



# LES TRANSISTORS ET LES IMPERFECTIONS DE L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL

Guide de l'étudiant

S2 APP5GE  
Hiver 2023

Pr Serge Charlebois  
Pr Jean-François Pratte

Département de génie électrique et de génie  
informatique  
Faculté de génie  
Université de Sherbrooke

Auteurs : Serge A. Charlebois et Jean-François Pratte, Révisé par Philippe Arsenault

Version : Hiver 2023

© 2023 Tous droits réservés. Département de génie électrique et de génie informatique, Université de Sherbrooke.

## Table des matières

1	Activité pédagogique et compétences .....	4
2	Synthèse de l'évaluation .....	5
3	Qualités de l'ingénieur .....	6
4	Énoncé de la problématique .....	7
	Les deux mandats de cette APP : .....	7
	Mandat A – Étude des imperfections de l'ampli-op .....	8
	Cas 1 .....	9
	Cas 2 : .....	10
	Cas 3 : .....	11
	Cas 4 : .....	12
	Cas 5 : .....	13
	Cas 6 : .....	14
	Mandat B – Conception d'un amplificateur à source commune .....	14
5	Connaissances nouvelles .....	16
	Connaissances déclaratives (quoi) .....	16
	Connaissances procédurales (comment) .....	16
	Connaissances conditionnelles (quand) .....	16
6	Guide de lecture .....	17
	6.1 Références essentielles .....	17
	Connaissances acquises – révision .....	17
	Procédural 1 – Transistor MOSFET .....	17
	Laboratoire 1 .....	17
	Procédural 2 – Amplificateur opérationnel et ses imperfections .....	17
	6.2 Documents complémentaires .....	17
7	Logiciels et matériel .....	18
	7.1 Notes importantes sur l'utilisation d'Altium .....	18
8	Santé et sécurité .....	19
	8.1 Dispositions générales .....	19
9	Sommaire des activités .....	20
	9.1 Semaine 1 .....	20
	9.2 Semaine 2 .....	20
10	Production à remettre .....	21

10.1	Modalités .....	21
10.2	Contenu.....	21
11	Politiques et règlements .....	22
11.1	Règlements et politiques de l'Université de Sherbrooke .....	22
11.2	Règlements et politiques facultaires .....	22
11.3	Intégrité intellectuelle.....	22
11.4	Situation particulière .....	22
12	Pratique procédurale 1 .....	23
12.1	Buts de l'activité :.....	23
12.2	Exercices préparatoires.....	23
12.3	Exercices.....	23
13	Pratique en laboratoire.....	26
13.1	Buts de l'activité :.....	26
13.2	Notes importantes sur l'utilisation d'Altium.....	26
13.3	Transistor NMOS.....	26
13.4	Transistor NMOS et amplificateur .....	28
13.5	Amplificateur opérationnel configuré en inverseur .....	29
13.6	Amplificateur opérationnel configuré en non-inverseur .....	30
13.7	Amplificateur opérationnel configuré suiveur.....	31
14	Pratique procédurale 2 .....	33
14.1	Buts de l'activité :.....	33
14.2	Exercices.....	33
15	Validation .....	37
15.1	But de l'activité : .....	37
16	Liste des Références.....	38

# 1      Activité pédagogique et compétences

GEL213 – Électronique analogique et composants

Compétence 1 - Analyser des circuits électroniques comprenant des dispositifs actifs (transistors et amplificateurs opérationnels) ;

Compétence 2 - Concevoir des circuits électroniques comprenant des dispositifs actifs ;

Compétence 3 - Prendre en compte des imperfections des dispositifs actifs reliées à leurs limites physiques et à leur fonctionnement interne.

Description officielle : <https://www.usherbrooke.ca/admission/fiches-cours/GEL213>

## 2 Synthèse de l'évaluation

	Compétence 1	Compétence 2	Compétence 3	Total
Rapport	45	60	45	150
Évaluation sommative	75	75	75	225
Évaluation finale	75	75	75	225
Total	195	210	195	600

### 3 Qualités de l'ingénieur

Les qualités de l'ingénieur visées par cette unité d'APP sont les suivantes. D'autres qualités peuvent être présentes sans être visées ou évaluées dans cette unité d'APP.

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12
Touchée	X	X		X	X		X					X
Évaluée	X	X		X	X							

Les qualités de l'ingénieur sont les suivantes. Pour une description détaillée des qualités et leur provenance, consultez le lien suivant :

<https://www.usherbrooke.ca/genie/futurs-etudiants/1er-cycle/baccalaureats/bcapg/>

Qualité	Libellé
Q1	Connaissance en génie
Q2	Analyse de problèmes
Q3	Investigation
Q4	Conception
Q5	Utilisation d'outils d'ingénierie
Q6	Travail individuel et en équipe
Q7	Communication
Q8	Professionalisme
Q9	Impact du génie sur la société et l'environnement
Q10	Déontologie et équité
Q11	Économies et gestion de projets
Q12	Apprentissage continu

## 4 Énoncé de la problématique

Le concept de transistor à effet de champ (FET – *field effect transistor*) a été inventé très tôt au 20<sup>e</sup> siècle et est attribué à Lilienfeld<sup>1</sup> par un brevet déposé (au Canada !) en 1925. Ce n'est qu'en 1947 que Bardeen, Brattain et Shockley (Bell Lab, Nobel de 1956) proposèrent le transistor à point de contact<sup>2</sup> (type de BJT – *bipolar junction transistor*) dont l'image est présentée en couverture. Bien que le transistor à effet de champ ait été inventé le premier, de nombreux problèmes techniques en ont retardé la démonstration à 1958<sup>3</sup>. La technologie BJT a dominé jusqu'au début des années 1970 pour être ensuite remplacée par la technologie MOSFET (*metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*) qui a mis la table pour la domination du CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*) à partir de 1976.

Aujourd'hui, presque tous les objets de la vie courante fonctionnent grâce à une électronique à forte intégration reposant sur le transistor. On peut même dire qu'aucune ligne de code informatique ne peut-être compilée sans un processeur fait de transistors ! Tous les secteurs industriels sont touchés et chacun vient avec ses propres défis qui appellent à des développements spécifiques tant au niveau de processeurs que de senseurs (composants analogiques). Les senseurs (lumière, pression, chaleur, etc.) sont une partie importante des développements de plusieurs secteurs : automobile, aérospatiale, énergie, robotique.

Il existe une grande diversité de transistors : BJT, HBT, JFET, MOSFET, MESFET, HEMP... Cela dit, cette APP met l'accent sur le MOSFET qui se prête bien à une initiation aux transistors. Nous étudierons d'une part le fonctionnement du MOSFET et nous l'utiliserons ensuite pour construire des circuits simples d'amplificateurs (source commune et suiveur) et comprendre des circuits tel qu'un miroir de courant, une paire différentielle et une charge active.

Comme nous le verrons, les caractéristiques des transistors varient d'un dispositif à l'autre. Cela a directement des impacts sur les circuits analogiques réalisés, par exemple l'amplificateur opérationnel. Ce circuit est l'un des circuits analogiques le plus répandu et il mérite votre attention. Ainsi nous regarderons ce qu'est l'ampli-op idéal, ses imperfections, et comment gérer ses imperfections pour pouvoir ultimement considérer l'ampli-op comme idéal, le point culminant des apprentissages présentés à vous durant cette APP.

### Les deux mandats de cette APP :

Pour cette APP vous avez deux mandats à compléter qui se résument à :

- A. Analyser des circuits à base d'amplificateurs opérationnels (ampli-op) afin d'identifier des problèmes de fonctionnement liés aux imperfections de ces ampli-op. Pour ce faire vous devrez poser des hypothèses pour l'analyse du circuit et les confirmer par des simulations sur ordinateur.
- B. Concevoir un amplificateur source commune avec un transistor MOSFET de type NMOS.

Voici quelques informations procédurales pour l'accomplissement de ces mandats.

---

<sup>1</sup> Voir la rubrique sur Julius Edgar Lilienfeld sur Wikipedia. Notez que le terme « transistor » n'a été consacré qu'en 1948. [https://en.wikipedia.org/wiki/Julius\\_Edgar\\_Lilienfeld](https://en.wikipedia.org/wiki/Julius_Edgar_Lilienfeld)

<sup>2</sup> Voir [https://en.wikipedia.org/wiki/Point-contact\\_transistor](https://en.wikipedia.org/wiki/Point-contact_transistor) et les liens inclus pour plus de détails.

<sup>3</sup> Voir l'historique publié par IEEE. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=730824>



## Mandat A – Étude des imperfections de l'ampli-op

Vous avez étudié l'ampli-op idéal durant votre première session et connaissez déjà le concept de boucle de rétroaction. Vous distinguez ainsi la notion de gain en boucle ouverte et de gain en boucle fermée. Nous vous présentons 6 circuits à base d'ampli-op pour lesquels les signaux de sortie ne correspondent pas aux attentes. Pour chaque cas, vous devez identifier la ou les imperfections, et la famille d'imperfections auxquelles elles appartiennent, qui permettent d'expliquer les signaux de sortie. Nous étudierons trois familles d'imperfections, soient DC, linéaire et non linéaire. Par la suite, vous devez suggérer des correctifs pour pallier les imperfections ou suggérer un régime d'opération où l'ampli-op pourra être considéré comme idéal. Le tableau ci-dessous présente les principales familles et leurs imperfections :

DC	Linéaire	Non linéaire
<ul style="list-style-type: none"><li>• Courant de polarisation d'entrée (<i>input bias current</i>)</li><li>• Décalage des courants de polarisation d'entrées (<i>input offset current</i>)</li><li>• Décalage des tensions d'entrées (<i>input offset voltage</i>)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Impédance d'entrée finie</li><li>• Impédance de sortie non-nulle</li><li>• Gain DC en boucle ouverte <math>A_{vol}</math> fini</li><li>• Gain en boucle ouverte qui diminue avec la fréquence</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Amplitude du signal de sortie limitée</li><li>• Courant de sortie fini</li><li>• Taux de balayage (<i>slew rate</i>)</li></ul>

Pour trouver les imperfections, vous allez devoir :

1. Analyser chaque circuit afin d'identifier la configuration de l'ampli-op et le comportement qui serait attendu dans le cas d'un ampli-op idéal.
2. Utiliser la fiche technique de l'ampli-op pour identifier les paramètres clés de son opération dans ce circuit.
3. Formuler des hypothèses sur la nature de/des imperfections en jeux et de leur famille respective.
4. Simuler le circuit avec ALTIUM pour mettre en évidence les imperfections.
5. Valider vos hypothèses (ex. faites varier un paramètre clé du circuit) et conclure sur le problème.
6. Proposer des corrections aux circuits ou aux conditions d'opération pour que l'ampli-op ait un comportement considéré idéal.

Consultez la section 7 « Logiciels et matériel » du guide étudiant pour les informations pertinentes à l'utilisation du logiciel ALTIUM (ex : librairies à utiliser et configuration du logiciel). Cela dit, il est important de mentionner que pour avoir un fonctionnement adéquat en laboratoire, **il est impératif de créer un nouveau projet pour chaque problème** et d'y insérer une page de schéma, etc. Vous devez recommencer ceci pour chaque problème.

### Cas 1

Dans la figure 1, un ampli-op TL062 de Texas Instrument est utilisé dans un circuit d'amplification inverseur avec un gain de -10. L'excitation est une source sinusoïdale de 1 kHz et 1.5 V crête d'amplitude. L'ampli-op est polarisé entre +15 V et -15 V.

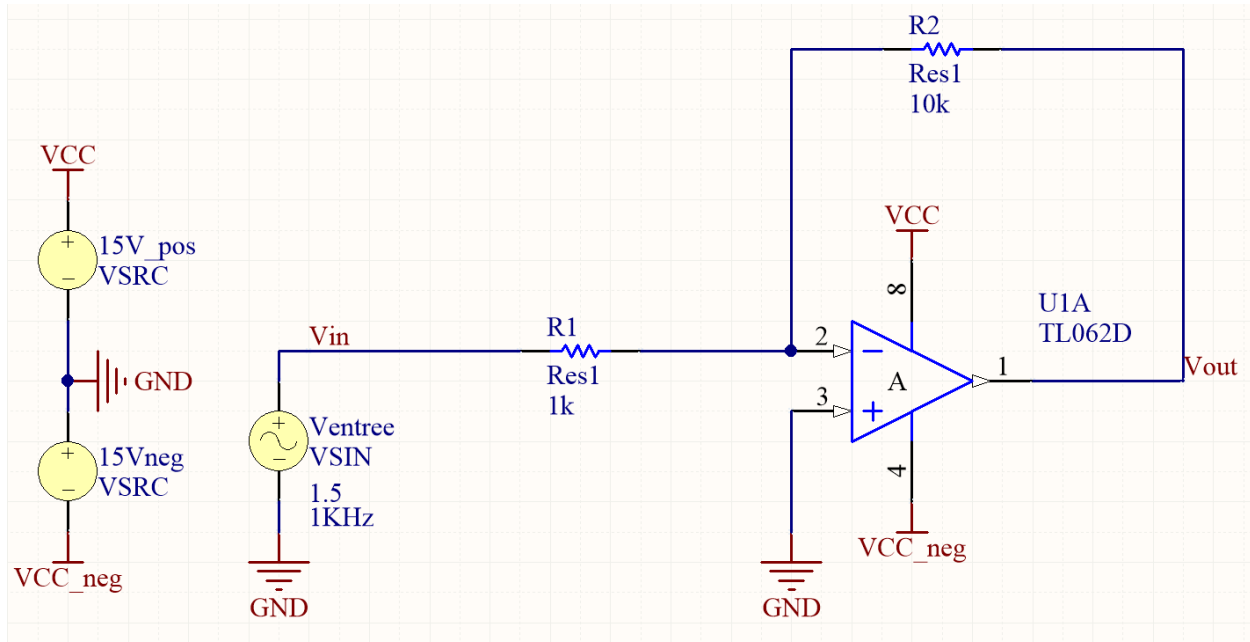


Figure 1. Circuit pour le cas 1.

P.1.1 : Donnez la réponse temporelle de ce circuit pour les 5 premières périodes du signal sinusoïdal.

P.1.2 : Quelle est la famille et quel est le nom de l'imperfection qui se manifeste ?

P.1.3 : Que nous apprend la fiche technique de Texas Instrument concernant cette imperfection ?

P.1.4 : À la lumière de votre analyse, pour le circuit tel qu'il est, quelle serait votre recommandation concernant le signal d'entrée pour assurer un bon fonctionnement ?

### Cas 2 :

Dans la figure 2, un ampli-op TL062 de Texas Instrument est utilisé dans un circuit d'amplification inverseur avec un gain de -10. L'excitation est considérée nulle pour ce cas.

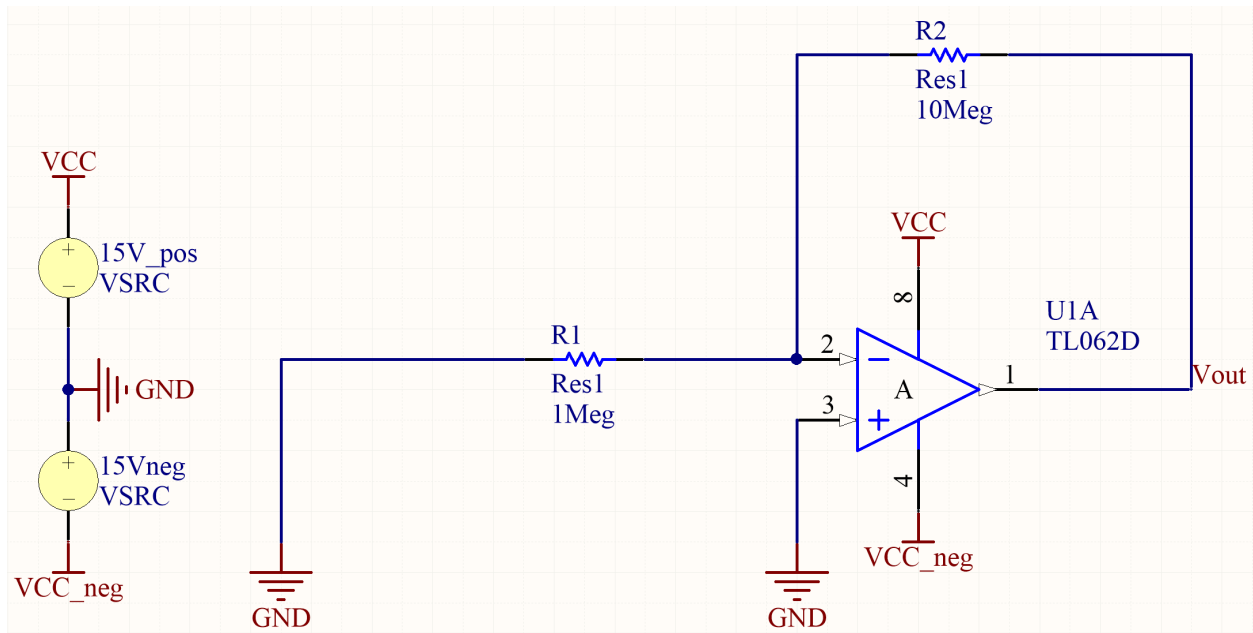


Figure 2 : Circuit pour le cas 2.

P.2.1 En simulation, quel est le niveau DC de la sortie ?

P.2.2 Quelle est la famille et quel est le nom de chaque imperfection qui se manifeste ?

P.2.3 Considérant que la borne 3  $V^+$  est à la masse, quel est le courant qui circule dans la résistance  $R_2$  pour le  $V_{out}$  simuler ? En consultant la fiche technique, est-ce à cela que vous vous attendez ?

P.2.4 : À la suite de votre analyse, modifiez le circuit suivant en ajoutant une résistance  $R_b$  entre la borne 3  $V^+$  et la masse. Premièrement, calculez et présentez dans votre rapport la valeur de  $R_b$  nécessaire et simulez ensuite le circuit avec  $R_b$ . Consignez dans le rapport le niveau DC à la sortie après l'introduction de  $R_b$ . Le niveau DC de la sortie n'est toujours pas à la valeur attendue intuitivement, soit 0 V. Expliquez qualitativement pourquoi.

### Cas 3 :

Dans la figure 3, un ampli-op TL062 de Texas Instrument est utilisé dans un circuit d'amplification inverseur avec un gain de -1000. L'excitation provient d'une source sinusoïdale de 10 Hz et 10 mV crête d'amplitude. L'ampli-op est polarisé entre +15 V et -15 V.

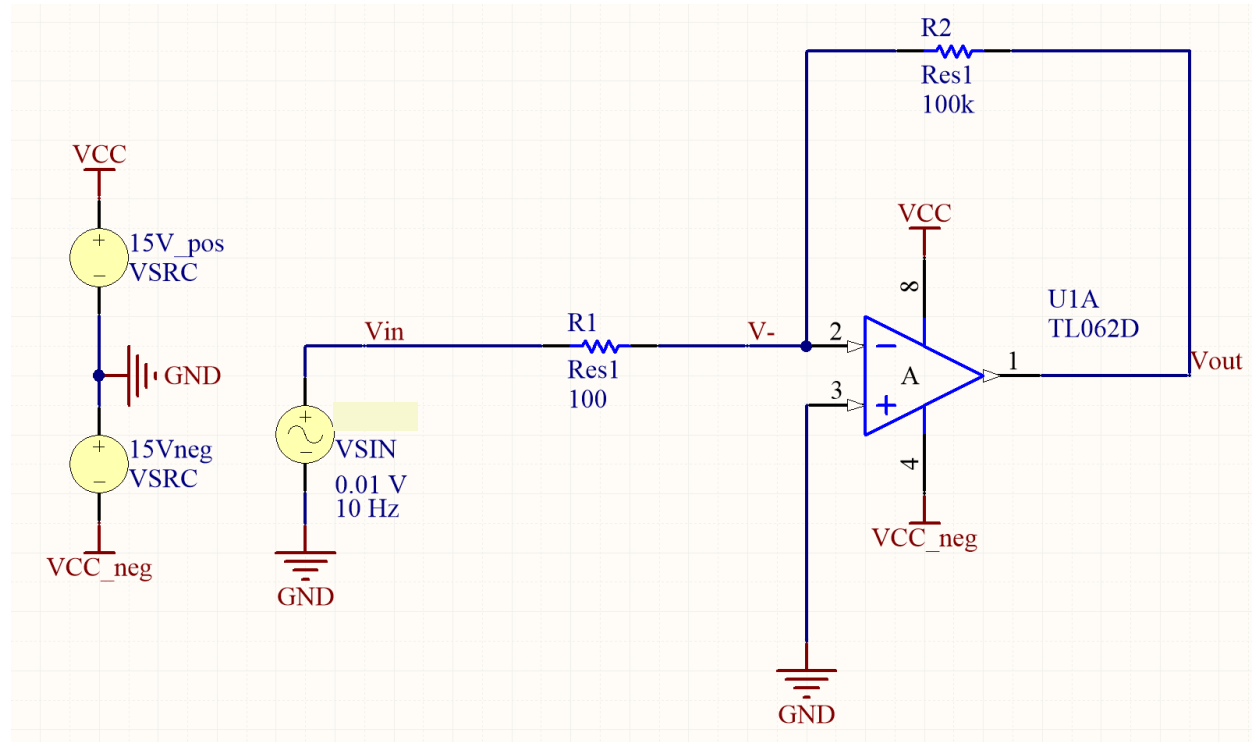


Figure 3 : Circuit pour le cas 3

P.3.1 : Simulez le circuit pour obtenir la réponse temporelle et consignez-la au rapport. Est-ce que la forme du signal de sortie correspond à la réponse attendue de ce circuit ? Quelle serait la forme du signal de sortie si l'ampli-op était idéal ?

P.3.2 : Quelle est la famille d'imperfection et quelle est l'imperfection en cause ?

P.3.3 : Tracez avec ALTIUM le lieu de Bode d'amplitude en **dB** du gain en boucle ouverte du circuit précédent et consignez-le au rapport. Attention : assurez-vous de faire le ratio des nœuds  $V_{out}/(V^+ - V^-)$  afin d'obtenir le gain en boucle ouverte et non le gain en boucle fermée  $V_{out}/V_{in}$ . Note : la tension de la borne  $V^+$  est à la masse. Remplacez simplement dans l'équation par « 0 ».

P.3.4 : Tracez avec ALTIUM le lieu de Bode d'amplitude en **dB** du gain en boucle fermée consignez-le au rapport. Attention : assurez-vous de faire le ratio des nœuds  $V_{out}/V_{in}$ . Comparez le gain en boucle fermée et le gain en boucle ouverte.

P.3.5 : À partir des informations que l'on peut obtenir du lieu de Bode d'amplitude en boucle ouverte précédent, calculez l'amplitude du signal que l'on devrait obtenir à la sortie de l'ampli-op et comparez cette valeur au gain déduit de la simulation temporelle (P.3.1) et du lieu de Bode d'amplitude en boucle fermée.

#### Cas 4 :

Dans la figure 4, un ampli-op TL062 de Texas Instrument est utilisé dans un circuit d'amplification inverseur avec un gain de -10. L'excitation est une source sinusoïdale de 10 Hz et 250 mV crête d'amplitude. L'ampli-op est polarisé entre +15 V et -15 V. La charge est purement résistive et est de 100  $\Omega$ .

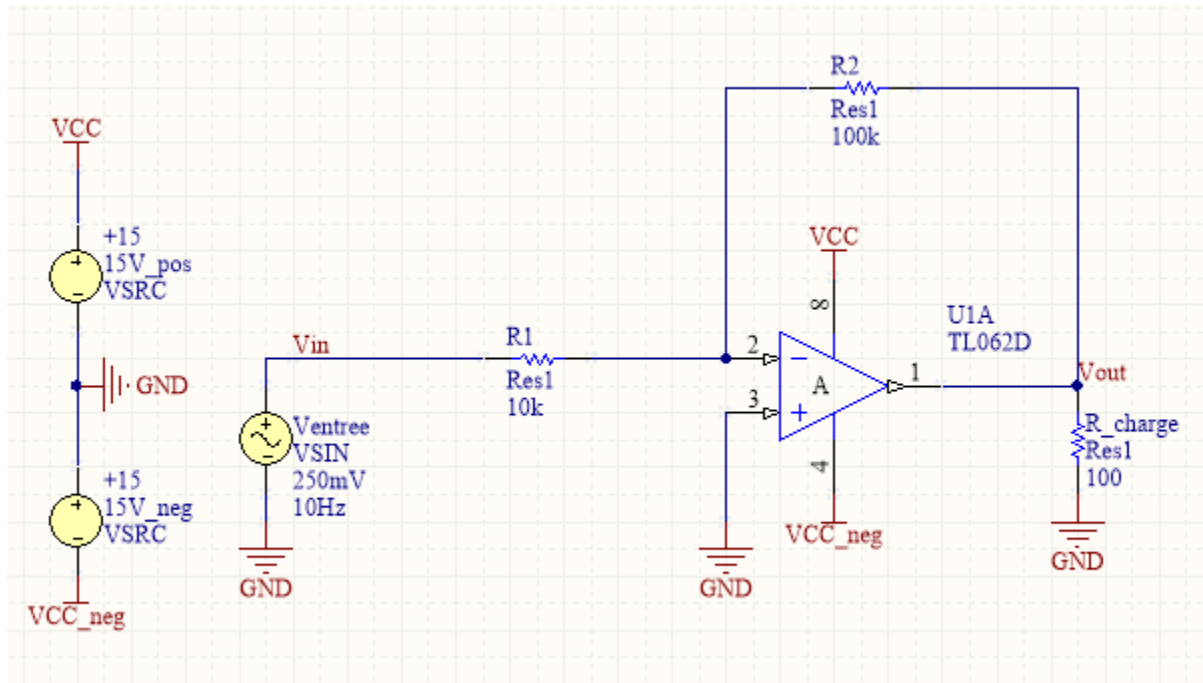


Figure 4. Circuit pour le cas 4.

P.4.1 : Donnez la réponse temporelle de ce circuit pour les 5 premières périodes du signal sinusoïdal.

P.4.2 : Quelle serait l'amplitude du signal attendue à la sortie de l'ampli-op si celui-ci était idéal ? Quelle est l'amplitude maximale observée à la charge de 100  $\Omega$  ?

P.4.3 : Quelle est la famille et quel est le nom de l'imperfection qui se manifeste ? Justifiez votre réponse.

P.4.4 : Que nous apprend la fiche technique de Texas Instrument concernant cette imperfection ?

### Cas 5 :

Dans la figure 5, un ampli-op TL062 de Texas Instrument est utilisé comme suiveur de tension. L'ampli-op est polarisé entre +15 V et -15 V. L'excitation est une source d'ondes carrées ayant les paramètres suivants :

Temps de montée	1 ns
Temps de descente	1 ns
Période	10 $\mu$ s
Largeur d'impulsion	5 $\mu$ s
Amplitude	5 V crête

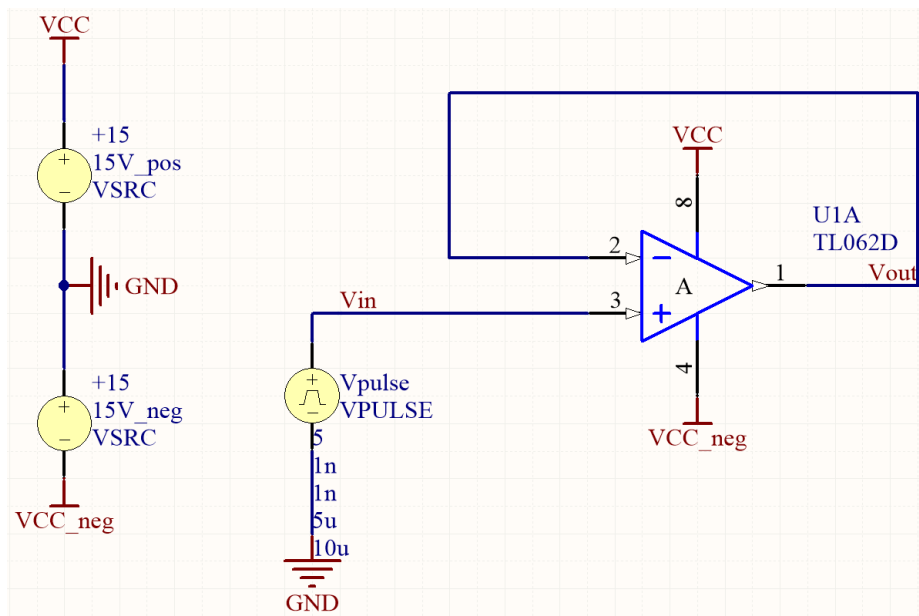


Figure 5. Circuit pour le cas 5.

P.5.1 : Donnez la réponse temporelle de ce circuit pour les 5 premières périodes de l'onde carrée.

P.5.2 : Quelle est la famille et quel est le nom de l'imperfection qui se manifeste ?

P.5.3 : Quelle est la valeur attendue du paramètre de l'ampli-op directement relié à cette imperfection selon la fiche technique de Texas Instrument ? Quelle est la valeur de ce paramètre obtenue en simulation pour le front montant et le front descendant du signal de sortie ? Utilisez les curseurs pour vous aider à calculer ces valeurs.

P.5.4 : Considérant un signal sinusoïdal de 5 V crête d'amplitude, quelle est la fréquence maximale à laquelle peut opérer le TL062 sans que le signal de sortie ne soit affecté par l'imperfection en cause ? Fournir la justification mathématique ainsi que le résultat de simulation pour les 5 premières périodes du signal d'entrée et du signal de sortie. Dans Hambley, cette caractéristique se nomme *full power bandwidth*.

#### Cas 6 :

N'utilisez pas ALTIUM pour ce problème.

Considérons un ampli-op ayant un gain en boucle ouverte  $A_{v0ol}$  de  $10^5$  V/V et un produit gain-largeur de bande de 1 MHz. Celui-ci est utilisé dans un amplificateur non-inverseur (voir Hambley 7<sup>e</sup> édition, figure 13.21) pour obtenir un gain en boucle fermée de +10 V/V.

P.6.1 : Quelle est la fréquence de coupure (à -3 dB) de cet ampli-op en boucle ouverte ET en boucle fermée ?

P.6.2 : Dans cet amplificateur non-inverseur, si  $R_1 = 10$  k $\Omega$ , quel est la valeur de  $R_2$  pour obtenir un gain en boucle fermée  $A_{v0CL}$  de +10 V/V ?

P.6.3 : Calculez le gain en boucle ouverte et le gain en boucle fermée pour chaque décade entre 1 Hz à 1 MHz. Présentez vos résultats (gain en dB) dans un tableau et le lieu de Bode d'amplitude (nous vous suggérons d'utiliser Excel).

P.6.4 : Suite au problème P.6.3 ci-dessus, quelle conclusion pouvez-vous tirer ? Quelle est la famille et quel est le nom de l'imperfection de l'ampli-op en cause ?

#### Mandat B – Conception d'un amplificateur à source commune

Vous devez concevoir un amplificateur en configuration source commune tel que présenté à la figure 6. Les étapes suivantes vous guideront dans la conception. D'abord, il est important d'analyser les équations décrivant le fonctionnement du transistor ainsi que les équations du circuit pour identifier les variables indépendantes et établir les étapes pour concevoir ce circuit.

1. Par exemple, à partir de la consommation de puissance statique, le courant  $I_{DQ}$  peut être trouvé.
2. Celui-ci vous permettra ensuite de calculer la transconductance  $g_m$  du transistor à ce point de polarisation et donc,
3. grâce au gain désiré, de trouver la résistance  $R_D$ . Ce calcul doit prendre en compte la charge au nœud de sortie.
4. Par la suite, le courant  $I_{DQ}$  peut être utilisé pour trouver  $V_{GS}-V_{TO}$  et donc  $V_{GS}$  où  $V_{TO}$  est la tension de seuil du transistor.
5. Avec la contrainte de conception sur  $V_{DSQ}$  et votre cher ami Kirchhoff, vous allez être en mesure de trouver la valeur de  $R_S$ .
6. En ce qui a trait au circuit de polarisation de la grille, la tension  $V_G$  peut être calculée à partir de  $V_{GS}$  et  $R_S$ .
7. Il faut ensuite choisir adéquatement les résistances  $R_1$  et  $R_2$  pour atteindre la valeur  $V_G$  désirée tout en accordant l'impédance d'entrée de l'étage à l'impédance de la source. Vous avez en main 2 variables inconnues et deux contraintes : le diviseur de potentiel entre  $R_1$  et  $R_2$  qui permet de fixer  $V_G$  et deuxièmement, le diviseur de potentiel formé par l'impédance de la source  $R$  et l'impédance d'entrée de l'étage (qui correspond à  $R_1 \parallel R_2$ ).

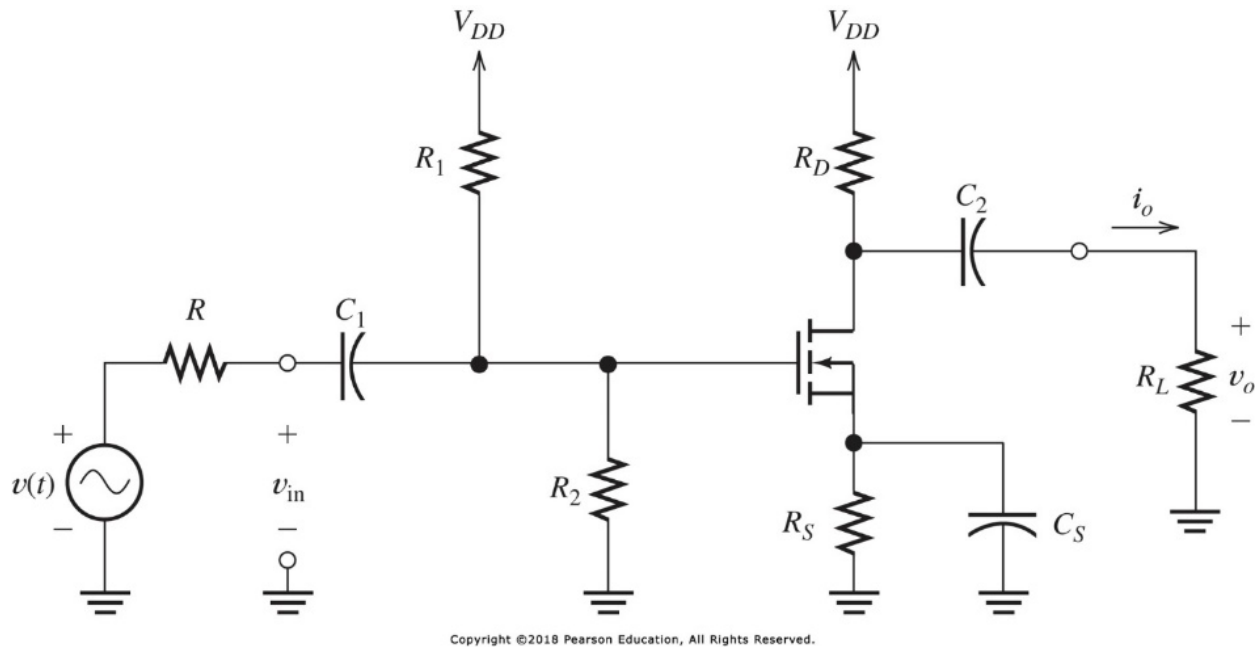


Figure 6. Schéma de l'amplificateur à source commune à concevoir.

Le transistor a les caractéristiques suivantes :  $W = 250 \mu\text{m}$ ,  $L = 5 \mu\text{m}$ ,  $K_P = 75 \mu\text{A/V}^2$ ,  $V_{TO} = 1.5 \text{ V}$ . Vous pouvez négliger la résistance du canal  $r_d$  (Hambley 7<sup>e</sup>, p574-Fig 11.20) dans vos calculs.

Cet amplificateur doit avoir un gain en charge  $A_v = v_o/v_{in}$  de  $-7.5 \text{ V/V}$  dans la bande passante pour une consommation de puissance continue de  $10 \text{ mW}$ . Il est pertinent de noter que la majorité de la consommation en courant du circuit passe par la branche composée de  $R_D$ ,  $V_{DS}$  et  $R_S$  et qui est alimentée par une tension  $V_{DD}$  de  $20 \text{ V}$ . La charge  $R_L$  du circuit est de  $10 \text{ k}\Omega$ . Enfin, comme les courbes caractéristiques du transistor ne sont pas disponibles et dans le but de maximiser la plage dynamique en sortie, on demande que  $V_{DSQ} = 10 \text{ V}$  soit à  $V_{DD}/2$ .

La source à l'entrée du circuit a une impédance  $R$  de  $10 \text{ k}\Omega$ . Afin de vous assurer d'un transfert efficace du signal d'entrée  $v(t)$  vers la grille, vous devez concevoir le circuit de polarisation ( $R_1$  et  $R_2$ ) pour que 99 % du signal  $v(t)$  se retrouve à l'entrée de l'amplificateur (c.-à-d. à la grille du transistor).

Notez que tous les condensateurs de découplage ( $C_1$ ,  $C_2$  et  $C_S$ ) sont court-circuit pour le signal AC dans la bande passante d'intérêt.

Enfin, noter qu'il n'est pas requis d'utiliser des valeurs standards pour les composantes passives.

-----Fin de la problématique-----



## 5 Connaissances nouvelles

### Connaissances déclaratives (quoi)

- La structure physique du MOSFET (NMOS et PMOS).
- Les équations régissant le comportement des transistors.
- Les courbes caractéristiques des transistors et ses différents régimes d'opération
- Le modèle petit signal basse fréquence d'un transistor MOSFET.
- L'impédance d'entrée et de sortie d'un amplificateur.
- Les configurations d'amplificateur en source commune et en suiveur.
- Les notions de gain en boucle ouverte ou fermée d'un amplificateur.
- Les propriétés d'un amplificateur opérationnel idéal.
- Les équations régissant le comportement d'un amplificateur opérationnel en boucle fermée dans un circuit suiveur et dans un amplificateur inverseur et non inverseur.
- Les imperfections de l'amplificateur opérationnel des familles linéaire, non linéaire et DC.
- L'origine des imperfections de l'amplificateur opérationnel considérant les tolérances des paramètres des transistors.

### Connaissances procédurales (comment)

- Lire et utiliser l'information dans la fiche technique d'un transistor et d'un amplificateur opérationnel.
- Obtenir ses courbes caractéristiques d'un transistor avec un logiciel de conception assistée par ordinateur.
- Analyser un circuit avec composants actifs.
- Concevoir un amplificateur en source commune utilisant un transistor MOSFET.
- Concevoir un amplificateur suiveur utilisant un transistor MOSFET.
- Simuler un circuit à amplificateur opérationnel avec un logiciel de conception assistée par ordinateur.
- Concevoir un circuit à base d'amplificateur opérationnel (non-inverseur, inverseur, suiveur et filtre actif d'ordre supérieur).
- Concevoir un circuit avec un amplificateur opérationnel en considérant ses imperfections.

### Connaissances conditionnelles (quand)

- Considérer un amplificateur opérationnel comme idéal ou non idéal dans l'analyse d'un circuit.
- Considérer un ampli-op (non idéal) comme idéal pour un régime d'opération donné en maîtrisant les imperfections de l'ampli-op.
- Apporter des modifications à un circuit pour tenir compte des imperfections d'un amplificateur opérationnel.

## 6 Guide de lecture

### 6.1 Références essentielles

Le livre officiel du cours est *Electrical Engineering – Principles and Applications*. Allan R. Hambley, 7<sup>e</sup> édition. Les suggestions de lecture ci-dessous sont pour ce manuel.

#### Connaissances acquises – révision

- Équivalent Thévenin et Norton : p90-97
- Impédance : p228-232
- Diode : p460-463
- Lieu de Bode : p306-309
- Concepts de base sur l'amplificateur opérationnel : p504-509

#### Procédural 1 – Transistor MOSFET

- Chapitre 11 p557 – 598
- Fiche technique du transistor sur la page web du cours

#### Laboratoire 1

- Amplificateur opérationnel configuration inverseur : p648-655
- Amplificateur opérationnel configuration non-inverseur : p655-661
- Amplificateur opérationnel configuration suiveur de tension : p656
- Tutoriel Altium (au besoin) sur la page web du cours.
- Fiches techniques sur transistor NMOS 2n7002k 2n7002k\_ps\_revb.pdf sur la page web du cours
- Fiches techniques sur transistor NMOS 2n7002k 2n7002k.pdf sur la page web du cours

#### Procédural 2 – Amplificateur opérationnel et ses imperfections

- Amplificateur opérationnel idéal : p647
- Imperfections de l'amplificateur opérationnel : p663-676

### 6.2 Documents complémentaires

Lors des procéduraux 1 et 2, nous ferons le pont entre les imperfections de l'ampli-op et les transistors qui le compose. Quoique le contenu de ces lectures ne sera pas évalué directement, elles aident à mieux comprendre la relation entre les transistors et l'ampli-op. Les lectures visent un des ampli-ops le plus simples, connu sous le nom de *Miller Operational Transconductance Amplifier*.

Les lectures suggérées se retrouvent dans la 7<sup>e</sup> édition du livre de Sedra and Smith intitulé *Microelectronic circuits*. Il y a deux copies de ce livre disponible à la réserve de la bibliothèque des sciences. Un document PDF avec les principales sections se retrouve sur la page web de l'APP5GE-S2.

- Miroir de courant : p509-515
- Paire différentielle MOSFET : p595-602
- Tension de décalage à l'entrée d'une paire différentielle MOSFET : p637-640
- Paire différentielle MOSFET avec miroir de courant comme charge active : p644-651
- Amplificateur opérationnel à deux étages : p659-663 ; p995-1001

## 7 Logiciels et matériel

L'outil de conception assistée par ordinateur utilisé dans cette APP est *Altium Designer 22.2.1* Notez qu'il n'y a pas de version disponible pour installation sur un ordinateur personnel.

### 7.1 Notes importantes sur l'utilisation d'Altium

1. Ce logiciel étant capricieux, IL EST ESSENTIEL de faire un nouveau projet pour chacun des problèmes du laboratoire ou de la problématique. Pour un projet donné, veuillez y ajouter un seul schéma pour résoudre un problème à la fois.
  - a. Dans la version 22.2.1, vous pouvez faire une nouvelle page (*Sheet*) pour chaque numéro. Ceci étant dit, si ce n'est pas fonctionnel pour vous, faites un nouveau projet.
2. Pour l'ampli-op TL062, utiliser la librairie *TI Operational Amplifier.IntLib* située dans le répertoire W:\Altium\Libraries\Texas Instruments.
3. Les sources d'alimentation DC, les générateurs de signaux sinusoïdaux et d'ondes carrées se retrouvent dans la librairie *Simulation Sources.IntLib* située dans le répertoire W:\Altium\Libraries\Simulation
4. Les composantes passives se retrouvent dans la librairie *Miscellaneous Devices.IntLib* située dans le répertoire C:\Utilisateurs\Public\Documents publics\Altium\AD21\Library
5. Si vous déplacez vos fichiers d'un répertoire à un autre, vous devrez redéfinir l'arborescence (*path*) des librairies pour tous les composants.
6. Il y a des tutoriels de disponibles sur la page de l'APP pour vous aider. Voir les autres APPs.

## 8 Santé et sécurité

### 8.1 Dispositions générales

Dans le cadre de la présente activité, vous êtes réputés avoir pris connaissance des politiques et directives concernant la santé et la sécurité. Ces documents sont disponibles sur les sites web de l'Université de Sherbrooke, de la Faculté de génie et du département. Les principaux sont mentionnés ici et sont disponibles dans la section Santé et sécurité du site web du département :

<http://www.gel.usherbrooke.ca/santesecurite/>

- Politique 2500-004 : Politique de santé et sécurité en milieu de travail et d'études
- Directive 2600-042 : Directive relative à la santé et à la sécurité en milieu de travail et d'études
- Sécurité en laboratoire et atelier au département de génie électrique et de génie informatique

## 9 Sommaire des activités

### 9.1 Semaine 1

- Première rencontre de tutorat
- Étude personnelle et exercices
- Formation à la pratique procédurale 1
- Formation à la pratique en laboratoire
- Formation à la pratique procédurale 2

### 9.2 Semaine 2

- Étude personnelle et exercices
- Formation à la pratique en laboratoire : validation pratique de la solution
- Rédaction du rapport d'APP
- Remise du rapport d'APP
- Deuxième rencontre de tutorat
- Évaluation formative théorique écrite
- Évaluation sommative théorique écrite

## 10 Production à remettre

Un rapport sur la résolution de la problématique sera le seul livrable de cette APP selon les modalités suivantes :

### 10.1 Modalités

- Un rapport par équipe de 2 étudiants. Veuillez utiliser l'outil pour l'inscription des équipes sur la page web de l'APP5GE.
- Pondération :
  - Mandat 1, cas 1 à 5 : 16 pts chaque (80 pts total)
  - Mandat 1, cas 6 : 25 pts
  - Mandat 2 : 45 pts
  - Total 150 pts
- Format : fichier PDF seulement. (Pas de ZIP ni docs)
- Date de remise : Avant le premier groupe de tutorat le jour du tutorat 2.
- Remise du rapport à l'aide de l'outil de dépôt que l'on retrouve sur la page web de la S2 au lien : *depot > h23 > s2ei > S2\_APP5GE*
- Pénalité en cas de retard : 20 % après le début du premier tutorat de fermeture et 20 % de plus par jour additionnel.
- Le rapport doit être une production originale et unique. Voir le document *Intégrité Intellectuelle* sur le site de la S2 concernant le plagiat.

### 10.2 Contenu

- Page titre
- Pour chacun des 6 cas du mandat 1 :
  - Répondez aux questions.
  - Présentez les graphiques obtenus avec Altium dans le corps du texte et non dans une annexe.
  - Assurez-vous que les graphiques soient lisibles et présentés pour en permettre l'évaluation.
- Pour le deuxième mandat :
  - Présentez les diverses étapes de conception avec les calculs détaillés.
  - Assurez-vous de bien documenter votre approche et vos résultats. (Nous devons être en mesure d'évaluer que vous savez ce que vous faites.)
  - Remplir le tableau suivant :

$I_{dq}$	
$g_m$	
$R_d$	
$V_{gs}$	
$R_s$	
$V_g$	
$R_1$	
$R_2$	

## 11 Politiques et règlements

Dans le cadre de la présente unité activité, vous êtes réputés avoir pris connaissance des politiques et des règlements suivants. Ces documents sont disponibles sur le site web de l'Université de Sherbrooke ou sur le site web de la Faculté de génie.

### 11.1 Règlements et politiques de l'Université de Sherbrooke

- Règlement des études
- Politique d'évaluation des apprentissages

### 11.2 Règlements et politiques facultaires

- Règlement facultaire d'évaluation des apprentissages/Programmes de baccalauréat
- Règlement facultaire sur la reconnaissance des acquis

### 11.3 Intégrité intellectuelle

- Déclaration d'intégrité relative au plagiat

### 11.4 Situation particulière

Si vous êtes dans une situation particulière pour votre intégration, assurez-vous d'avoir communiqué avec le Programme d'intégration des étudiantes et étudiants à l'adresse de courriel [prog.integration@usherbrooke.ca](mailto:prog.integration@usherbrooke.ca).

## 12 Pratique procédurale 1

### 12.1 Buts de l'activité :

Le but de se procédural est de se familiariser avec les transistors MOSFETs. Les notions couvertes vont de l'implémentation physique du dispositif, aux courbes caractéristiques, aux équations régissant leurs comportements et son modèle petit signaux. Par la suite nous allons étudier 2 configurations d'amplificateurs à base d'un transistor (source commune et suiveur de tension). Un pont sera fait avec les imperfections de l'ampli-op qui sera le sujet du procédural 2.

Il est important de mentionner qu'il existe une variété de transistors (MOSFET, bipolaire, JFET, HEMP, etc.). Ceci dit, par souci d'acquisition des compétences en fonction du temps alloué, il a été décidé de mettre l'emphasis sur les transistors MOSFET, qui sont d'ailleurs les plus répandus. Grâce aux compétences développées dans cette APP, il sera facile de les transposer aux autres types de transistors.

### 12.2 Exercices préparatoires

Q.1.1 Pourquoi est-ce que nous vous avons fait réviser les notions concernant les circuits équivalents Norton et Thévenin ?

Q.1.2 Pour trouver la résistance Thévenin d'un circuit, le plus simple est de mettre à zéro les sources de tension et de courant indépendantes. Pour une source de tension quel est l'équivalent ? Pour une source de courant, quel est l'équivalent ?

Q.1.3 Dans quel cas ne pouvons-nous pas appliquer la démarche précédente pour trouver la résistance Thévenin équivalente ?

Q.1.4 À quelle page dans Hambley 7<sup>e</sup> édition retrouvons-nous la liste des étapes pour obtenir l'équivalent Norton ou Thévenin ?

Q.2.1 Qu'est-ce qu'une diode ?

Q.2.2 Quelle est la courbe caractéristique I-V d'une diode et commenter sur les divers régimes d'opération.

Q.2.3 Pourquoi prenons le temps de réviser ce qu'est une diode ?

### 12.3 Exercices

Q.3.1 Dessiner une vue en coupe d'un transistor NMOS et identifier le drain, la grille, la source, le contact au substrat, la longueur de grille L et la largeur de grille W.

Q.3.2 Analysez les figures 11.4 et 11.5 dans Hambley 7<sup>e</sup> édition et portez attention à la courbe caractéristique des transistors à la figure 11.6. Par la suite, donner ci-dessous les équations qui régissent le comportement des transistors, plus particulièrement  $I_d$  VS  $V_{ds}$  pour divers  $V_{gs}$ .

Q.4.1 Pour un transistor NMOS avec un  $V_{to} = 1$  V,  $K_P = 50 \mu A/V^2$ ,  $L = 5 \mu m$  et  $W = 50 \mu m$ , considérant les points d'opérations ci-dessous, préciser quel est le régime d'opération et calculer le courant.

- a)  $V_g = 5V$ ,  $V_s = 1V$ ,  $V_d = 11V$ ,
- b)  $V_g = 6V$ ,  $V_s = 2V$ ,  $V_d = 4V$ ,
- c)  $V_g = 2V$ ,  $V_s = 2V$ ,  $V_d = 12V$

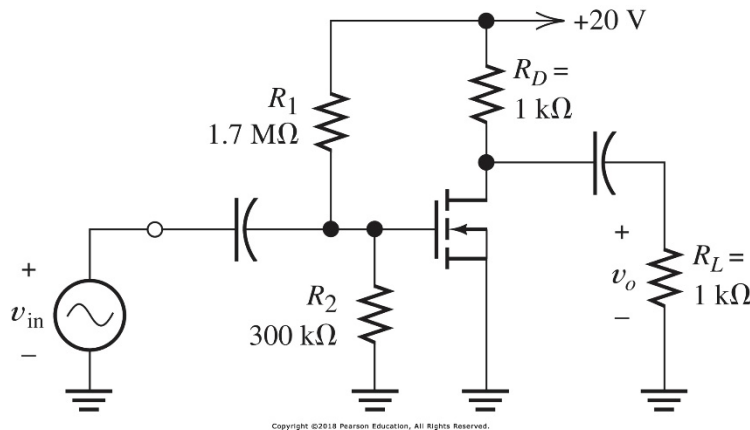


Q.4.2 Pour un transistor PMOS avec un  $V_{to} = -1$  V,  $V_g = 8$  V,  $V_s = 10$  V,  $V_d = 2$  V,  $K_P = 50 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $L = 5 \mu\text{m}$  et  $W = 50 \mu\text{m}$ , préciser quel est le régime d'opération et calculer le courant.

Q.5.1 Amplificateur source commune (Hambley P11.50 et P11.51). La figure suivante présente un amplificateur source commune. Dans un premier temps, considérez que le NMOS a un  $K_P = 50 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $L = 5 \mu\text{m}$ ,  $W = 500 \mu\text{m}$ ,  $V_{to} = 1$  V et  $r_d = \infty$ .

À quoi servent les 2 condensateurs ?

Trouvez  $I_{dq}$ ,  $V_{dsq}$  et  $g_m$ . Ensuite, trouvez le gain, l'impédance d'entrée et l'impédance de sortie (considérez les condensateurs de découplage comme du court-circuit aux fréquences d'intérêt).



Q.5.2 Dans le problème 5.1 précédent, le transistor NMOS a maintenant les caractéristiques suivantes :  $K_P = 50 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $L = 20 \mu\text{m}$ ,  $W = 600 \mu\text{m}$ ,  $V_{to} = 2$  V et  $r_d = \infty$ .

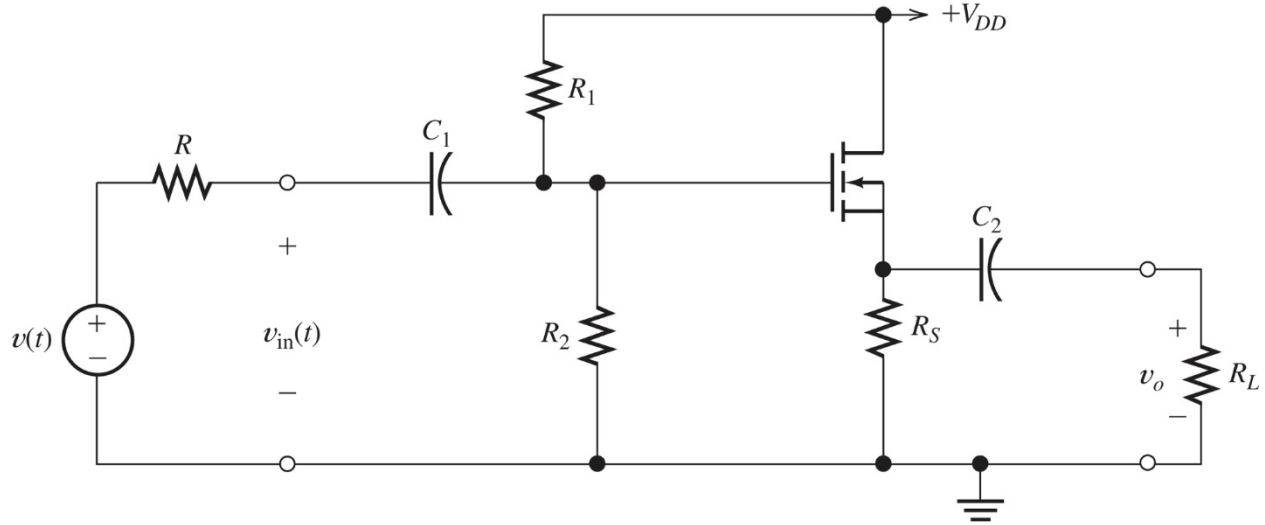
Trouvez  $I_{dq}$ ,  $V_{dsq}$  et  $g_m$ . Ensuite, trouvez le gain, l'impédance d'entrée et l'impédance de sortie (considérez les condensateurs de découplage comme du court-circuit aux fréquences d'intérêt).

Comparez le gain obtenu en Q.5.1.

Q.5.3 Maintenant, supposons que l'on désire augmenter le gain du problème précédent. Est-ce que doubler le courant  $I_{dq}$  (donc puissance) double le gain ?

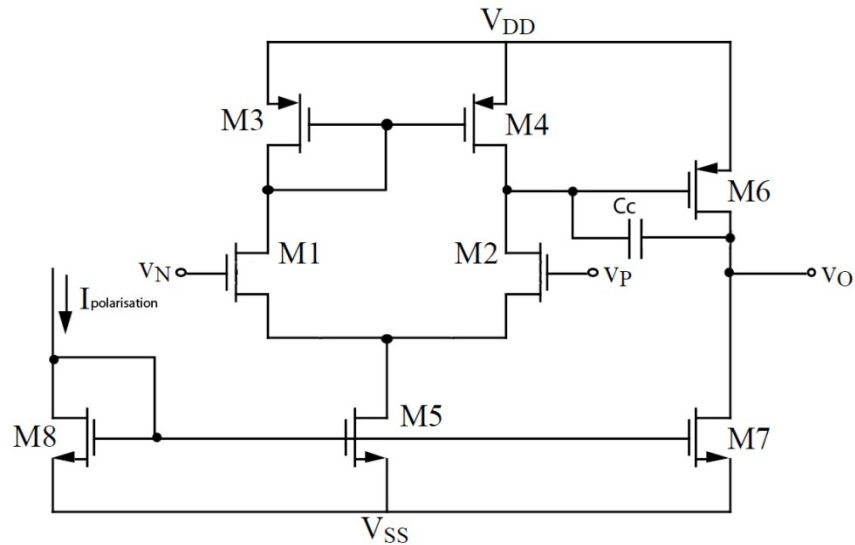
Q.6.1 Amplificateur suiveur. (Hambley p11.56) Dans la figure suivante,  $V_{dd} = 15$  V,  $R_L = 2$  kΩ,  $R_1 = 1$  MΩ et  $R_2 = 2$  MΩ. Le transistor NMOS a un  $K_P = 50 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $L = 10 \mu\text{m}$ ,  $W = 160 \mu\text{m}$ ,  $r_d = \infty$  et  $V_{to} = 1$  V. Trouver la valeur de  $R_s$  pour obtenir  $I_{dq} = 2$  mA. Ensuite, calculer le gain de tension, l'impédance d'entrée et l'impédance de sortie.

Q.7.1 Quelles sont les différences principales entre un amplificateur source commune et amplificateur suiveur ?



Copyright ©2018 Pearson Education, All Rights Reserved.

Q.8.1 La figure ci-dessous présente le schéma d'un amplificateur opérationnel au niveau transistor. Identifier la fonction de chacun des transistors. Il y a un/des miroirs de courant, une charge active, une paire différentielle et un amplificateur source commune.



Q.9.1 Allez voir la fiche technique du transistor NTND31225CZ-D et portez une tension sur les caractéristiques présentées. Que remarquez-vous ?

Q.9.2 Suite à cette conclusion, que peut-on anticiper concernant les circuits électroniques et microélectroniques (amplificateur opérationnel, comparateur, transmetteur LVDS, régulateur de tension, etc.) qui en sont conçus ?

Q.10.1 Où retrouve-t-on le plus grand nombre de transistors MOSFET ?

## 13 Pratique en laboratoire

### 13.1 Buts de l'activité :

Plusieurs buts sont visés par cette activité :

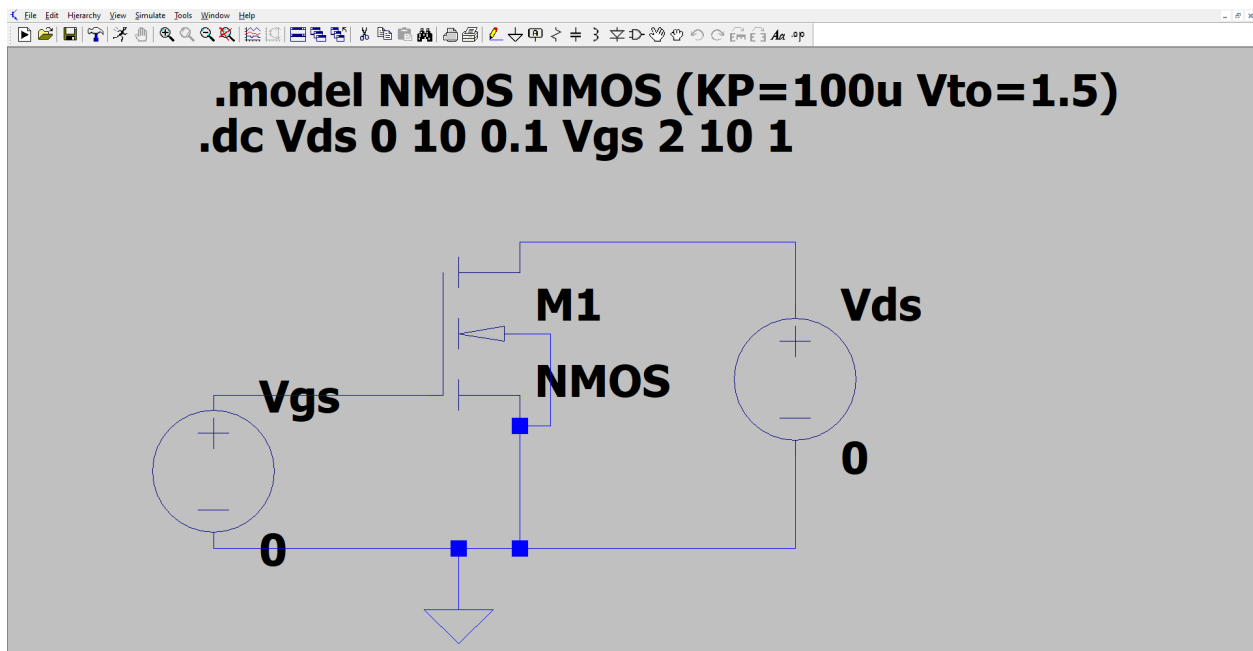
1. Dans l'objectif d'assimiler le fonctionnement des transistors, des exercices vous permettront de simuler les courbes caractéristiques de ceux-ci afin de faire le lien avec les notions vues au procédural 1. De plus, des exercices sont proposés pour comprendre comment fonctionnent des circuits avec des transistors en mode suiveur de tension (*source follower*) et en mode source commune.
2. Afin de résoudre la problématique, ce laboratoire vous permettra de parfaire vos connaissances du logiciel Altium. De la conception de schéma, d'inclure les librairies, de configurer le logiciel pour effectuer des simulations en fonction du temps, en fonction d'un paramètre du circuit, en fonction de la fréquence pour obtenir le lieu de Bode pour observer le gain en boucle ouverte et le gain en boucle fermée, d'utiliser les curseurs, etc.
3. Enfin, pour vous aider à résoudre la problématique et vous préparer au 2<sup>e</sup> procédural, vous étudierez avec Altium les 3 principales configurations en boucle fermée où l'ampli-op est utilisé.

### 13.2 Notes importantes sur l'utilisation d'Altium

Voir la [section 7 – Logiciels et matériel](#) pour de l'information essentielle pour réussir le laboratoire.

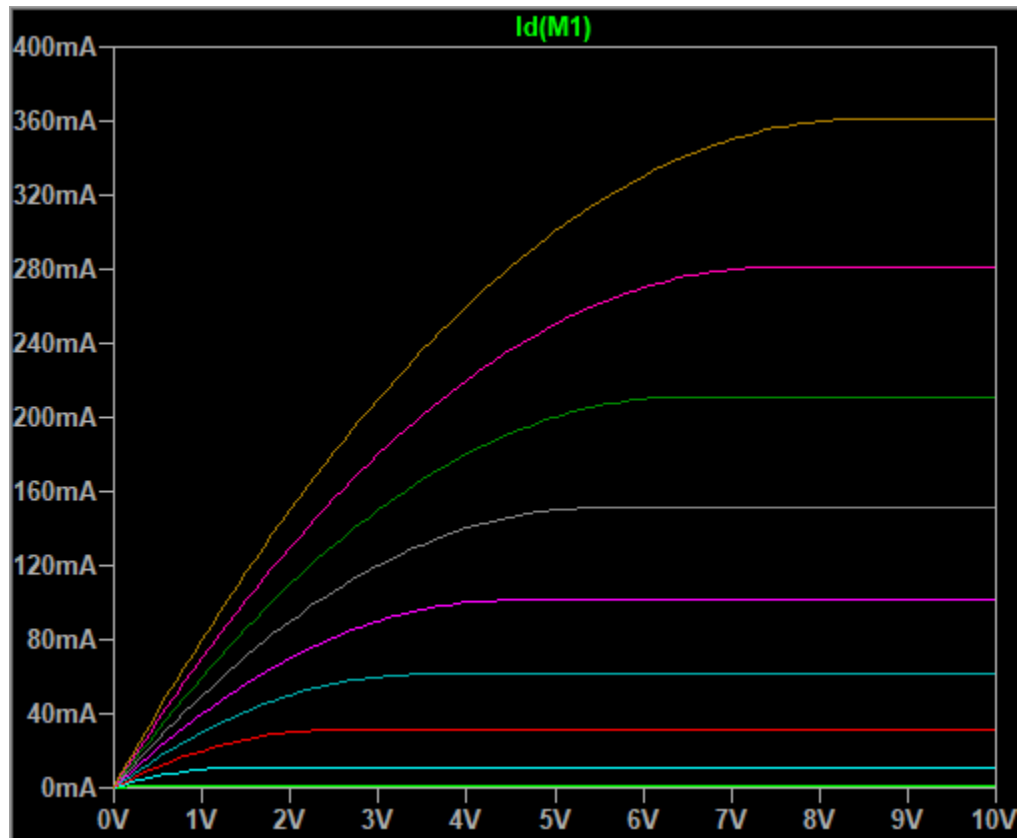
### 13.3 Transistor NMOS

Tout d'abord, allez chercher sur le site les schémas nécessaires pour LTSPICE et faite l'extraction du .zip. Ouvrez le fichier courbes\_prob1.asc, votre fenêtre LTSPICE devrait ressembler à ceci :



Q.1 Si vous appuyez sur le bouton 'Simulate' et 'Run' (ou encore l'icône du petit bonhomme qui court), une simulation de balayage en tension DC (*DC sweep analysis*) tracera les courbes caractéristiques  $I_{ds}$  versus  $V_{ds}$  pour divers  $V_{gs}$ . Dans l'analyse « *DC sweep analysis* », la source primaire est  $V_{ds}$  et la

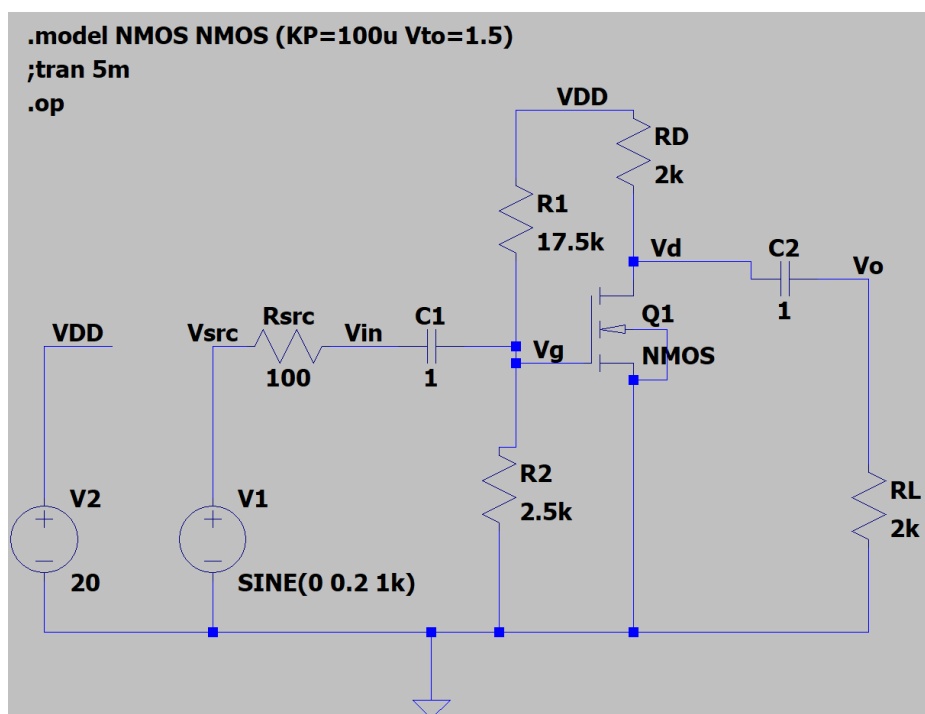
secondaire,  $V_{gs}$ .  $V_{ds}$  varie de 0 à 10 V par pas de 0.1 V et la source  $V_{gs}$  de 2 à 10 V par pas de 1 V. Comparez avec les courbes caractéristiques suivantes :



### 13.4 Transistor NMOS et amplificateur

Ouvrez le schéma ampli\_complet.asc qui est dans l'archive .zip. Le transistor Q1 a un  $r_d$  de 0 Ohm.

Voici le circuit en question :



Q.1 Faites une simulation du point d'opération (.OP) et notez les valeurs demandées au tableau 13.3.

Q.1.1 Quel est le régime d'opération du transistor? (saturé, triode, *cut off*). Il est essentiel de déterminer le régime d'opération pour pouvoir utiliser les bonnes équations dans la suite du problème.

Q.2 Faites une simulation temporelle (4-5 périodes, .tran 5m) et notez les valeurs demandées au tableau 13.3.

Tableau 13.3 – Amplificateur à source commune

Au point d'opération	
$V_{to}$	1.5 V
$V_{GQ}$	V
$V_{DQ}$	V
$I_{DQ}$	A

Simulation temporelle (amplitude des signaux)	
$V_{src}$	V
$V_{in}$	V
$V_o$	V

Q.3 À partir de vos mesures au point d'opération, calculez le paramètre K du transistor (eq. 11.4) et la transconductance de l'amplificateur  $g_m$  (eq. 11.24).

Q.4 À partir des mesures d'amplitude des signaux, calculez le gain de tension en charge  $A_v = V_o/V_{in}$  de l'amplificateur.

Q.5 Calculez ensuite à partir de ce gain  $A_v$  la transconductance de l'amplificateur  $g_m$  (eq. 11.35). Comparez cette valeur à celle obtenue à partir des mesures au point d'opération.

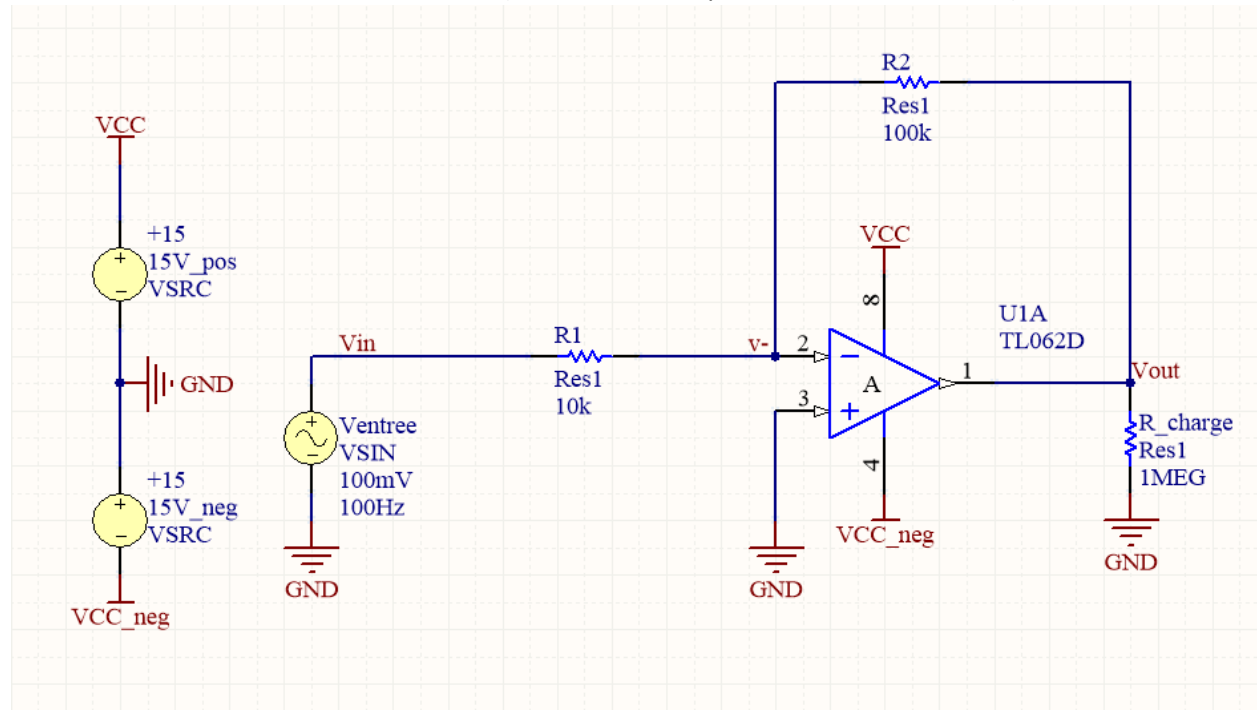
Q.6 À partir du ratio  $v_{in}/v_{src}$ , calculez l'impédance d'entrée de l'amplificateur (voir au milieu de la page 580). Comparez votre résultat avec l'estimation faite par l'équation 11.36.

Q.7 Comparer le gain de l'amplificateur source-commune  $A_v = V_o/V_{in}$  et le gain du système  $V_o/V_{src}$  qui a une charge  $R_L$  et avec une source à l'entrée non-idéale (impédance de sortie  $R_{src}$ ). À l'aide des réponses aux problèmes précédents, comment expliquez-vous le comportement observé ?

Q.8 Observez ce qui arrive au signal  $v_o$  si vous mettez la charge  $R_L$  à 1000  $\Omega$ . Qu'en déduisez-vous au sujet de l'impédance de sortie? Est-ce conforme aux attentes (eq. 11.37) ?

### 13.5 Amplificateur opérationnel configuré en inverseur

Tout d'abord, réaliser le schéma suivant. (Voir la [section 7](#) pour les libraires utilisées)



Configurer la source VSIN pour avoir un sinus de 100 Hz et 100 mV crête. Pour ce faire double cliquer sur la source VSIN. Ensuite, dans la fenêtre qui s'ouvrira aller dans la section *Models* et sélectionner *Edit*, et enfin sélectionner l'onglet *Parameters*.

Q.1 Obtenir la réponse temporelle du circuit en effectuant une analyse temporelle (*transient*). Comparer le signal de sortie et le signal d'entrée. Que remarquez-vous quant à la phase des 2 signaux ?

Q.2 À partir de la simulation temporelle, valider le gain théorique de ce circuit.

Q.3 Obtenir la réponse en fréquence de ce circuit en effectuant une simulation AC de 1 Hz à 100 MHz avec 100 points par décade. Avec Altium obtenir le lieu de Bode de l'ampli-op en boucle fermée ( $V_{out}/V_{in}$ )

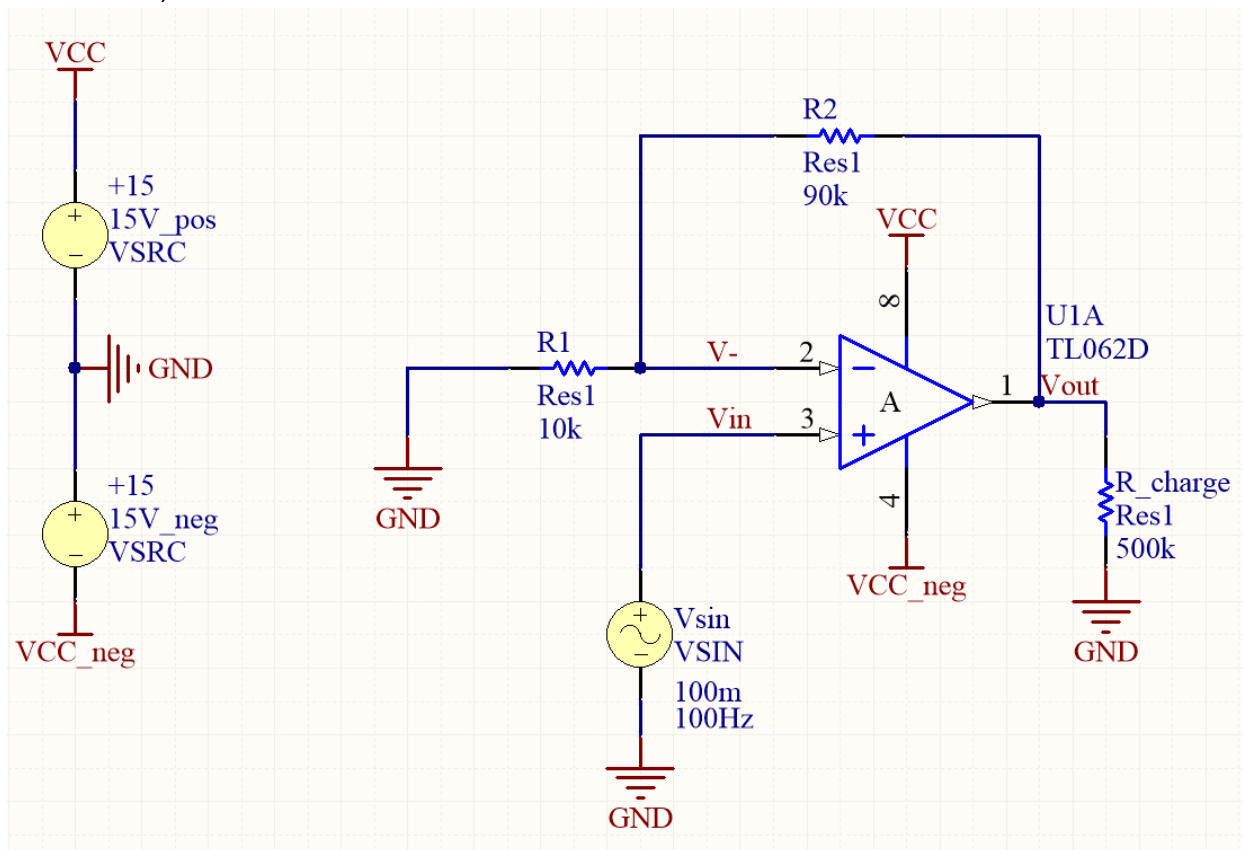
et en boucle ouverte ( $V_{out}/(v^+-v^-)$ ), les deux courbes en dB, et sur le même graphique. Notez ici que  $v^+$  est la masse et donc il suffit de faire ( $V_{out}/(0-v^-)$ )

Q.4 En analysant le lieu de Bode en boucle fermée à basse fréquence, quel gain obtenez-vous et comparez-le au gain théorique.

Q.5 (Optionnel si le temps le permet) Nous vous invitons à changer l'amplitude du signal d'entrée, la valeur de la charge, le gain  $-R_2/R_1$ , ainsi que le type de signal d'excitation. Peut-être que certaines imperfections de l'ampli-op vont se manifester, ce qui serait une excellente préparation pour le 2<sup>e</sup> procédural.

### 13.6 Amplificateur opérationnel configuré en non-inverseur

Tout d'abord, réaliser le schéma suivant.



Configurer la source VSIN pour avoir un sinus de 100 Hz et 100mV crête. Pour ce faire double cliquer sur la source VSIN. Ensuite, dans la fenêtre qui s'ouvrira aller dans la section *Models* et sélectionner *Edit*, et enfin sélectionner l'onglet *Parameters*.

Q.1 Obtenir la réponse temporelle du circuit en effectuant une analyse temporelle (*transient*). Comparer le signal de sortie et le signal d'entrée. Que remarquez-vous quant à la phase des 2 signaux ? Est-ce différent de la réponse au problème de l'ampli-op configuré en inverseur ?

Q.2 À partir de la simulation temporelle, valider le gain théorique de ce circuit.

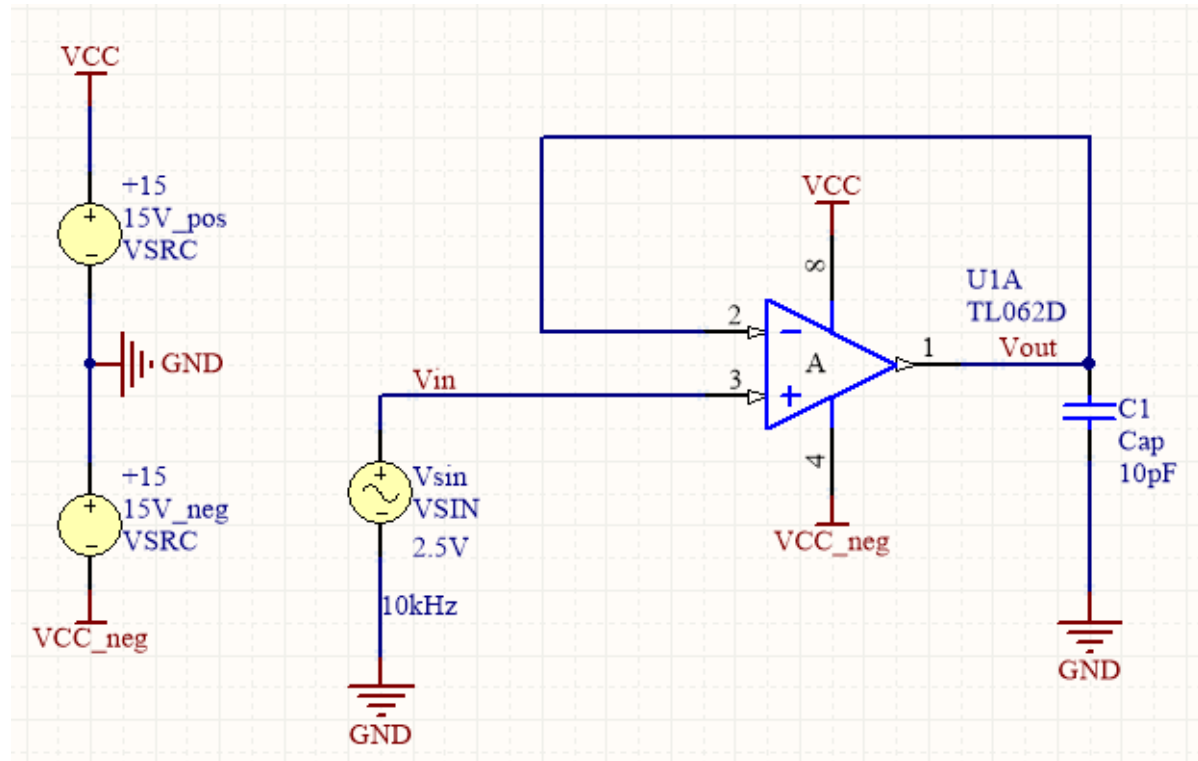
Q.3 Obtenir la réponse en fréquence de ce circuit en effectuant une simulation AC de 1 Hz à 100 MHz avec 100 points par décade. Avec Altium obtenir le lieu de Bode de l'ampli-op en boucle fermée ( $V_{out}/V_{in}$ ) et en boucle ouverte ( $V_{out}/(V_{in} - v^-)$ ), les deux courbes en dB, et sur le même graphique. Pourquoi ici est-il essentiel de faire  $V_{out}/(V_{in} - v^-)$  pour obtenir le lieu de Bode en boucle ouverte ?

Q.4 En analysant le lieu de Bode en boucle fermée à basse fréquence, quel gain obtenez-vous et comparez-le au gain théorique et à la réponse temporelle.

Q.5 (Optionnel si le temps le permet) Nous vous invitons à changer l'amplitude du signal d'entrée, la valeur de la charge, le gain  $1 + R_2/R_1$ , ainsi que le type de signal d'excitation. Peut-être que certaines imperfections de l'ampli-op vont se manifester, ce qui serait une excellente préparation pour le 2<sup>e</sup> procédural.

### 13.7 Amplificateur opérationnel configuré suiveur

Tout d'abord, réaliser le schéma suivant.



Configurer la source VSIN pour avoir un sinus de 10 kHz et 2.5 V crête. Pour ce faire double cliquer sur la source VSIN. Ensuite, dans la fenêtre qui s'ouvrira aller dans la section *Models* et sélectionner *Edit*, et enfin sélectionner l'onglet *Parameters*.

Q.1 Obtenir la réponse temporelle du circuit en effectuant une analyse temporelle (*transient*). Comparer le signal de sortie et le signal d'entrée. Que remarquez-vous quant à la phase des 2 signaux ?

Q.2 À partir de la simulation temporelle, valider le gain théorique de ce circuit.

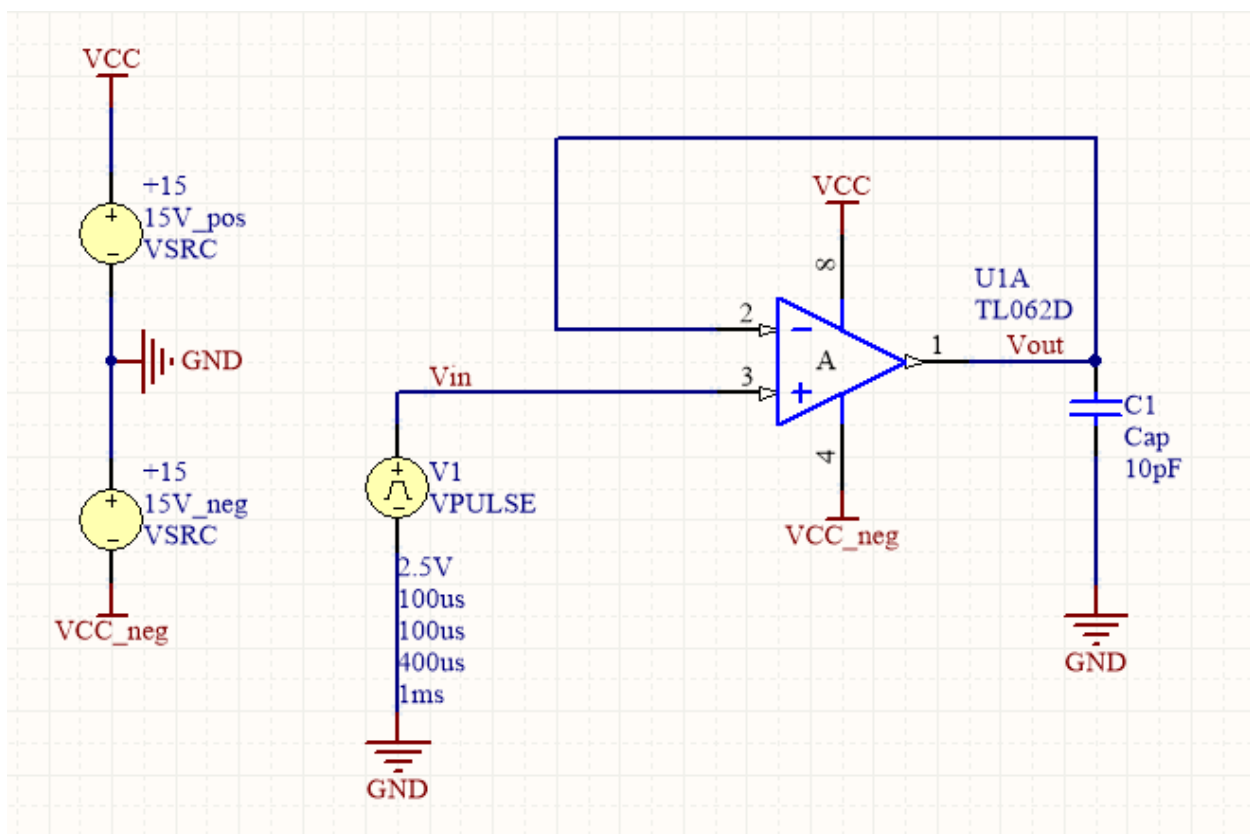
Q.3 Obtenir la réponse en fréquence de ce circuit en effectuant une simulation AC de 1 Hz à 100 MHz avec 100 points par décade. Avec Altium obtenir le lieu de Bode de l'ampli-op en boucle fermée



( $V_{out}/V_{in}$ ) et en boucle ouverte ( $V_{out}/(V_{in} - V_{out})$ ), les deux courbes en dB, et sur le même graphique. Pourquoi ici est-il essentiel de faire  $V_{out}/(V_{in} - V_{out})$  pour obtenir le lieu de Bode en boucle ouverte ?

Q.4 En analysant le lieu de Bode en boucle ouverte, utiliser le curseur pour trouver l'endroit sur la courbe où le gain est de 0 dB (1 V/V). Quelle est la fréquence ? À quoi correspond cette fréquence et comment s'appelle-telle dans une fiche technique ? Enfin, valider la réponse obtenue avec la fiche technique du TL062.

Q.5 Changer la source  $V_{sin}$  par une source d'ondes carrées «  $V_{pulse}$  » (voir schéma ci-dessous). Tout comme pour la source  $V_{sin}$ , cliquer sur la source, aller dans la section *Models*, sélectionner *Edit*, et enfin sélectionner l'onglet *Parameters*. Ensuite initialiser la source avec un temps de montée et un temps de descente de 100  $\mu s$ , une largeur de pulse de 400  $\mu s$  et une période de 1 ms pour un signal d'amplitude 2.5 V crête. Donner la réponse temporelle obtenue.



Q.6 (Optionnel si le temps le permet) Nous vous invitons à changer l'amplitude du signal d'entrée, la valeur de la charge, ainsi que le type de signal d'excitation. Peut-être que certaines imperfections de l'ampli-op vont se manifester, ce qui serait une excellente préparation pour le 2<sup>e</sup> procédural.

## 14 Pratique procédurale 2

### 14.1 Buts de l'activité :

Dans ce procédural, nous allons nous concentrer sur l'amplificateur opérationnel et ses imperfections en les regroupant en famille (DC, linéaire et non linéaire). À la fin du procédural, vous serez en mesure d'analyser un circuit et prédire le signal de sortie. Dans le cas où une imperfection se manifeste, nous discuterons de son origine, de son impact et de comment concevoir un circuit pour en minimiser l'impact. Ultimement, un bon concepteur pourrait considérer l'ampli-op comme idéal en le tenant loin de ses limites. Enfin, nous analyserons la fiche technique pour faire le lien entre ce qui est observé et ce que le fabricant nous indique.

### 14.2 Exercices

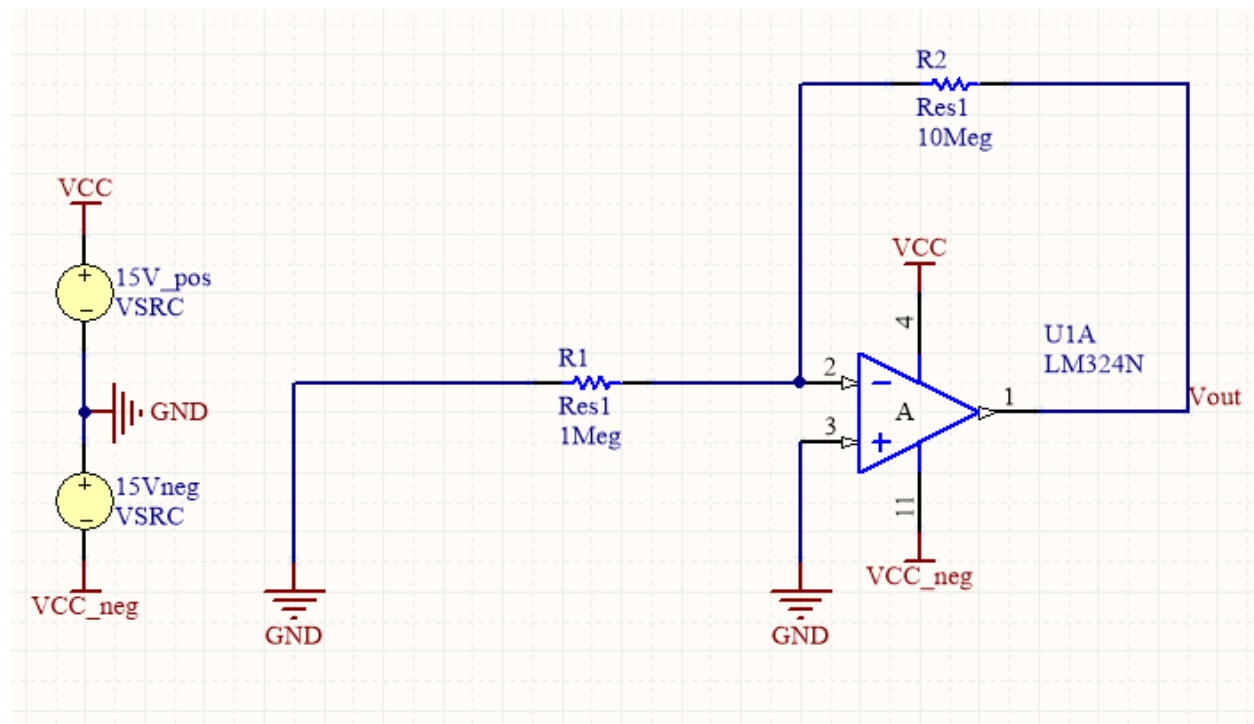
Q.1 Quelles sont les caractéristiques d'un amplificateur opérationnel idéal ?

Q.2 À quoi attribuons-nous les imperfections de l'ampli-op ?

Q.3 Pourquoi étudier les imperfections de l'ampli-op ?

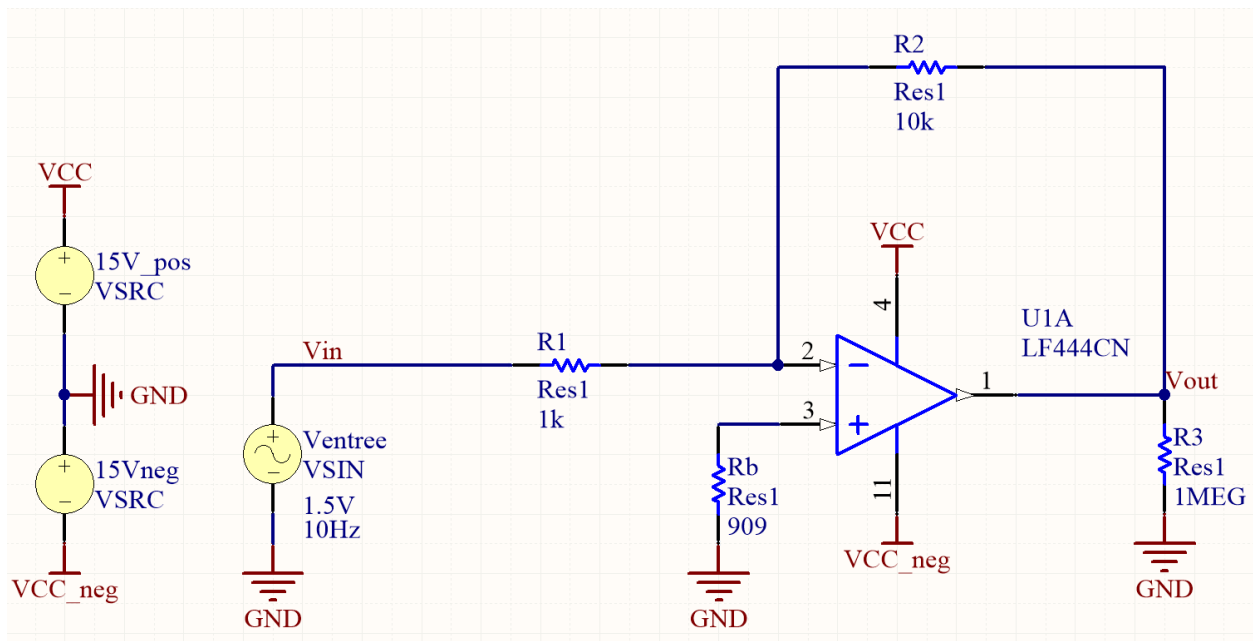
Q.4 Nommer les imperfections de l'ampli-op et les regrouper par familles :

Q.5 Selon le schéma suivant, quelle(s) hypothèse(s) pouvez-vous formuler quant à l'imperfection en cause ? Y a-t-il une façon de faire pour minimiser l'impact de cette imperfection ?

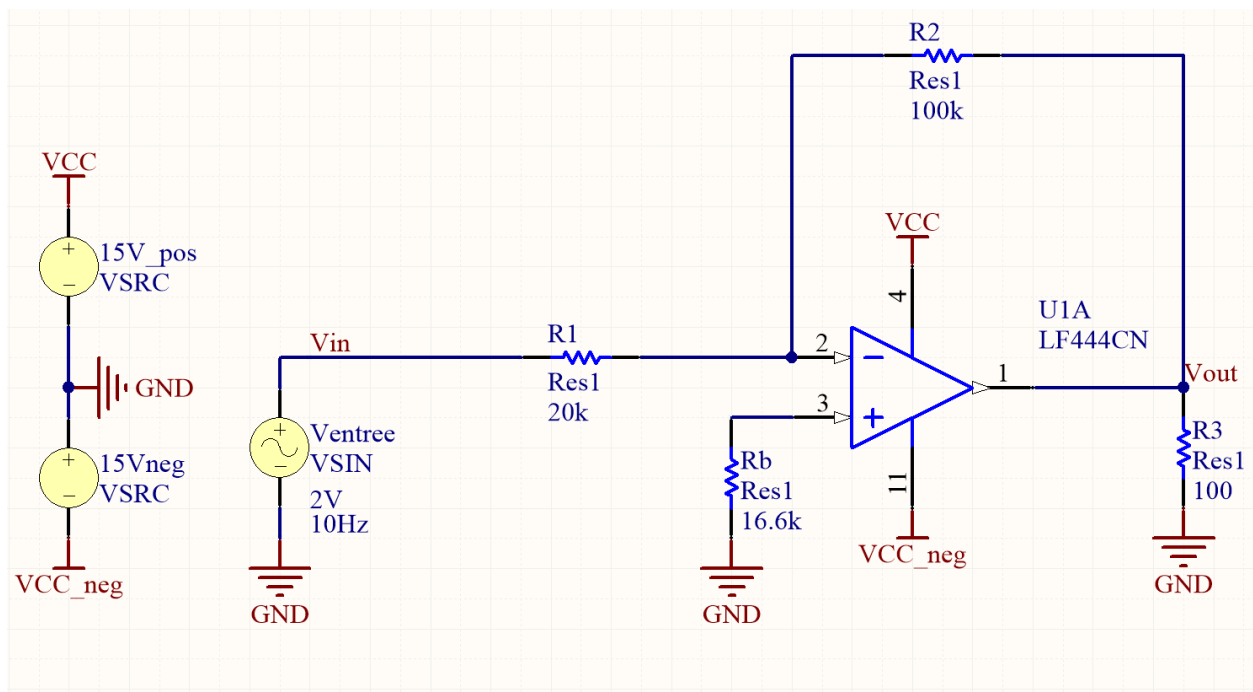


(Suite page suivante)

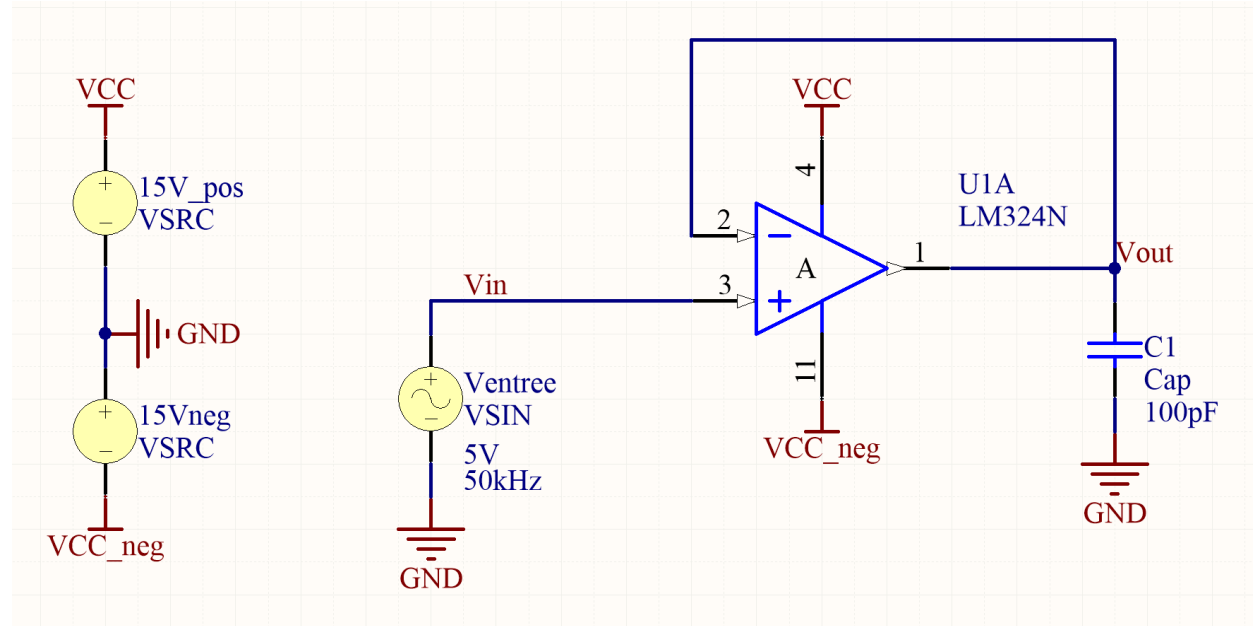
Q.6 Selon le schéma suivant, quelle(s) hypothèse(s) pouvez-vous formuler quant à l'imperfection en cause ? Valider avec la fiche technique du LF444.



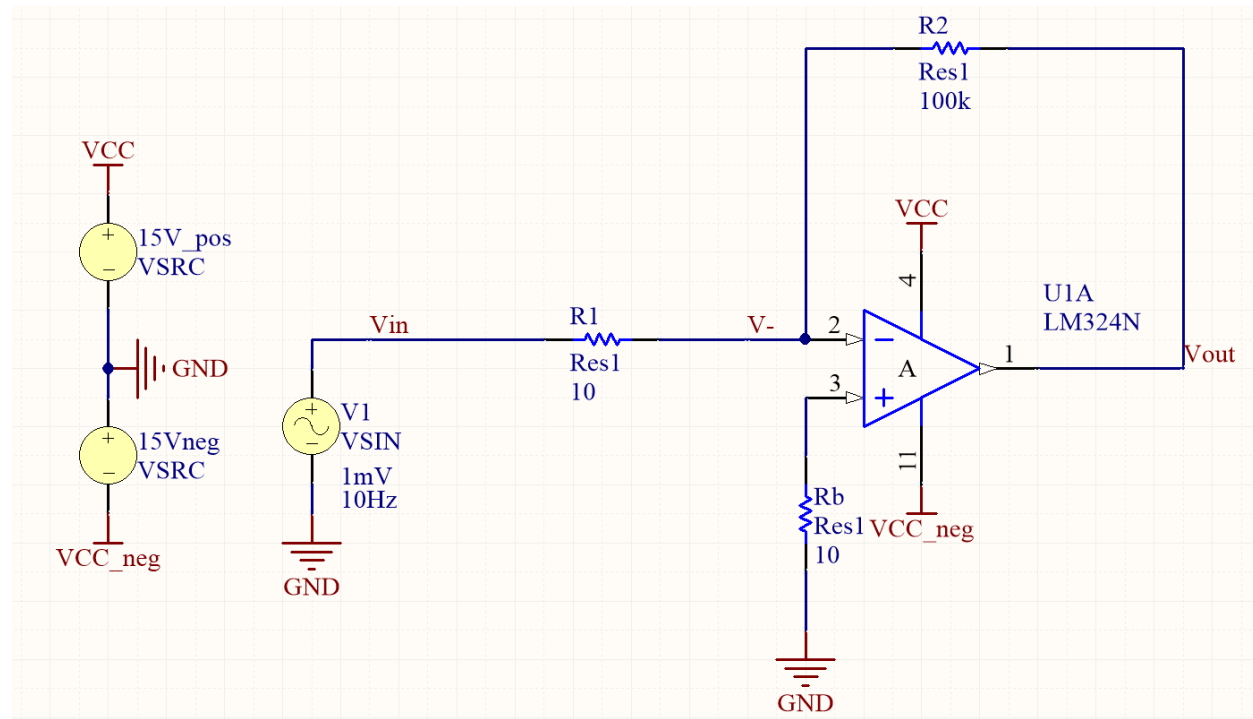
Q.7 Selon le schéma suivant, quelle(s) hypothèse(s) pouvez-vous formuler quant à l'imperfection en cause ? Valider avec la fiche technique du LF444.



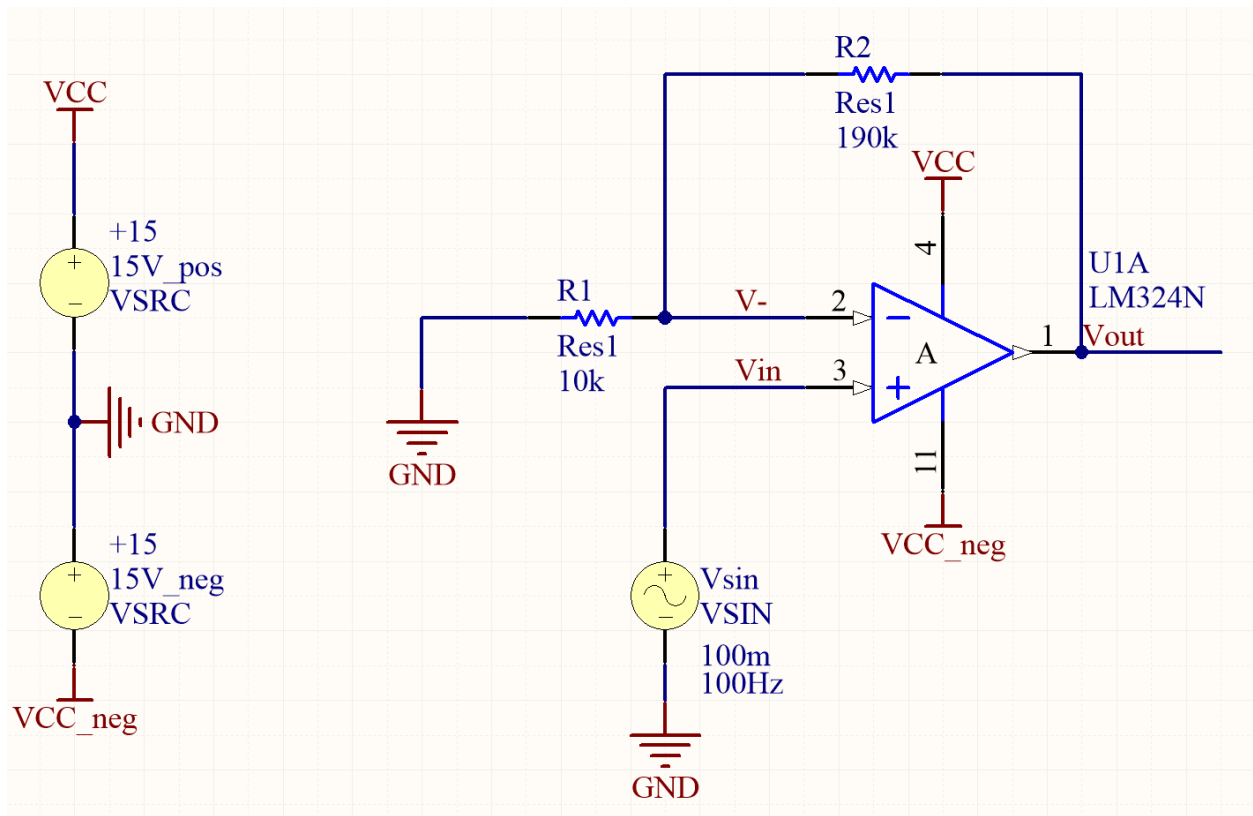
Q.8 Selon le schéma suivant, comment se nomme cette configuration ? Quelle(s) hypothèse(s) pouvez-vous formuler quant à l'imperfection en cause ? Valider avec la fiche technique du LM324. Quels sont les paramètres de la source sinusoïdale en entrée devons-nous limiter pour obtenir le signal attendu à la sortie ?



Q.9 Selon le schéma suivant, quel devrait être la sortie considérant le gain et l'amplitude du signal à l'entrée ? Quelle imperfection risque de se manifester selon vous ?



Q.10 Selon le schéma suivant, comment se nomme cette configuration ? En théorie quel est le gain en boucle fermée  $A_{vcl}$  à 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz et 100 kHz si la fiche technique nous indique que le produit gain-largeur de bande est de 1 MHz ? Comment cela se compare-t-il en simulation ?



## 15 Validation

### 15.1 But de l'activité :

Le but de cette activité est de supporter les équipes dans la résolution de la problématique et de valider les solutions proposées. Il s'agit d'une période très importante pour l'intégration des nouveaux concepts et d'avoir l'opportunité d'en discuter avec les professeurs et les auxiliaires d'enseignement. Il est donc essentiel d'avoir complété la résolution de la problématique avant la validation.

Les deux auxiliaires et les professeurs seront présents. Voir la page web de l'APP pour prendre rendez-vous. (Quoique la prise de rendez-vous optimise grandement l'utilisation de votre temps, n'hésitez pas à vous présenter même si vous n'avez pas pris de rendez-vous, nous trouverons le moyen de supporter toutes les personnes étudiantes qui le désirent. Merci de votre collaboration.)

La validation n'est pas évaluée.

## 16 Liste des Références

- *Electrical Engineering – Principles and Applications. Allan R. Hambley, 7<sup>e</sup> édition.*
- *Microelectronic circuits. Sedra and Smith, 7<sup>e</sup> édition.*
- *Fiches techniques*