Méthode de conception en électronique

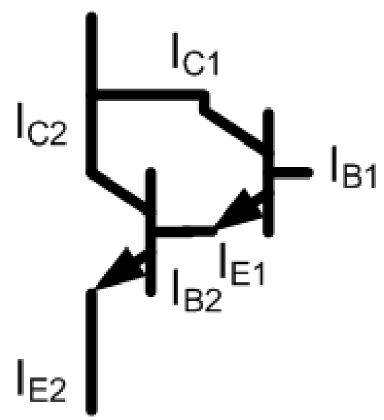
Cours 10

Connexion Darlington

- Configuration de transistor pratique:
  - Considéré comme étant un transistor à β plus élevé
- On commence par analyser le transistor à droite:

$$I_{C1} = \beta I_{B1}$$

$$I_{E1} = (\beta + 1) I_{B1}$$



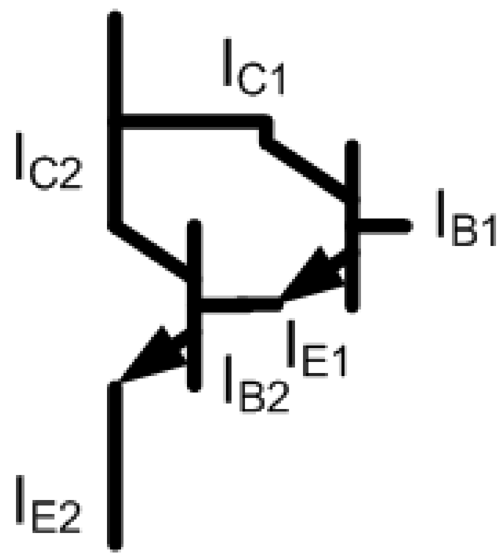
Connexion Darlington

- On écrit les équations pour le transistor à gauche:
  - On sait que I_{E1} c'est I_{B2}

$$I_{B2} = (\beta + 1) I_{B1}$$

$$I_{C2} = \beta(\beta + 1) I_{B1}$$

$$I_{E2} = (\beta + 1)(\beta + 1) I_{B1}$$

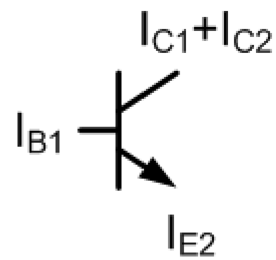


Connexion Darlington

- Donc, si on le remplaçait par un transistor équivalent:

$$I_C = \beta(\beta + 2)I_{B1}$$

$$I_E = (\beta + 1)(\beta + 1)I_{B1}$$



- Ce nouveau transistor a un β qui est β plus élevé:
  - Besoin de moins de courant à la base pour autant de courant au collecteur/émetteur

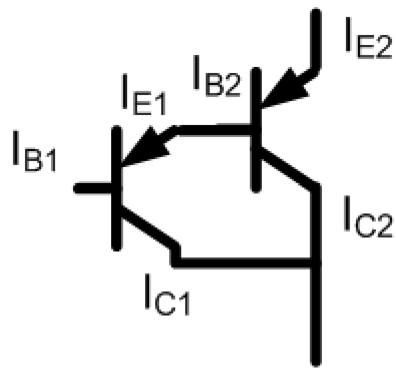
Connexion Darlington

- La connexion est aussi possible en PNP:
- Le raisonnement est le même:

$$I_{B2} = I_{E1} = (\beta + 1)I_{B1}$$

$$I_{C2} = \beta I_{B2} = \beta(\beta + 1)I_{B1}$$

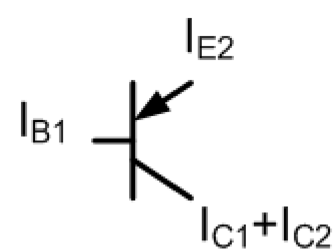
$$I_{E2} = (\beta + 1)(\beta + 1)I_{B1}$$



- Le transistor équivalent sera:

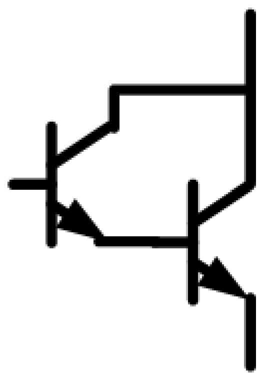
$$I_C = \beta(\beta + 2)I_{B1}$$

$$I_E = (\beta + 1)(\beta + 1)I_{B1}$$



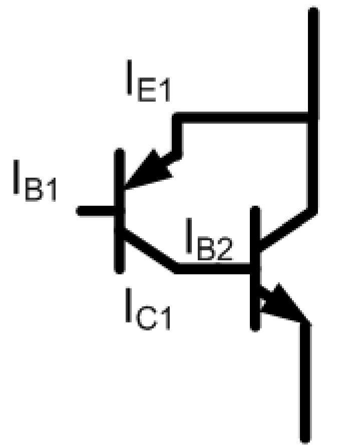
Caractéristiques

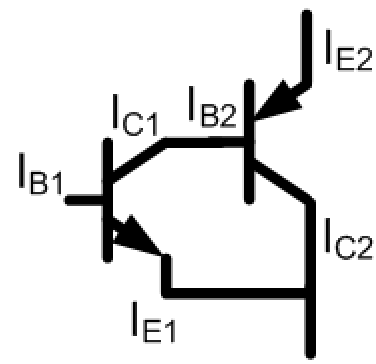
- Avantage:
  - Gros gain
  - Impédance en entrée élevée
- Désavantage:
  - A besoin de 2 V_{BE} pour allumer
  - V_{CE} saturation est au moins de V_{BE}



Darlington complémentaire

- Une configuration semblable existe pour les transistors complémentaires
  - Aussi connu sous le nom Sziklai





Darlington complémentaire

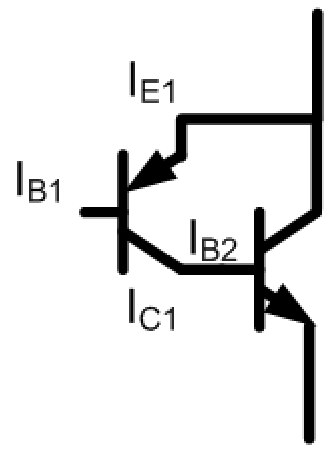
- Les équations sont les suivants:

$$I_{C1} = I_{B2} = \beta I_{B1}$$

$$I_{E1} = (\beta + 1) I_{B1}$$

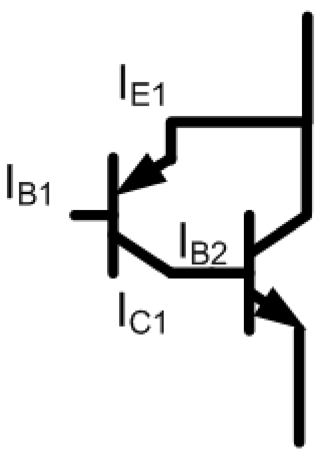
$$I_{C2} = \beta^2 I_{B1}$$

$$I_{E2} = \beta(\beta + 1) I_{B1}$$



Darlington complémentaire

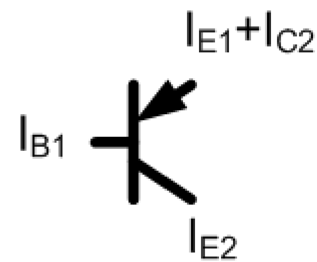
- L'équivalent serait le PNP suivant:



$$I_E = \left[\beta^2 + (\beta+1)\right] I_{B1}$$

$$I_C = \beta(\beta+1) I_{B1}$$

$$I_B = I_{B1}$$



Darlington complémentaire

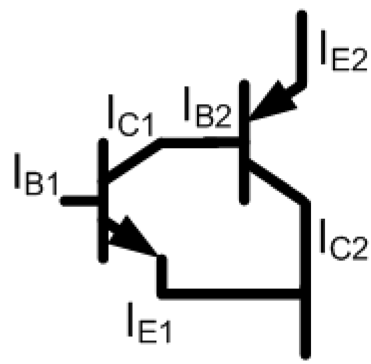
- Les équations sont les mêmes:

$$I_{C1} = I_{B2} = \beta I_{B1}$$

$$I_{E1} = (\beta + 1) I_{B1}$$

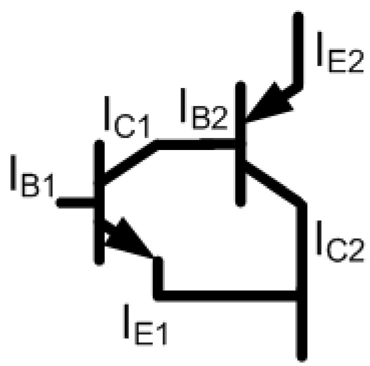
$$I_{C2} = \beta^2 I_{B1}$$

$$I_{E2} = \beta(\beta + 1) I_{B1}$$



Darlington complémentaire

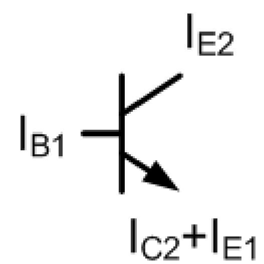
- L'équivalent serait le NPN suivant:



$$I_B = I_{B1}$$

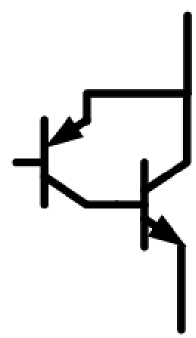
$$I_C = \beta(\beta+1)I_{B1}$$

$$I_E = \left[\beta^2 + (\beta+1)\right]I_{B1}$$



Caractéristiques

- Semble régler le problème de 2 V_{BE}
- Mais le V_{CE} saturation reste au moins de 1 V_{BE}

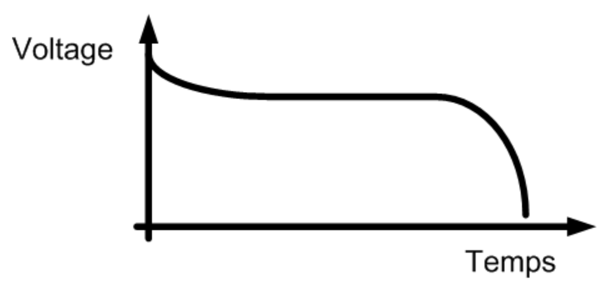


Régulation de tension

- La régulation de tension est importante pour la plupart des applications
- Le changement d'alimentation affecte la performance du circuit:
  - Parfois plus lent
  - Parfois la performance baisse
  - Parfois ça cesse de fonctionner
- Il est donc important de fournir un bon voltage…

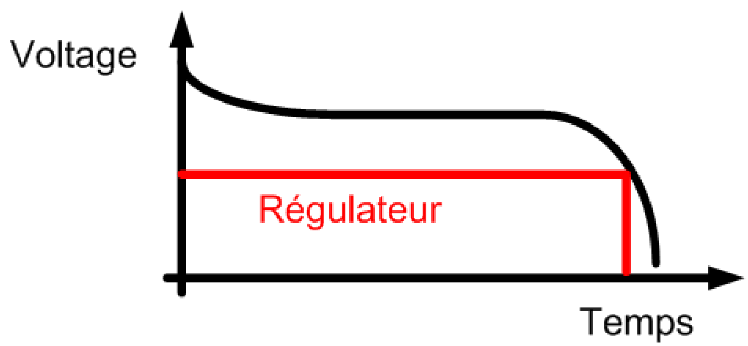
Régulation de tension

- Les sources de voltage font ce travail:
  - Pas pratique pour des application portables
  - On a parfois besoin de plusieurs voltages
- Les batteries perdent leur voltage avec le temps/l’usage



Régulation de tension

- Il faut utiliser des batteries à voltage plus élevé et générer une tension stable



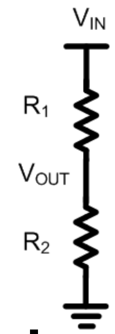
Régulation de tension

- Il existe 2 grandes classes de régulateurs:
  - Linéaires
  - Commutation
- On va regarder rapidement les différentes configurations

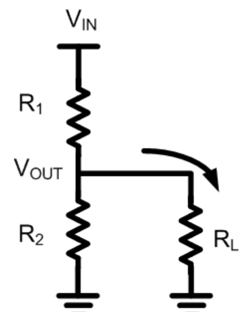
Régulateur linéaire

- À la base, ce qu'il y a de plus simple, c'est le diviseur de tension:

$$V_{OUT} = V_{IN}\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

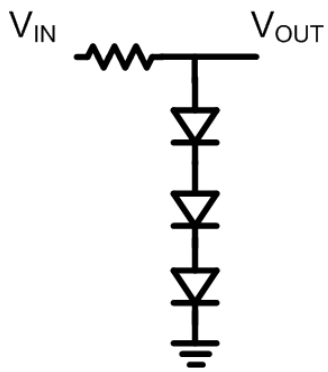


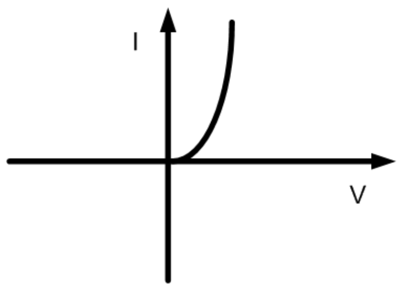
- Le problème est que V_{OUT} change lorsqu'il y a une charge
    - Le voltage dépend de cette charge ce qui n'est pas souhaitable



Régulateur linéaire

- On pourrait utiliser des diodes PN:
  - En conduction, chaque diode donne un V_{BE}
  - Ici, V_{OUT} serait égal à $3V_{BE}$

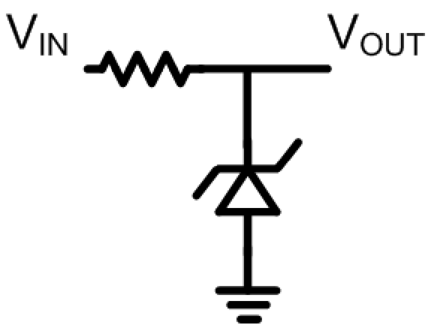


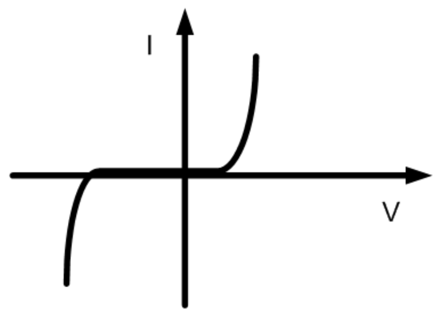


Mais on ne peut y aller que par coup de V_{BE}…

Régulateur linéaire

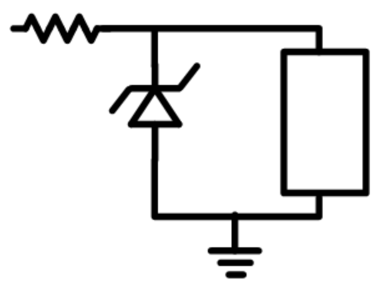
- On pourrait aussi utiliser des diodes zener
  - Meilleur choix pour le voltage





Régulateur linéaire

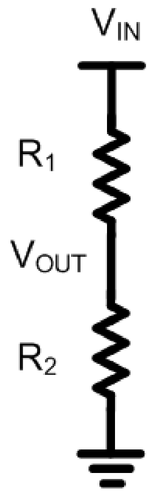
- Les régulateurs par diode fonctionnent lorsque la charge est à faible courant
- Les diodes Zener ne sont pas faits pour opérer à gros courant:
  - Par exemple, si la charge est déconnectée, la diode doit absorber la puissance

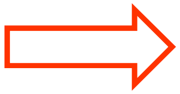


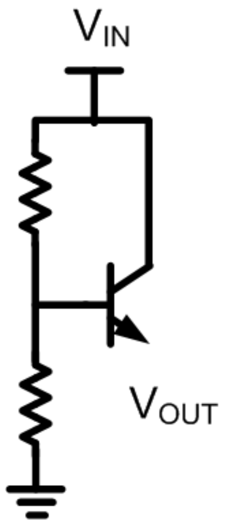
Régulateur linéaire

- Pour régler le problème de diviseur de tension:
  - On pourrait mettre un transistor

$$V_{OUT} = V_{IN} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{BE}$$



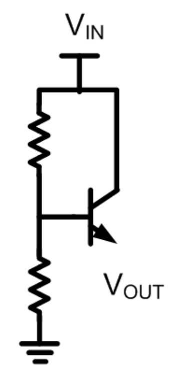




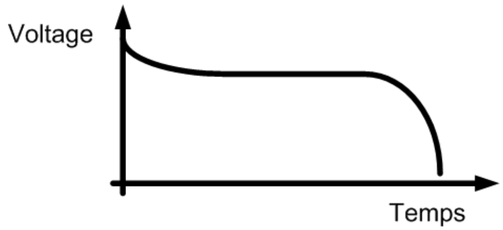
Régulateur linéaire

- Le problème c'est la dépendance sur la valeur de V_{IN}:

$$V_{OUT} = V_{IN} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{BE}$$

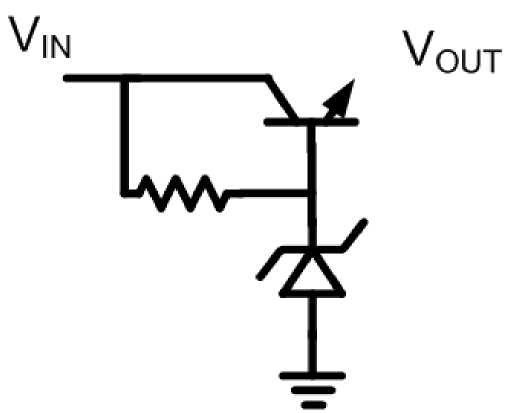


- Rappelons que V_{IN} d'un batterie peut ressembler à:



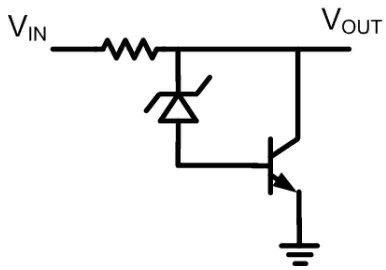
Régulateur linéaire

- Pour enlever la dépendance sur l'alimentation, on revient au Zener
- Cette fois, on y ajoute un transistor:
  - Le chemin V_{IN} vers la diode génère la tension V_Z
  - V_{OUT} serait donc V_Z-V_{BE}



Régulateur linéaire

- Une autre option serait de mettre le transistor en parallèle…
  - V_{OUT} serait égal à V_Z+V_{BE}
  - L'excédent de courant passe par le transistor plutôt que la diode Zener



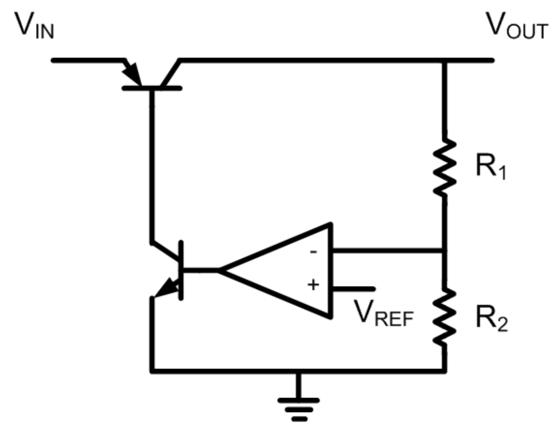
Typiquement moins efficace que l'approche en série

Régulateur linéaire

- Les solutions proposées précédemment sont en boucle ouverte:
  - Il n’y a pas de mécanisme qui nous indique si la sortie est bonne ou pas
  - Le comportement peut changer selon la charge
  - Le comportement peut même changer avec le temps, la température, etc.
- Il est souvent souhaitable d’avoir une rétroaction (feedback)…

Régulateur linéaire

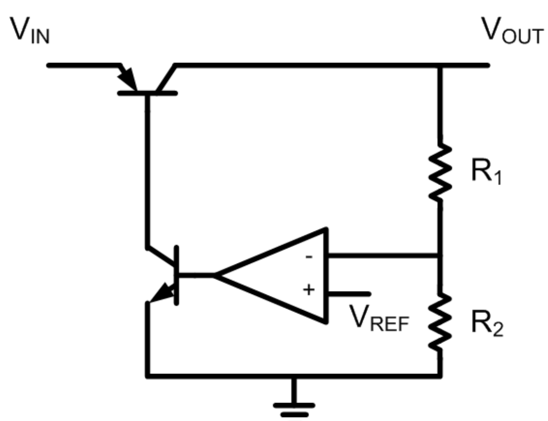
- Une approche simple est d'utiliser un amplificateur en rétroaction
  - On sait ce que devrait être la sortie
  - Si la sortie est trop faible, on augmente
  - Si la sortie est trop élevée, on baisse



On va explorer en plus de détails…

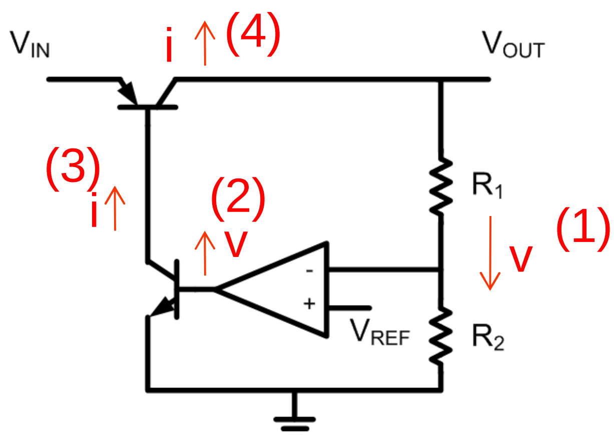
Régulateur linéaire

- Prenons des valeurs pour comprendre le fonctionnement:
  - Imaginons qu'on veut V_{OUT}=10v
  - On a une référence de 5v (Zener, par exemple)
  - On décide donc que R_1 et R_2 sont égaux
  - Que se passe-t-il si V_{OUT}=9v?



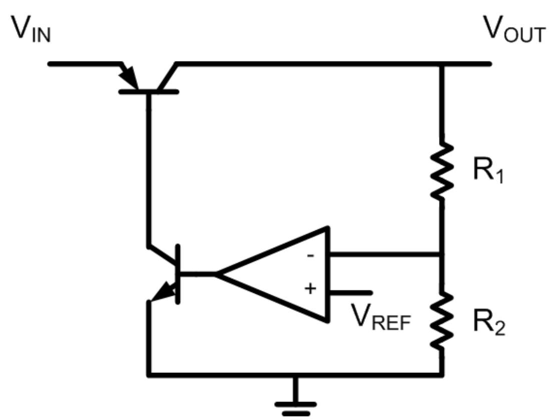
Régulateur linéaire

- Si V_{OUT}=9, le noeud V_{-} sera 4.5
- La sortie de l'ampli et V_{BE} augmentent
- Le courant I_C du NPN augmente
- Le courant I_B du PNP augmente
- V_{OUT} augmente



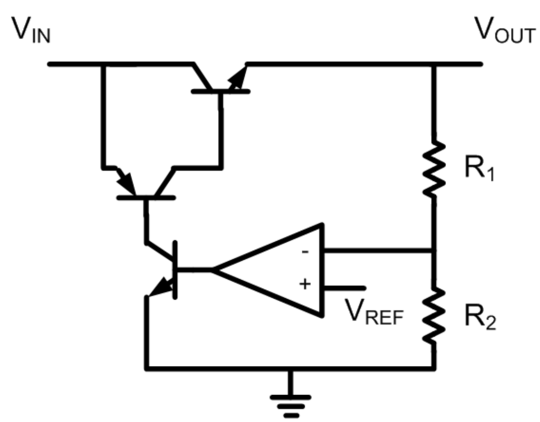
Régulateur linéaire

- Ce genre de régulateur (LDO) est utile pour des applications avec batteries
  - La différence entre V_{IN} et V_{OUT} est moins de 1v
  - MAIS! Pour avoir un gros courant I_{OUT}, j'ai besoin d'un "gros" courant I_B qui va vers la masse (perdu)
  - Comment limiter cette perte?



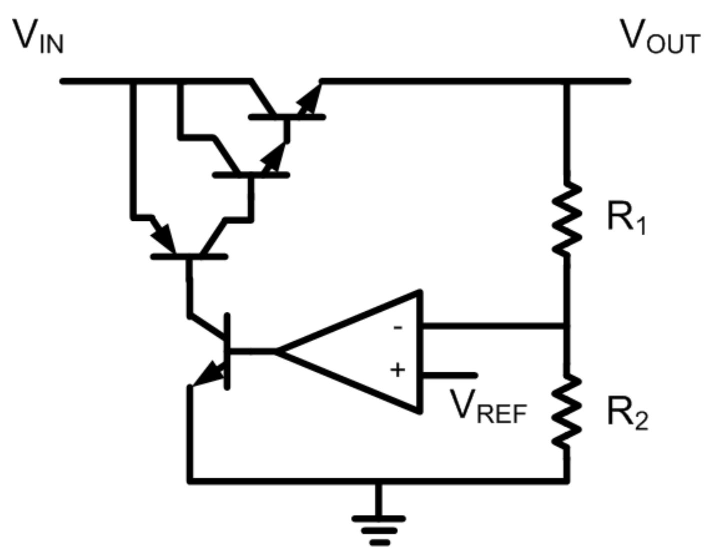
Régulateur linéaire

- On utilise une configuration Darlington complémentaire
  - Le courant I_B requis diminue de β fois



Régulateur linéaire

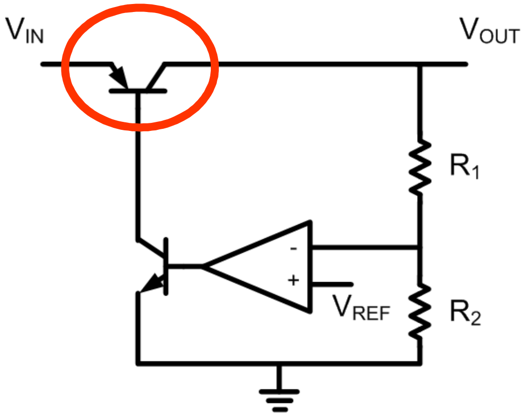
- Il est aussi possible d'ajouter ENCORE un autre transistor
  - C'est le circuit d'un régulateur considéré "standard"



Efficacité

- Une des mesures importantes en régulation de voltage c'est l'efficacité:
  - Quel pourcentage de la puissance totale est réellement transmise à la charge?
- Il y a plusieurs composantes, mais concentrons-nous sur le gros facteur…

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{TOTAL}} = \frac{P_{OUT}}{P_{OUT} + P_{PERDUE}}$$



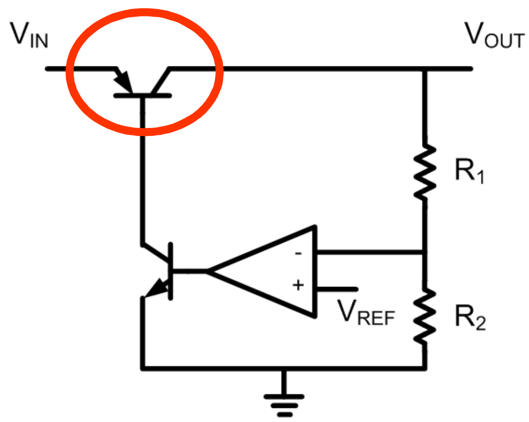
Efficacité

- En négligeant la puissance dans R_1 et R_2:
  - La puissance à la sortie c'est V_{OUT} * I_{OUT}
- La puissance perdue dans le transistor c'est: $(V_{IN}-V_{OUT})*I_{OUT}$

$$\eta = \frac{V_{OUT} I_{OUT}}{V_{OUT} I_{OUT} + (V_{IN} - V_{OUT}) I_{OUT}}$$

$$\eta = \frac{V_{OUT}}{V_{OUT} + (V_{IN} - V_{OUT})}$$

$$\eta = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$



Efficacité

- Prenons un cas concret…
  - J'ai une alimentation de 12v
  - Je veux générer 3.3v

$$\eta = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \qquad \eta = \frac{3.3}{12} = 27.5\%$$

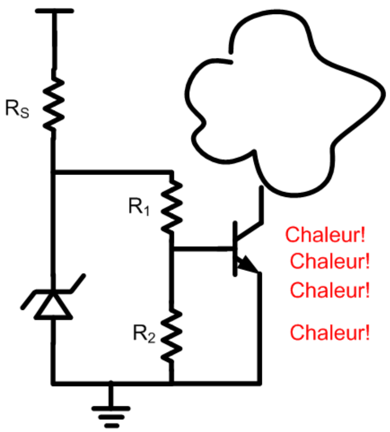
- Je perds 72.5% de ma puissance!
  - Je gaspille mon énergie
  - Je génère beaucoup de chaleur

Gestion de la chaleur

- Il faut donc prendre conscience de la chaleur
    - D’ailleurs, c’est pour ça que les pièces ont un “heat sink”
    - On veut faire circuler de l’air pour refroidir les pièces
- Il existe aussi une gestion de la chaleur à l’interne

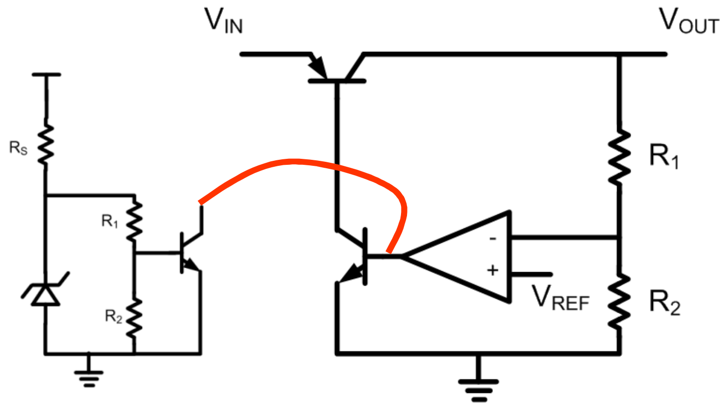
Gestion de la chaleur

- La chaleur fait baisser le V_{BE} d'un transistor:
  - Typiquement, -2mV/degré
  - Si on mettait une protection à 200C, il faudrait que R_1 et R_2 mette une tension de 0.4v à la base…
  - Lorsque la température dépasse 200C, le V_{BE} sera 0.4 et ça conduira…



Gestion de la chaleur

- On pourrait penser à ce genre de connexion:
  - L'augmentation de la température fait baisser le voltage dans V_{BE} du NPN
  - Ceci baisse le courant I_B du PNP pour baisser le courant de sortie
  - Moins de chaleur



Régulateur linéaire

- Caractéristiques:
  - Beau, bon, pas cher
  - Faible bruit
  - Répond rapidement
  - Besoin d’une alimentation faible…

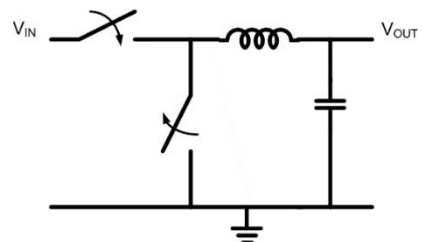
Régulateur commuté

- Le régulateur commuté existe en 2 formes classiques:
  - Buck (tension plus faible que l'alimentation)
  - Boost (tension plus élevée que l'alimentation)
- Ils sont basés sur des commutateurs, donc plus efficaces:
  - Un voltage est présent lorsque le courant est nul
  - Un courant est présent lorsque le voltage est nul

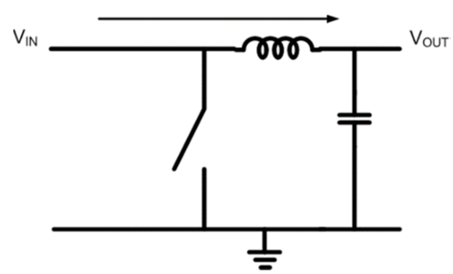
$$P = VI = 0$$

Buck

- La structure d'un convertisseur Buck ressemble à ceci:
  - Les commutateurs fonctionnent en alternance

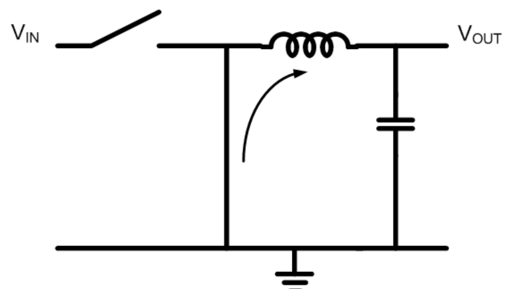


- Quand un commutateur conduit, le courant passe dans l'inductance



Buck

- Lorsque ça arrête, le courant d'une inductance continue:
  - Mais ça diminue tranquillement vers 0



- Et le cycle recommence...

Buck

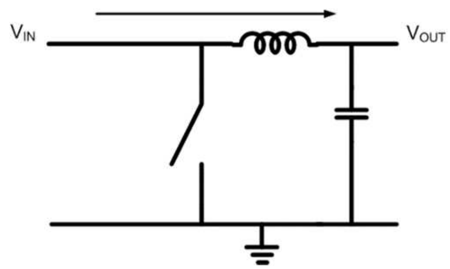
- Le courant qui passe dans une inductance est:

$$I = \int \frac{V}{L} dt$$

- Pour un échelon, ça devient:

$$I = \frac{V}{L} T + I_0$$

- Quand le commutateur d'en haut fonctionne pendant duréee D (fraction):



$$\Delta I_+ = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{L} D$$

Buck

- Dans la 2e phase, l'augmentation de courant est donné par:

$$\Delta I_+ = \frac{0 - V_{OUT}}{L}(1 - D)$$

- L'augmentation de l'un est égal à la <u>diminution</u> de l'autre

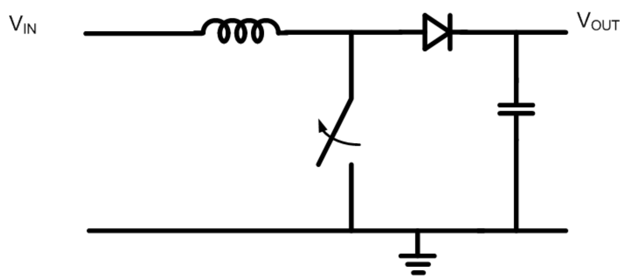
$$-\frac{(0 - V_{OUT})}{L}(1 - D) = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{L} D$$

- On simplifie le tout est ça devient ceci:

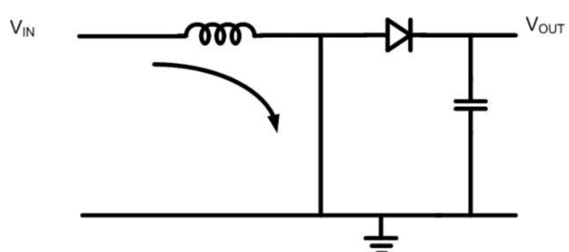
$$V_{OUT} = V_{IN} D$$

Boost

- La structure d’un convertisseur Boost ressemble à ceci:

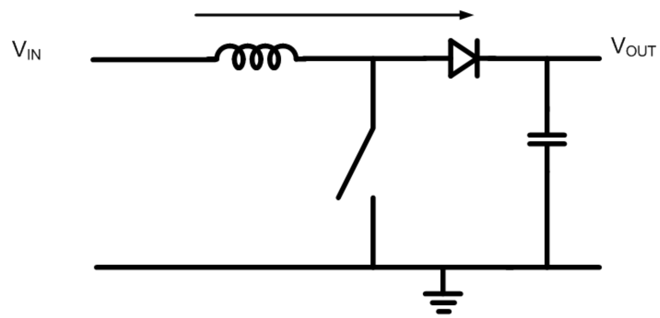


- Dans une première phase, le courant passe de V_{IN} à la masse par l’inductance



Boost

- Lorsque le commutateur est désengagé, le courant doit quand même continuer ...



- Il passe par la diode et fait augmenter les charges au condensateur...
  - Et ce, même si $V_{OUT} > V_{IN}$...

Boost

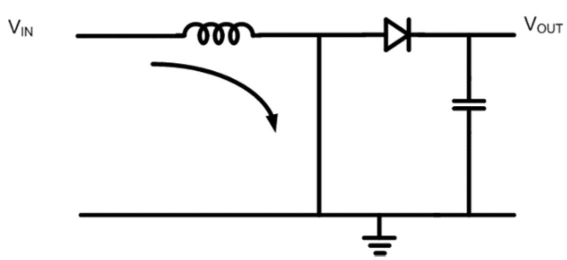
- Le courant dans une inductance est

$$I = \int \frac{V}{L} dt$$

- Avec un échelon, ça devient

$$I = \frac{V}{L} T + I_0$$

- Dans la première phase, ça donne ceci:



$$\Delta I_+ = \frac{V_{IN}}{L} D$$

Boost

- Lorsque le commutateur se désengage, le l'augmentation de courant est

$$\Delta I_{+} = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{L}(1 - D)$$

- L'augmentation de l'un c'est la diminution de l'autre

$$\frac{V_{IN}}{L}D = -\frac{(V_{IN} - V_{OUT})}{L}(1 - D)$$

- Après simplification, ça devient

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{(1 - D)}$$

Oscillateurs

- Les oscillateurs jouent un rôle fondamental dans les systèmes:
  - On vient de voir les régulateurs commutés
  - TOUS les systèmes numériques: horloge pour synchroniser les opérations
  - Systèmes de communication sans fil: modulation AM, FM, PM
- L'objectif est de générer une onde oscillante stable à fréquence déterminée

Oscillateurs

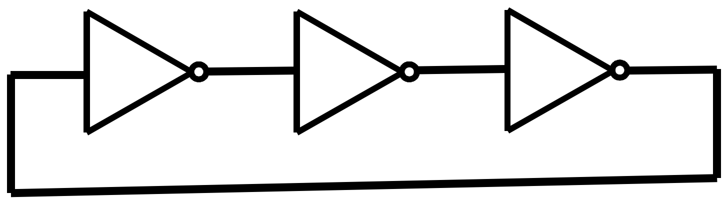
- Il existe 2 classes d'oscillateurs:
  - Oscillateurs harmoniques
  - Oscillateurs de relaxation
- Les oscillateurs harmoniques:
  - Génèrent des ondes sinusoïdales
  - Respectent les critères de Barkhausen
  - Typiquement avec LC ou cristal

Oscillateurs

- Les oscillateurs de relaxation:
  - Génèrent souvent des ondes carrées ou triangulaires
  - Plus faciles à concevoir
  - Moins stables

Oscillateurs de relaxation

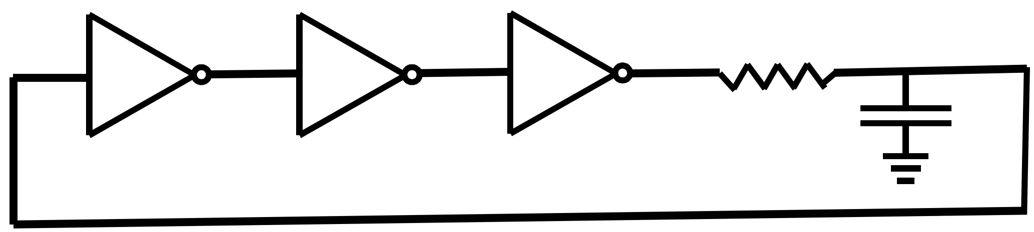
- L'exemple le plus simple est un oscillateur en boucle:



- La vitesse est déterminée par le temps de propagation dans les portes
    - Variable et pas très précis
    - Pas stable avec la température

Oscillateurs de relaxation

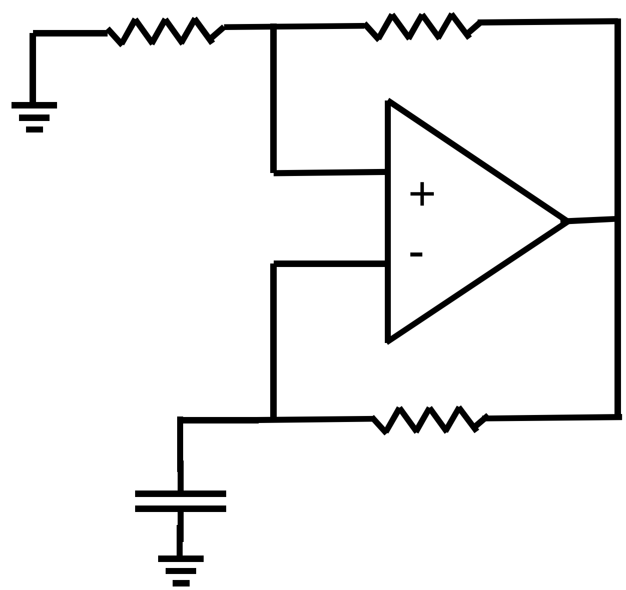
- Pour ajouter de la stabilité, on peut mettre un gros RC



- Le temps de charge/décharge est plus que le temps de propagation
  - Temps mieux contrôlé

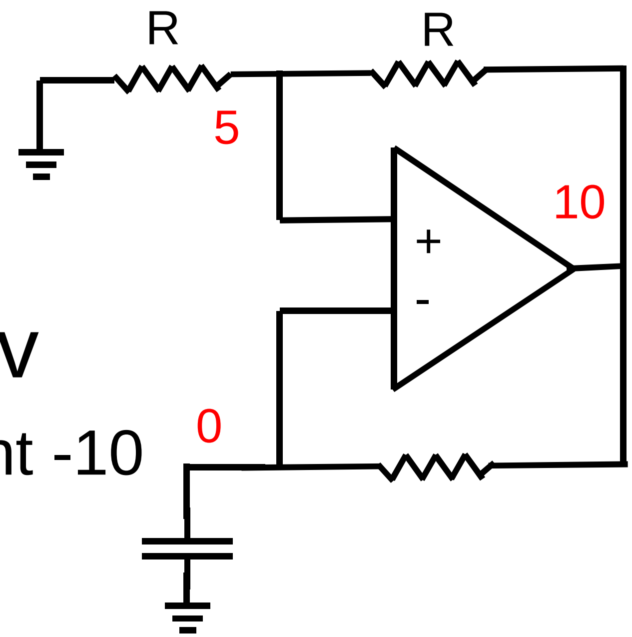
Oscillateurs de relaxation

- Une autre version utilise un ampli-op alimenté positif et négatif (ex: +10 et -10)



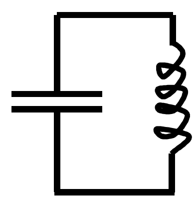
Oscillateurs de relaxation

- On imagine une condition de départ:
  - V- = 0
  - Avec sortie à +10, disons.
  - V+ sera à +5
- Sortie montera... jusqu'à +5v
  - Une fois dépassé, sortie devient -10
  - V+ sera -5
  - Sortie baisse
- Sortie baisse jusqu'à -5v...



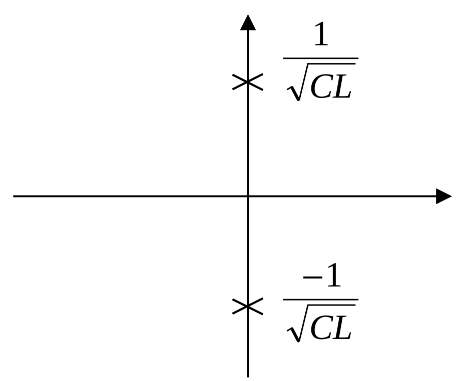
Oscillateur harmonique

- Les oscillateurs harmoniques génèrent des signaux sinusoïdaux
- À la base, on sait qu'un circuit LC va osciller:



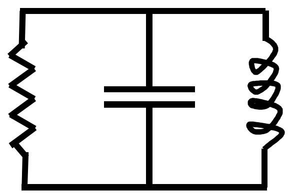
$$Z = \frac{1}{\frac{1}{sL} + sC} = \frac{sL}{1 + s^2 CL}$$

$$Poles = \pm j \frac{1}{\sqrt{CL}}$$



Oscillateur harmonique

- Du côté pratique, il y aura toujours des effets résistifs (fils, composantes, etc.)
  - Le modèle devient donc



$$Z = \frac{1}{\frac{1}{sL} + sC + \frac{1}{R}} = \frac{s\left(\frac{1}{C}\right)}{s^2 + s\left(\frac{1}{RC}\right) + \frac{1}{LC}}$$

$$Poles = \frac{-\frac{1}{RC} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{RC}\right)^2 - 4\left(\frac{1}{LC}\right)}}{2}$$

Oscillateur harmonique

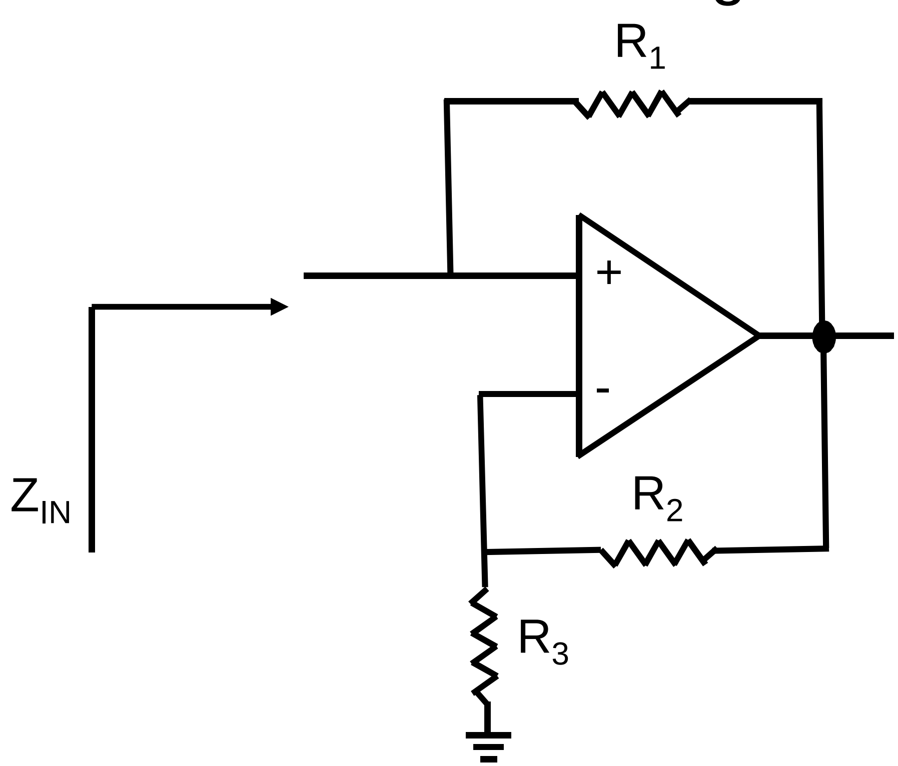
- La présence de R ramène les pôles vers la gauche du plan s
  - Les oscillations s'atténuent

$$Poles = \frac{-\frac{1}{RC} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{RC}\right)^2 - 4\left(\frac{1}{LC}\right)}}{2}$$

- Pour que le circuit oscille, il faudrait que les pôles soient sur l'axe ou même à droite
  - Pour ça, il faut une résistance nulle ou négative!

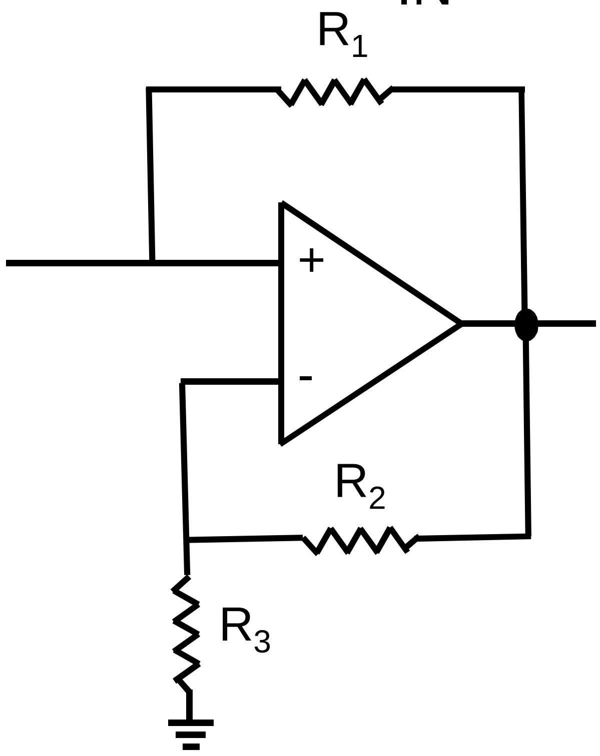
Oscillateur harmonique

- Déterminez la valeur de Z_{IN}:
  - Considérez l'amplificateur opérationnel comme étant ideal avec feedback négatif



Oscillateur harmonique

- On met une source V_{IN} et on voit le courant I_{IN} tiré:



2 équations:

$$I_{IN} = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{R_1}$$

$$\frac{V_{OUT} - V_{IN}}{R_2} = \frac{V_{IN}}{R_3}$$

On isole V_{OUT} pour substituer:

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN} R_2}{R_3} + V_{IN} = V_{IN}\left(\frac{R_2}{R_3} + 1\right)$$

Oscillateur harmonique

- Après substitution, l'équation devient:

$$I_{IN} = \frac{V_{IN} - V_{IN}\left(\frac{R_2}{R_3} + 1\right)}{R_1}$$

- On isole Z_{IN}:

$$Z_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}} = \frac{-R_1 R_3}{R_2}$$

- Si R2=R3, on obtient:

$$Z_{IN} = -R_1$$

Oscillateur harmonique

- Quand on connecte 2 résistances en parallèle, on obtient:

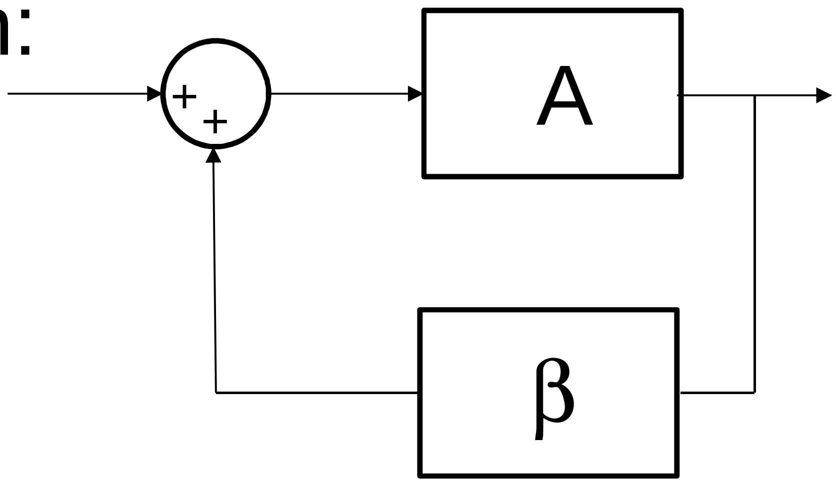
$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

- Si R_2 est négatif:
  - Le numérateur serait négatif
  - Pour que ça reste négatif, il faudrait que $R_1 > R_2$

Passons à un autre oscillateur...

Oscillateurs harmoniques

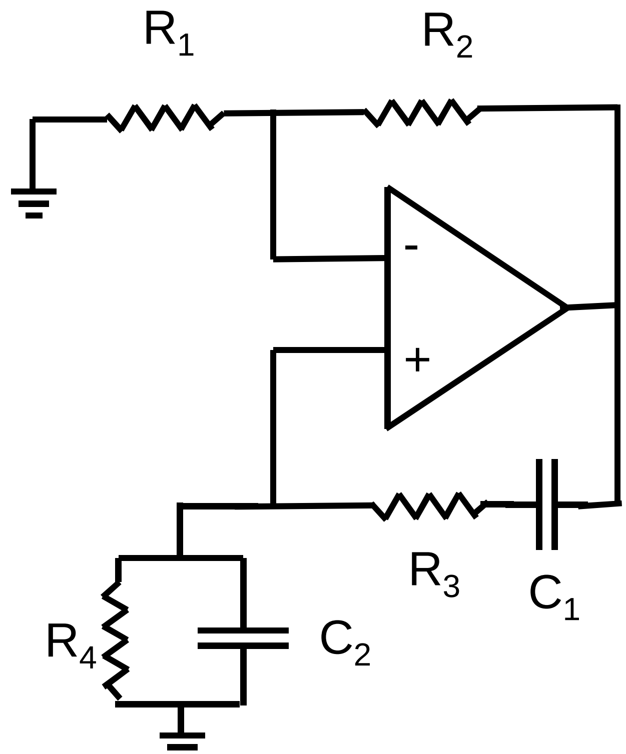
- Les oscillateurs harmoniques respectent les critères de Barkhausen
- Critères de Barkhausen:
  - Déphasage de 0
  - $A\beta=1$ ("Loop gain")



Gain plus élevé: oscillations grossissent
Gain plus faible: oscillations s'atténuent

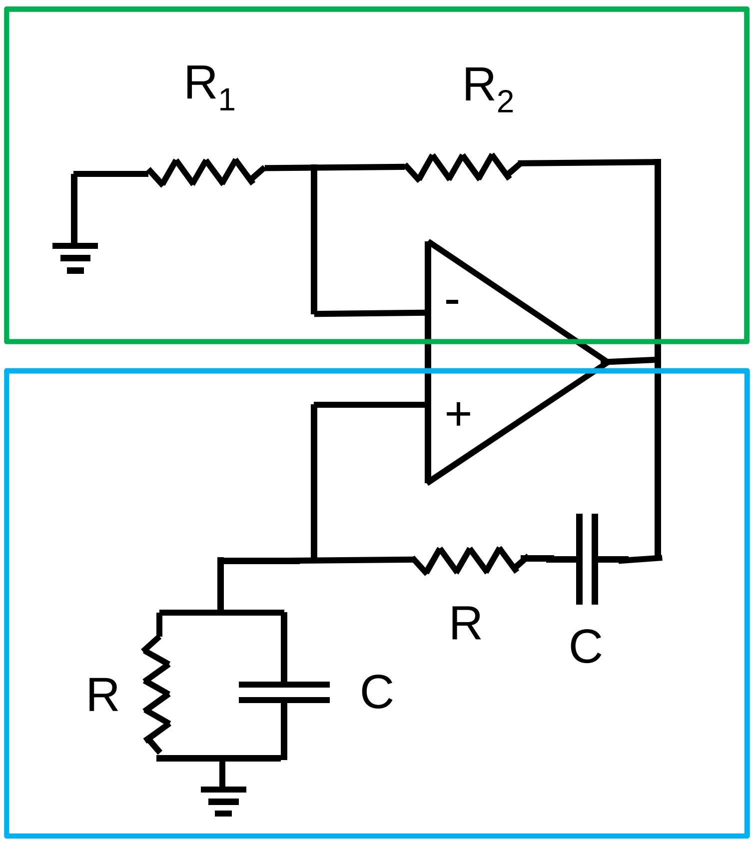
Oscillateur harmonique

- Oscillateur en pont de Wien
  - Traduction-maison de "Wien bridge oscillator"

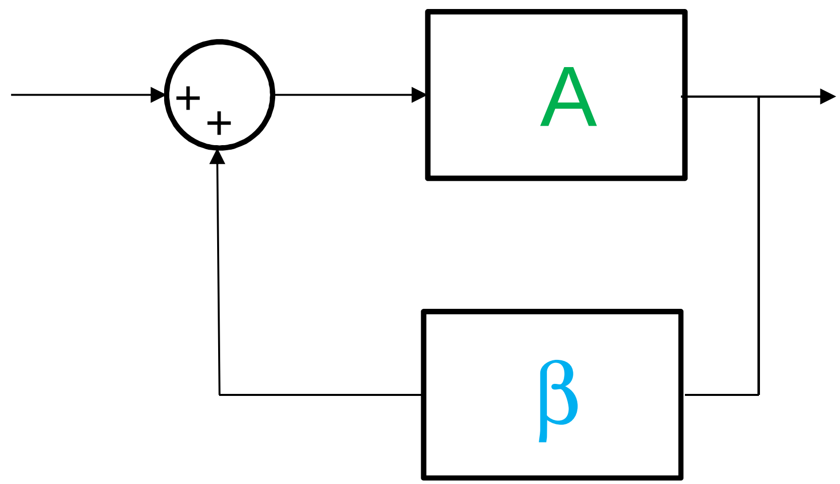


Oscillateur harmonique

- On simplifie l'analyse en mettant C_1=C_2 et R_3=R_4



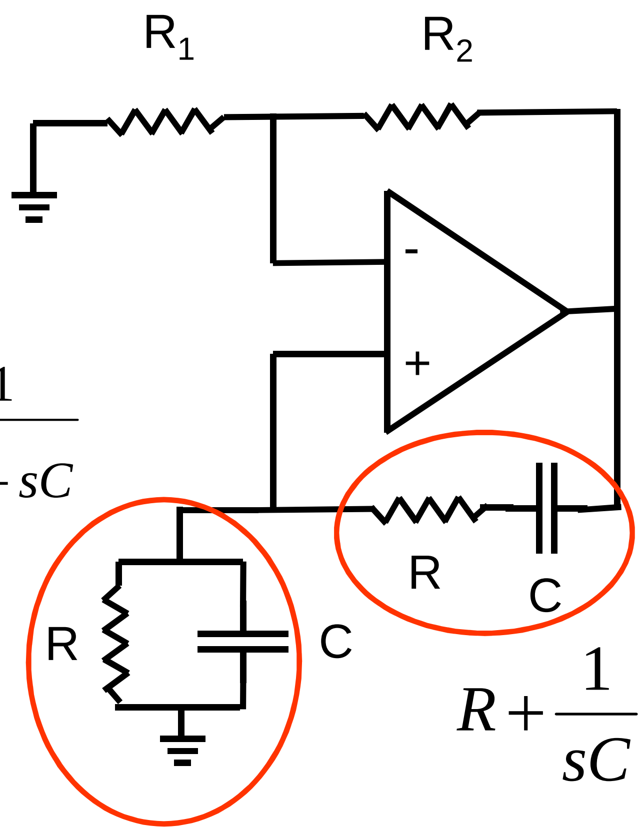
Cette portion représente un ampli en gain non-inversé



La sortie revient vers V+ par un diviseur de tension (β)

Oscillateur harmonique

- On calcule la valeur de β:



$$\frac{1}{\frac{1}{R}+sC}$$

$$\frac{R}{1+sCR}$$

$$R+\frac{1}{sC}$$

$$\frac{sCR+1}{sC}$$

Oscillateur harmonique

- On utilise un diviseur de tension:

$$\beta = \frac{\frac{R}{1+sCR}}{\frac{R}{1+sCR}+\frac{sCR+1}{sC}}$$

- Étape intermédiaire:

$$\beta = \frac{\frac{R}{1+sCR}}{\frac{sCR}{sC(1+sCR)}+\frac{s^2C^2R^2+2sCR+1}{sC(1+sCR)}}$$

Oscillateur harmonique

- On simplifie:

$$\beta = \frac{sCR}{s^2C^2R^2 + 3sCR + 1}$$

- Rappel: On veut un déphasage de 0
  - On se met en régime sinusoïdal établi

$$\beta(j\omega) = \frac{j\omega CR}{1 - \omega^2C^2R^2 + 3j\omega CR}$$

Oscillateur harmonique

- La phase est:

$$\beta(j\omega) = \frac{j\omega CR}{1-\omega^2C^2R^2+3j\omega CR} \Rightarrow \angle\beta(j\omega) = 90 - \tan^{-1}\left(\frac{3\omega CR}{1-\omega^2C^2R^2}\right)$$

- Pour que l'arctangente donne 90, il faut que le dénominateur soit 0:
    - Il faut donc que

$$\omega = \frac{1}{RC}$$

L'oscillateur aura donc une fréquence de 1/RC... s'il oscillait...

Oscillateur harmonique

- L'autre critère de Barkhausen c'est le gain de la boucle qui doit être 1:
  - Aβ=1
- Le gain de β est donné par

$$\beta(j\omega) = \frac{j\omega CR}{1-\omega^2 C^2 R^2 + 3j\omega CR} \qquad \left|\beta(j\omega)\right| = \frac{\omega CR}{\sqrt{\left(1-\omega^2 C^2 R^2\right)^2 + \left(3\omega CR\right)^2}}$$

- À la fréquence d'oscillation, ω=1/RC, donc

$$\left|\beta\left(j\frac{1}{RC}\right)\right| = \frac{1}{\sqrt{(1-1)^2 + (3)^2}} = \frac{1}{3}$$

Oscillateur harmonique

- Pour osciller, il faudrait que A soit 3:

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 3$$

- Dans ce cas, on aurait un oscillateur avec une fréquence de 1/RC