

Méthodes de conception en électronique

Cours 1

Mise en contexte

- Suite du cours d'électronique
 - Anciennement "Électronique 2"
- Connaissances préalables:
 - Fonctionnement R, L, C, diodes et transistors
 - Logiciel de simulation et de PCB (Altium)
 - Instruments de laboratoire

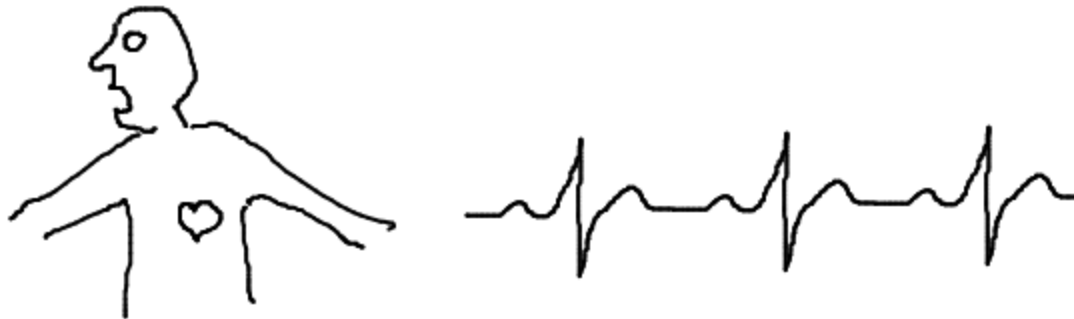
Mise en contexte

- Matière axée sur amplificateurs
 - Conception: comment les concevoir de toute pièce
 - Analyse: comprendre les critères de performance
 - Application: comment s'en servir
- Approfondir le côté pratique:
 - Comportement des composantes réelles
 - Comportement des systèmes réels
 - Réfléchir au système dans son ensemble...

Un cours au complet sur les amplificateurs?!

Mise en contexte

- Que peut faire un amplificateur?
 - Agrandir la taille d'un faible signal
- Exemple d'application:
 - Électrocardiogramme (ECG)
 - Signaux de quelques millivolts doivent être amplifiés pour être examinés



Mise en contexte

- Amplificateur sert à faire des opérations mathématiques:
 - Addition, multiplication, intégrale, dérivée et fonctions de transfert (filtrer).
- Exemple d'application:
 - Ajustement de la réaction dynamique d'un changement de vitesse électronique

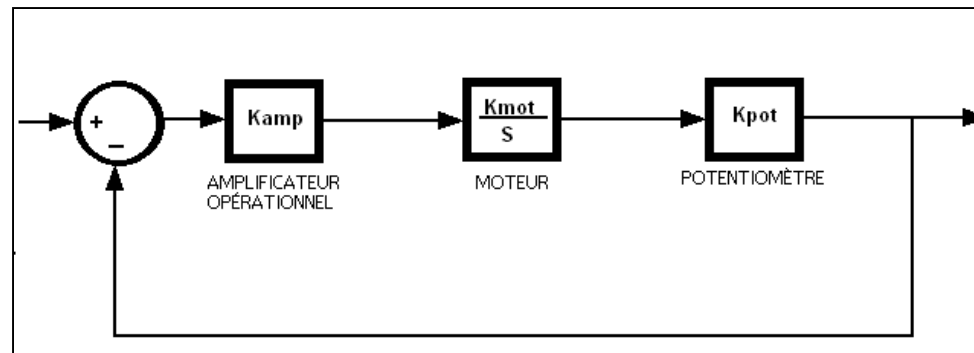
Application

- **But:** Faire tourner un moteur pour obtenir la bonne position pour le changement de vitesse



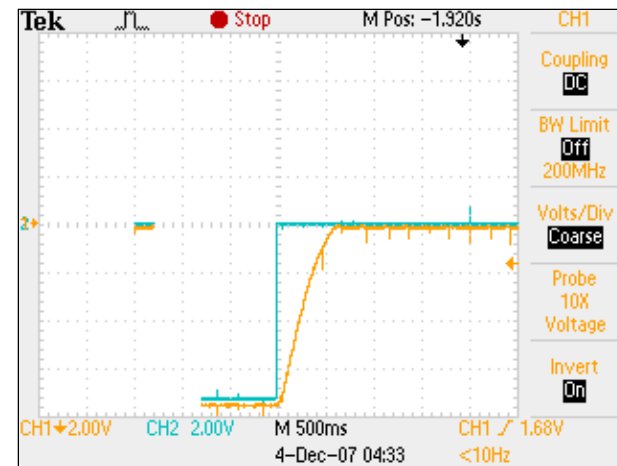
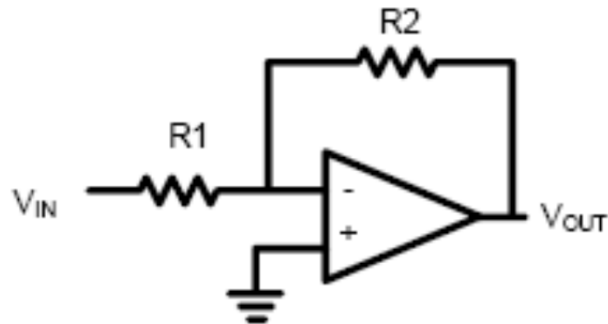
Application

- Pour changer de vitesse:
 - On fait tourner le moteur
 - Quand le moteur arrive à la bonne place, on arrête
 - On utilise un potentiometre pour mesurer la position:
position \rightarrow voltage



Application

- Première solution

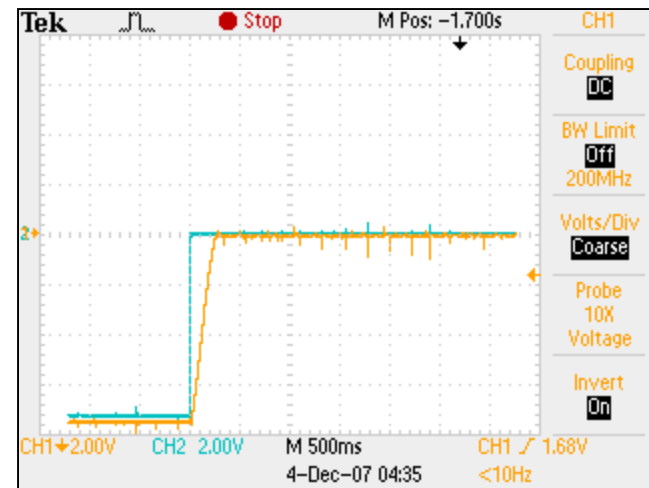
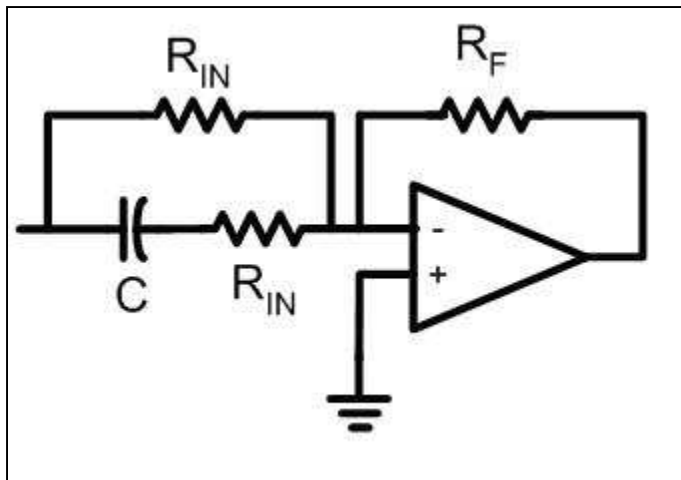


- Réponse trop lente pour les besoins
 - Solution: ajouter un zéro dans la fonction de transfert

“Ajouter un zero” = “derivée” ou “passe haut”

Application

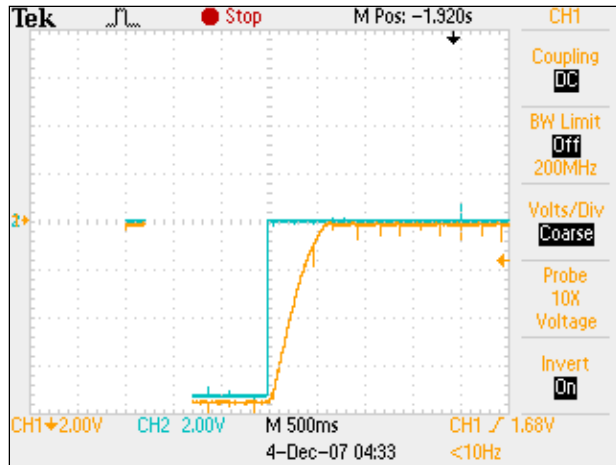
- Nouvelle solution



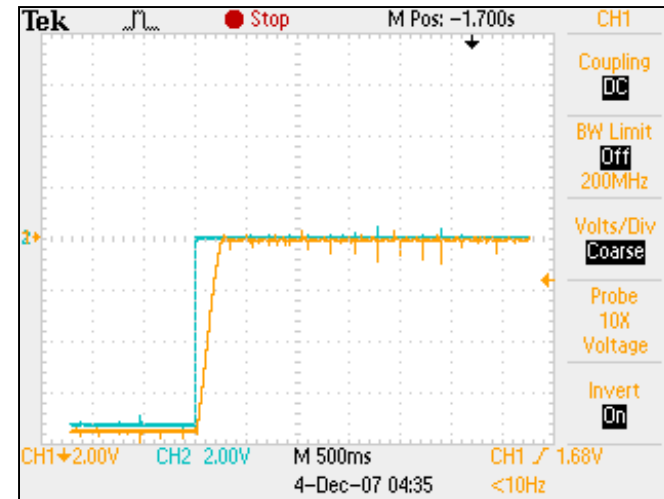
- L'ampli-op est utilisé pour ajuster la réponse en implantant une fonction de transfert

Application

- Comparaison



Avant optimisation



Après optimisation

Mise en contexte

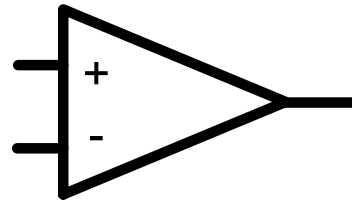
- Les amplificateurs opérationnels sont des blocs essentiels en électronique
 - Les amplificateurs sont considérés de la même manière que les transistors et les diodes
- Ce cours se dédie donc entièrement aux amplificateurs et à leurs applications

Amplificateur opérationnel

- La conception d'amplificateurs se fera plus tard dans la session
 - Pour l'instant, on se concentre sur les applications
 - "Si j'avais un ampli, qu'est-ce que je peux faire avec?"
- Pour y répondre, il faut savoir comment un ampli idéal se comporte.
 - On commence avec un rappel du cours d'électronique et on poussera les choses plus loin...

Amplificateur opérationnel

- Le symbole d'un amplificateur est celui-ci

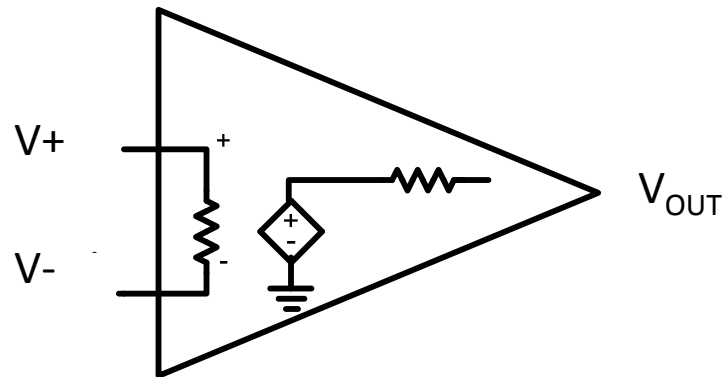


- Il y a 3 pattes:
 - 2 entrées V_+ et V_-
 - 1 sortie...
- Ça amplifie (gain A) la différence entre V_+ et V_-

$$V_{OUT} = A(V_+ - V_-)$$

Amplificateur opérationnel

- Voici le modèle classique:

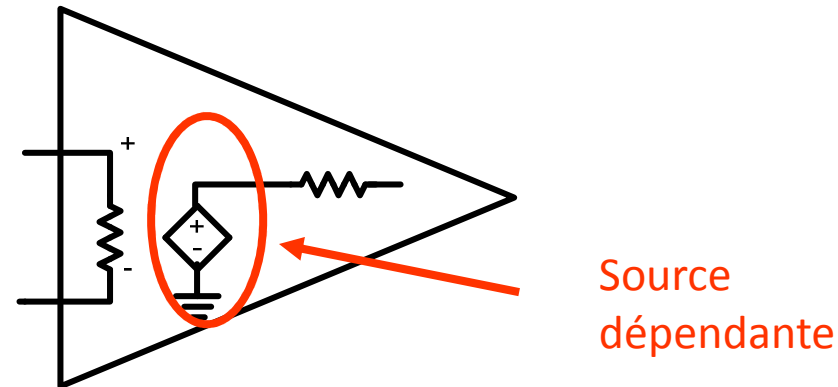


- On observe ceci:
 - Il y a une résistance à l'entrée et à la sortie
 - Il y a une source de tension dépendante

Allons voir pourquoi ces composantes sont présentes dans le modèle

Source dépendante

- La source dépendante modélise le gain de l'amplificateur



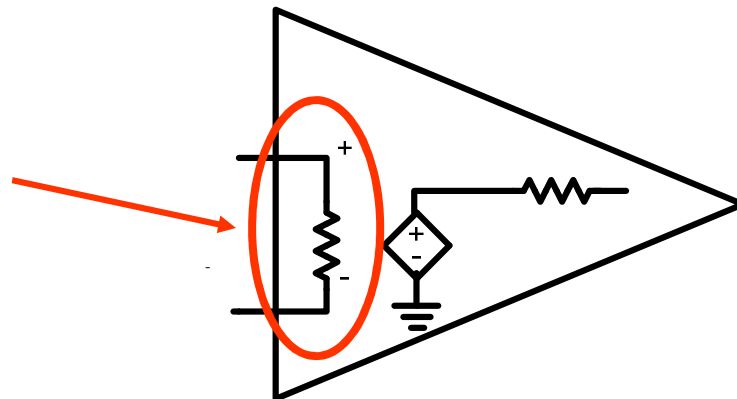
- Sa tension dépend de la tension en entrée
- Elle détermine le gain de l'amplificateur

$$V_{\text{DÉPENDANTE}} = A(V_{+} - V_{-})$$

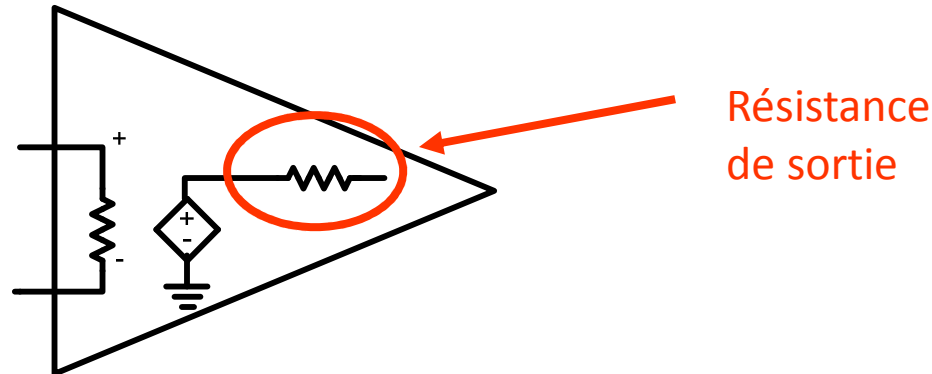
Résistance à l'entrée

- Quand on connecte une tension à l'entrée, l'amplificateur "tire" un courant.
 - La valeur du courant dépend du circuit de l'amplificateur.
 - Tension => courant: on modélise comme résistance
 - Ce n'est pas une VRAIE résistance, mais plutôt un comportement "résistif"

Résistance
à l'entrée



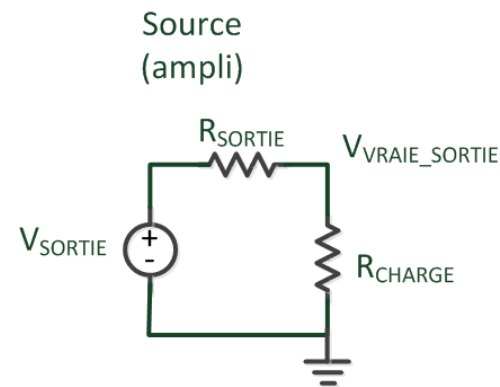
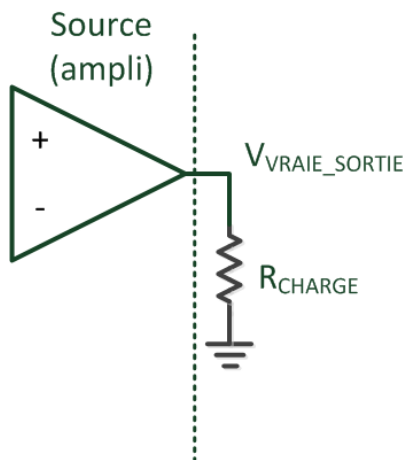
Résistance de sortie



- Aide à modéliser le comportement lorsque l'ampli est connecté à une charge résistive
- En l'absence de ce R_{OUT} , un court-circuit donnerait un courant infini
 - Pas réaliste

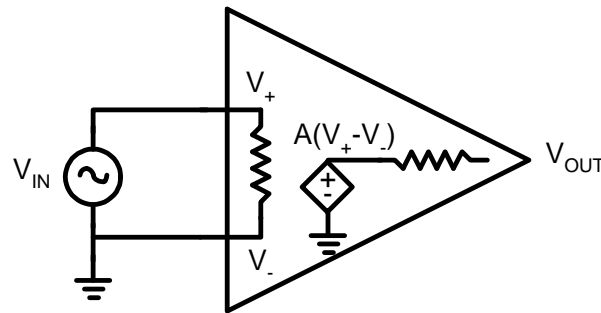
Resistance de sortie

- Si la charge tire peu de courant:
 - La vraie sortie sera égale à V_{SORTIE} (tension voulue)
- Si la charge tire trop de courant (R_{CHARGE} faible)
 - La VRAIE sortie aura une tension très faible
 - Certains disent que “la tension s’écrase”



Dans un circuit idéal

- Situation idéale:
 - Entrée est une source idéale (sans R_S)
 - Sortie tire AUCUN courant (circuit ouvert):
 $V_{OUT} = V_{DEPENDANTE}$

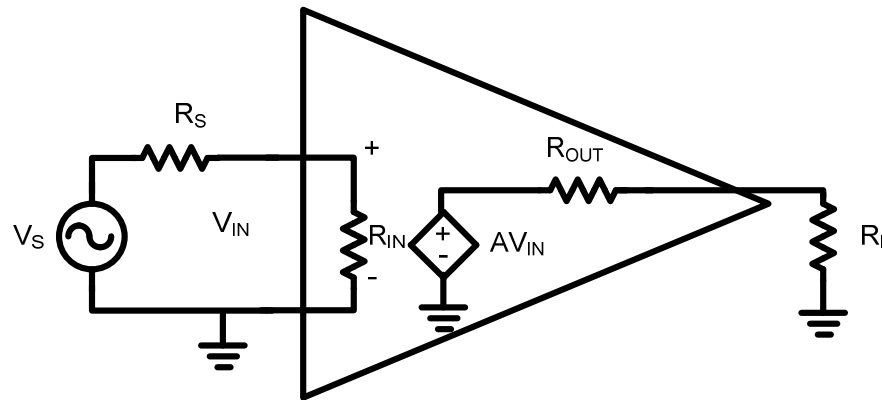


- La source dépendante donne AV_{IN}
 - Donc la sortie est A fois plus grande que l'entrée

Ça fonctionne, mais peu réaliste

Amplificateur Idéal

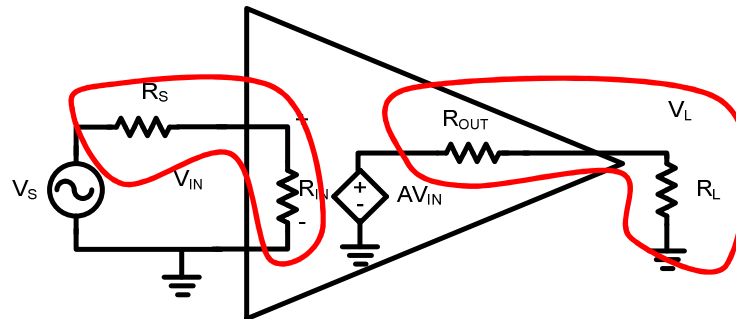
- Voici un système plus réaliste:



- La source V_S pourrait être un micro
 - Elle a une résistance interne R_S
- La charge R_L pourrait être un haut-parleur

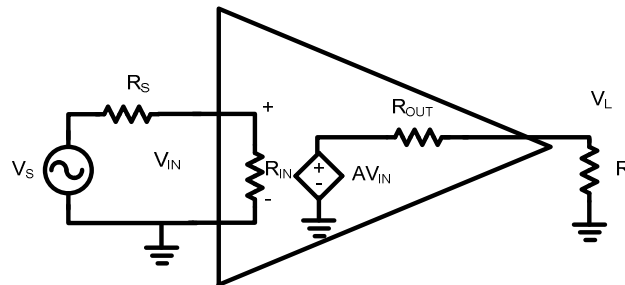
Amplificateur Idéal

- Avec source V_S et un gain de A , on aimerait que la sortie soit AV_S .
- Exemple:
 - Mon micro sort $1\mu\text{V}$ et le gain est 1000
 - Le haut-parleur devrait IDÉALEMENT avoir 1mV
- Dû à R_S , R_{IN} , R_{OUT} et R_L , ce n'est pas possible.



Voyons ça mathématiquement

Amplificateur Idéal



- On écrit l'équation à la sortie:

$$V_L = V_{DEP} \left(\frac{R_L}{R_L + R_{OUT}} \right)$$

- On sait que V_{DEP} est:

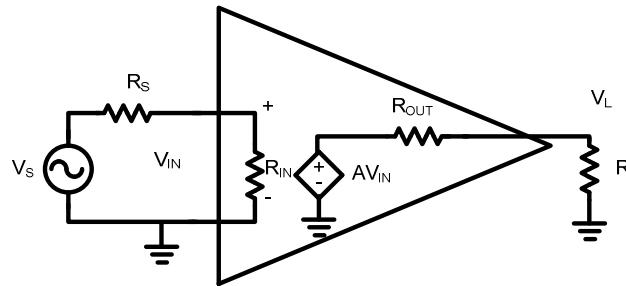
$$V_{DEP} = AV_{IN}$$

- On substitue:

$$V_L = AV_{IN} \left(\frac{R_L}{R_L + R_{OUT}} \right)$$

Il faut maintenant trouver V_{IN}

Amplificateur Idéal



- V_{IN} est un diviseur de tension:

$$V_{IN} = V_S \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_S}$$

- On substitue dans l'équation précédente

$$V_L = AV_S \left(\frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_S} \right) \left(\frac{R_L}{R_L + R_{OUT}} \right)$$

Gain intrinsèque maximal

Considère la perte dans R_S

Considère la perte dans R_{OUT}

Amplificateur Idéal

- On aimerait que la sortie soit AV_S

- En réalite, ça donne:

$$V_L = AV_S \left(\frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_S} \right) \left(\frac{R_L}{R_L + R_{OUT}} \right)$$

- Comment faire pour que le gain soit AV_S ?
 - Théoriquement, on peut changer R_S , R_L , R_{IN} et R_{OUT}
- R_L et R_S sont hors de notre contrôle:
 - Seulement R_{IN} et R_{OUT} font partie de l'ampli

Allons voir comment ajuster R_{IN} et R_{OUT} ...

Amplificateur Idéal

- Revenons à l'équation:

$$V_L = AV_S \left(\frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_S} \right) \left(\frac{R_L}{R_L + R_{OUT}} \right)$$

- $V_L = AV_S$ quand les 2 parenthèses sont 1
- Parenthèse #1:
 - Si $R_{IN} \rightarrow \infty$, sa valeur sera 1
- Parenthèse #2:
 - $R_{OUT} = 0$, sa valeur sera 1

Sinon, tension V_L sera moins que AV_S

Caractéristiques Idéales

- Donc, je veux que $R_{IN} \rightarrow \infty$ et $R_{OUT}=0$
- Dans un amplificateur, il y a aussi le gain
 - Qu'est-ce qui est idéal pour le gain A?
- Première réponse:
 - Ça dépend de l'application: si j'avais besoin d'un gain de 10, je voudrais que $A=10$.

Caractéristiques Idéales

- Problème: le gain d'un amplificateur opérationnel n'est pas stable ni précis
- Comment le rendre stable/précis?
 - On pourrait asservir le gain (feedback)
- Notions de systèmes asservis:
 - En boucle fermée, on a un meilleur contrôle sur le gain
 - Pour ça, on veut un gain élevé en boucle ouverte
 - Idéalement, $A \rightarrow \infty$

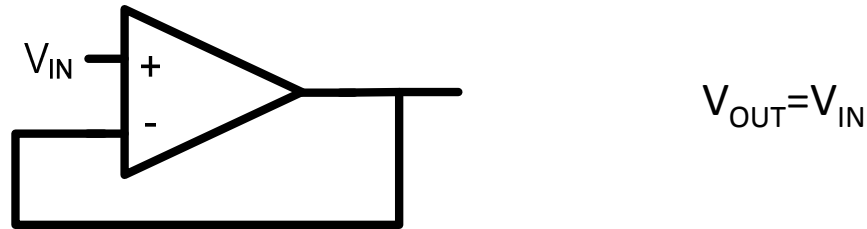
$$R_{IN} \rightarrow \infty$$

$$R_{OUT} = 0$$

$$A \rightarrow \infty$$

Exercice d'observation

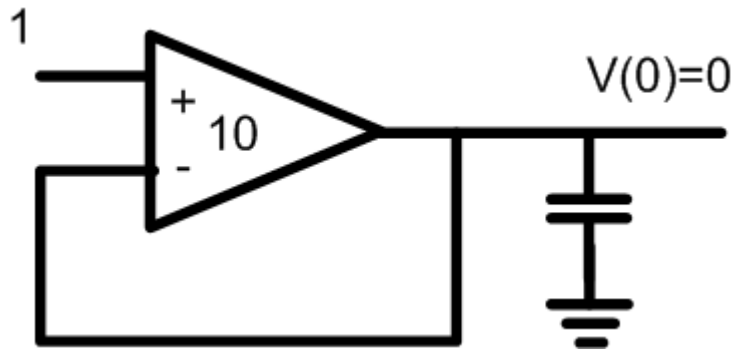
- Lors du cours d'électronique, nous avons appris que ce circuit copie l'entrée à la sortie



- Mais que ceci est vrai SEULEMENT si le gain est infini...
 - Qu'arrive-t-il si le gain n'est pas infini?

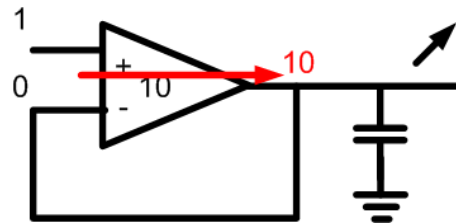
Exercice d'observation

- Imaginez un amplificateur opérationnel avec un gain de 10 (plutôt qu'infini)
 - Quelle sera la sortie?
 - Procédons par itération...

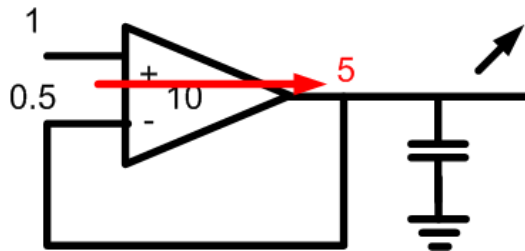


Exercice d'observation

- La différence est de 1, multiplié par le gain: 10
 - La sortie veut AUGMENTER et se diriger vers 10
 - Mais, on va examiner son comportement avant qu'il ne s'y rende...



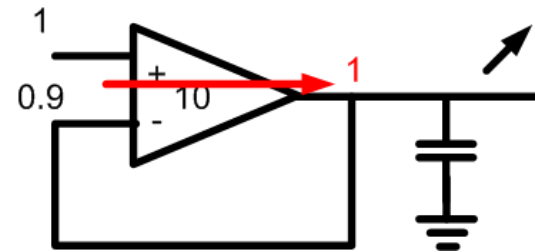
- Imaginons qu'il se rende à 0.5...
- La sortie voudrait se rendre à 5... ça augmente...



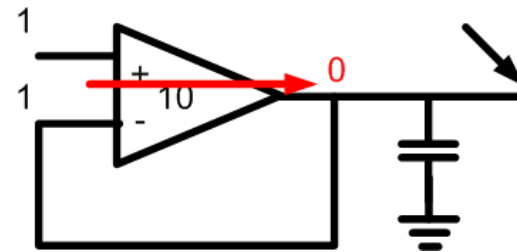
Continuez l'exercice jusqu'à ce que ça arrête de bouger...

Exercice d'observation

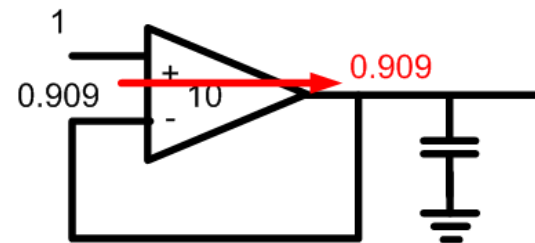
Ça monte à 0.9... sortie veut monter



Ça monte à 1... oups! Sortie veut baisser!

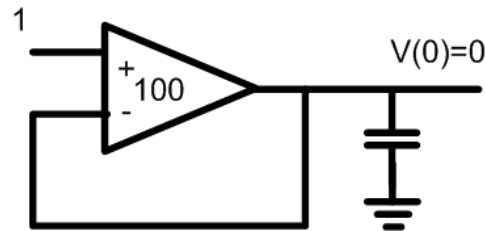


Finalement, ça se stabilise à ~0.909

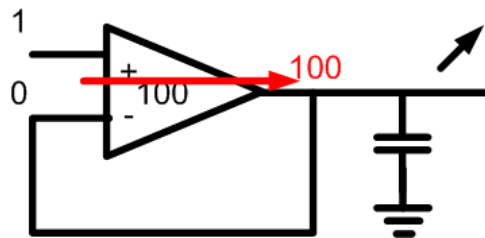


Exercice d'observation

- Faisons le même exercice avec un ampli qui a un gain de 100

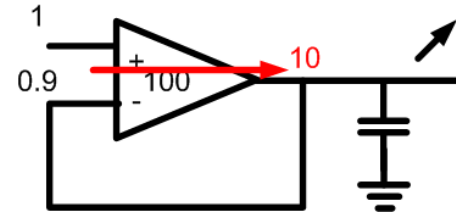


- La différence de 1 donnerait une sortie de 100
- Ça veut donc augmenter
- Continuez jusqu'à ce que ça se stabilise

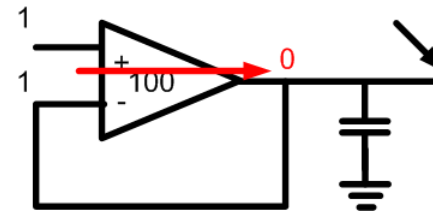


Exercice d'observation

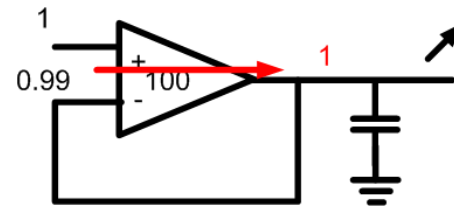
Ça monte à 0.9... sortie veut monter



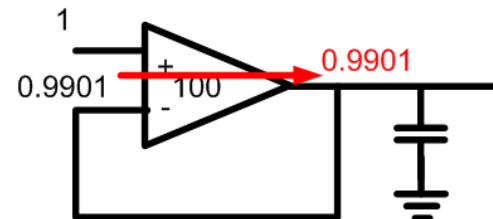
Ça monte à 1...Sortie veut baisser



Ça baisse à 0.99...Sortie veut monter



Ça monte à 0.9901... ça se stabilise

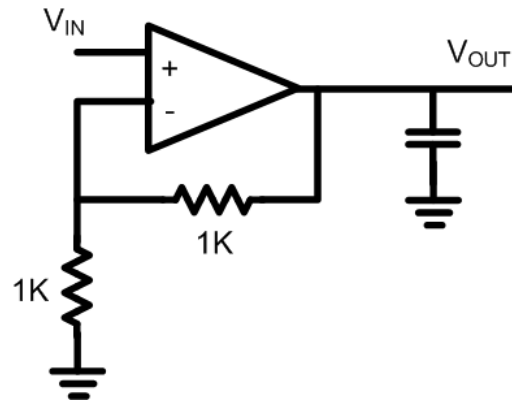


Exercice d'observation

- Si on faisait l'exercice pour un gain de 1000, on verrait que ça se stabilise à 0.999
- Donc:
 - Gain de 10: 0.909 (différence $v+$ et $v-$ de 0.1)
 - Gain de 100: 0.9901 (différence $v+$ et $v-$ de 0.01)
 - Gain de 1000: 0.999 (différence $v+$ et $v-$ de 0.001)
 - Gain infini: 1 (différence $v+$ et $v-$ de 0)

Exercice d'observation #2

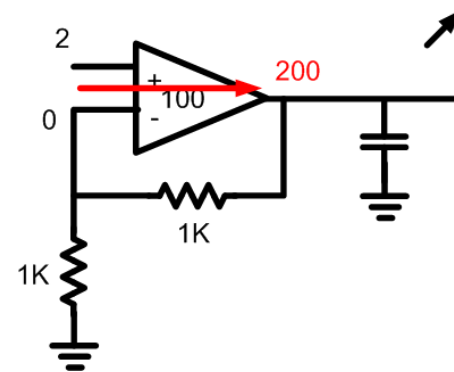
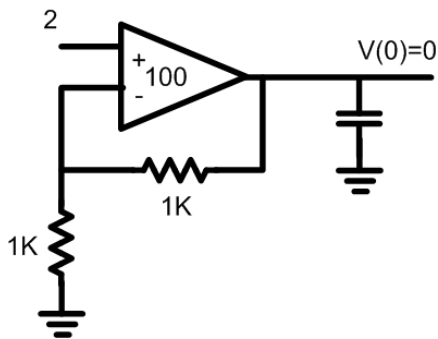
- Considérons maintenant ce circuit:



- Selon la théorie, on s'attendrait à ce que le gain soit de $1+(R2/R1) = 2$ lorsque le gain est infini
- Qu'arrive-t-il quand le gain n'est pas infini?

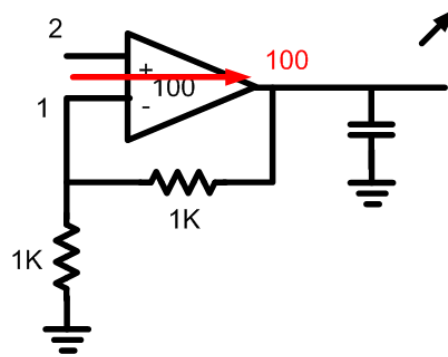
Exercice d'observation #2

- Si l'entrée est 2 et que la condition initiale du condensateur est 0...
 - L'entrée v- est un diviseur de tension qui divise la sortie en 2
 - $V_- = 0...$
 - La sortie veut se rendre à 200... donc, ça monte



Exercice d'observation #2

- Disons que la sortie monte à 2v...
 - Dans ce cas, v- serait 1v (diviseur de tension)

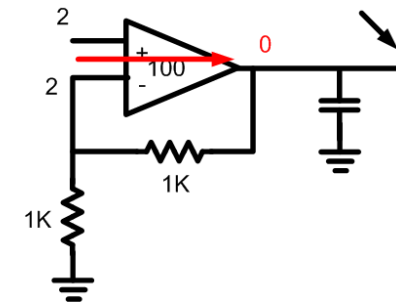


- La sortie voudrait monter à 100v... ça fait monter la sortie
 - Ça fait aussi monter v-

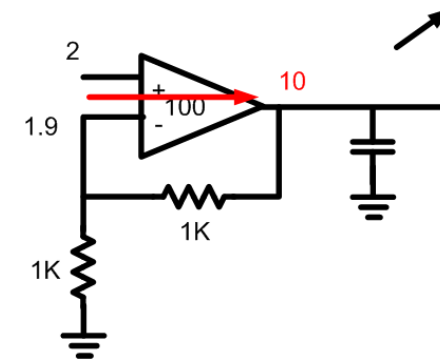
Continuez le raisonnement jusqu'à ce que ça se stabilise...

Exercice d'observation #2

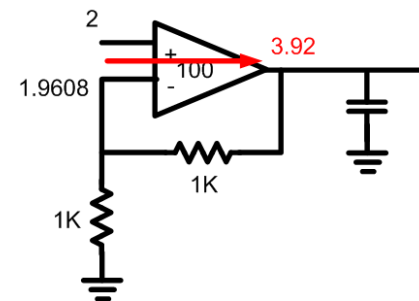
Si la sortie monte à 4v, v- serait 2
La sortie voudrait être 0... ça baisse



Si la sortie baisse à 3.8v, v- serait 1.9v
La sortie voudrait monter à 10... ça monte



Si la sortie monte à 3.9216, v- serait 1.9608v
La sortie se stabiliserait

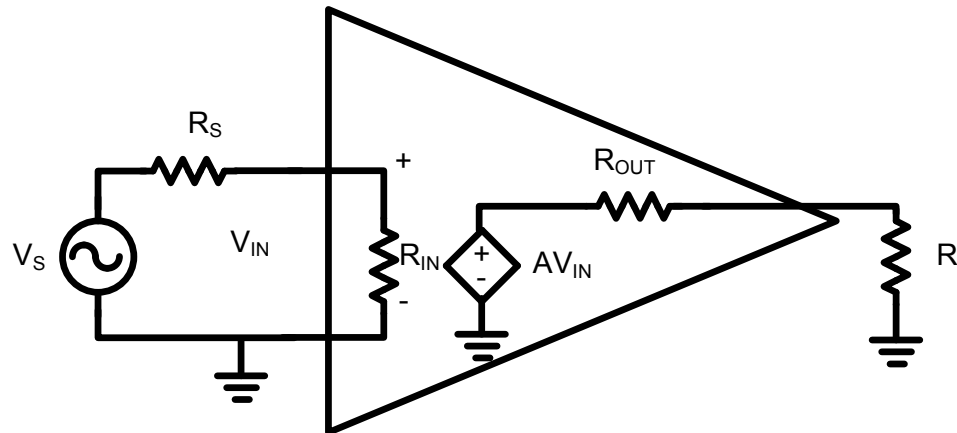


Exercice d'observation #2

- En faisant les mêmes tests avec $A=10$ et $A=1000$, on obtient ceci:
 - Gain de 10: 3.33 (différence $v+$ et $v-$ de 0.335)
 - Gain de 100: 3.92 (différence $v+$ et $v-$ de 0.04)
 - Gain de 1000: 3.99 (différence $v+$ et $v-$ de 0.005)
 - Gain infini: 4 (différence $v+$ et $v-$ de 0)
- Donc, un gain infini est souhaitable
- Et en feedback négatif, $V+ = V-...$

Caractéristiques Idéales

- Caractéristiques d'un ampli-op idéal:
 - $R_{IN} \rightarrow \infty$: V_S se retrouve entièrement à V_{IN}
 - $R_{OUT} = 0$: AV_{IN} se retrouve entièrement à R_L
 - $A \rightarrow \infty$: Nous permet de mieux contrôler le gain en boucle fermée



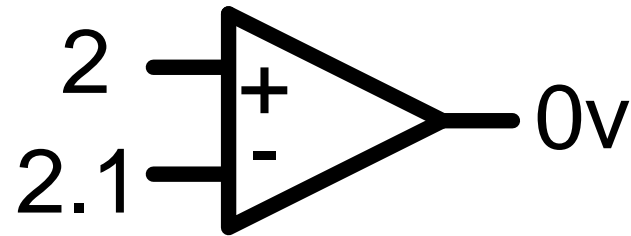
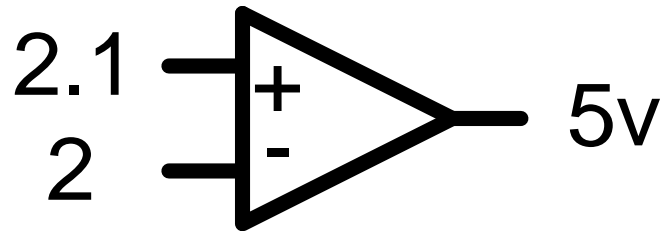
Donc, quand on conçoit un ampli, on voudrait avoir ces caractéristiques

Caractéristiques Idéales

- Mais... si le gain était ∞ , la sortie serait **toujours** ∞ !?
 - Si $V_+ = 2\text{v}$ et $V_- = 1\text{v}$, sortie $\rightarrow \infty$
 - Si $V_+ = 2\text{v}$ et $V_- = 3.2\text{v}$, sortie $\rightarrow -\infty$
- C'est un comparateur
 - Mais ce n'est pas très intéressant pour amplifier!
- Note: On dit ∞ , mais ça va saturer avant.
 - Ex: Si l'alimentation de l'ampli était de 0v et 5v, la sortie sera 0v ($-\infty$) ou a 5v (∞)

Ça va ESSAYER de se rendre à ∞ , mais ça va bloquer bien avant...

Exemple d'application



- Application: Comparateur
- Circuit qui dit si un signal est plus gros qu'un autre:
 - Si "oui", sortie 5v ('1' logique)
 - Si "non", sortie 0v ('0' logique)

} Sortie "numérique"

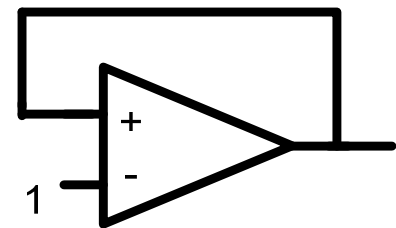
Cependant, ce n'est pas très utile pour l'application

Caractéristiques Idéales

- Un amplificateur sera utile lorsqu'il est en feedback négatif:
 - En boucle ouverte, c'est un comparateur
- En feedback négatif, il peut amplifier:
 - Lorsque le gain est infini, $V_+ = V_-$
- Que fait le feedback positif?

Feedback positif

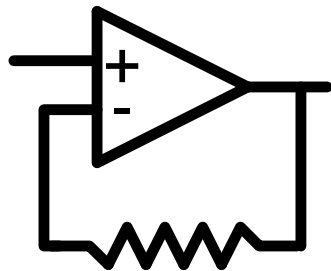
- Feedback négatif fait que la sortie ne soit pas ∞ et que V_+ et V_- soient semblables
- Le feedback positif fait quoi?
 - Si V_+ (initial) < 1, sortie $\rightarrow -\infty$
 - Si V_+ (initial) > 1, sortie $\rightarrow \infty$
- Sortie tend a s'éloigner de l'entrée.
- **Conclusion:** en feedback positif, V_+ n'est pas égal à V_- .



On s'en sert parfois pour des "Trigger de schmitt"

Conclusions

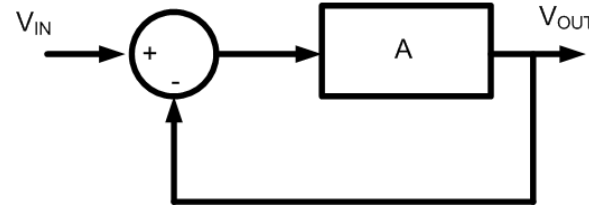
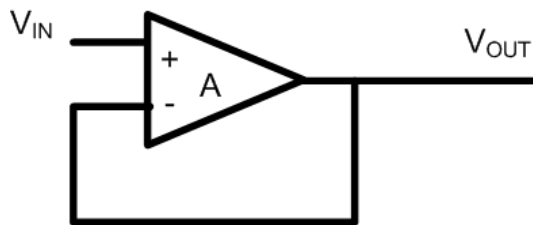
- Donc, en feedback négatif, la relation entre V_+ et V_- dépend du gain:
 - Gain infini: V_+ et V_- sont égaux
 - Plus le gain est faible, plus V_+ et V_- sont différents
- Cette relation est vraie même s'il y avait des éléments en feedback



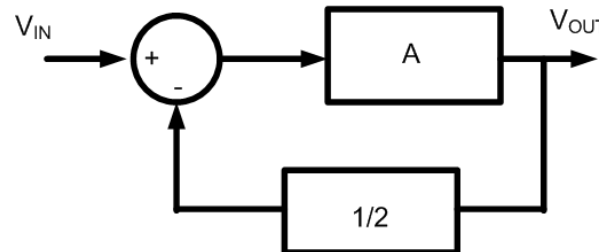
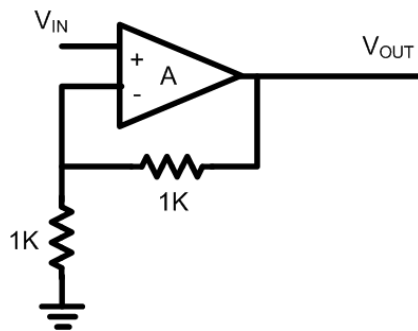
Si $A \rightarrow \infty$, $V_+ = V_-$

Parallèle avec systèmes asservis

- Tous les exemples d'observations peuvent être résolus analytiquement...



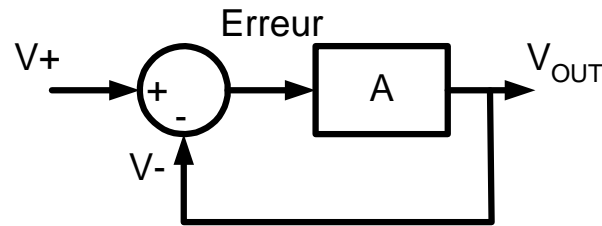
$$T(s) = \frac{A}{1+A}$$



$$T(s) = \frac{A}{1 + \left(\frac{1}{2}\right)A}$$

Parallèle avec systèmes asservis

- D'ailleurs, on arriverait aussi aux mêmes conclusions



- Sachant que $V_{OUT} = A(V_+ - V_-)$
 - Si on isole $V_+ - V_-$, on se retrouve avec $V_+ = V_-$ lorsque A tend vers l'infini

$$(V_+ - V_-) = \frac{V_{OUT}}{A} \rightarrow 0$$

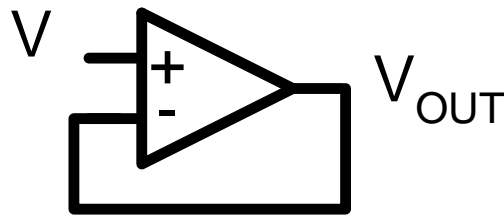
Resume de l'ampli ideal

- Les caractéristiques de l'ampli op:
 - Gain $A \rightarrow \infty$
 - $R_{IN} \rightarrow \infty$ (aucun courant à l'entrée)
 - $R_{OUT} = 0$
 - On note: En feedback négatif, on a $V_+ = V_-$.
- Maintenant... que peut-on faire avec tout ça?

Allons voir des applications

Configurations

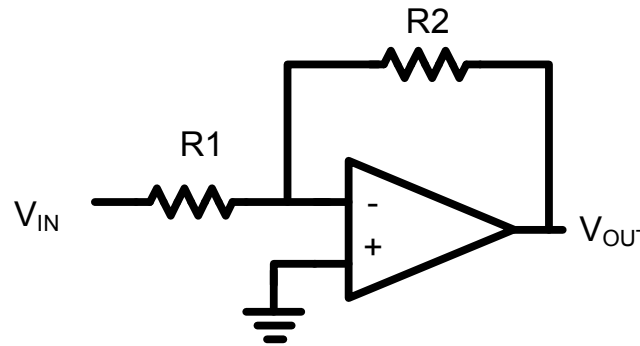
- On a vu une configuration où la sortie est connectée V_-



- Dans ce cas, V et V_{OUT} sont égaux
- Allons voir d'autres configurations
 - Différentes configurations différentes opérations possibles avec l'ampli op.

Configuration: Gain négatif

- Examinons cette configuration

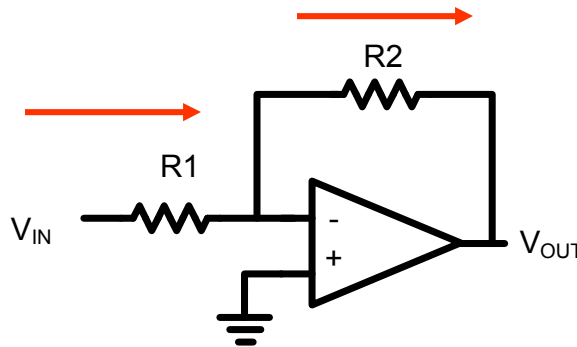


- Quelle est la sortie?
- On remarque premièrement le feedback négatif: $V_+ = V_-$
 - Les 2 tensions seront 0

Allons maintenant écrire des équations de noeuds

Configuration: Gain négatif

- La résistance a l'entrée est infinie.
 - Aucun courant n'entre dans l'ampli
 - Donc, courant dans R1 et courant dans R2 est le meme.

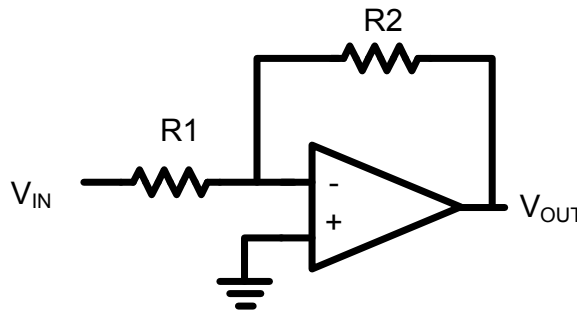


$$\frac{V_{IN} - 0}{R1} = \frac{0 - V_{OUT}}{R2}$$

Configuration: Gain négatif

- On manipule un peu et on obtient:

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\left(\frac{R2}{R1}\right)$$



- Gain est déterminé seulement avec des composants externes: $R1$ et $R2$.

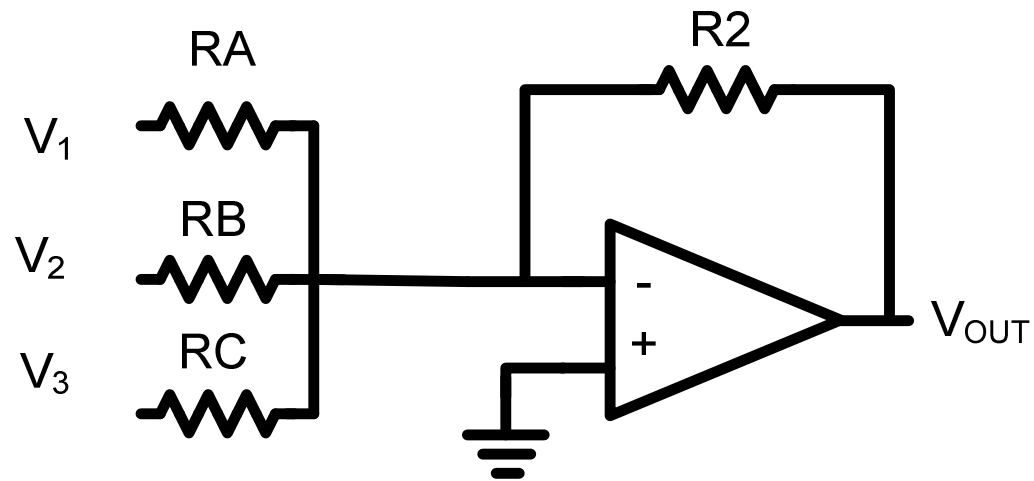
Configuration: Gain négatif

- Même avec un ampli qui a un gain infini, on peut avoir un gain bien déterminé.
- Le gain ne “dépend pas” du gain de l’ampli op:
 - Cette indépendance est due au gain très élevé
- Si le gain n’était pas infini, sa valeur devra être considérée.
 - Plus compliqué... on en parlera tantôt

Passons à un autre exemple...

Configuration: ???

- Que fait ce circuit?



Configuration: ???

- Feedback négatif: $V_+ = V_-$
- R_{IN} infini: courant en entrée passe directement à la sortie:

$$\frac{V_A - 0}{R_A} + \frac{V_B - 0}{R_B} + \frac{V_C - 0}{R_C} = \frac{0 - V_{OUT}}{R_2}$$

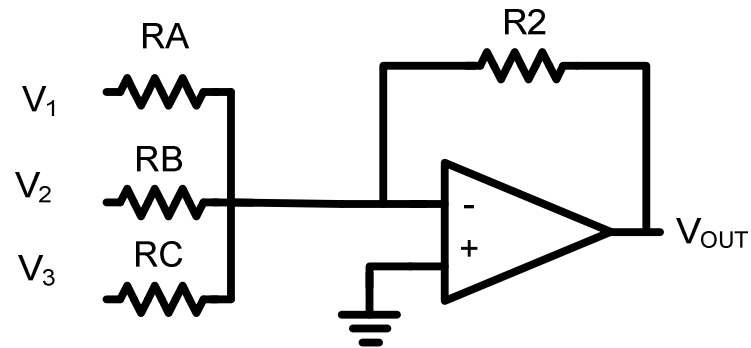
- Avec manipulations:

$$-R_2 \left(\frac{V_A}{R_A} + \frac{V_B}{R_B} + \frac{V_C}{R_C} \right) = V_{OUT}$$

Configuration: Additionneur

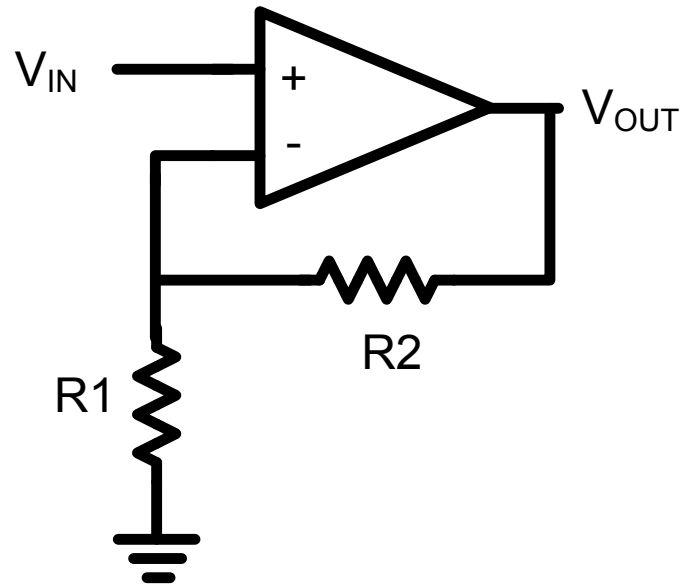
- Ça ne veut pas dire grand chose pour l'instant...
- Mettons $R_A=R_B=R_C=R_2$:
 - La sortie serait $V_1+V_2+V_3$.
- C'est un additionneur de tension.

$$-R_2 \left(\frac{V_A}{R_2} + \frac{V_B}{R_2} + \frac{V_C}{R_2} \right) = V_{OUT}$$



Exemple (seul)

- Calculez le gain V_{OUT}/V_{IN}



Exemple (seul)

- On est en feedback négatif: $V_+ = V_-$
- Écrivons nos équations:
 - Au noeud à l'entrée négative.

$$\frac{V_{OUT} - V_{IN}}{R2} = \frac{V_{IN}}{R1}$$

- On met les V_{IN} à droite:

$$\frac{V_{OUT}}{R2} = V_{IN} \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \right)$$

Exemple (seul)

- Finalement, on isole le gain:

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \left(\frac{R2}{R1} + 1 \right)$$

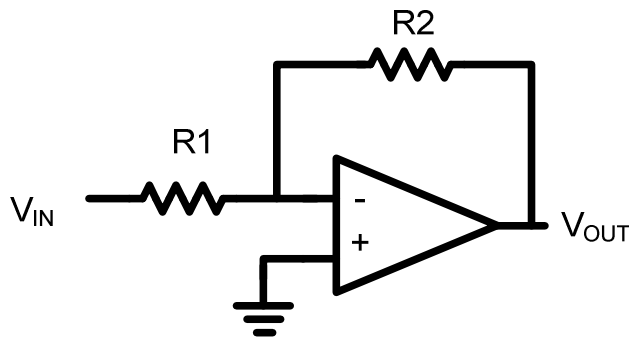
- Remarquez que c'est la première fois qu'on a un gain positif.
 - C'est aussi la première fois que V_{IN} est connecté à $V+$.

Recette magique

- Recette pour résoudre les problèmes d'ampli op idéal:
 - Est-ce qu'il y a feedback négatif?
 - Si oui, $V_+ = V_-$.
 - Sinon, c'est probablement $V_{OUT} \rightarrow \pm \infty$
 - Écrire équation de courant aux noeuds
 - Se rappeler qu'il n'y a aucun courant qui entre
 - Se rappeler que le courant à la sortie d'un ampli op est inconnu (On n'écrit donc PAS d'équations de courant à la sortie)

Ampli non-idéal (gain)

- Quand un ampli est non-idéal, son gain A n'est pas infini.
 - V_+ et V_- ne sont plus égaux (proche, mais...)
 - Considérons notre ampli à gain inversé



$$\frac{V_{in} - V_-}{R1} = \frac{V_- - V_{out}}{R2}$$

- v_- n'est pas égal à 0 parce que gain est non-infini

Comment trouver V_- ?

Ampli non-ideal (gain)

- On sait que la sortie est donnée par:

$$A(v_+ - v_-) = v_{out}$$

- En isolant v_- , j'obtiendrais

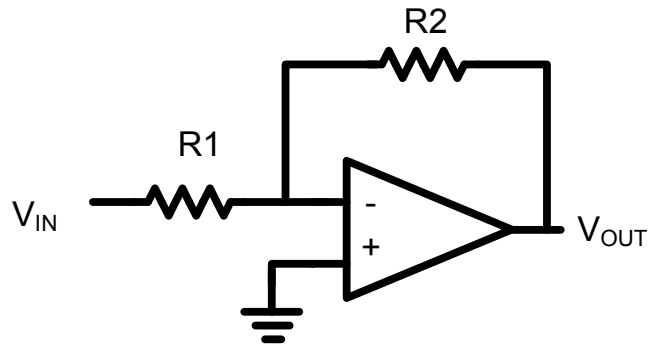
$$v_- = v_+ - \frac{v_{out}}{A}$$

Note: Si A infini, on aurait $v_- = v_+$ de nouveau

On a une relation entre v_+ et v_- ...

Ampli non-ideal (gain)

- Retournons à notre ampli à gain inversé



$$\frac{v_{IN} - v_-}{R1} = \frac{v_- - v_{out}}{R2}$$

- On substitue le v_- avec l'équation précédente

$$v_- = v_+ - \frac{v_{out}}{A} \qquad \frac{v_{IN} - \left(v_+ - \frac{v_{out}}{A} \right)}{R1} = \frac{\left(v_+ - \frac{v_{out}}{A} \right) - v_{out}}{R2}$$

Rappel: $V_+ = 0$

Ampli non-ideal (gain)

- On isole V_{OUT}/V_{IN} :

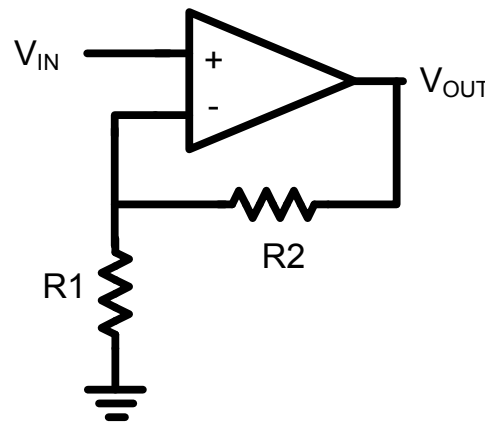
$$\frac{v_{out}}{v_{IN}} = -\frac{1}{\left(\frac{R1}{AR2} + \frac{R1}{R2} + \frac{1}{A}\right)}$$

- Vérification: $A \rightarrow \infty$, V_{OUT}/V_{IN} : $-R2/R1$

Ça concorde avec nos résultats précédents

Exemple (seul)

- Trouvez V_{OUT}/V_{IN} quand A n'est pas infini.



Exemple (seul)

- On écrit l'équation au noeud v_- :

$$\frac{v_{out} - v_-}{R2} = \frac{v_-}{R1}$$

- Sachant que v_- est donné par:

$$v_- = v_{IN} - \frac{v_{out}}{A}$$

- Substitution:

$$\frac{v_{out} - \left(v_{IN} - \frac{v_{out}}{A} \right)}{R2} = \frac{\left(v_{IN} - \frac{v_{out}}{A} \right)}{R1}$$

Exemple (seul)

- On fait de l'algèbre (résultat intermédiaire)

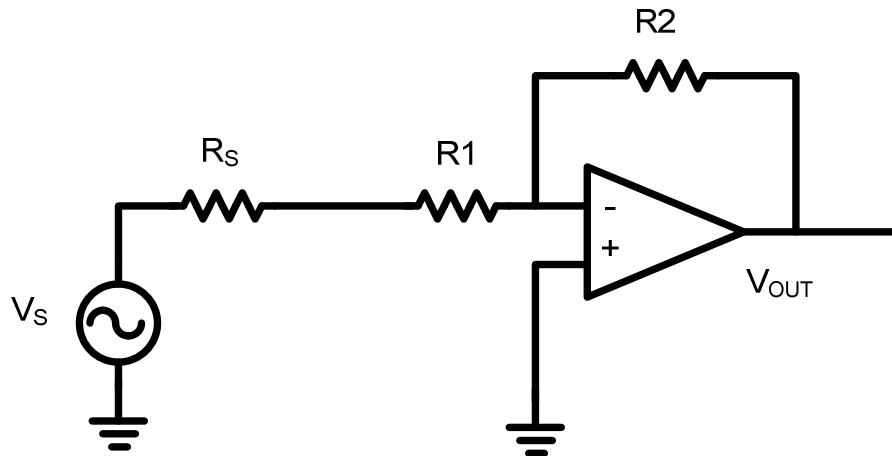
$$v_{out} \left(\frac{1}{R2} + \frac{1}{AR2} + \frac{1}{AR1} \right) = v_{IN} \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \right)$$

- Pour finalement isoler v_{out}/v_{in} :

$$\frac{v_{out}}{v_{IN}} = \frac{\left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \right)}{\left(\frac{1}{R2} + \frac{1}{AR2} + \frac{1}{AR1} \right)}$$

Application d'un ampli à gain 1

- Considerons un système plus complet avec une source "réelle"
- Connectons à un amplificateur feedback négatif à sortie inversée:



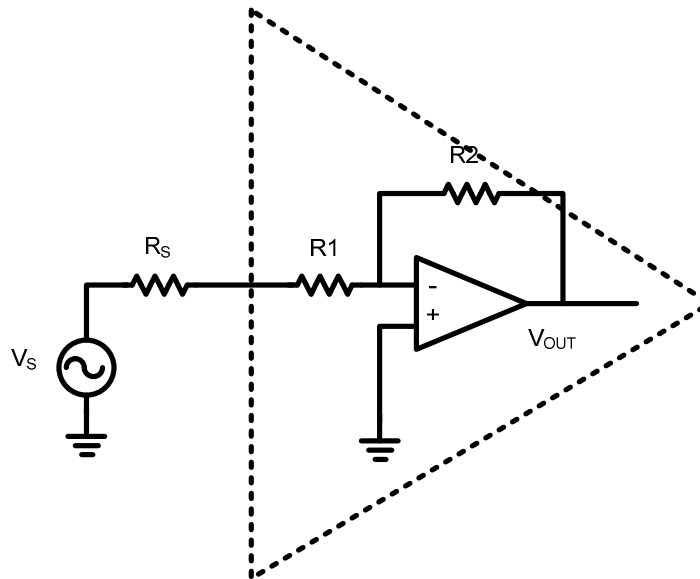
Application d'un ampli à gain 1

- En concevant l'ampli, on s'attendrait à avoir un gain de $-R_2/R_1$
- Avec la présence de R_s , ce n'est pas le cas.
- On se retrouve avec gain de

$$-\frac{R_2}{R_1 + R_s}$$

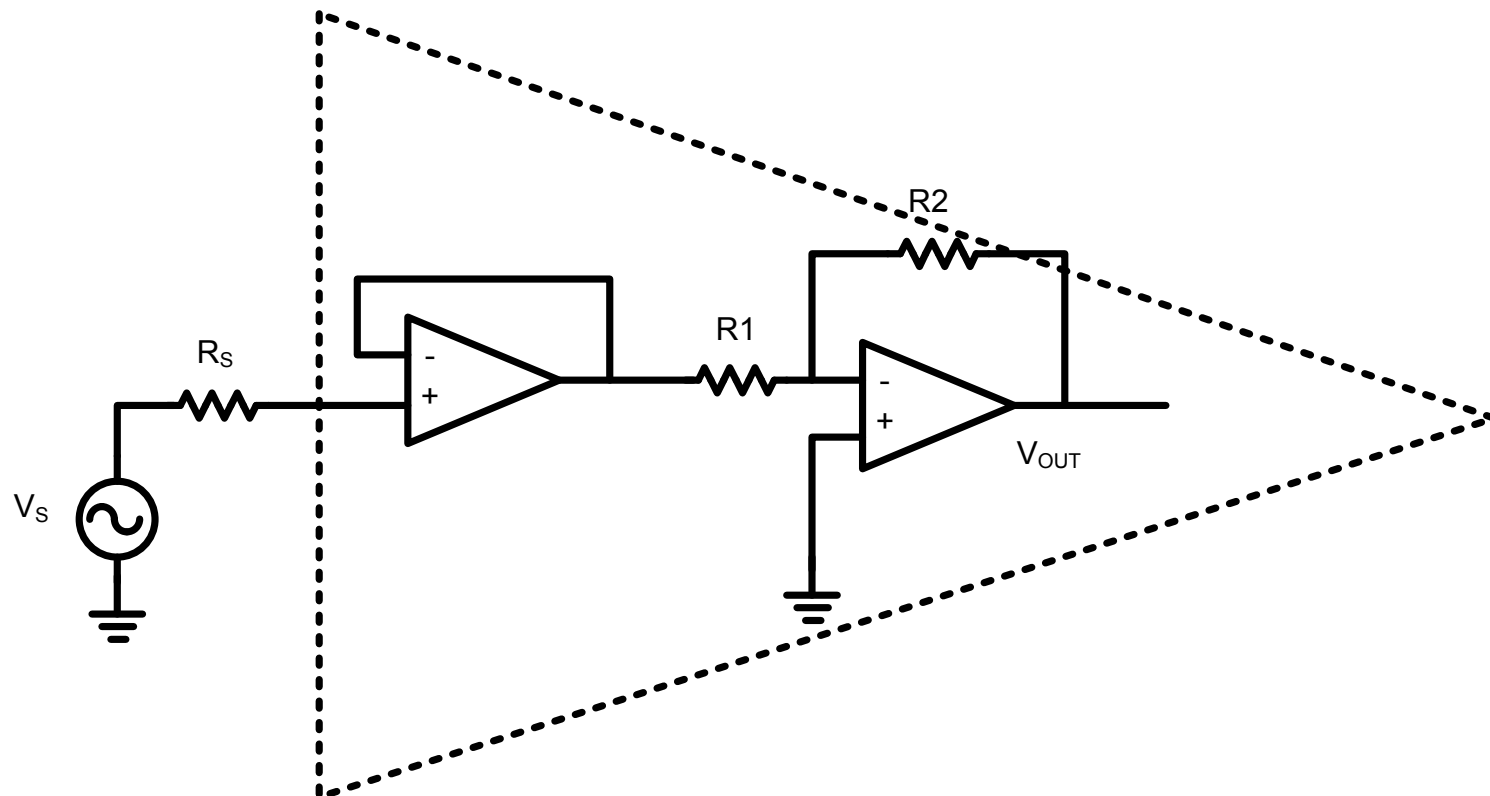
Application d'un ampli à gain 1

- Raison: résistance a l'entrée n'est pas infinie.
 - C'est égal à R1.
- Comment résoudre le problème?



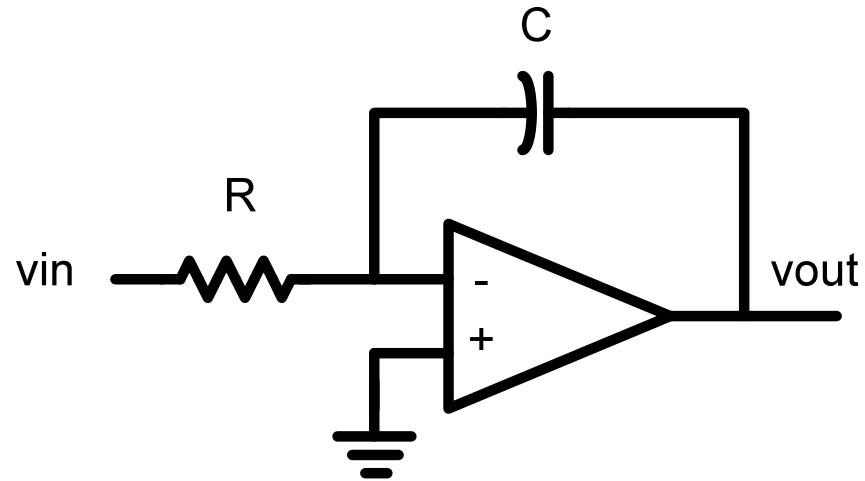
Application d'un ampli à gain 1

- Solution: Introduire "buffer"
- Résistance à l'entrée: infinie



Ajoutons un condensateur

- Remplaçons la résistance de feedback par un condensateur



- Que fait ce circuit?

Rappel: Impédance

- Les condensateurs et les inductances n'ont pas de résistance.
- À la place, ils ont une résistance qui change avec la fréquence: impédance (Z)
 - Impédance de C: $(1/sC)$
 - Impédance de L: sL
- On les traite comme des résistances
 - Les équations s'écrivent comme si elles étaient des résistances

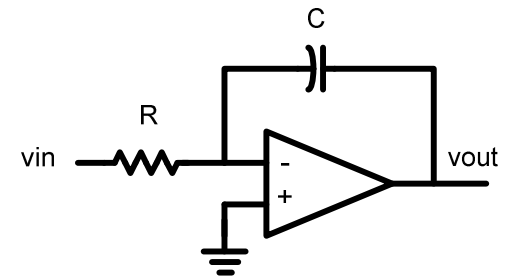
Ampli op avec C en feedback

- Écrivons l'équation de noeud à l'entrée:

$$\frac{v_{in} - 0}{R} = \frac{(0 - v_{out})}{\left(\frac{1}{sC}\right)}$$

- On isole v_{out}/v_{in} :

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{1}{-sCR}$$



- On embellit l'équation:

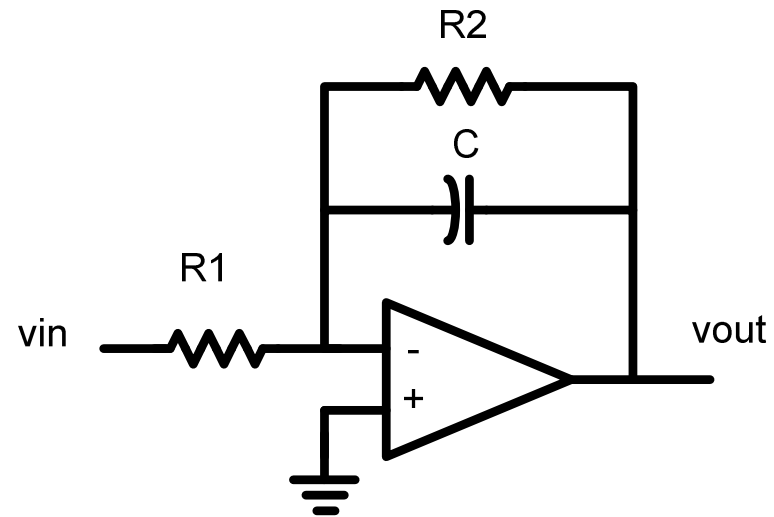
$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -\left(\frac{1}{CR}\right)\left(\frac{1}{s}\right)$$

Ampli op avec C en feedback

- On peut remarquer 3 choses:
 - Le gain est négatif
 - Le $1/s$ veut dire que c'est un intégrateur
 - Il y a un facteur multiplicatif de $1/RC$
- Donc, c'est un intégrateur négatif avec un facteur de $1/RC$.
- Avec d'autres combinaisons de R et C, on peut faire d'autres opérations

Exemple (seul)

- Trouvez la fonction de transfert de ce circuit



A: infini

Exemple (seul)

- Une façon de résoudre est de combiner R2 et C (parallèle)

$$\frac{R2}{1 + sCR2}$$

- On écrit l'équation de noeud à l'entrée:

$$\frac{v_{in} - 0}{R1} = \frac{(0 - v_{out})}{\frac{R2}{1 + sCR2}}$$

On veut maintenant isoler v_{out}/v_{in} ...

Exemple (seul)

- On manipule un peu:

$$\frac{v_{in}}{R1} = \frac{-v_{out}(1 + sCR2)}{sC}$$

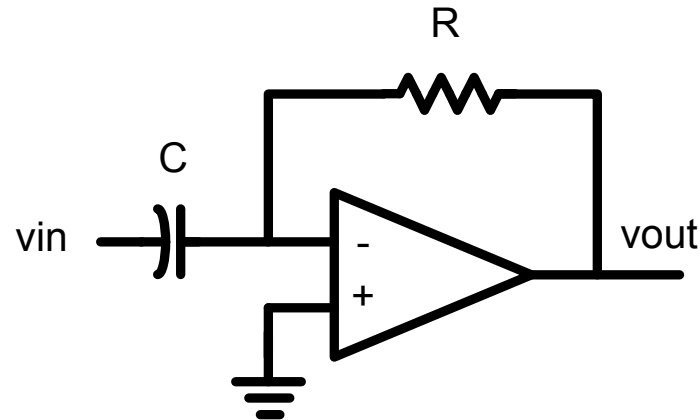
- On isole v_{out}/v_{in} :

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{R2}{R1} \frac{1}{(1 + sCR2)}$$

- C'est un filtre passe-bas avec gain négatif de $R2/R1$

Ampli op avec C en entrée

- Reprenons l'intégrateur mais inversons le R et le C



- Allons voir ce que ça donne...

Ampli op avec C en entrée

- On écrit l'équation des courants à l'entrée:

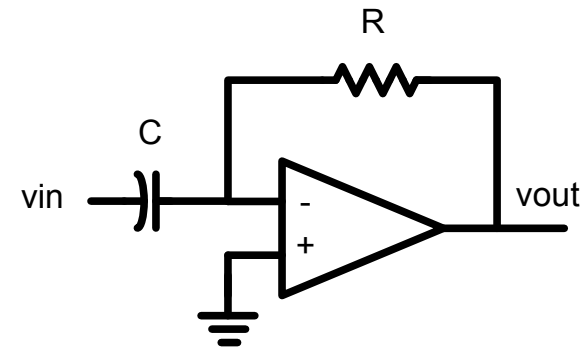
$$\frac{v_{in} - 0}{\frac{1}{sC}} = \frac{0 - v_{out}}{R}$$

- On arrange l'équation:

$$v_{in} = -\frac{v_{out}}{sCR}$$

- On isole v_{out}/v_{in} :

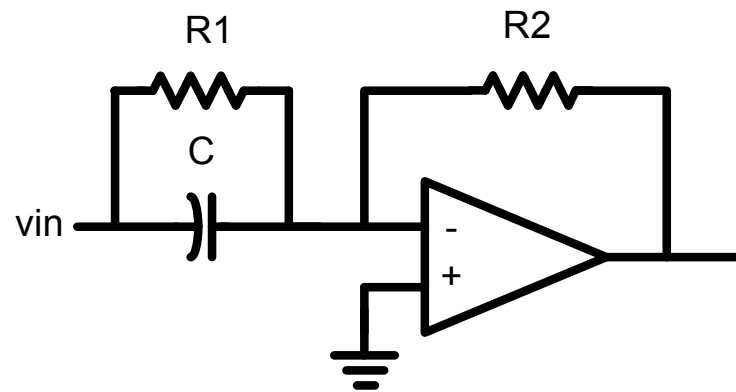
$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -(CR)s$$



Ça donne une dérivée..

Exemple (seul)

- Trouvez la fonction de transfert de ce circuit



Exemple (seul)

- Impédance équivalente à l'entrée:

$$\frac{1}{sC + \frac{1}{R1}} = \frac{1}{\left(\frac{sCR1}{R1}\right) + \frac{1}{R1}}$$

- Ça se simplifie:

$$\frac{R1}{sCR1 + 1}$$

- Avec ça, on écrit l'équation de noeud:

$$\frac{v_{in} - 0}{R1} = \frac{0 - v_{out}}{R2}$$
$$\frac{v_{in}}{sCR1 + 1}$$

Exemple (seul)

- On simplifie:

$$\frac{v_{in}(sCR1+1)}{R1} = \frac{-v_{out}}{R2}$$

- Finalement, on obtient ceci:

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -\left(\frac{R2}{R1}\right)(sCR1+1)$$

- C'est un filtre passe haut.

Resumé du cours

- On a présenté l'amplificateur operationnel
- Caractéristiques des amplificateurs
- Comportement quand le gain est non-infini
- Analyse de circuits avec amplificateurs
- Configurations de base
- Configuration pour filtres