

# 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

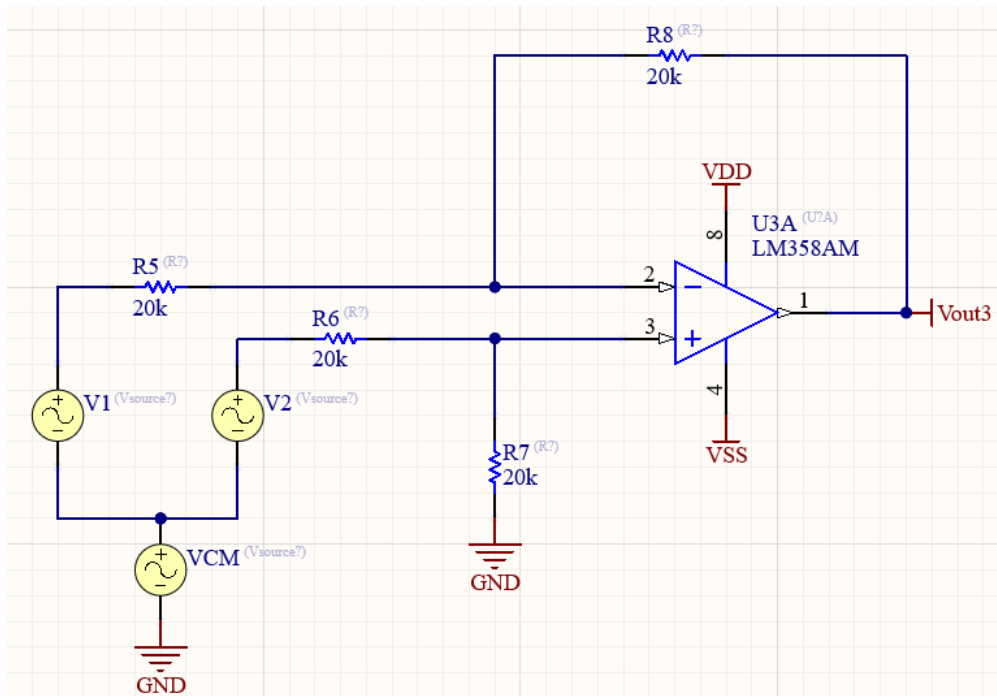


Figure 1: Montage de l'amplificateur différentiel à un ampli-op

#### 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 :

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

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

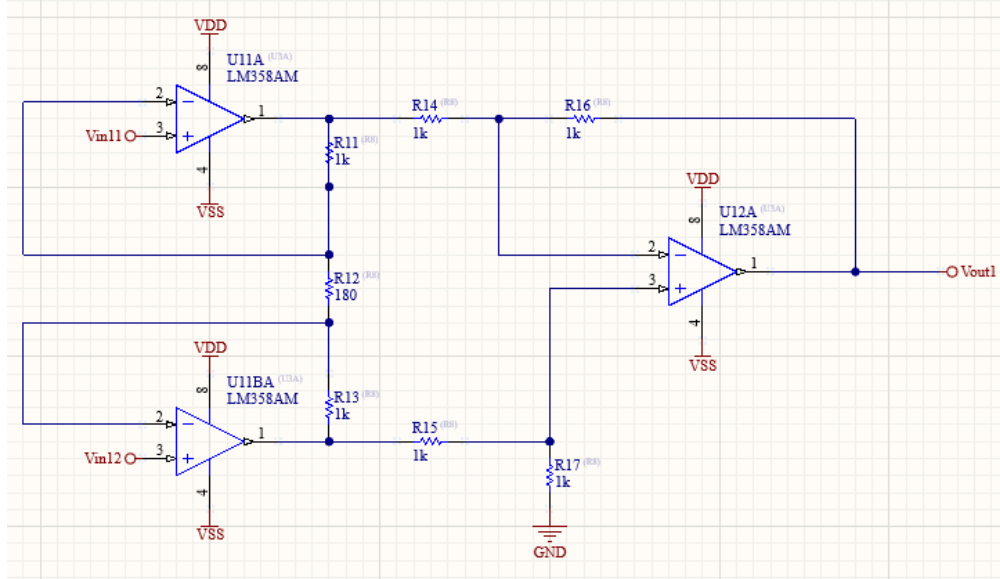
$$\frac{V_{out}}{V_{din}} = 12.1$$

### Gain commun du deuxième étage

En reprenant l'expression trouvée en 1.1 :

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

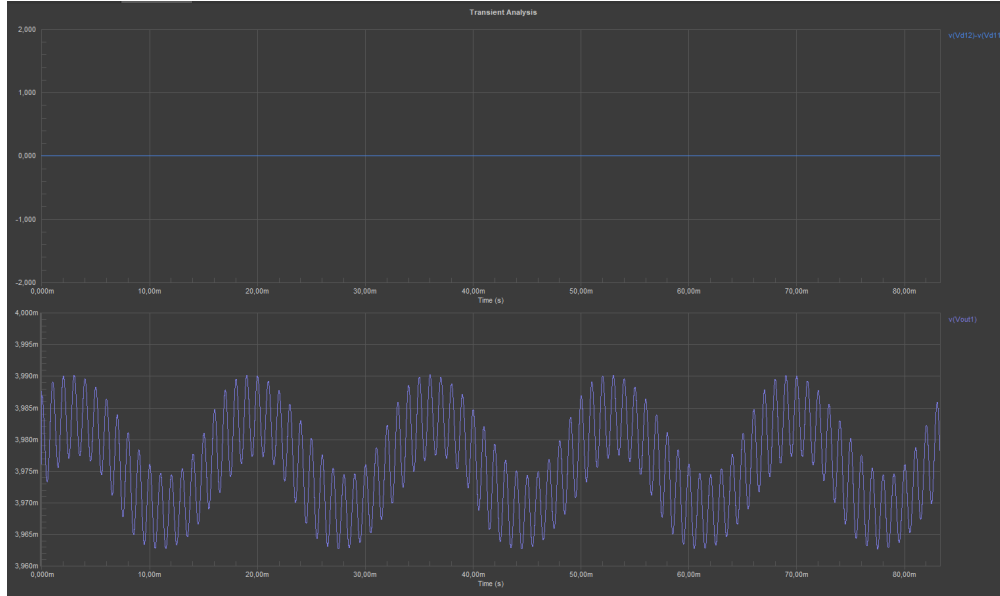
### 1.3 Schéma du circuit dans Altium Designer



**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

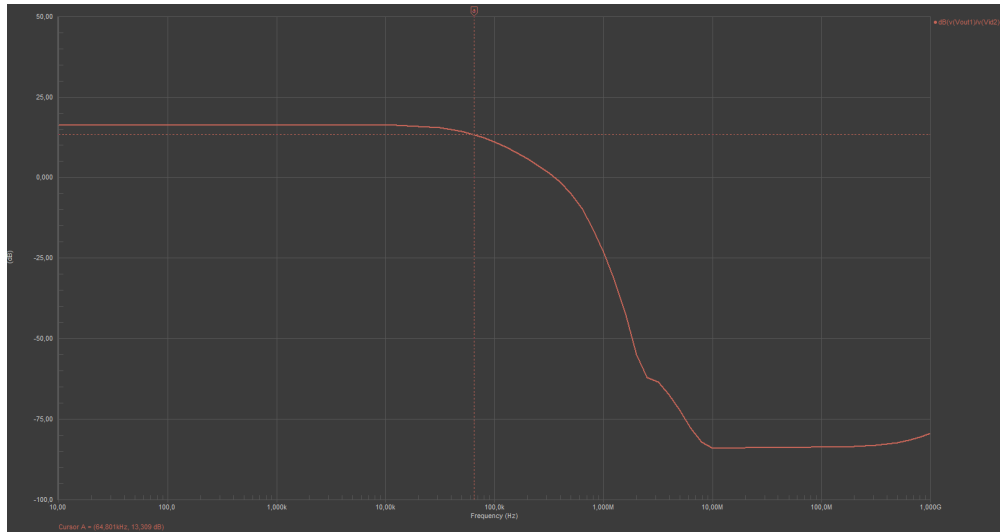
La sortie théorique attendu aurait été nulle selon les calculs. Toutefois, les amplis-op n'ont pas un comportement statique en fréquence et leur gain n'est pas infinie. Ces imperfections font en sorte que ce circuit d'amplification a un gain en mode commun non-nul, mais toutefois assez faible.



**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) :

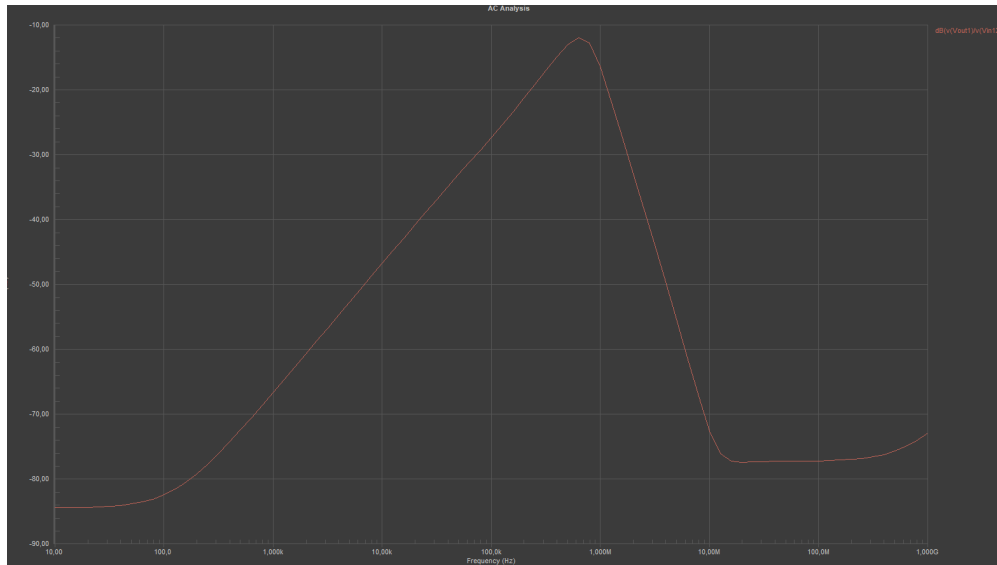


**Figure 4:** Réponse en fréquence (gain) en mode différentiel du montage à 3 amplificateurs

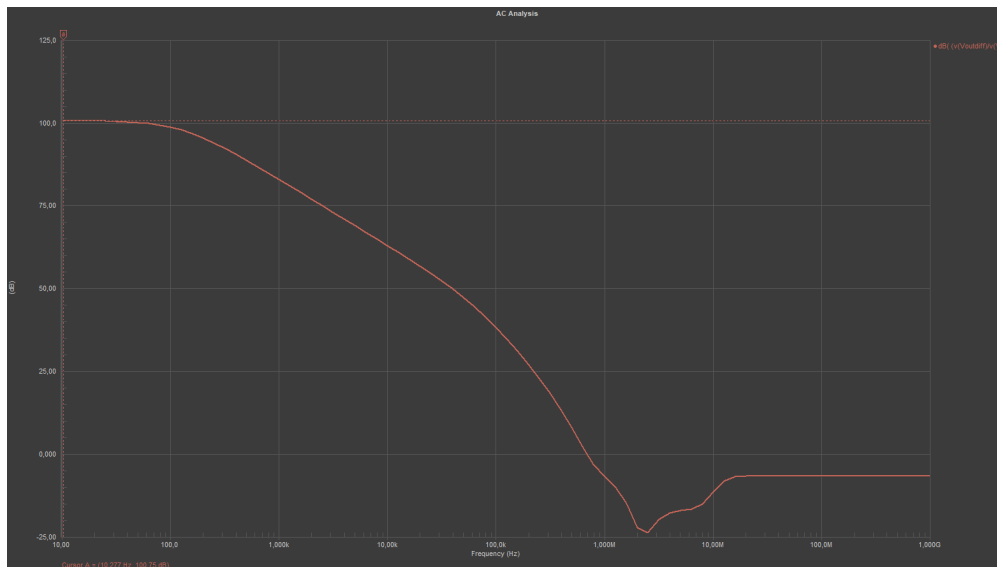
La fréquence de coupure à -3dB est de  $\approx 64.8 \text{ kHz}$

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

**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 :

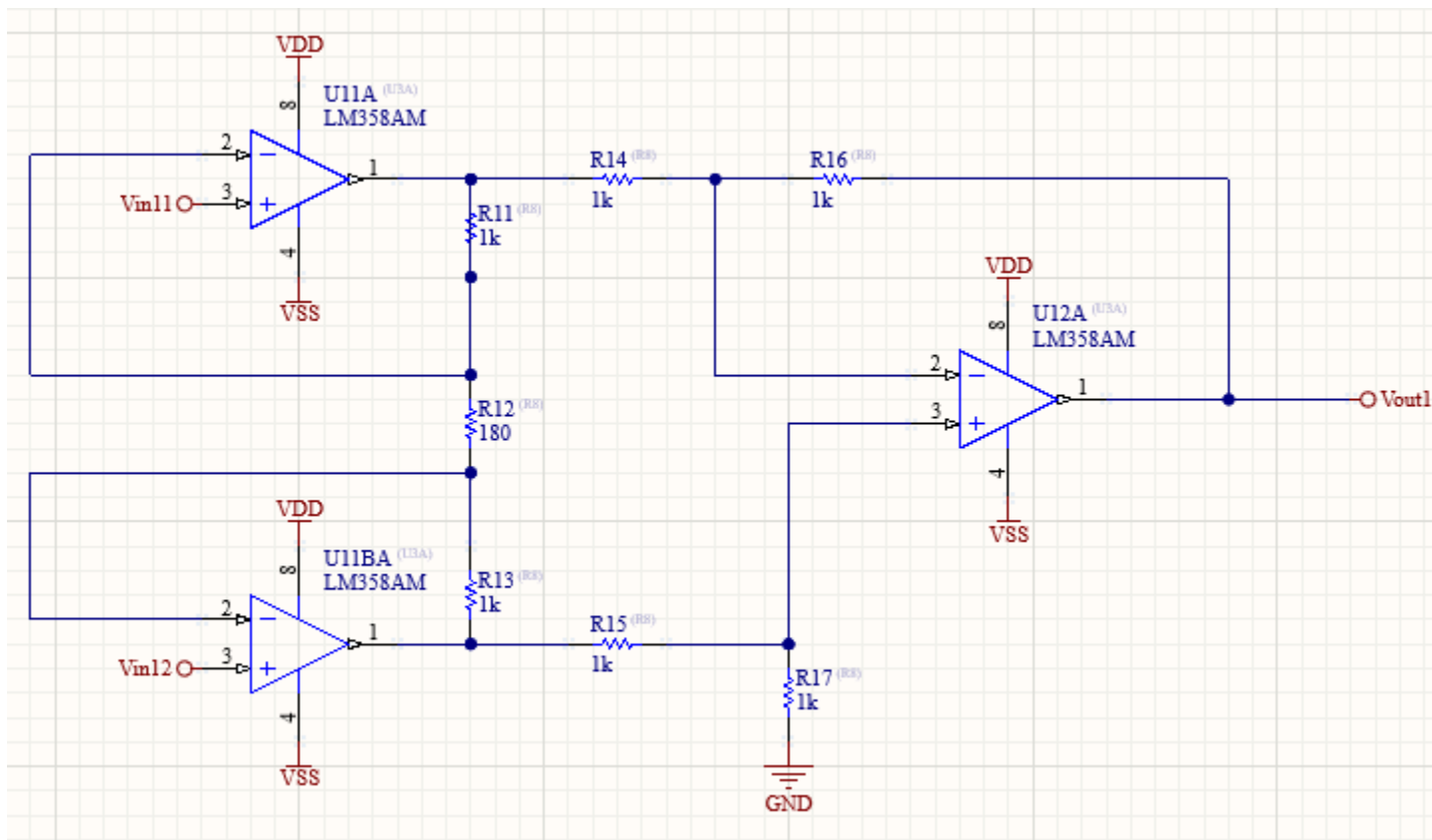


Figure 8: L'amplificateur d'instrumentation à trois amplis-op

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 calcul 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  $A_{cm}$ .

$$V_{out-cm} = \dots$$

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

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  $V_{d11} = 100mVp - p$  :

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

## 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 :

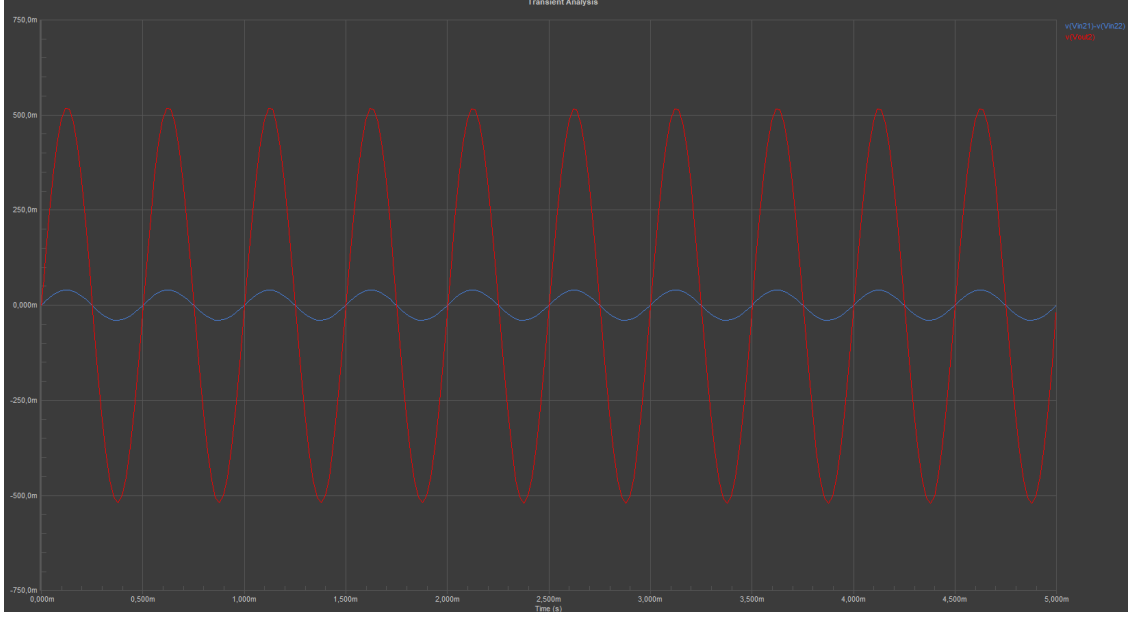
$$G = 5 + \frac{80k\Omega}{R_G}$$

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. ...

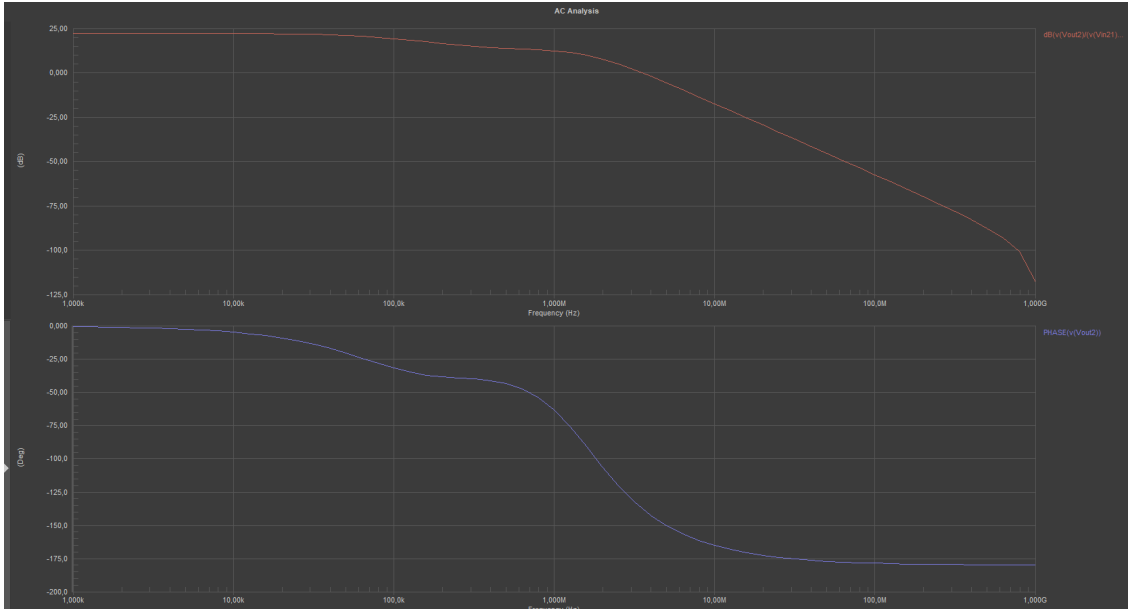
2.3. Simulation temporelle du circuit



**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. ...

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

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

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

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

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      temperature ambiante
9 #define beta 3380.0
  #define T0 298.0 //Temperature ambiante
11 #define R2G = 10000.0
  #define R1G = 100000.0
13
15 float T; // temperature calcul
  float Rt; // Resistance calcul
17 int Vout;
  int Voutb4;
```

```

19 float G;
21
22 void setup() {
23   pinMode(A0, INPUT);
24   Serial.begin(9600);
25   G = R2 / R1;
26 }
27
28 void loop() {
29   // Lecture analogique
30   Vout = analogRead(tempPin);
31   Voutb4 = map(Vout,0,1023,0,5000);
32   Vout = Voutb4 - 2500.0;
33   Vout = Vout / (1 + G);
34
35
36   // Calcul de la r sistance instantanne Rt
37   Rt = R3 * ((R2 / (R1 + R2)) - (Vout / (6250.0 * Vdd))) / ((Vout / (6250.0 * Vdd)) - (
38     R2 / (R1 + R2)) + 1);
39
40   // Calcul de la temperature
41   T = 1 / ((1/T0) + (1/beta) * (log(Rt / R0)));
42
43   //Serial.print("La temperature est ");
44   Serial.println(T);
45   //Serial.println(" Kelvins !");
46   delay(50);
47 }
48
49

```

**Figure 12:** Code Arduino.

## Semaine 2 - Travaux à effectuer au laboratoire

### 1. Montage de l'amplificateur d'instrumentation INA126

(a) ...

(b) ...

**Figure 13:** Sortie  $V_{out}$  du circuit.

(c) ...

**Calcul du TRMC**

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

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

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

(d) ...

Comparez vos résultats avec les données de la fiche technique du INA126.

(e) ...

Comparez la performance du INA126 avec l'amplificateur d'instrumentation à trois ampli-op et discutez du résultat.

(f) ...

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

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

(g) ...

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

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

## 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 14:** Changement de température en fonction du temps

Êtes-vous satisfait du résultat?

## Rapport et questions post-laboratoire

- 1) Supposez une alimentation bipolaire est de  $\pm 15$  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.

**XXX**

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

**XXX**

- 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.

**XXX**