

# Laboratoire 2

## Les amplificateurs opérationnels : Montages de base

---

*Michelle Janusz, Camille Morin, Gabriel Gagné et Benoit Gosselin*

*Université Laval - Hiver 2023*

### Objectifs

- ✓ Familiarisation avec les configurations de base impliquant des amplis-op
- ✓ Réalisation des schémas et simulations SPICE de circuits à base d'ampli-op
- ✓ Réalisation et validation de montages de circuits à base d'ampli-op

### Description

Ce travail pratique a pour but d'effectuer la simulation et le montage de plusieurs circuits à base d'ampli-op. Vous simulerez d'abord chaque circuit à l'aide d'*Altium Designer* et validerez ensuite le montage expérimentalement au laboratoire. Les circuits en question comptent le suiveur de tension, l'inverseur, le non-inverseur, l'intégrateur et le dérivateur. Il est recommandé de consulter les spécifications techniques des amplis-op utilisés dans la section « références » du site web du cours.

### Semaine 1 - Simulation SPICE et questions prélaboratoire

Répondez aux questions suivantes avant de vous présenter au laboratoire. N'oubliez pas de remettre vos réponses aux assistants avant le début de la séance sur MonPortail. **Pour toutes les simulations, utilisez  $V_{DD} = 5V$  et  $V_{SS} = -5V$ . En simulation, rajoutez une résistance de source de  $50\ \Omega$  en série avec les sources de signal (ex. : VSIN, VPULSE, etc.) pour émuler le comportement des sources réelles (voir la Figure 1). Utilisez la librairie associée et référez-vous au Didacticiel *Altium Designer* pour savoir comment l'intégrer au projet.**

#### 1. Le suiveur de tension

Le montage suiveur de tension est un circuit en boucle fermée qui a un gain unitaire, une impédance d'entrée élevée et une impédance de sortie faible. La Figure 1 montre un suiveur de tension utilisant l'ampli-op **LM358** de la compagnie « *National Semiconductor* ».

- 1.1. Réalisez le schéma du suiveur de tension présenté à la Figure 1 dans *Altium Designer*. Ce schéma vous sera utile au laboratoire 3 aussi. Il peut donc être pertinent de le conserver. Utilisez une sinusoïde d'amplitude de 1 V et une fréquence de 10 kHz.
- 1.2. Dans *Altium*, tracez la réponse temporelle de  $V_{out}$  et  $V_{in}$  sur 5 périodes pour le suiveur de tension. **Imprimez vos courbes.**

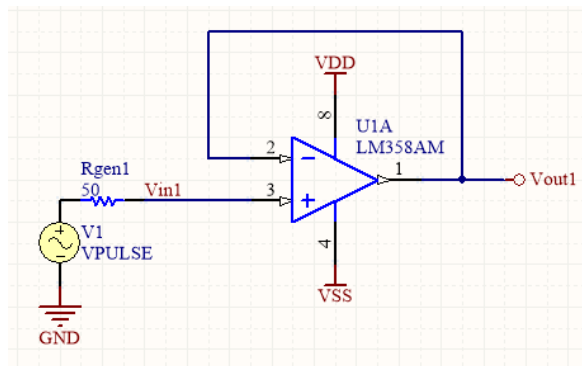


Figure 1: Le suiveur de tension.

1.3.

## 2. L'inverseur

La Figure 2 montre un amplificateur inverseur basé sur l'ampli-op **TL082**, aussi de la compagnie « *National Semiconductor* ». Le signal d'entrée est branché à une borne de la résistance  $R_{21}$  qui est branchée à l'entrée négative de l'ampli-op. Par conséquent, le signal d'entrée est déphasé de 180 degrés à la sortie (inversé). Les résistances  $R_{21}$  et  $R_{22}$  permettent d'appliquer la rétroaction négative et de réaliser un gain stable en boucle fermée.

- 2.1. Réalisez le schéma du circuit inverseur présenté à la Figure 2 dans *Altium Designer*.
- 2.2. En utilisant *Altium*, tracez les courbes de gain et de phase en fréquence (Bode) pour l'inverseur. **Imprimez vos courbes.**
- 2.3. Toujours avec *Altium*, relevez la fréquence de coupure de cette configuration par simulation. **Annotez la fréquence de coupure sur la courbe de gain obtenue.**

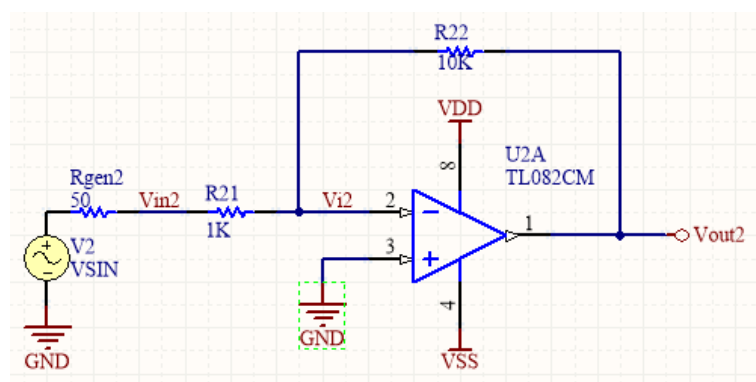


Figure 2: L'amplificateur inverseur.

- 2.4. Faites une analyse par balayage pour le circuit de l'inverseur. Faites varier  $R_{22}$  de 1k $\Omega$  à 20k avec un pas de 4k. **Tracez les réponses fréquentielles correspondantes. Que peut-on apprendre de ces courbes?**

### 3. Le non-inverseur

Au lieu de brancher le signal d'entrée à l'entrée négative de l'ampli-op comme pour l'inverseur, on le branche à l'entrée positive afin d'obtenir le circuit non-inverseur montré à la Figure 3. Le signal de sortie du circuit non-inverseur aura la même phase que le signal d'entrée. Comme pour l'inverseur, le non-inverseur compte une résistance dans la boucle de rétroaction afin d'amplifier le signal. Ce circuit utilise l'ampli-op **LMC6482** de la compagnie « *National Semiconductor* ».

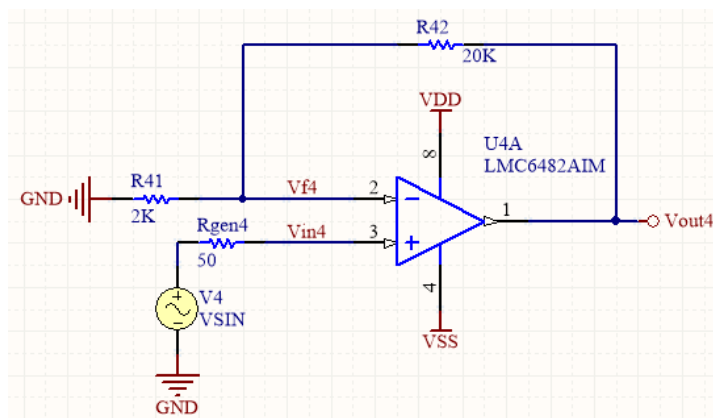


Figure 3: L'amplificateur non-inverseur.

- 3.1. Réalisez le schéma du circuit non-inverseur présenté à la Figure 3 dans *Altium Designer*. Ce schéma vous sera utile au laboratoire 3 aussi. Il peut donc être pertinent de le conserver.
- 3.2. En utilisant *Altium*, tracez les courbes de gain et de phase (Bode) pour le non-inverseur. **Imprimez vos courbes.**
- 3.3. Toujours avec *Altium*, relevez la fréquence de coupure de cette configuration par simulation. **Annotez la fréquence de coupure sur la courbe de gain obtenue.**

## Semaine 1 - Travaux à effectuer au laboratoire

Cette partie du travail s'effectue au PLT-3101 et consiste à réaliser les montages des circuits illustrés sur les Figures 1 à 3 et d'utiliser l'Arduino. Rapportez les valeurs demandées (celles **en gras** dans le protocole) dans votre rapport, comparez-les avec les valeurs simulées et **discutez de vos résultats**. Advenant le cas où vos résultats ne concorderaient pas tout à fait avec la simulation, fournissez une explication.

### 1. Montage du suiveur

- 1.1. Montez le circuit de la Figure 1 sur votre *breadboard*. Choisissez +5V pour l'alimentation positive et -5V pour l'alimentation négative et branchez ces tensions au circuit. Utilisez la fonction *SERIES* de votre source d'alimentation pour générer des tensions positives et négatives.
- 1.2. Ensuite, appliquez une tension sinusoïdale d'une fréquence de 10 kHz et d'une amplitude crête de 0.5 V à l'entrée du circuit et regardez sa sortie à l'oscilloscope. **Rapportez la capture d'oscilloscope de  $V_{in}$  et  $V_{out}$  dans votre rapport. Notez l'amplitude crête des signaux d'entrée ( $V_{in}$ ) et de sortie ( $V_{out}$ ) et calculez le gain du circuit grâce à  $V_{out}/V_{in}$ .**
- 1.3. Diminuez la tension de sortie de la source sinusoïdale à 100 mV crête puis rajoutez une résistance de 100  $\Omega$  en parallèle avec la source et **mesurez la tension de sortie  $V_{out}$ .**
- 1.4. Connectez une résistance de 220  $\Omega$  entre la sortie de l'ampli-op et la masse et **mesurez la tension de sortie  $V_{out}$  à nouveau.**
- 1.5. **Comparez les valeurs de  $V_{out}$  pour les trois derniers circuits.**
- 1.6. Garder le montage sur le *breadboard*.

### 2. Montage de l'inverseur

- 2.1. Montez le circuit de la Figure 2 sur votre breadboard. Comme le circuit précédent, utilisez des alimentations de +5V et -5V.
- 2.2. Appliquez un signal sinusoïdal d'une amplitude de 100 mV à l'entrée du circuit et observez la sortie à l'oscilloscope. **Mesurez le gain, la fréquence de coupure et la fréquence de gain unitaire de ce circuit. Comparez les valeurs mesurées avec les valeurs simulées et calculées.**
- 2.3. Garder le montage sur le *breadboard*.

### 3. Montage du circuit non-inverseur

- 3.1. Montez le circuit de la Figure 3 sur votre breadboard. Utilisez des tensions d'alimentation de +5V et -5V. Appliquez un signal sinusoïdal d'une amplitude de 100 mV à l'entrée du circuit et observez la sortie à l'oscilloscope. **Rapportez la capture d'oscilloscope dans votre rapport.**
- 3.2. **Mesurez le gain, la fréquence de coupure et la fréquence de gain unitaire de ce circuit. Comparez les valeurs mesurées avec les valeurs simulées et calculées.**

#### 4. Arduino

- 4.1. Remplacez les résistances de l'inverseur pour avoir un gain de 1.
- 4.2. Connectez la sortie de l'inverseur à une LED et celle du suiveur à une autre LED. Les LEDs doivent être en série avec une résistance de  $200\Omega$ .
- 4.3. Connectez l'entrée de l'inverseur et du suiveur à la même Pin 10 de l'Arduino.
- 4.4. Générez une onde carrée avec l'Arduino sur la Pin 10 à une fréquence de 1 Hz. **Montrez le résultat au dépanneur. Mettez le code de l'Arduino dans le rapport.**

## Semaine 2 – Simulation SPICE et questions prélaboratoire

Répondez aux questions suivantes avant de vous présenter au laboratoire. N'oubliez pas de remettre vos réponses aux assistants avant le début de la séance sur MonPortail. **Pour toutes les simulations, utilisez  $V_{DD} = 5V$  et  $V_{SS} = -5V$ . En simulation, rajoutez une résistance de source de  $50\ \Omega$  en série avec les sources de signal (ex. : VSIN, VPULSE, etc.) pour émuler le comportement des sources réelles (voir la Figure 1). Utilisez la librairie associée et référez-vous au Didacticiel Altium Designer pour savoir comment l'intégrer au projet.**

### 1. L'additionneur

La figure 4 montre un circuit additionneur à deux entrées basées sur l'ampli-op **TL082**. L'additionneur est très similaire à l'amplificateur inverseur. Il fournit un gain en boucle fermée et inverse les signaux d'entrée. Ces multiples entrées permettent d'additionner plusieurs tensions à la sortie.

- 1.1. Réalisez le schéma du circuit additionneur présenté à la Figure 4 dans Altium Designer.
- 1.2. Simulez le comportement du circuit additionneur à l'aide d'une simulation temporelle. Utilisez deux sources sinusoïdales d'amplitudes et de fréquences différentes. **Imprimez vos courbes.**

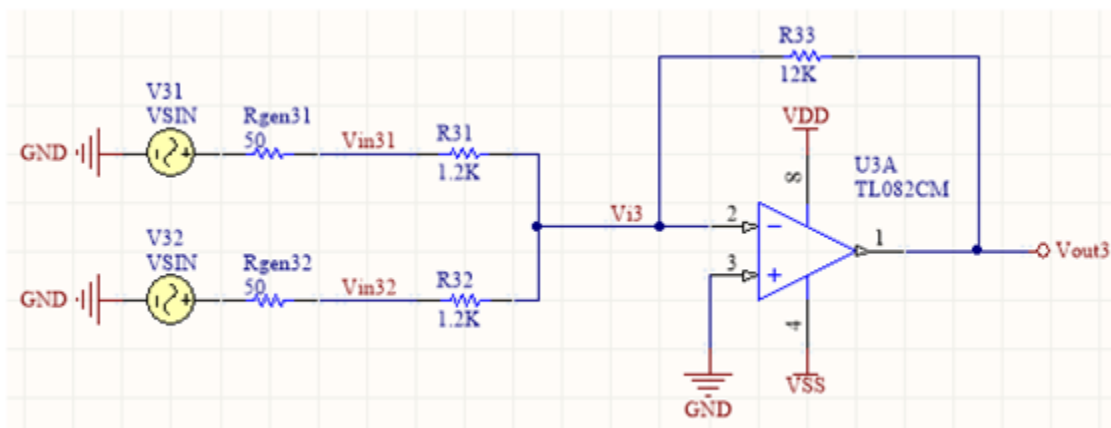
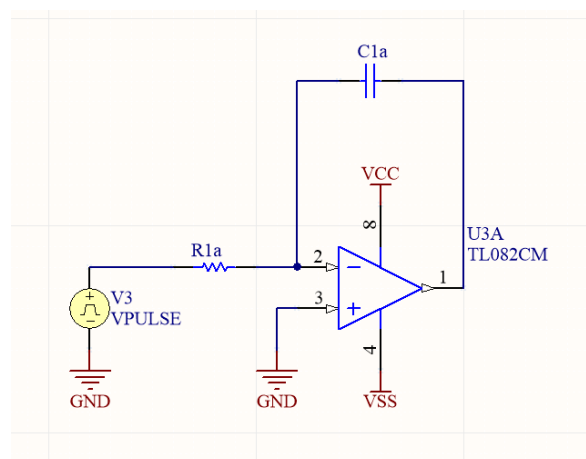


Figure 4 – Le circuit additionneur

### 2. L'intégrateur inverseur

Considérez le circuit présenté figure 5. Faites-en le design afin d'obtenir une résistance d'entrée en hautes fréquences (rappel : un condensateur est considéré comme un court-circuit aux hautes fréquences) de  $2\ k\Omega$  et une constante de temps de  $1\ ms$ .

- 2.1. Réalisez le schéma du circuit correspondant dans Altium Designer avec les valeurs trouvées à la question précédente.**
- 2.2. Effectuez une simulation temporelle du circuit sur 1ms en prenant comme source un signal carré d'une amplitude de 1V et d'une fréquence de 10 kHz (voir figure 6 pour les paramètres de la source). Ensuite, effectuez une simulation sur 1s avec comme source un signal carré d'une amplitude de 1V et d'une fréquence de 10 Hz.
- 2.3. Imprimez vos résultats et commentez.**
- 2.4. Considérant les imperfections DC des amplis-op, quel problème risque-t-on de rencontrer en pratique avec l'intégrateur idéal?**
- 2.5. Transformez votre intégrateur idéal en intégrateur non-idéal tel que présenté à la figure 7. Faites-en le design afin d'obtenir un gain DC de -5 V/V et une fréquence de coupure de 1 kHz. Choisissez les résistances de sorte que la résistance d'entrée soit de 2 k $\Omega$ . **Expliquez.**
- 2.6. Réalisez le schéma du circuit correspondant dans Altium Designer avec les valeurs trouvées à la question précédente.**
- 2.7. Effectuez une simulation temporelle du circuit sur 1ms en prenant comme source un signal carré d'une amplitude de 1V et d'une fréquence de 10 kHz (voir figure 6 pour les paramètres de la source). Ensuite, effectuez une simulation sur 1s avec comme source un signal carré d'une amplitude de 1V et d'une fréquence de 10 Hz.
- 2.8. Imprimez vos résultats, commentez et comparez les comportements de l'intégrateur idéal et non-idéal.**



**Figure 5 - L'intégrateur idéal**

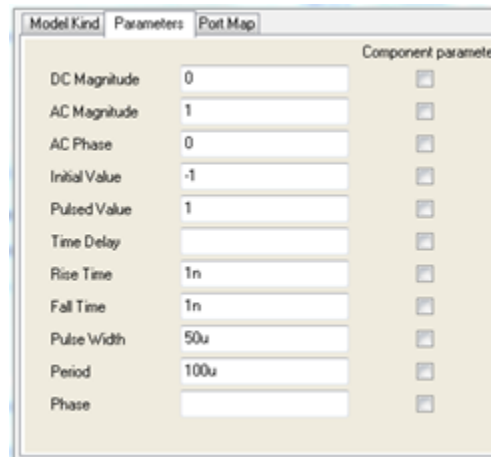


Figure 6 - Paramètres de la source alternative - Montage intégrateur

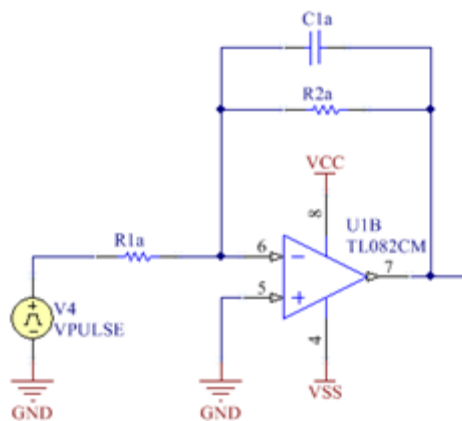


Figure 7 - L'intégrateur inverseur non idéal, aussi appelé intégrateur de Miller

### 3. Le dérivateur inverseur

3.1. Faites le design du circuit de la figure 8. Utilisez une résistance de 1 k $\Omega$  en rétroaction et choisissez un condensateur pour avoir une constante de temps de 1  $\mu$ s.

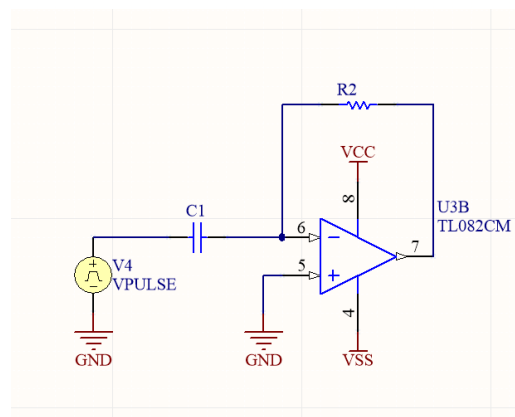
3.2. Réalisez le schéma du circuit dans Altium Designer avec les valeurs trouvées à la question précédente.

3.3. Effectuez une simulation temporelle du circuit sur 1ms en prenant comme source un signal triangulaire d'une amplitude de 5V et d'une fréquence de 12.5kHz (voir figure 9 pour les paramètres de la source). Ensuite, effectuez une simulation sur 1s avec comme source un signal triangulaire d'une amplitude de 5V et d'une fréquence de 10 Hz.

3.4. Relevez vos résultats et commentez.



- 3.5. Si le circuit reçoit en entrée un signal sinusoïdal à très haute fréquence, qu'arrive-t-il avec le gain du circuit? Quel problème risque-t-on de rencontrer en pratique avec le dérivateur idéal?**
- 3.6. Ajoutez une résistance à l'entrée du dérivateur pour en faire un dérivateur non-idéal tel que présenté à la figure 10. Faites-en le design afin d'obtenir un gain en haute-fréquence de -5 V/V et une fréquence de coupure de 1 kHz. Choisissez les résistances de sorte que la résistance d'entrée en haute-fréquence (c.-à-d., lorsqu'on considère que le condensateur agit comme un court-circuit) soit de 1 k $\Omega$ . **Expliquez.**
- 3.7. Réalisez le schéma du circuit dans Altium Designer avec les valeurs trouvées à la question précédente.**
- 3.8. Effectuez une simulation temporelle du circuit sur 1ms en prenant comme source un signal triangulaire d'une amplitude de 5V et d'une fréquence de 12.5kHz (voir figure 9 pour les paramètres de la source). Ensuite, effectuez une simulation sur 1s avec comme source un signal triangulaire d'une amplitude de 5V et d'une fréquence de 10 Hz.
- 3.9. Relevez vos résultats, commentez et comparez les comportements du dérivateur idéal et non-idéal.**



**Figure 8 - Le dérivateur inverseur idéal**

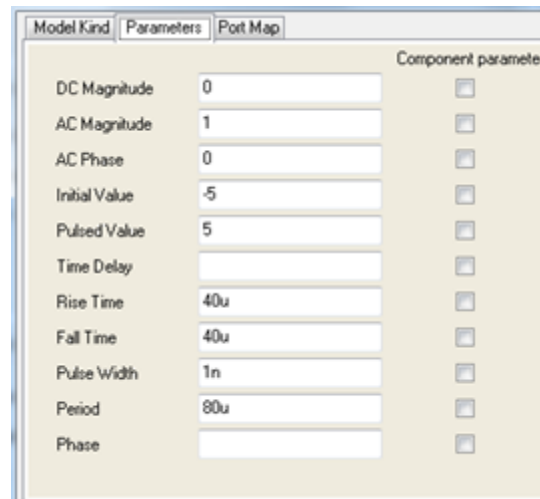


Figure 9 - Paramètres de la source alternative - Montage dérivateur

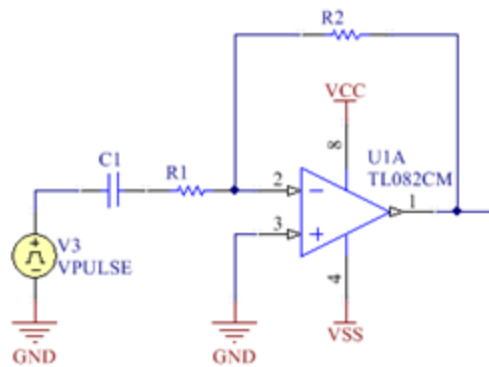


Figure 10 - Le dérivateur inverseur non idéal

## Semaine 2 – Travaux à effectuer au laboratoire

Cette partie du travail s'effectue au PLT-3101 et consiste à réaliser les montages des circuits illustrés sur les figures 4, 5 et 7. Rapportez les valeurs demandées (celles **en gras** dans le protocole) dans votre rapport, comparez-les avec les valeurs simulées et **discutez de vos résultats**. Advenant le cas où vos résultats ne concorderaient pas tout à fait avec la simulation, fournissez une explication.

### 1. Montage du circuit additionneur

- 1.1. Montez le circuit de la figure 4 sur votre breadboard. Utilisez des tensions d'alimentation de +5V et -5V. Branchez les deux entrées du circuit à des sources de tensions différentes. **Prenez bien soin d'inscrire dans votre rapport l'amplitude et la fréquence de ces deux signaux.** Réalisez la première source de tension avec le générateur de signaux et deuxième source de tension à l'aide de l'Arduino.
- 1.2. Observez le signal de sortie à l'oscilloscope et **donnez la forme d'onde observée dans votre rapport. Décrivez la tension de sortie du circuit et expliquez ce qui se passe**

### 2. Montage de l'intégrateur

- 2.1. Montez le circuit de la figure 5 sur votre *breadboard*.
- 2.2. Appliquez une onde carrée d'une amplitude de 500 mV et de fréquence de 1 kHz à l'entrée de votre circuit. En vous assurant que l'entrée de votre oscilloscope est configurée en couplage DC, observez la sortie de l'intégrateur idéal sur une période de 1 à 2 minutes. **Qu'observez-vous?**
- 2.3. **Discutez du comportement de l'intégrateur idéal et justifiez la nécessité de la résistance R2a (en parallèle au condensateur).**
- 2.4. Montez le circuit de la figure 7 sur votre *breadboard*.
- 2.5. Appliquez un signal sinusoïdal d'une amplitude de 500 mV à l'entrée de votre circuit. Vérifiez les points de fonctionnement (gain et phase) pour des fréquences de 100Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz et 5kHz. **Commentez.**
- 2.6. **Relevez la fréquence de coupure à -3 dB du circuit.**
- 2.7. Testez votre montage pour des ondes carrées de fréquences 100 Hz. **Présentez vos courbes d'entrée et de sortie dans votre rapport et commentez dans vos mots le comportement de la sortie.**

### 3. Montage du dérivateur

- 3.1. Montez le circuit de la figure 10 sur votre *breadboard*.
- 3.2. Appliquez un signal sinusoïdal d'une amplitude de 500 mV à l'entrée de votre circuit. Vérifiez les points de fonctionnement (gain et phase) pour des fréquences de 100Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz et 5kHz. **Commentez.**
- 3.3. Faites varier la fréquence de votre signal d'entrée jusqu'à ce que la sortie corresponde à 70% de l'amplitude en haute-fréquence. **Relevez ceci comme étant la fréquence de coupure à -3 dB.**
- 3.4. Testez votre montage pour des ondes triangulaires de fréquences 100 Hz, 1.2 kHz, et 5 kHz. **Présentez vos résultats dans votre rapport et commentez dans vos mots le comportement de la sortie pour l'ensemble des cas.**

## Questions Post-laboratoire

Répondez aux questions suivantes:

1. Proposez un montage en boucle fermée pour amplifier un signal délivré par une source dont la résistance de source est de  $R_s = 10 \text{ k}\Omega$ ? **Consigne : visez un gain de 20 et n'utilisez pas de valeur de résistance supérieure à  $1 \text{ k}\Omega$  pour votre montage.**
2. Expliquez en quoi consiste un amplificateur dont l'alimentation VDD est unipolaire. Proposez et dessinez un amplificateur dont l'alimentation est unipolaire permettant d'amplifier le signal  $s(t) = 2\sin(10\pi t) + 5$  avec un gain de 2 sans que celui-ci sature. Donner la forme d'onde d'entrée et de sortie.  $V_{DD} = 10 \text{ V}$
3. Calculez l'erreur relative maximum sur le gain en boucle fermée d'un amplificateur inverseur dont les valeurs  $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$  et  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ , en sachant que la tolérance sur ces résistances est de  $\pm 5\%$  des valeurs nominales.
  - a. Si la valeur attendue est le gain en boucle fermée d'un ampli-op idéal (boucle ouverte infinie) avec les valeurs exactes des résistances et la valeur mesurée est le gain en boucle fermée d'un ampli-op idéal (boucle ouverte infinie) avec les valeurs de résistance considérant les tolérances.
  - b. Si la valeur attendue est le gain en boucle fermée d'un ampli-op idéal (boucle ouverte infinie) avec les valeurs exactes des résistances et la valeur mesurée est le gain en boucle fermée d'un ampli-op avec un gain en boucle ouverte fini ( $A_0 = 1000 \text{ V/V}$ ) avec les valeurs de résistances considérant les tolérances.
4. Justifiez le choix d'un amplificateur non-inverseur vs un amplificateur inverseur pour effectuer un bon couplage AC.
5. Quelle est la raison pour laquelle l'ensemble des simulations sont faites avec une résistance de  $50 \Omega$  en série avec la source de signal?
6. BONUS: Lors du laboratoire, vous avez eu à mesurer avec l'oscilloscope un signal provenant de la source de signal. Pourquoi la valeur obtenue sur l'oscilloscope est-elle de 2 fois la valeur affichée sur le générateur de signal (exemple: vous marquez 2V d'amplitude et 2.5V d'offset sur le générateur de signal et mesurez 4V d'amplitude et 5V d'offset sur l'oscilloscope)?

## Rapport

- 1.1 Dans votre rapport, répondez aux questions posées de façon succincte. Un seul rapport est nécessaire pour l'ensemble du laboratoire. Il n'est pas nécessaire de rédiger une introduction et une conclusion. Les courbes et valeurs demandées (les informations en gras dans le protocole) devront être présentées en spécifiant les numéros de question correspondants. De plus, placez la dernière page de cet énoncé comme 1re page de votre rapport et remplissez là.
- 2.1 Votre rapport doit être remis en format PDF dans la boîte de dépôt du site du cours avant la date limite.

## Laboratoire 2

### Les amplificateurs opérationnels : Montages de base

Nom

Matricule

1. \_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_

Signature de l'assistant : \_\_\_\_\_

Date : \_\_\_\_\_