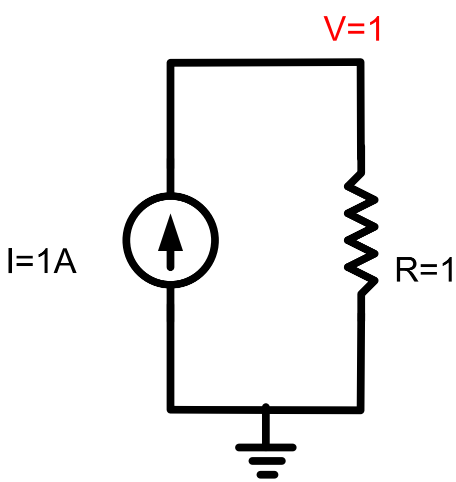
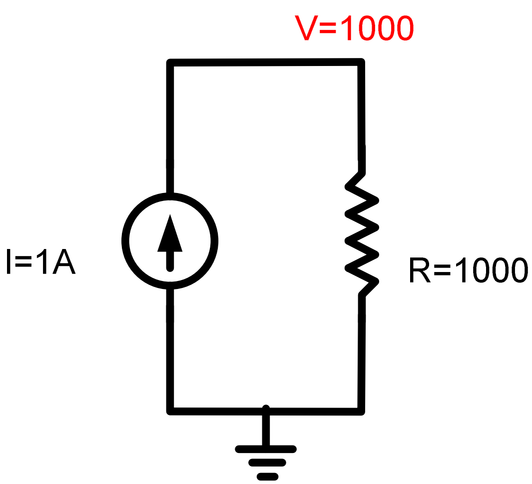
Méthode de conception en électronique

Cours 7

Source de courant

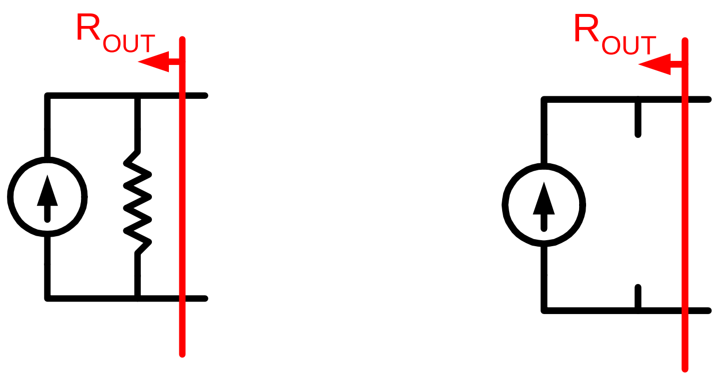
- Caractéristiques d'une source de courant:
  - Fournir un courant de façon indépendante de la charge
  - Courant doit être indépendant de la tension à ses bornes
  - Générer la tension requise pour fournir le courant





Miroirs de courant

- La dépendance du courant sur la tension à la sortie se traduit par R_{OUT}
- Dans le cas d'une source idéale:



  - Quelle que soit la tension, le courant sera toujours le même:

$$R_{OUT} = \frac{\Delta V}{\Delta I} \rightarrow \infty$$

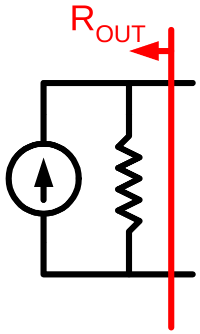
Miroirs de courant

- Pour une source idéale, R_{OUT} est infini

$$R_{OUT} = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

  - Par exemple: V_{OUT} change de 10v mais I_{OUT} change de 0…

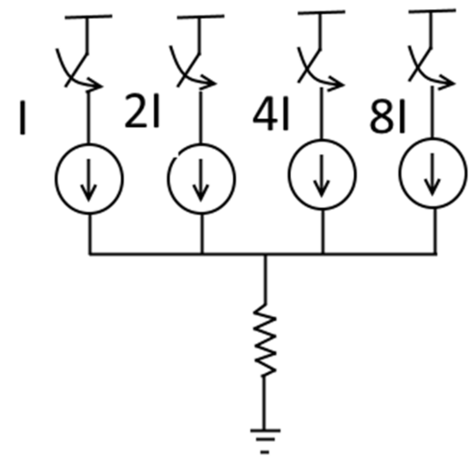
- Pour une source <u>réelle</u>, I variera avec V
  - Elle aura donc un R_{OUT} qui n'est pas infini



Allons voir un exemple…

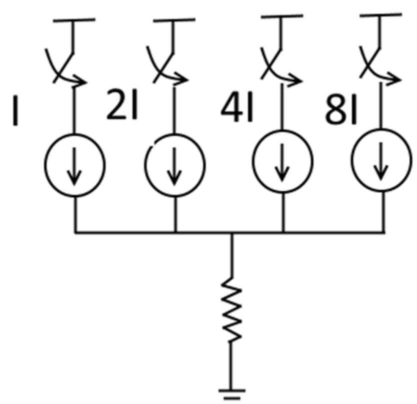
Application

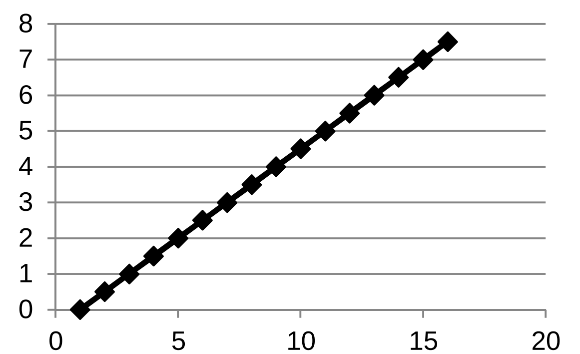
- Avec:
  - V_{CC}=10v
  - I=100μA
  - R=5K
- Que fait ce circuit?



Application

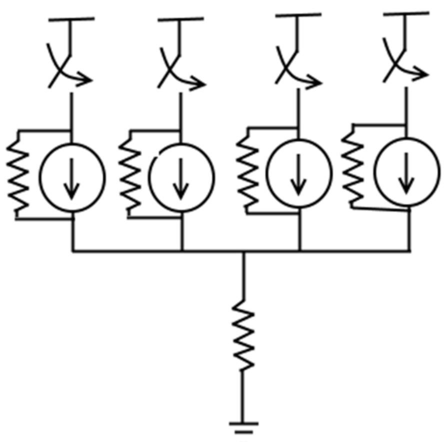
- Quand la première switch ferme, on a:
  - 0.5v
- Quand la deuxième switch ferme, on a:
  - 1v
- Quand les deux premières switchs ferment
  - 1.5v
- Jusqu'à 7.5v





Application

- Avec:
  - V_{CC}=10v
  - I=100μA
  - R=5K
  - R_{OUT}=100K chaque
- Que fait ce circuit?



Application

- Quand la première switch ferme, on a

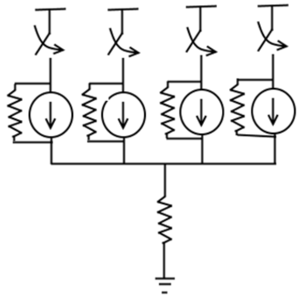
$$\frac{10-V_{OUT}}{100K}+100\mu A=\frac{V_{OUT}}{5K} \qquad V_{OUT}=\frac{20}{21}=1.05$$

- Quand la deuxième switch ferme, on a

$$\frac{10-V_{OUT}}{100K}+200\mu A=\frac{V_{OUT}}{5K} \qquad V_{OUT}=\frac{21}{30}=1.43$$

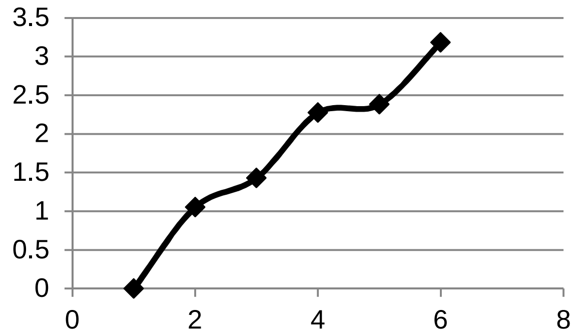
- Quand les deux premiers switchs ferment

$$\frac{10-V_{OUT}}{100K}+\frac{10-V_{OUT}}{100K}+300\mu A=\frac{V_{OUT}}{5K} \qquad V_{OUT}=\frac{50}{22}=2.27$$

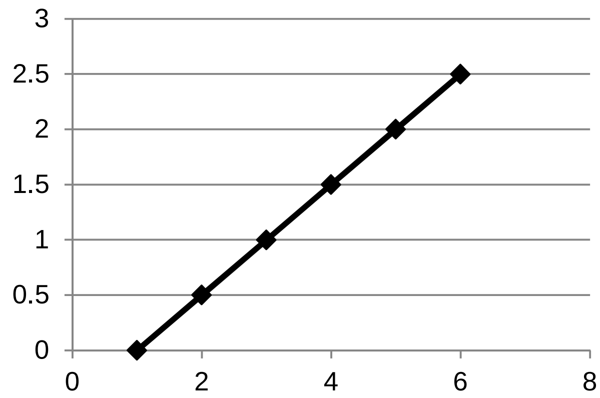


Application

- La courbe pour les 5 premiers chiffres:



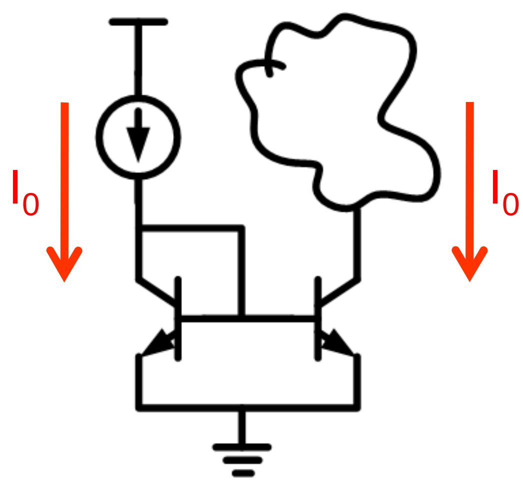
- Et avec R_{OUT} infini:

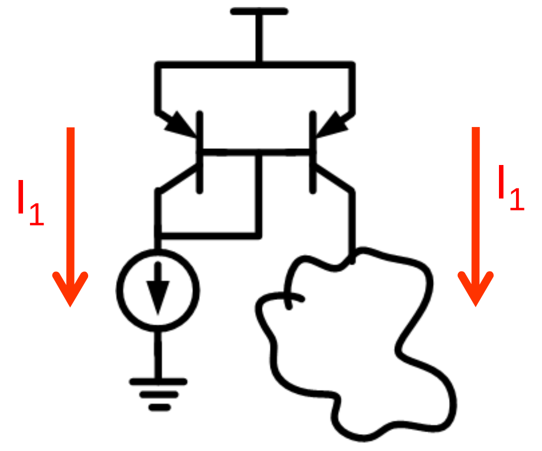


Donc, on aimerait avoir un R_{OUT} élevé

Miroirs de courant

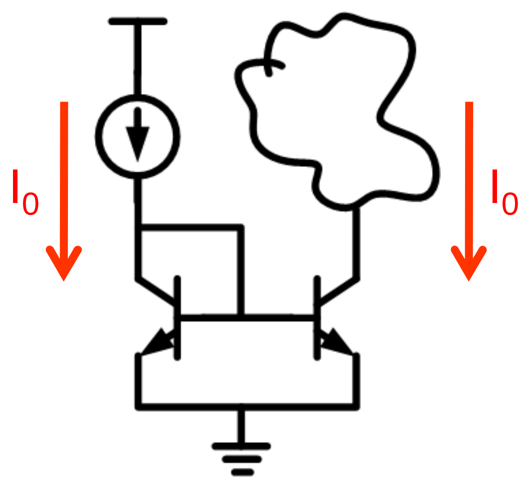
- Sous sa forme de base, un miroir a deux formes possibles:
  - Une version FOURNIT du courant
  - Une version TIRE du courant

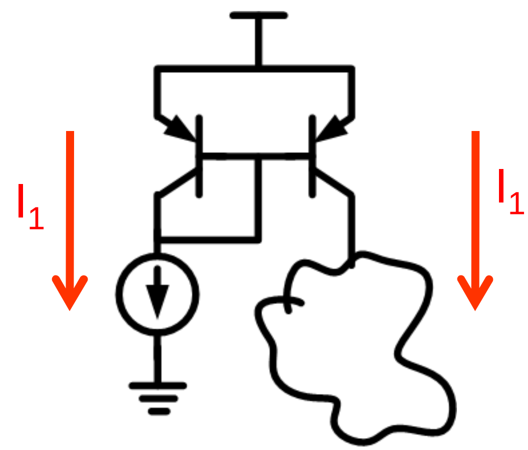




Miroirs de courant

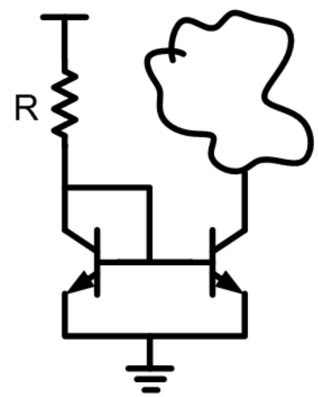
- Si les transistors sont en région active:
  - Le courant ne dépend pas de V_C
  - Même V_{BE}, même courant I_C **<u>SI</u>** les transistors sont identiques
- On a besoin d'une source de courant pour créer une source de courant… ?

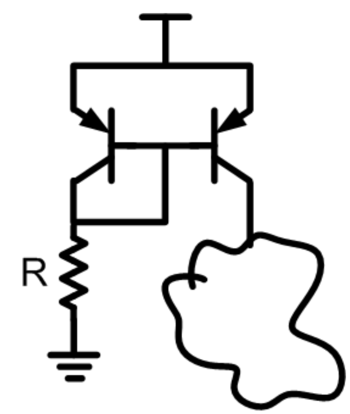




Miroirs de courant

- Une façon simple d'imposer le courant est de mettre une résistance:
    - Le courant se calcule facilement



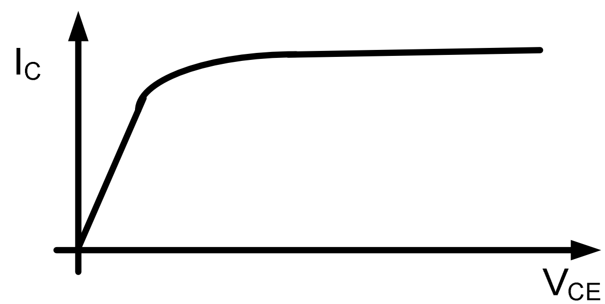


$$I_C \cong \frac{V_{CC} - 0.7}{R}$$

$$I_C \cong \frac{V_{CC} - 0.7}{R}$$

Miroirs de courant

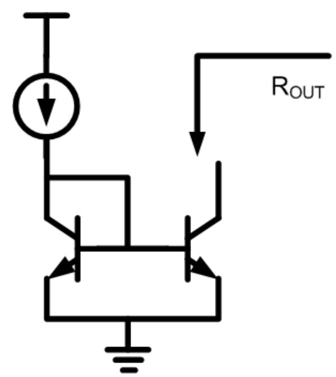
- En réalité, le courant ne sera pas toujours égal
  - V_C pourrait mettre le transistor en saturation
  - I_C dépend UN PEU de V_{CE} en région active



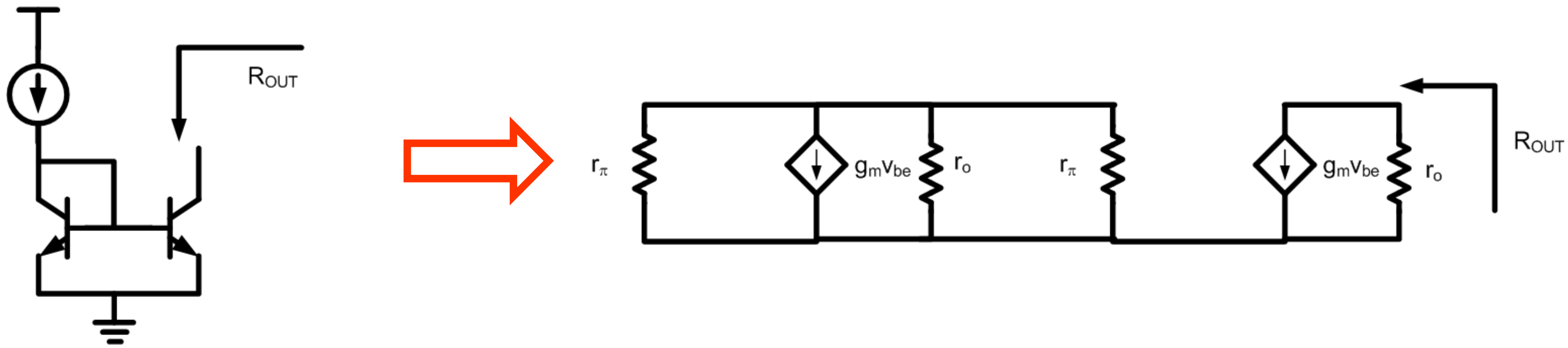
Allons voir ça de plus près...

Miroirs de courant

- Même si les V_{BE} sont les mêmes, différents $V_{CE} \rightarrow$ différents courants
- Comment différent?
    - Ça dépend du R_{OUT} qu'on va vouloir calculer…
- Mais commençons par faire le modèle petit-signal



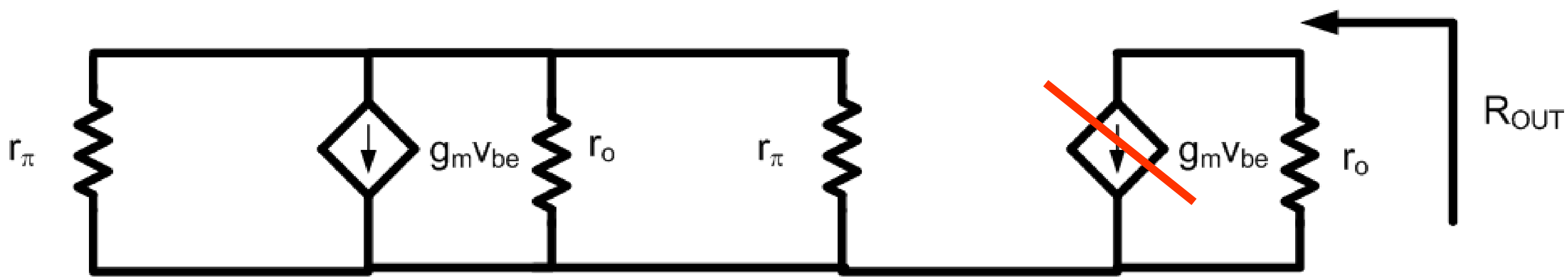
Miroirs de courant



- Le R_{OUT} dépend de r_o et de $g_m v_{be}$
- C'est quoi la valeur de $g_m v_{be}$?
- Si $v_{be} > 0$, il y aura des charges positives
  - Le courant va SORTIR par r_π, r_o et par $g_m v_{be}$
  - Éventuellement, $v_{be} \rightarrow 0$
  - DONC… $v_{be}=0$

Miroirs de courant

- La source dépendante devient nulle



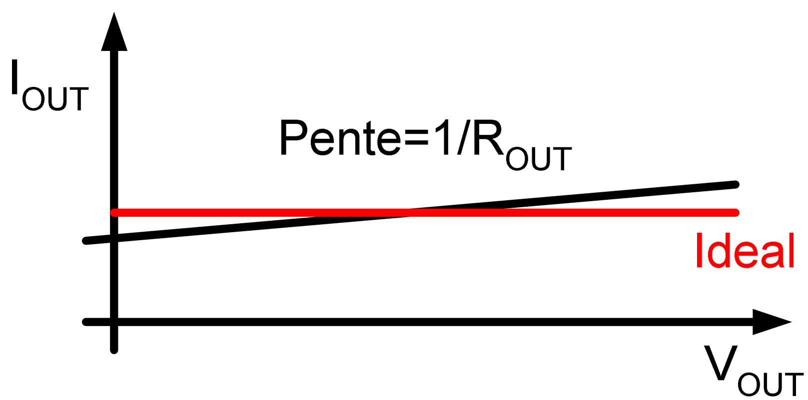
- La résistance de sortie est r_o.
  - Donc, R_{OUT} du miroir c'est le r_o du transistor

Miroirs de courant

- Qu'est-ce que ça veut dire?
- On sait que: $R_{OUT} = \dfrac{\Delta V}{\Delta I} \quad \Rightarrow \quad \Delta I = \dfrac{\Delta V}{r_o}$
- Dans un miroir de courant de 1mA, si changeait V_C de 1v, I changerait de $1/r_o$.
  - Avec r_o=50K, ΔI sera de 20µA
  - On fournirait 1.02mA à la place de 1mA
  - Parfois c'est acceptable, parfois non...

Miroirs de courant

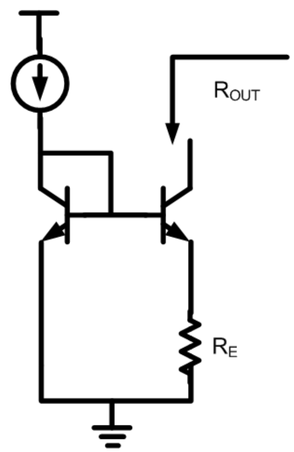
- Idéalement, on aimerait $\Delta I \rightarrow 0$, quel que soit le ΔV
  - Donc, on a besoin d'un R_{OUT} plus élevé



- Comment augmenter R_{OUT}?

Source Widlar

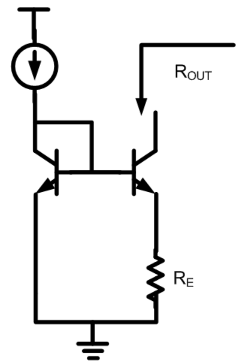
- Pour augmenter la résistance à la sortie, on pourrait penser à mettre R_E
  - La première personne à y avoir pensé, c'est Widlar

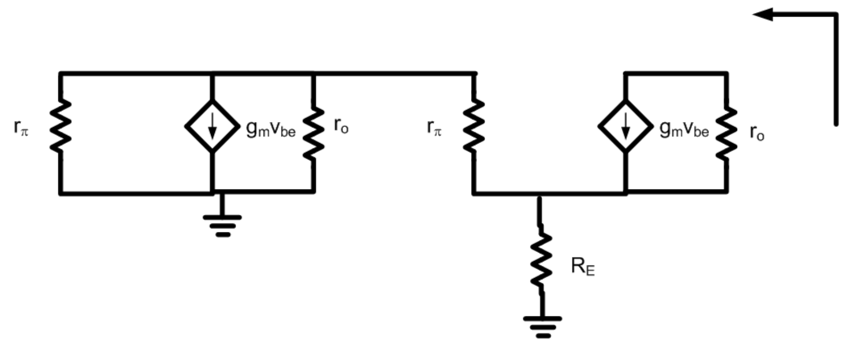


Faites le modèle petit signal en π

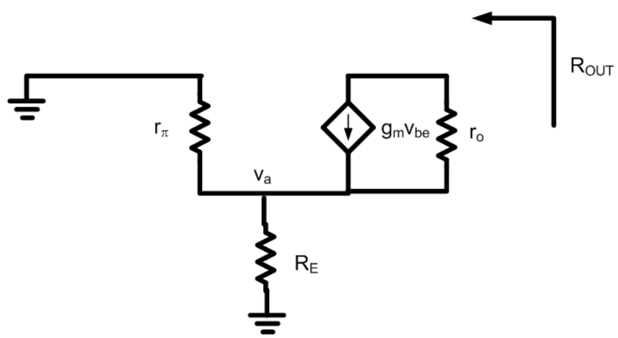
Source Widlar

- On transforme en modèle petit-signal



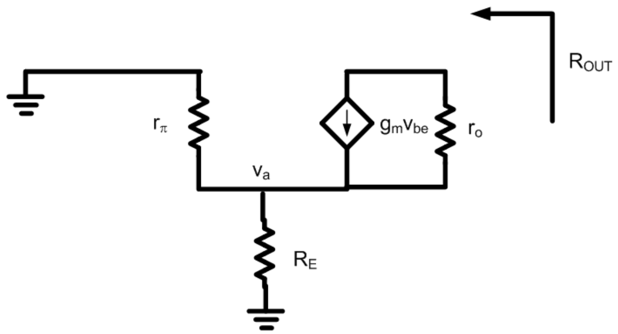


- La portion à gauche a un voltage nul
  - Le circuit à analyser est celui-ci:



Source Widlar

- On applique une tension V_{OUT} à la sortie:



$$I_{OUT} = \frac{V_{OUT} - v_a}{r_o} + g_m(-v_a) = \frac{V_{OUT} - v_a}{r_o} - g_m v_a$$

- On écrit l'équation au noeud v_a:

$$\frac{V_{OUT} - v_a}{r_o} - g_m v_a = \frac{v_a}{(R_E \parallel r_\pi)}$$

Source Widlar

- On isole v_a:

$$v_a = \frac{V_{OUT}}{\left(\frac{r_o}{(R_E \parallel r_\pi)} + r_o g_m + 1\right)}$$

- On substitue dans l'autre équation:

$$I_{OUT} = \frac{V_{OUT} - \frac{V_{OUT}}{\left(\frac{r_o}{(R_E \parallel r_\pi)} + r_o g_m + 1\right)}}{r_o} - g_m \frac{V_{OUT}}{\left(\frac{r_o}{(R_E \parallel r_\pi)} + r_o g_m + 1\right)}$$

Source Widlar

- On le met au même dénominateur

$$I_{OUT} = V_{OUT}\,\frac{\dfrac{r_o}{(R_E \parallel r_\pi)} \cancel{+ r_o g_m} \cancel{+1}}{r_o\left(\dfrac{r_o}{(R_E \parallel r_\pi)} + r_o g_m + 1\right)} - \cancel{\frac{1}{r_o\left(\dfrac{r_o}{(R_E \parallel r_\pi)} + r_o g_m + 1\right)}} - \cancel{\frac{g_m r_o}{r_o\left(\dfrac{r_o}{(R_E \parallel r_\pi)} + r_o g_m + 1\right)}}$$

- On réarrange

$$I_{OUT} = V_{OUT}\,\frac{1}{\left(r_o + (R_E \parallel r_\pi) r_o g_m + (R_E \parallel r_\pi)\right)}$$

Source Widlar

- On isole R_{OUT}

$$R_{OUT} = r_o + \left(R_E \parallel r_\pi\right) r_o g_m + \left(R_E \parallel r_\pi\right)$$

- On peut aussi négliger les termes sans r_o:

$$R_{OUT} = r_o\left[1 + \left(R_E \parallel r_\pi\right) g_m\right] + \cancel{\left(R_E \parallel r_\pi\right)}$$

- Donc:

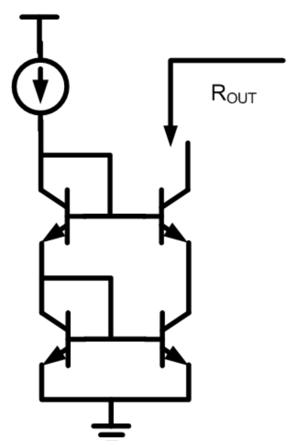
$$R_{OUT} = r_o\left[1 + \left(R_E \parallel r_\pi\right) g_m\right]$$

Miroirs de courant Cascode

- Dans Widlar, r_o est multiplié par la R_E (entre autres)

$$R_{OUT} = r_o\left[1 + \left(R_E \parallel r_\pi\right) g_m\right]$$

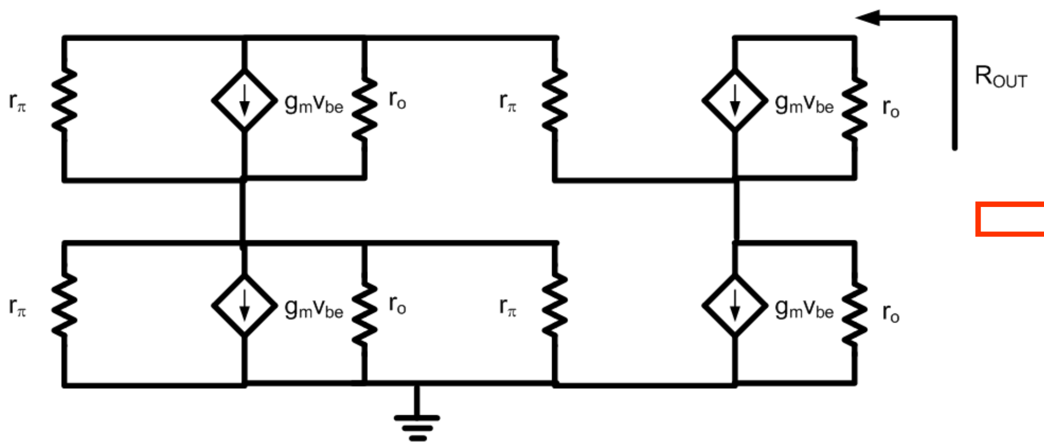
  - On pourrait mettre un plus gros "R_E"
  - En mettant un autre miroir, ce R_E est en fait r_o..

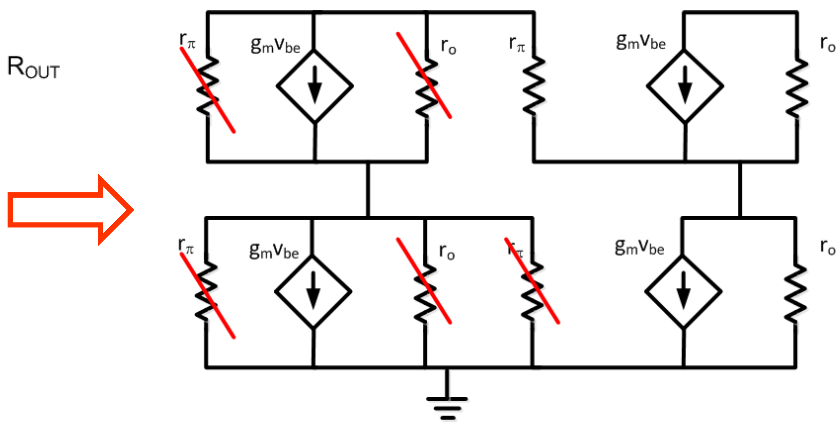


On commence avec le modèle petit-signal

Miroirs de courant Cascode

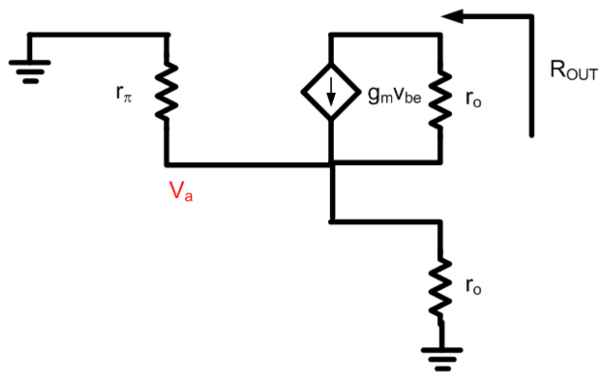
- Avec le même raisonnement, les tensions à gauche sont 0





Miroirs de courant Cascode

- Ça se simplifie donc à ceci:



- On applique une source V_{OUT} qui fournit un courant I_{OUT}:

$$I_{OUT} = \frac{V_{OUT} - v_a}{r_o} + g_m(-v_a) = \frac{V_{OUT} - v_a}{r_o} - g_m v_a$$

Miroirs de courant Cascode

- On écrit l'équation au nœud v_a:

$$\frac{V_{OUT} - v_a}{r_o} - g_m v_a = \frac{v_a}{r_\pi \parallel r_o}$$

- On l'isole:

$$v_a = \frac{V_{OUT}}{r_o \left(\frac{1}{r_\pi \parallel r_o} + g_m + \frac{1}{r_o} \right)}$$

Miroirs de courant Cascode

- On substitue dans la première équation

$$I_{OUT} = \frac{V_{OUT} - \dfrac{V_{OUT}}{r_o\left(\dfrac{1}{r_\pi \parallel r_o} + g_m + \dfrac{1}{r_o}\right)}}{r_o} - g_m \frac{V_{OUT}}{r_o\left(\dfrac{1}{r_\pi \parallel r_o} + g_m + \dfrac{1}{r_o}\right)} = \frac{\dfrac{V_{OUT}}{r_o\left(\dfrac{1}{r_\pi \parallel r_o} + g_m + \dfrac{1}{r_o}\right)}}{r_\pi \parallel r_o}$$

- Pour finalement isoler R_{OUT}:
  - Les termes non multipliés par r_o sont négligeables:

$$R_{OUT} = \left(r_o + \left(r_\pi \parallel r_o\right) r_o g_m + \cancel{\left(r_\pi \parallel r_o\right)}\right)$$

Miroirs de courant Cascode

- On reprend l'équation

$$R_{OUT} = r_o\left(1+\left(r_\pi \parallel r_o\right)g_m\right)$$

- On considère que r_π est beaucoup plus petit que r_o:

$$R_{OUT} = r_o\left(1+g_m r_\pi\right)$$

- $g_m r_\pi$, c'est β:

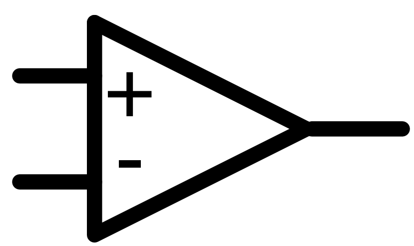
$$R_{OUT} = r_o\left(1+\beta\right)$$

Miroirs de courant Cascode

- La connexion cascode MULTIPLIE l'ancien R_{OUT} par β+1
- Utilisons des chiffres:
  - β=100 et r_o=50K
- Ca donne un R_{OUT} de ~5M
- Si V_D changeait de 1v, le courant changerait de: 0.2μA
  - Dans le cas precedent, ça changeait de 20μA

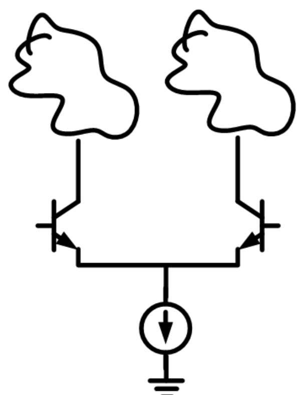
Amplificateurs différentiels

- Les amplificateurs idéaux ont:
  - 2 entrées
  - 1 Sortie
- Les configurations jusqu'à présent n'ont qu'UNE seule entrée
- Il y a sûrement quelque chose qu'on ne connait pas...



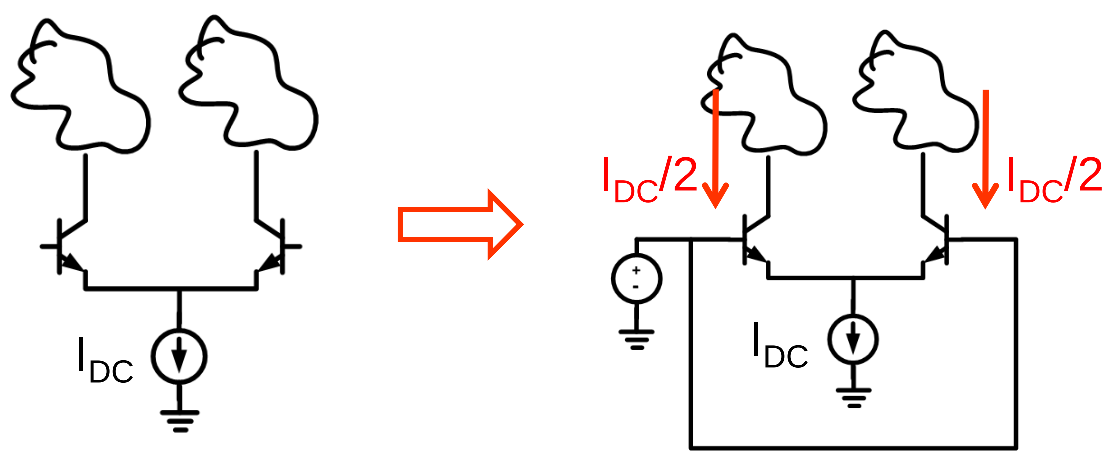
Paires Différentielles

- Ce qu'on ne connait pas, ce sont les "amplificateurs différentiels"
- Les amplificateurs différentiels sont basés sur les "paires différentielles"
    - Transistors identiques connectés à l'émetteur



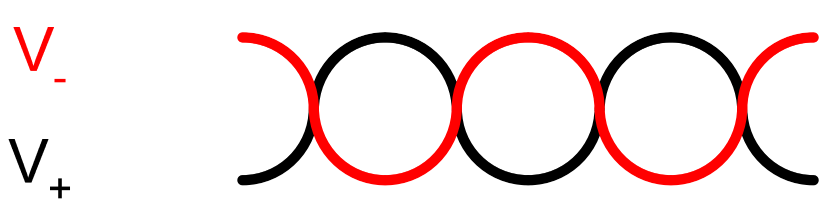
Paires Différentielles

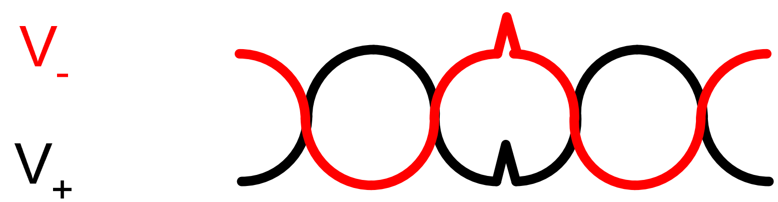
- Analyse qualitative
- Le courant I_{DC} est divisé entre 2 transistors
  - Si les transistors sont en active et si les V_{BE} sont pareils, les courants seront pareils
  - I_{DC} sera divisé de façon **égale** de chaque bord...



Paires Différentielles

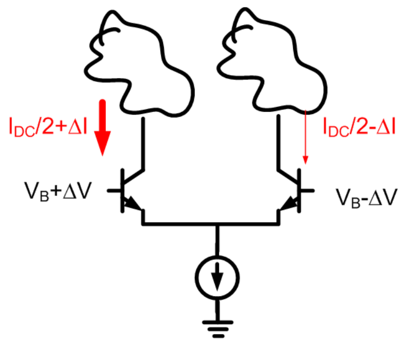
- Pour analyser le système, on va dire que l'entrée est symmétrique:
  - Quand l'un augmente, l'autre baisse
  - Quand l'un baisse, l'autre augmente
- On appelle ça un "signal differentiel"
  - Moins susceptible au bruit commun
  - Couplage affecte les 2 fils de la même manière





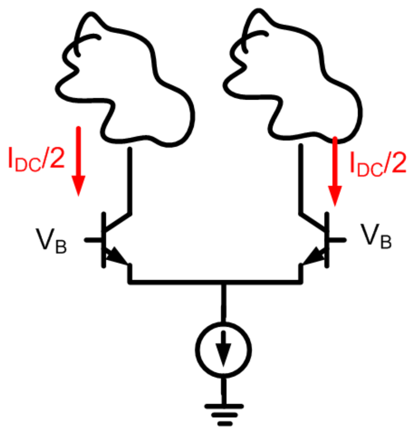
Paires Différentielles

- Disons qu'ils ont le meme V_{BE} au début
- Si l'un monte de ΔV, l'autre baisse de ΔV
  - Les changements sont différentiels
- Quand un bord augmente:
  - Il augmente son V_{BE}
  - Il prend plus de courant
- L'autre bord baisse (signal différentiel)
  - Il baisse son V_{BE}
  - Il prend moins de courant

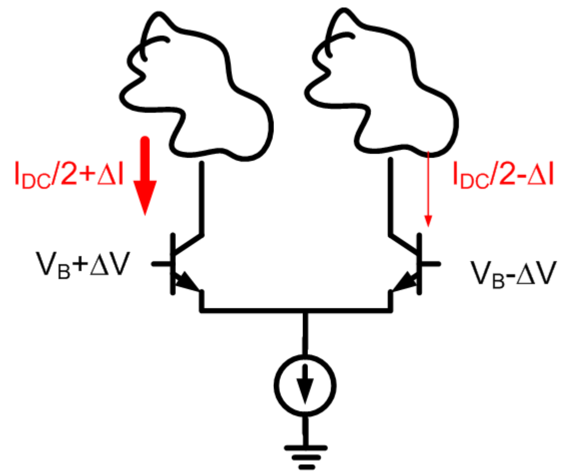


Paires Différentielles

- Voici comment les courants changent avec un changement de V_B:



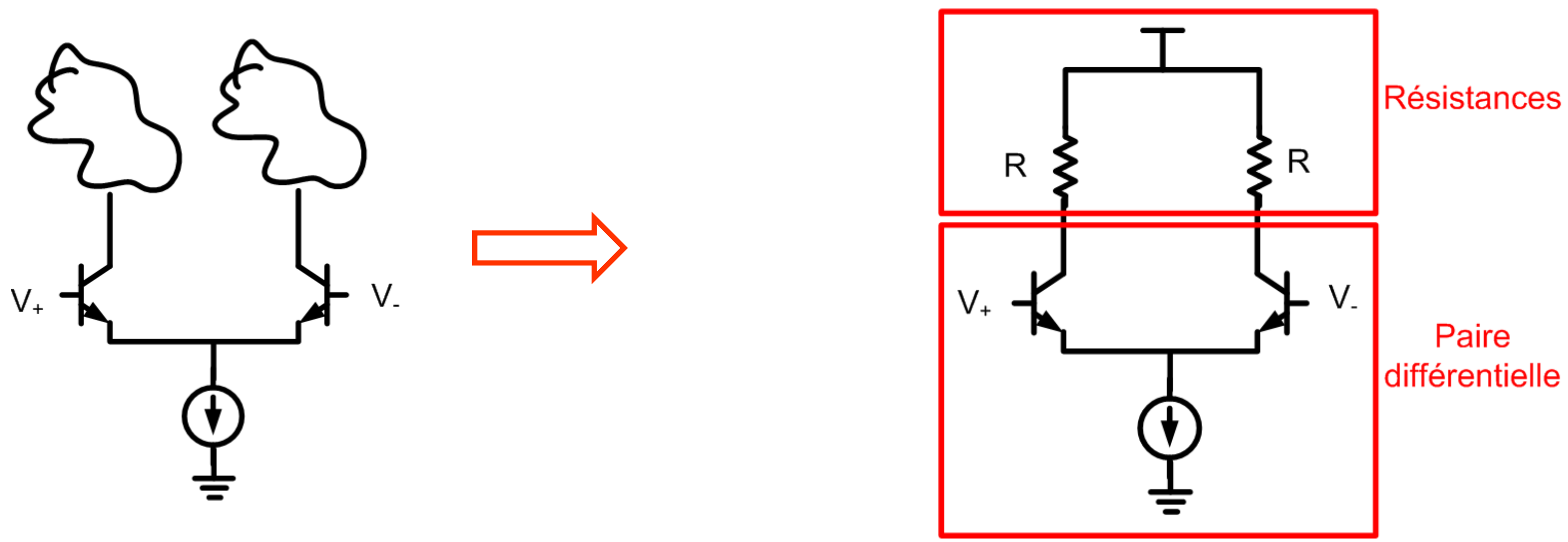
Les V_B sont égaux



V_B à gauche est plus élevé

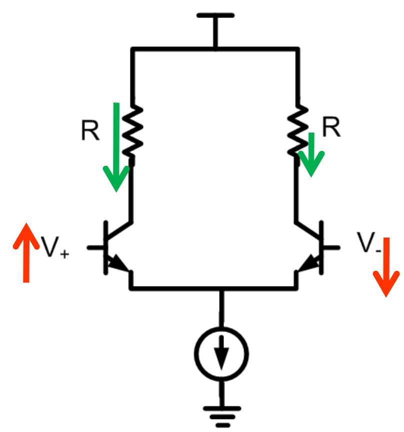
Amplificateurs différentiels

- Un amplificateur différentiel, c'est une paire différentielle avec des résistances...



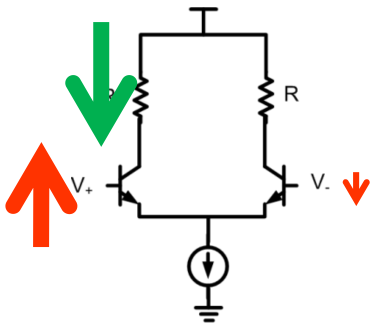
Amplificateurs différentiels

- Changement de V_B donne changement I
- Changement I passe dans R et est transformé en changement de V.
- Plus on augmente V d'un côté, plus le courant augmente…
  - Jusqu'à une certaine limite…



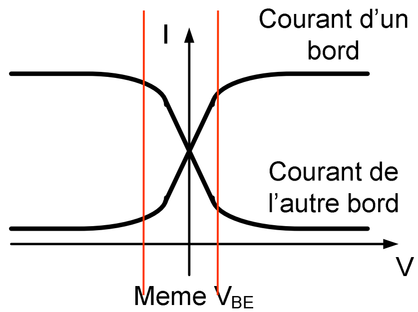
Amplificateurs différentiels

- Si la tension est trop grande, on arrive au point ou I_{DC} passe <u>juste d'un bord.</u>
- À ce point, notre sortie ne change plus:
    - Pas bon pour les amplificateurs
- À ce point, meme si on change V_B, le courant ne change plus
    - On ne peut pas avoir plus de courant



Amplificateurs différentiels

- Regardons la relation V-I de notre paire…



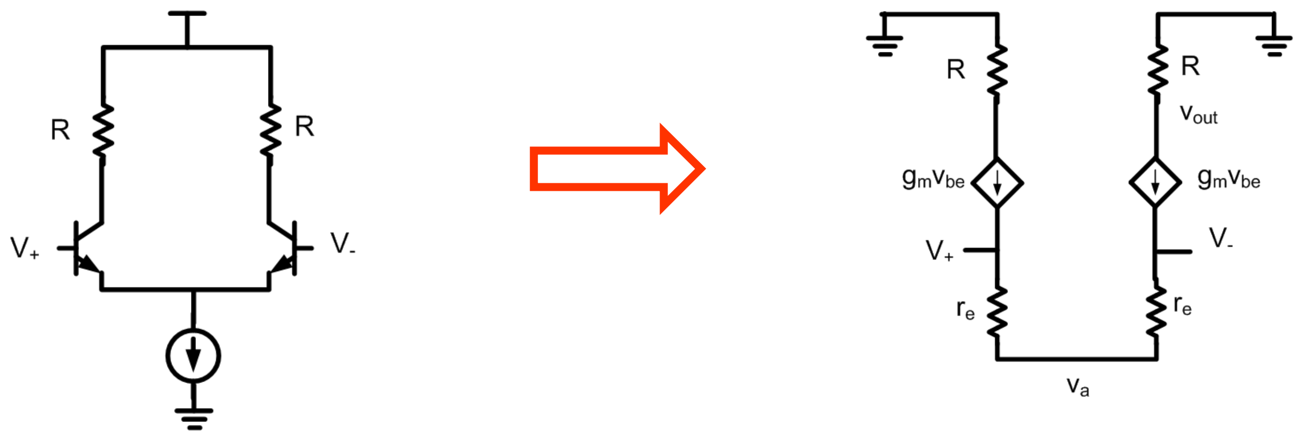
- Quand les 2 sont proches, ça marche
- Quand les 2 sont loins, ça sature
  - Il y a donc un « point critique » qu'il ne faut pas dépasser

Amplificateurs différentiels

- En amplification, le courant ne passe jamais seulement d'un bord
  - Raison: ΔV_{BE} ne donnera plus ΔI
  - On n'aura plus d'amplification
- Pour certaines applications on va vouloir avoir TOUT le I_{DC} ou pas de I_{DC} du tout
  - On parle notamment de la commutation
  - L'exemple le plus important, ce sont les portes logique

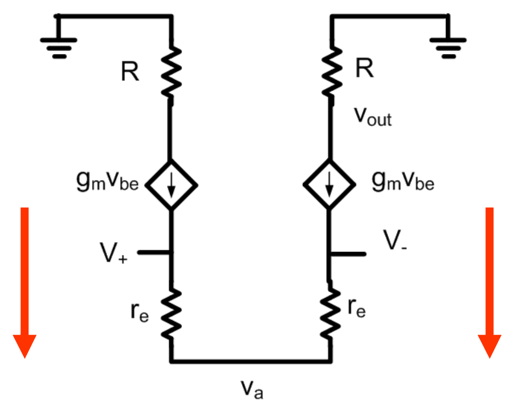
Amplificateurs différentiels

- Analysons le comportement petit signal d’un amplificateur differentiel:



Amplificateurs différentiels

- On va négliger r_o dans nos analyses pour se simplifier la vie…



- On écrit les équations de courant:

$$i_1 = g_m (v_+ - v_a) \qquad\qquad i_2 = g_m (v_- - v_a)$$

Amplificateurs différentiels

- On sait que la somme des courants qui entrent dans un noeud est 0:

$$i_1 + i_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad g_m(v_+ - v_a) + g_m(v_- - v_a) = 0$$

- Dans un amplificateur différentiel, $v_- = -v_+$

$$g_m(v_+ - v_a) + g_m(-v_+ - v_a) = 0$$

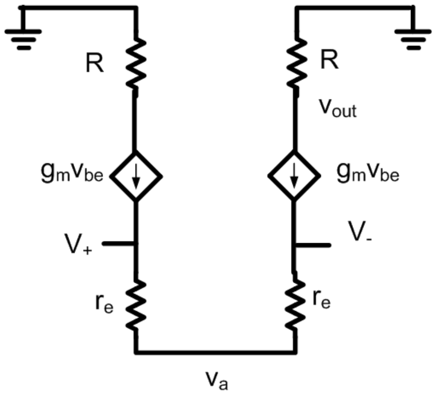
- On simplifie:

$$-2g_m v_a = 0 \quad \Rightarrow \quad v_a = 0$$

Amplificateurs différentiels

- La tension de sortie est donnée par:

$$v_{out} = -i_2 R$$



- Donc

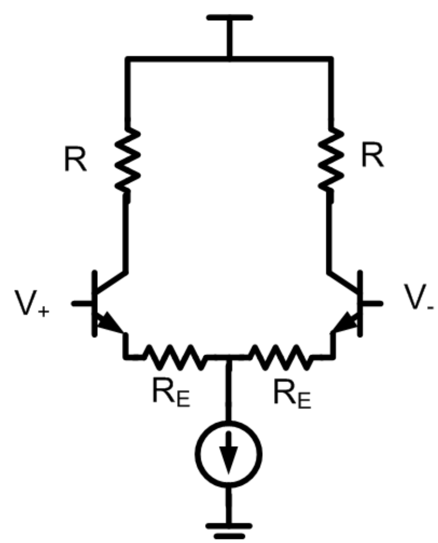
$$v_{out} = -g_m v_- R$$

- Sachant que l'entrée est $v_{in}=v_+-v_-$
  - Ou plutôt $2v_+$…

$$v_{out} = \frac{v_{in} g_m R}{2} \Rightarrow gain = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{g_m R}{2}$$

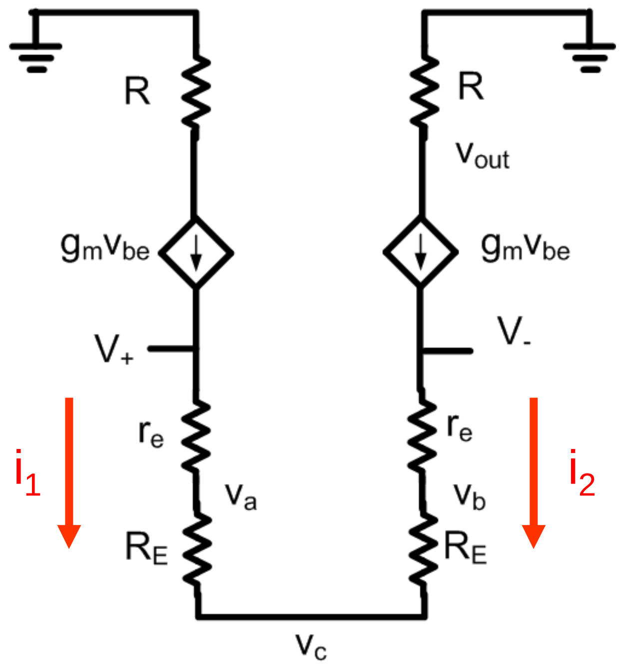
Amplificateurs différentiels

- Avec R_E, on peut échanger le gain contre:
  - La linéarité
  - La dépendance sur le g_m
- Semblable à l'émetteur commun:



Amplificateurs différentiels

- Le modèle petit signal (en T) ressemble à ceci:



$$i_1 = g_m(v_+ - v_a)$$

$$i_1 = \frac{v_a - v_c}{R_E}$$

$$i_2 = g_m(v_- - v_b)$$

$$i_2 = \frac{v_b - v_c}{R_E}$$

Amplificateurs différentiels

- Équation de courant dans v_c:

$$i_1 + i_2 = 0 \qquad \frac{v_a - v_c}{R_E} + \frac{v_b - v_c}{R_E} = 0$$

- Donc,

$$v_a + v_b - 2v_c = 0$$

- L'autre équation de courant dans v_c:

$$g_m(v_+ - v_a) + g_m(v_- - v_b) = g_m v_+ - g_m v_a - g_m v_+ - g_m v_b = 0$$

- Ça se simplifie:

$$v_+ - v_a + v_- - v_b = 0$$

Amplificateurs différentiels

- Avec $v_-=-v_+$:

$$v_+ - v_a + v_- - v_b = 0 \quad \Rightarrow \quad -v_a = v_b$$

- On revient à l'autre équation:

$$v_a + v_b - 2v_c = 0 \quad \Rightarrow \quad -2v_c = 0$$

- Donc:

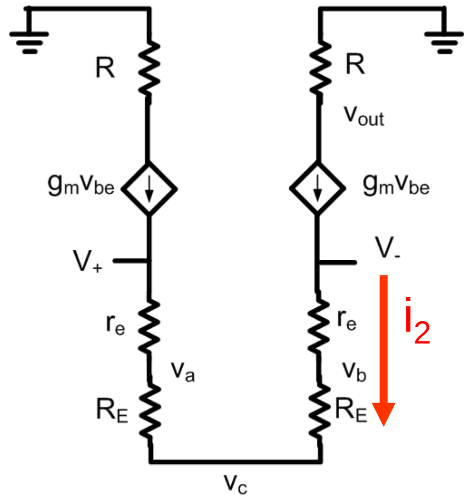
$$v_c = 0$$

On connait les liens entre v_a, v_b et v_c… retournons au gain

Amplificateurs différentiels

- La sortie se trouve du côté droit:

$$v_{out} = -i_2 R = -g_m \left(v_- - v_b\right) R$$



- On n'aime pas v_b:
  - On écrit une autre équation:

$$v_b = i_2 R_E = -g_m \left(v_- - v_b\right) R_E$$

- Et on isole v_b:

$$v_b = \frac{g_m R_E v_-}{\left(1 + g_m R_E\right)}$$

Amplificateurs différentiels

- On substitue:

$$v_{out} = -g_m(v_- - v_b)R \qquad v_b = \frac{g_m R_E v_-}{(1+g_m R_E)}$$

- Ça donne ceci:

$$v_{out} = -g_m\left(v_- - \frac{g_m R_E v_-}{(1+g_m R_E)}\right)R$$

- On simplifie:

$$v_{out} = -v_-\left(\frac{g_m R}{(1+g_m R_E)}\right) \Rightarrow \frac{v_{out}}{v_-} = -\frac{R}{R_E}$$

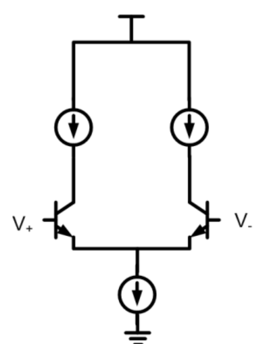
Amplificateurs différentiels

- Sachant que v_{in}, c'est $v_+ - v_-$ et que $v_- = -v_+$

$$\frac{v_{out}}{v_-} = -\frac{R}{R_E} \qquad gain = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R}{2R_E}$$

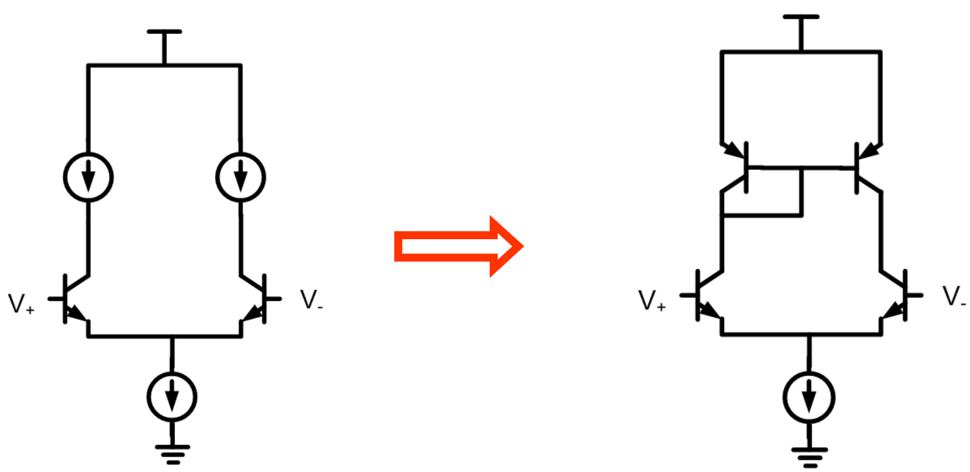
Amplificateurs différentiels

- Le gain d'un amplificateur différentiel dépend de R
- Pour obtenir un gain plus élevé, on peut augmenter R
    - Mais on risque de tomber en saturation
- Une façon d'obtenir un grand R:
    - Source de courant… r_{out} infini (idéalement)



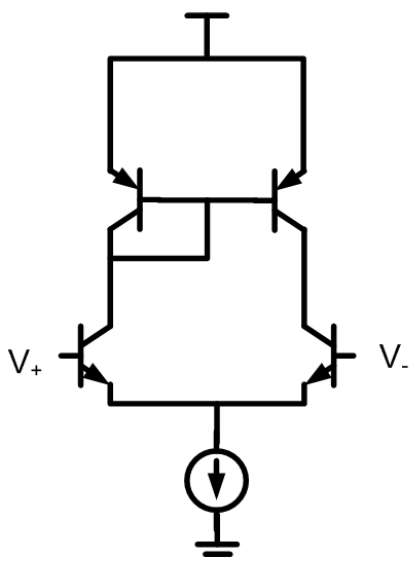
Amplificateurs différentiels

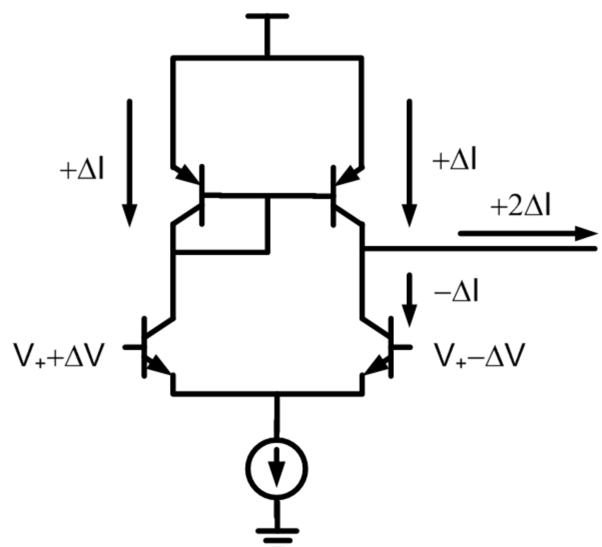
- Une façon élégante est d'utiliser une source de courant
  - La facon “élégante” de le faire c'est avec un miroir de courant



Amplificateurs différentiels

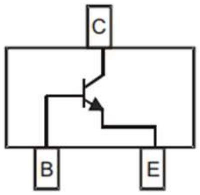
- La résistance R du gain sera r_o du miroir…
  - Le gain est aussi “doublé”…





Aspects pratiques

- Approche Naïve:
  - Utiliser des transistors simples

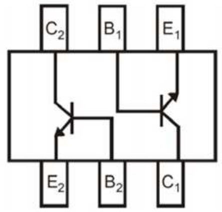


MMBT3904

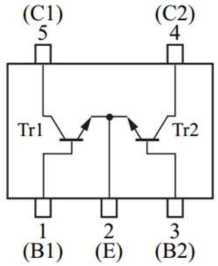
- Difficultés:
  - Ils n’ont pas les mêmes caractéristiques (β, notamment)
  - Ils ne sont pas affectés de la même manière par la température

Aspects pratiques

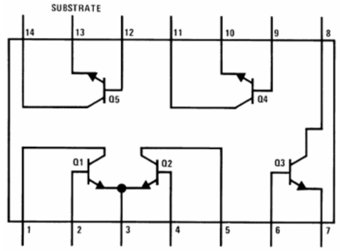
- On va donc préférer aller vers les matrices de transistors:
  - Certains sont des transistors indépendants
  - D'autres sont des paires différentielles
  - D'autres encore sont des combinaisons



BC847BS



DMC201A0



LM3046

Aspects pratiques

- Le gain de l'amplificateur dépend du β de la paire différentielle:
  - On choisit le courant qui maximise le β dans les 2 transistors de la paire
  - Le miroir de courant devra donc être la somme des deux courants