (-37.7)dB \approx 60dB$$

Qu'advient-il du TRMC en fonction de la fréquence? Expliquez.

Jusqu'à environ 1MHz, le gain en mode commun augmente alors que le gain différentiel diminue. Il en résulte que le TRMC diminue avec la fréquence (pour cette plage). La performance de l'amplificateur différentiel diminue donc lorsque la fréquence augmente.

3.1. ...

$$V_{in31} = V_{DD} \left(\frac{10k}{10k + 10k} \right) = \frac{V_{DD}}{2}$$

$$V_{in32} = V_{DD} \left(\frac{R_T}{R_T + 10k} \right)$$

$$V_{in} = V_{in31} - V_{in32} = V_{DD} \left[\frac{1}{2} - \frac{R_T}{R_T + 10k} \right]$$

$$G = A_{diff} = 5 + \frac{80k}{40k} = 7 \rightarrow V_{out3} = 7V_{in} = 7V_{DD} \left[\frac{1}{2} - \frac{R_T}{R_T + 10k} \right]$$

3.2. Code Arduino

À partir de l'expression précédente, on peut isoler la résistance de la thermistance R_T en fonction de la tension mesurée avec l'arduino.

$$R_T = \frac{10k \left[\frac{1}{2} - \frac{V_{out}}{7V_{DD}} \right]}{\frac{V_{out}}{7V_{DD}} - \frac{1}{2} + 1}$$

* La valeur de la tension réellement mesurée doit être ajustée afin de retrouver V_{out} étant donné le offset d'une valeur V_{ref} y étant appliqué (pour pouvoir lire la valeur avec l'ADC 0-5V).

À partir de l'équation suivante, il est possible de déduire la température en fonction de résistance mesurée :

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{R_T}{R_0} \right)$$

À partir de la fiche technique, on trouve $\beta = 3380$.

```

1 #define tempPin A0
3 #define Vdd 5.0
5 #define R1 9730.0
  #define R2 9770.0
7 #define R3 9610.0
  #define R0 9560.0 //Valeur de la thermistance      temprature ambiante
9 #define beta 3380.0
  #define T0 298.0 //Température ambiante
11 #define R2G = 10000.0
  #define R1G = 100000.0
13
15 float T; // température calcul
  float Rt; // Résistance calcul
17 int Vout;
  int Voutb4;
19 float G;
21
22 void setup() {
23   pinMode(A0, INPUT);
  Serial.begin(9600);
25   G = R2 / R1;
27 }
29 void loop() {
  // Lecture analogique
31   Vout = analogRead(tempPin);
  Voutb4 = map(Vout,0,1023,0,5000);
33   Vout = Voutb4 - 2500.0;
  Vout = Vout / (1 + G);
35
37   // Calcul de la résistance instantanée Rt
  Rt = R3 * ((R2 / (R1 + R2)) - (Vout / (6250.0 * Vdd))) / ((Vout / (6250.0 * Vdd)) - (
    R2 / (R1 + R2)) + 1);
39
  // Calcul de la température
41   T = 1 / ((1/T0) + (1/beta) * (log(Rt / R0)));
43
  //Serial.print("La température est ");
  Serial.println(T);
45   //Serial.println(" Kelvins !");
  delay(50);
47 }
49

```

Figure 12: Code Arduino.

Semaine 2 - Travaux à effectuer au laboratoire

1. Montage de l'amplificateur d'instrumentation INA126

1.1. ...

1.2. Sortie V_{out} du circuit

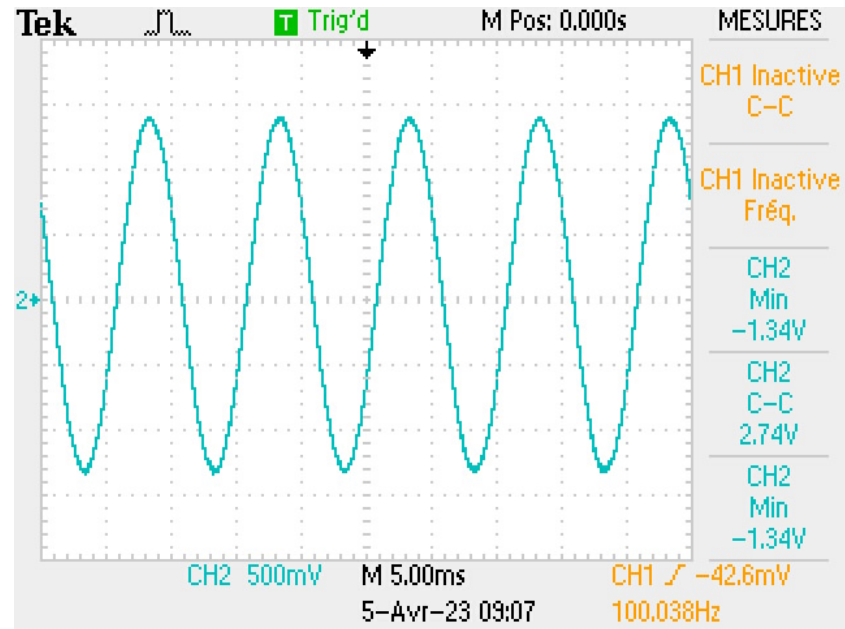


Figure 13: Sortie V_{out} du circuit avec la source commune annulée.

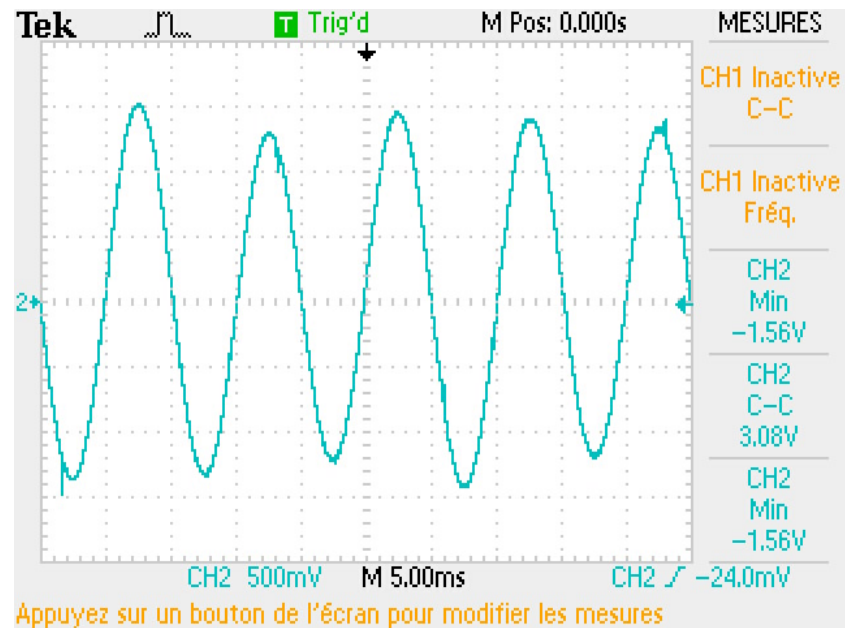


Figure 14: Sortie V_{out} du circuit avec la source commune.

1.3. ...

Mode	V_{in}	V_{out}	Gain (A)
diff. (d)	216m	2.72	12.59
commun (cm)	1.90	240m	0.126

Table 2: Mesures en mode commun et différentiel pour le calcul du TRMC

Calcul du TRMC

$$TRMC = 20 \log \frac{A_d}{A_{cm}} = 20 \log \frac{12.59}{0.126} = 39.99 dB$$

1.4. ...

En comparant nos résultats avec les données de la fiche technique du INA126, on remarque que notre INA126 a vraiment des performances décevantes par rapport à la fiche technique. En effet, on observe un TRMC très bas de 39.99 dB comparé au TRMC promis de la fiche technique de 80-90 dB. Il est difficile d'expliquer une telle différence car l'amplificateur différentiel était utilisé dans sa plage d'opération, avec un gain normal et une fréquence loin de la fréquence de coupure.

1.5. ...

En comparant la performance du INA126 avec l'amplificateur d'instrumentation à trois ampli-op, on remarque que l'amplificateur d'instrumentation à trois ampli-op est supérieur pour ce qui du rejet du mode commun, et ce, d'environ 17.6 dB. Nous nous serions attendu à des performances largement supérieures de la part du INA126, nous sommes donc très déçu et n'avons pas d'explications liées à l'utilisation particulière dont nous avons fait des amplis.

1.6. ...

$$A_{diff} = 26.667 \text{ et } A_{cm} = 0.261$$

$$TRMC = 20 \log \frac{A_d}{A_{cm}} = 40.18667 dB$$

Comparez la valeur du TRMC obtenue avec la valeur précédente et expliquez votre résultat.

La valeur est pratiquement identique malgré le fait que le gain ait été approximativement doublé. La raison est que l'augmentation du gain différentiel a eu pour effet d'augmenter par un même facteur le gain commun ce qui a globalement eu l'effet de modifier que très peu le TRMC.

1.7. ...

$$TRMC|10kHz = 20 \log \frac{A_d}{A_{cm}} = 20 \log \frac{25.19}{0.261} = 39.69 dB$$

Comparez la valeur du TRMC obtenue avec la valeur précédente et expliquez votre résultat.

Les TRMC obtenue à 100 Hz et à 1 KHz sont identiques à celui calculé à la question précédente. Toutefois, la valeur du TRMC pour un signal différentiel de 10KHZ est inférieur de 1%. La raison est que le gain différentiel peut être approximé par un filtre passe-bas. Ainsi, en augmentant la fréquence à 10 KHz, on s'approche légèrement de la fréquence de coupure, le gain est donc plus faible. Le gain en mode commun est conservé pour sa part puisque le signal commun est toujours à la même fréquence. L'effet globale est une diminution du TRMC.

2. Montage du thermomètre électronique

2.1. ...

2.2. ...

2.3. ...

2.4. ...

2.5. ...

2.6. Capture d'écran du graphique Arduino avec le changement de température

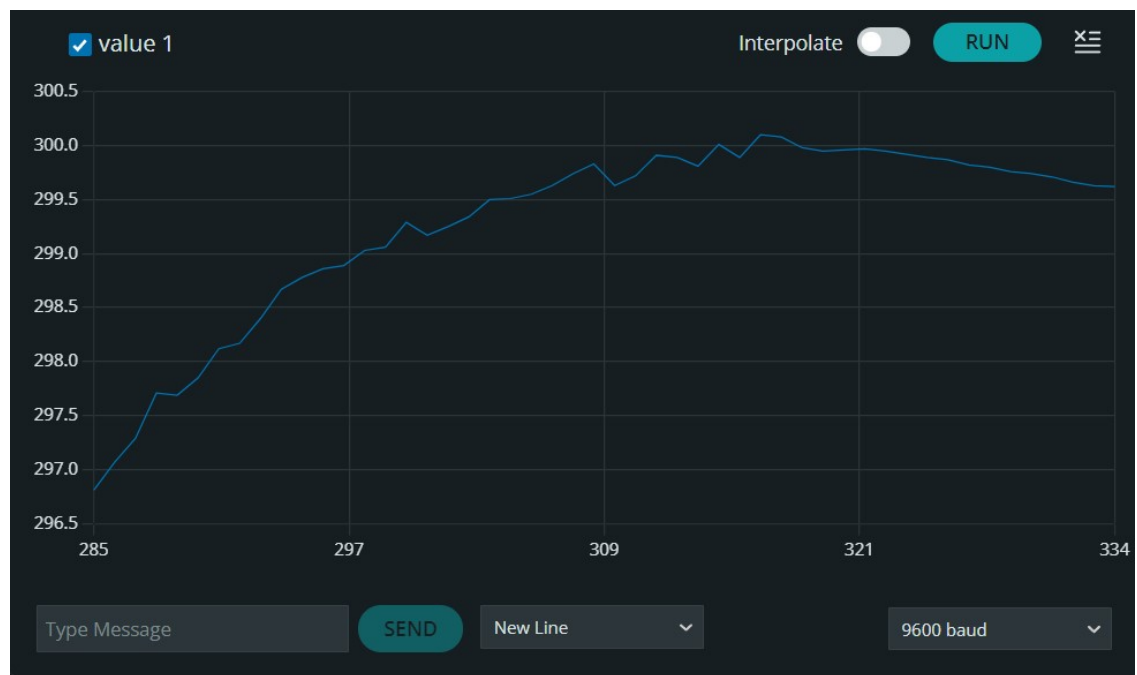


Figure 15: Changement de température en fonction du temps

En effet, on est satisfait du résultat. On remarque une grande précision de notre thermomètre et surtout une grande réactivité en raison du gain que nous avons optimisé à l'aide du potentiomètre.

Rapport et questions post-laboratoire

- 1) Supposez une alimentation bipolaire est de ± 15 V. Donnez le TRMC du INA126 pour un gain de 1000 sur la plage allant de 100Hz à 1 kHz. Référez-vous à la datasheet.

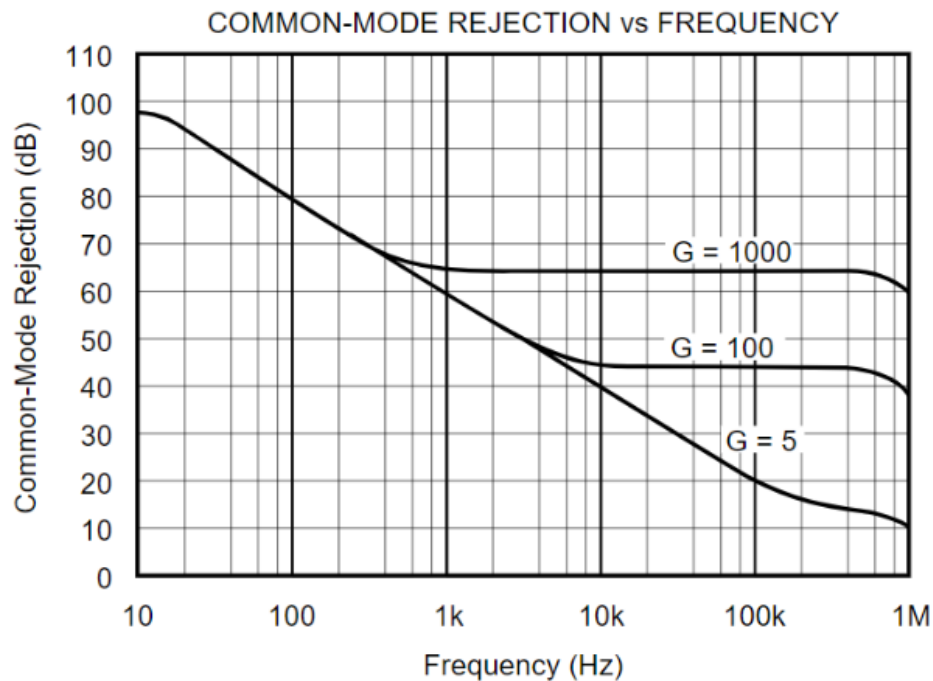


Figure 16: Graphique décrivant TRMC(frequence) de la datasheet

On observe que le TRMC vaut environ 80dB à 100 KHz. Sa valeur diminue de façon linéaire, puis la pente s'estompe jusqu'à un TRMC d'environ 65 dB à 1kHz.

- 2) Décrivez 2 avantages d'un amplificateur d'instrumentation à trois ampli-op par rapport à un simple amplificateur différentiel.

Tout d'abord, l'amplificateur différentiel à 3 ampli-ops permet d'avoir un gain à la fois élevée et précis. Ensuite, les amplificateur différentiel à 3 ampli-ops permettent d'avoir un meilleur rejet de mode commun grâce aux deux amplificateurs tampons qui offre une impédance d'entrée élevée et une impédance de sortie faible. Ceci permet de minimiser certaines erreurs dues aux déséquilibres de gain et de polarisation entre les deux branches constituant le circuit.

- 3) Expliquez l'influence qu'ont les courants de polarisation de l'ampli-op lors de l'amplification de signaux provenant d'une thermistance. Votre explication doit donc montrer dans quel cas nous devons porter une attention particulière au courant de polarisation lors d'un design électronique.

Les courants de polarisation de l'ampli-op lors de l'amplification de signaux provenant d'une thermistance influencent notre impédance d'entrée en la diminuant puisque les courants de polarisation agissent comme source de courant entrant dans l'ampli-op. Cela crée un diviseur courant. Ainsi, plus les résistances utilisées dans le pont de Wheatstone sont grandes et la tension d'alimentation, petite, plus les courants de polarisation affecteront la valeur de la tension mesurée, les courants de polarisation se "couplant" aux résistances disposées dans le pont (dont la thermistance). Pour que l'effet soit négligeable, il faut que les courants du pont de Wheatstone \ll courants de polarisations.