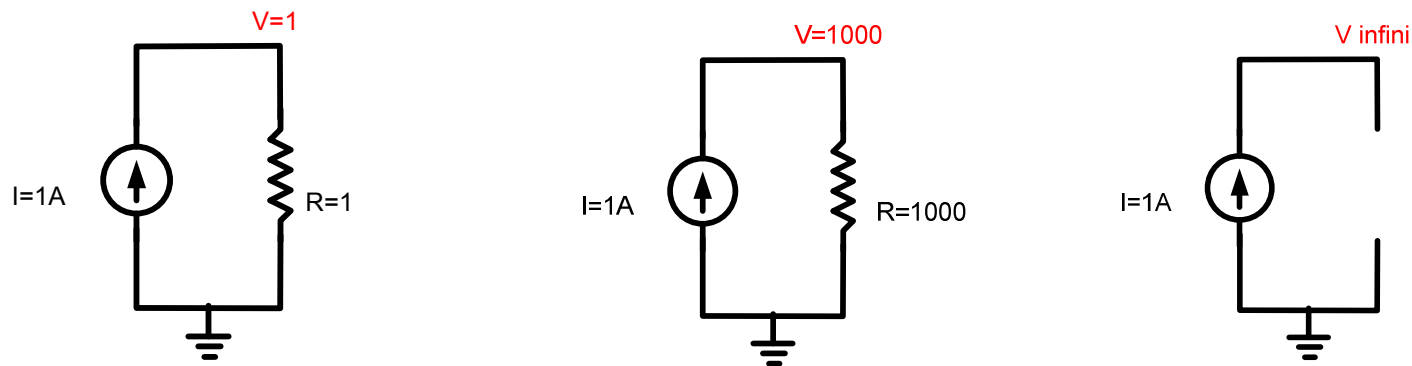


# Cours 10

Mirroirs de courant,  
amplificateur différentiels et  
amplificateurs à 2 étages

# Miroirs de courant

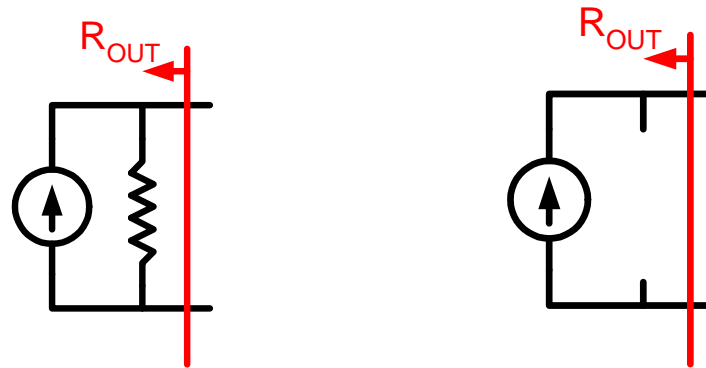
- Caractéristique d'une source de courant:
  - Fournir un courant de façon indépendante de la charge
  - Courant doit être indépendant de la tension à ses bornes
  - Il va fournir n'importe quelle tension requise pour fournir le courant



La source de courant idéale n'est pas très réaliste

# Miroirs de courant

- Pour modeliser le comportement reel d'une source, on utilise  $R_{OUT}$
- Dans le cas d'une source ideale:



- Quel que soit la tension le courant sera toujours le meme:

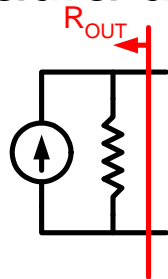
$$R_{OUT} = \frac{\Delta V}{\Delta I} \rightarrow \infty$$

# Miroirs de courant

- Pour une source ideale, le  $R_{OUT}$  est infini

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

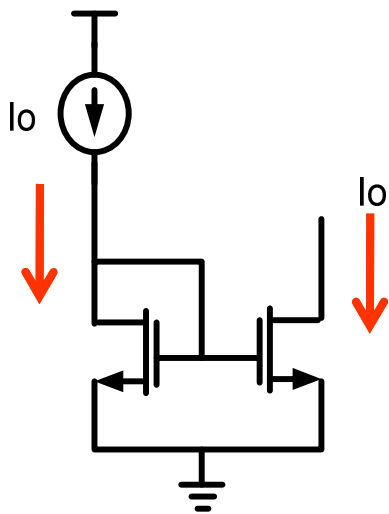
- Par exemple:  $V_{OUT}$  change de 1000X mais  $I_{OUT}$  ne change pas...
- Ca, c'est une source ideale
  - Une source reelle aura une dependance sur V
  - Elle aura donc un  $R_{OUT}$  qui n'est pas infini



Allons voir comment ca s'applique a nous...

# Miroirs de courant

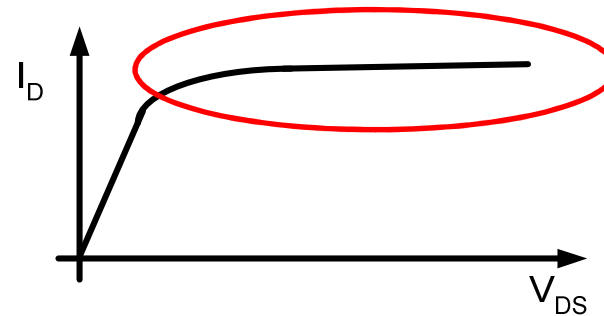
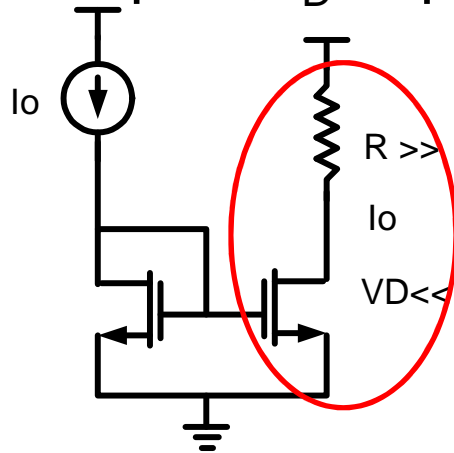
- On va vu les miroirs de courant:
  - En saturation,  $I_D$  ne depend que de  $V_{GS}$
  - La source de courant va “imposer” la tension  $V_{GS}$  necessaire pour le courant  $I_0$  voulu
  - Puisque les 2 NMOS ont le meme  $V_{GS}$ , ils auront le meme courant



$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2$$

# Miroirs de courant

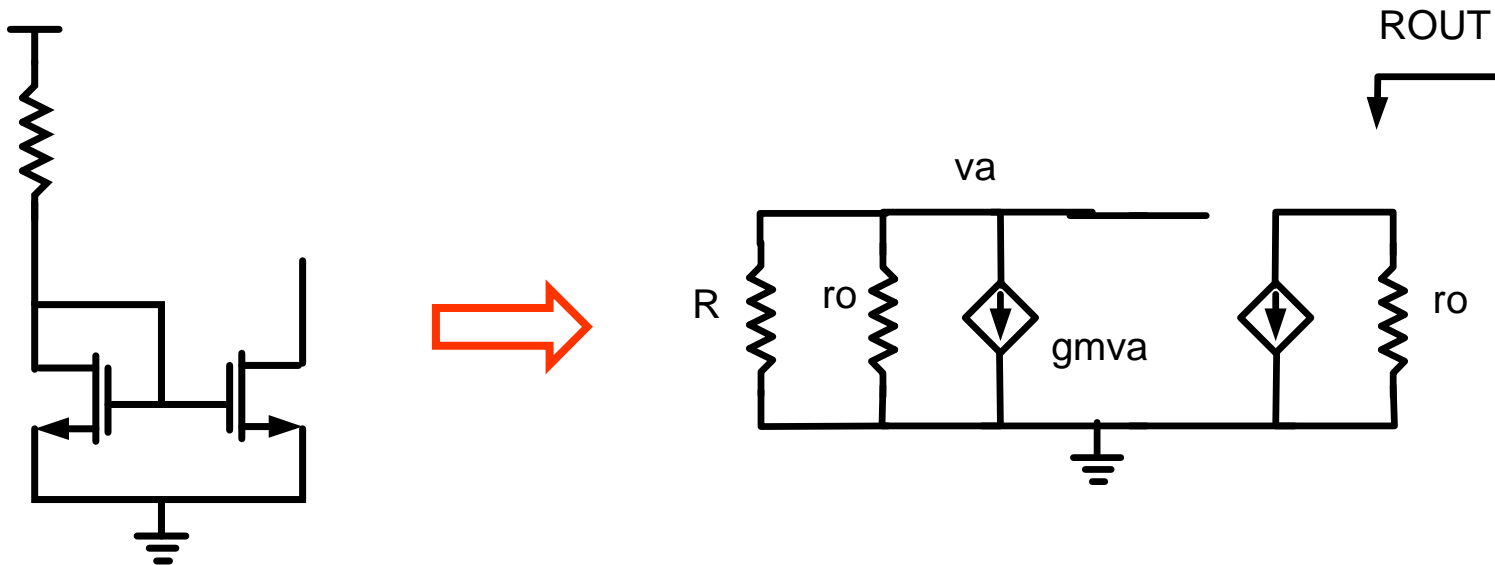
- Le courant de sortie ne sera pas toujours  $I_o$
- Par exemple:
  - Sa tension  $V_D$  pourrait le sortir de la saturation
  - De plus,  $I_D$  depend de  $V_{DS}$  en saturation



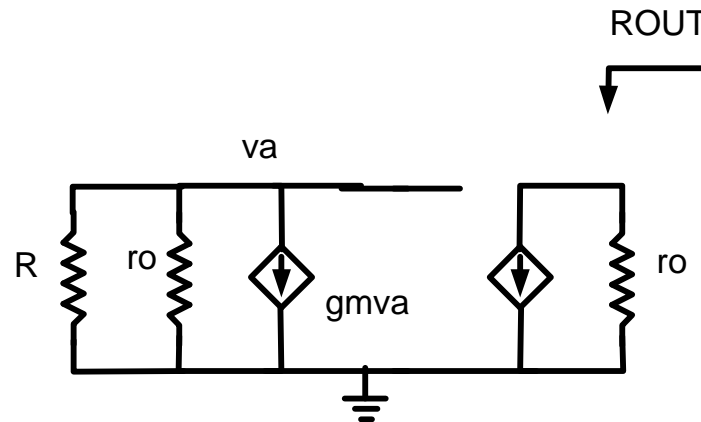
Allons voir ca de plus pres...

# Miroirs de courant

- Meme si les  $V_{GS}$  sont les memes, differents  $V_{DS} \rightarrow$  differents courants
- Comment different?
  - Ca depend du  $R_{OUT}$  du miroir de courant...
  - Allons calculer le  $R_{OUT}$



# Exercice de raisonnement

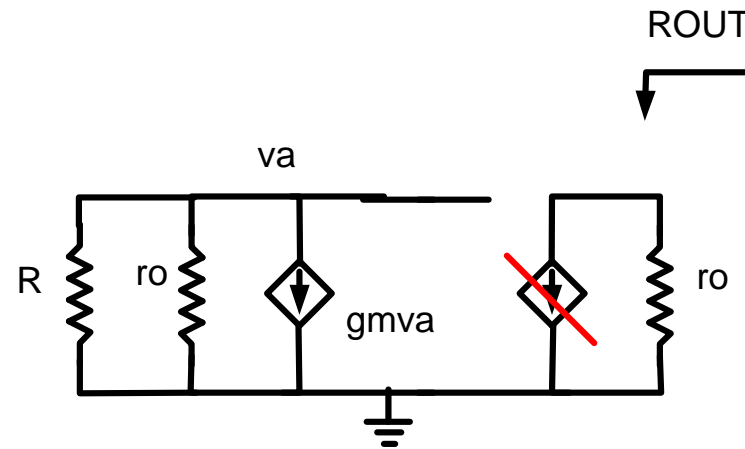


- Le  $R_{OUT}$  depend de  $r_o$  et de  $g_m v_{gs}$
- C'est quoi la valeur de  $g_m v_{gs}$  ( $g_m v_a$ )?
- Si  $v_a > 0$ , il y aura des charges positives
  - Le courant  $v_a$  SORTIR par R,  $r_o$  et par  $g_m v_a$
  - Eventuellement,  $v_a \rightarrow 0$
  - DONC...  $v_a = 0$



# Miroirs de courant

- La source dependante devient nulle



- La resistance vue de la sortie est  $r_o$ .
  - Donc,  $R_{OUT}$  du miroir c'est le  $r_o$  du transistor

# Miroirs de courant

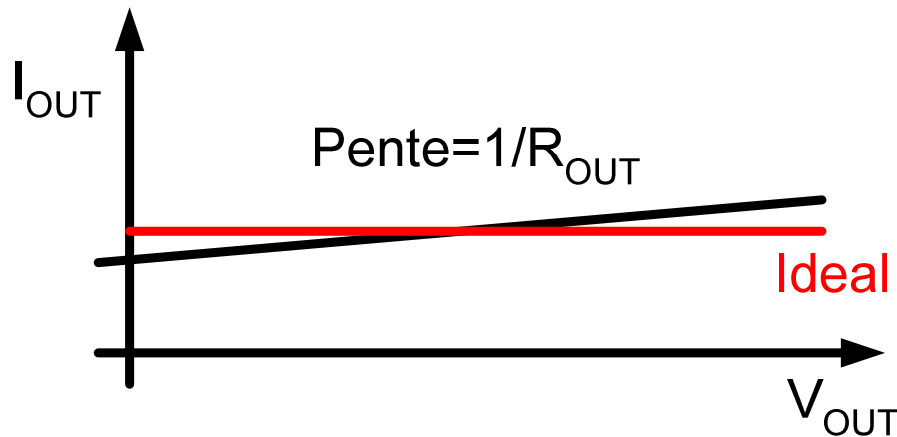
- Qu'est-ce que ca veut dire?
  - Imaginez qu'on ait  $V_D=1$  et  $I=1\text{mA}$
  - Si on changeait  $V_D$  de  $1\text{v}$ , le courant changerait de  $1\text{v}/r_o$ .

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

- Si  $r_o$  etait de  $50\text{K}$ ,  $\Delta I$  serait de  $20\mu\text{A}$ 
  - On fournirait  $1.02\text{mA}$  a la place de  $1\text{mA}$
  - Parfois c'est acceptable, parfois non...

# Miroirs de courant

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

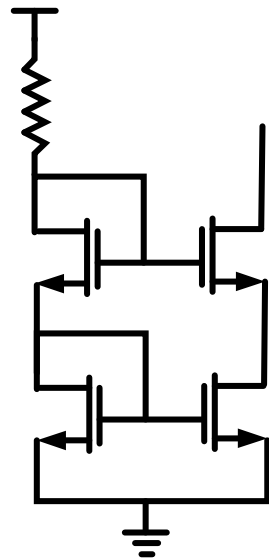


$$R_{OUT} = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

- Comment augmenter  $R_{OUT}$ ?

# Miroirs de courant Cascode

- La solution la plus commune: cascode.
- On a vu ça pour éliminer l'effet Miller:
  - Superposition de grille-commune sur source-commune
- Ici, c'est une superposition de 2 miroirs



Est-ce que c'est vraiment  
Meilleur?

Allons analyser ca...

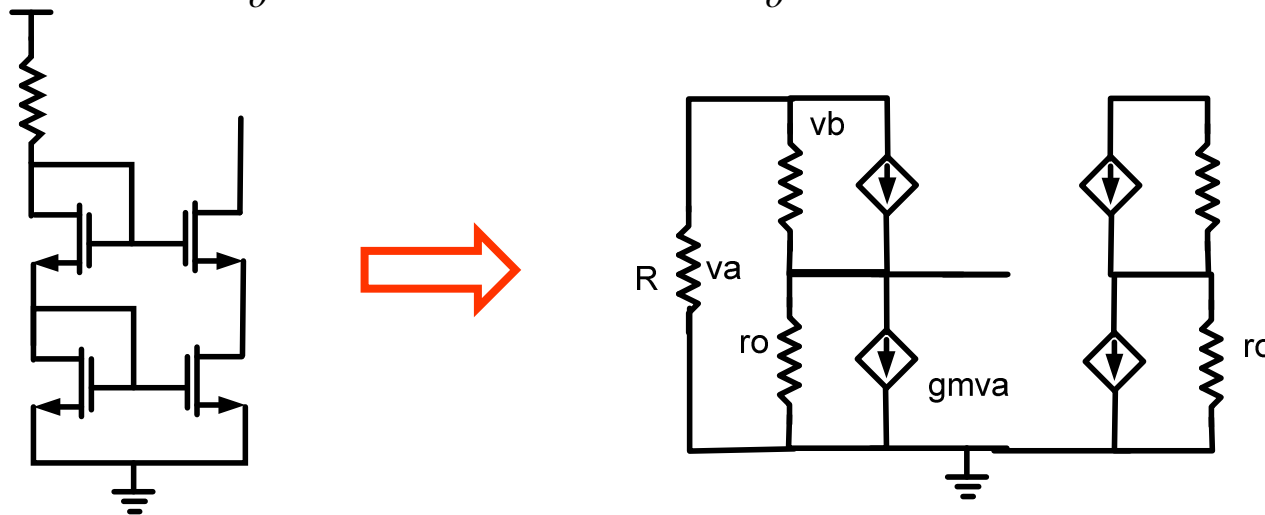
# Miroirs de courant Cascode

- On peut écrire l'équation au noeud  $v_b$ :

$$\frac{0 - v_b}{R} = \frac{v_b - v_a}{r_o} + g_m (v_b - v_a)$$

- Et l'équation au noeud  $v_a$ :

$$\frac{v_b - v_a}{r_o} + g_m (v_b - v_a) = \frac{v_a}{r_o} + g_m v_a$$



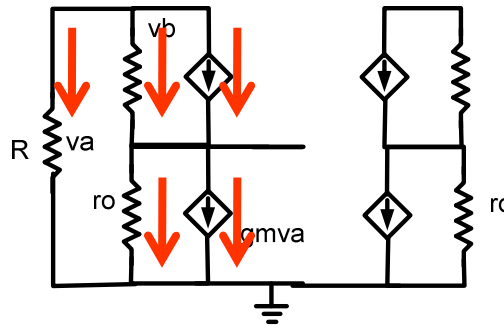
# Miroirs de courant Cascode

- On examine ca de plus proche:

$$\frac{0 - v_b}{R} = \frac{v_b - v_a}{r_o} + g_m (v_b - v_a)$$

$$\frac{v_b - v_a}{r_o} + g_m (v_b - v_a) = \frac{v_a}{r_o} + g_m v_a$$

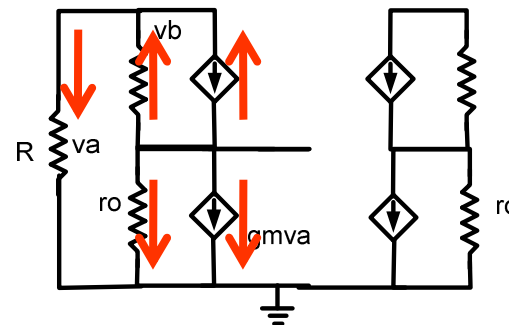
- Si  $v_b > v_a$



$v_b$  se decharge de tous les bords

$v_a$  fera la meme chose

- Si  $v_a > v_b$ :



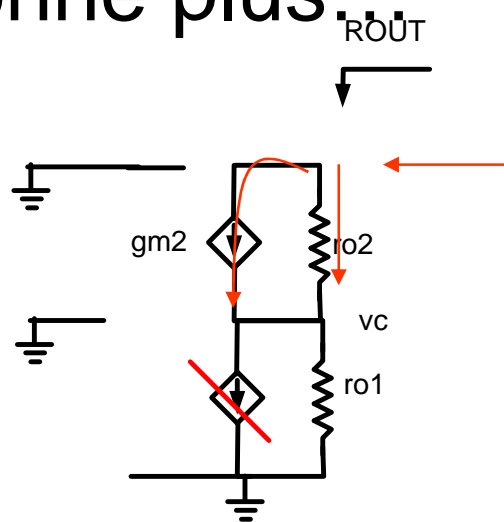
$v_a$  se decharge de tous les bords

$v_b$  fera la meme chose

Donc,  $v_a = v_b = 0$

# Miroirs de courant Cascode

- Puisque  $v_a=0$ , la source dependante du bas ne fonctionne plus.



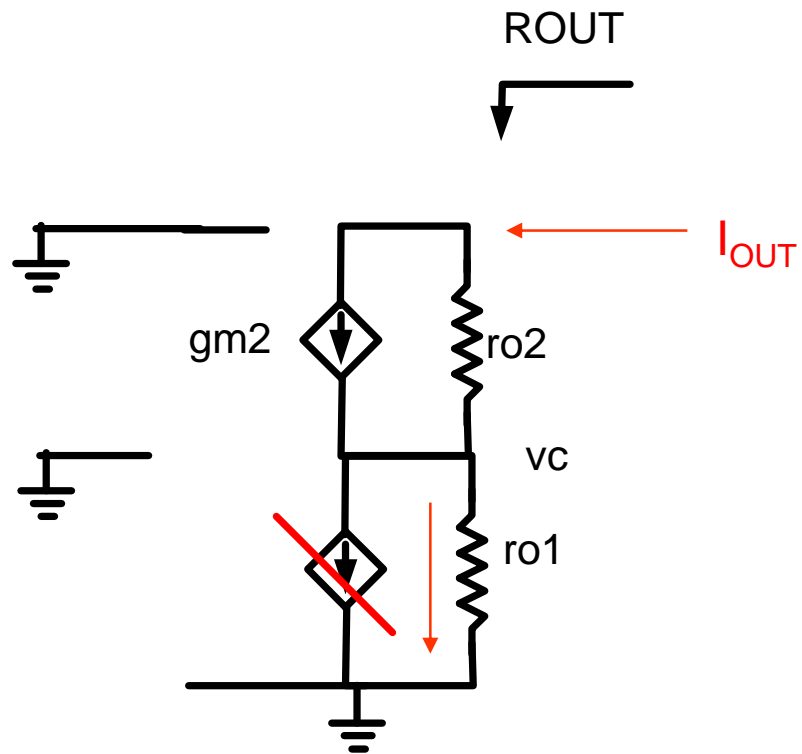
- On écrit l'équation à la sortie

$$i_{out} = g_{m2} (0 - v_c) + \frac{v_{out} - v_c}{r_{o2}}$$

C'est quoi  $V_C$ ?

# Miroirs de courant Cascode

- Ecrivons une 2e equation:



$$i_{out} = \frac{v_c}{r_{o1}}$$



$$i_{out} r_{o1} = v_c$$



# Miroirs de courant Cascode

- En substituant  $V_C$ , on obtient ceci:

$$i_{out} = g_{m2}(0 - v_c) + \frac{v_{out} - v_c}{r_{o2}} \Rightarrow i_{out} = g_{m2}(0 - \underline{i_{out} r_{o1}}) + \frac{v_{out} - \underline{i_{out} r_{o1}}}{r_{o2}}$$

- Il ne reste que de l'algebre:

$$R_{OUT} = \frac{v_{out}}{i_{out}} = (r_{o1} + r_{o2} + g_{m2} r_{o1} r_{o2})$$

- $r_{o1} + r_{o2}$  est negligeeable vs  $g_{m2} r_{o1} r_{o2}$

$$R_{OUT} \cong (g_{m2} r_{o2}) r_{o1}$$

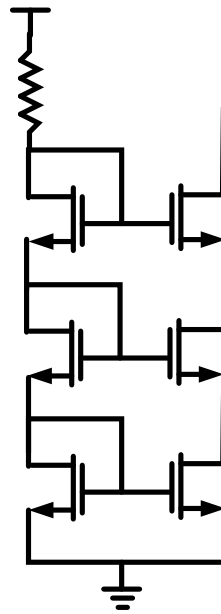
On a donc obtenu le  $R_{OUT}$  ...qu'est-ce que ca veut dire?

# Miroirs de courant Cascode

- Le  $R_{OUT}$  du miroir simple etait  $r_o$ .
- Le  $R_{OUT}$  du miroir cascode est  $g_m r_{o1} r_{o2}$ 
  - On a multiplie l'ancien  $R_{OUT}$  par  $g_m r_o$
- Utilisons des chiffres:
  - $g_m = 0.01$  et  $r_{o1} = r_{o2} = 50K$
  - Ca donne un  $R_{OUT}$  de 25M
- Si  $V_D$  changeait de 1v, le courant changerait de:  $0.04\mu A$ 
  - Dans le cas precedent, ca changeait de  $20\mu A$

# Miroirs de courant Cascode

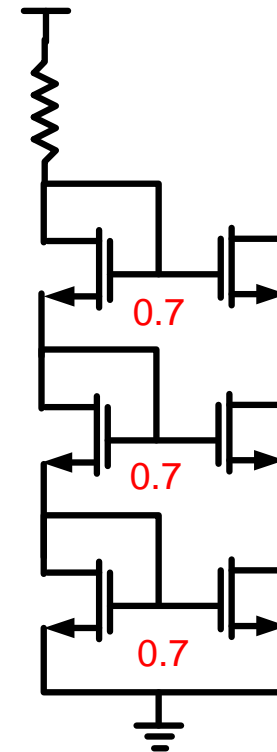
- En utilisant le meme raisonnement, on peut aussi utiliser un triple-cascode.
- Ca permet de gagner un autre facteur de  $g_m r_o$



On pourrait donc penser a utiliser beaucoup de cascodes...

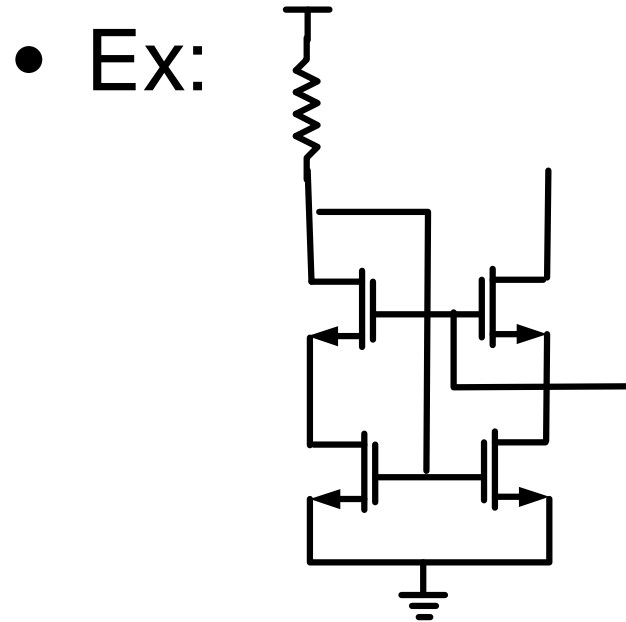
# Miroirs de courant Cascode

- Un des gros problemes c'est la "perte de tension".
- Pour operer, chaque miroir a besoin de 0.7v pour sortir du cutoff
- Rappel: connexion "diode"
  - Si moins que 0.7, cut-off
  - Si plus que 0.7, saturation



# Miroirs de courant Cascode

- Les technologies modernes utilisent autour de 1.2v
  - Avec 1 cascode, on n'est déjà plus capable...
- Certaines solutions ont été proposées

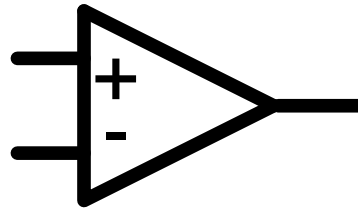


Passons maintenant à d'autres choses...

# Amplificateurs différentiels

- Les amplificateurs idéaux ont:

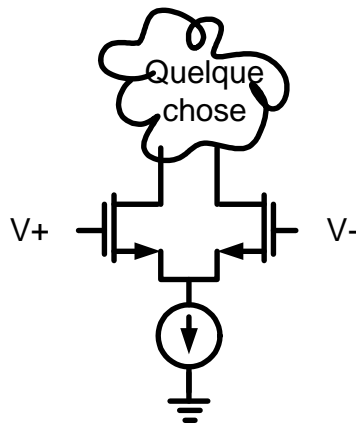
- 2 entrées
- 1 Sortie



- Les configurations jusqu'à présent n'ont qu'UNE seule entrée
- Il y a sûrement quelque chose qu'on ne connaît pas...

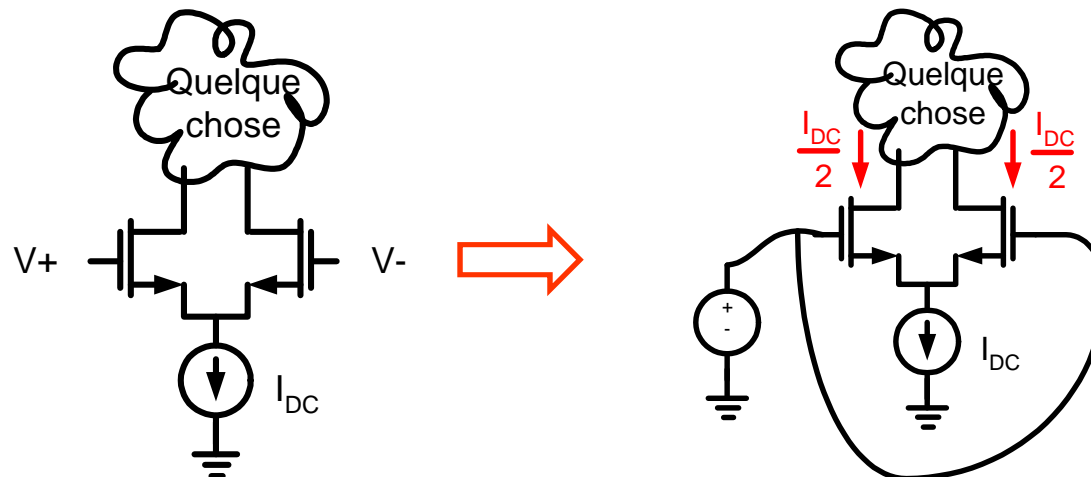
# Paires Differentielles

- Ce qu'on ne connait pas, ce sont les “amplificateurs differentiels”
- Les amplificateurs differentiels sont bases sur les “paires differentielles”
  - Paire de transistor identique connectes a la source
  - Commencons par examiner ca...



# Paired Differential

- Commencons par une analyse qualitative
- Le courant  $I_{DC}$  est divisé entre 2 transistors
  - Si les transistors sont en saturation et si les  $V_{GS}$  sont pareils, les courants seront pareils
  - $I_{DC}$  sera divisé de façon egale de chaque bord...

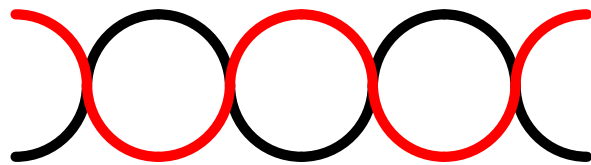




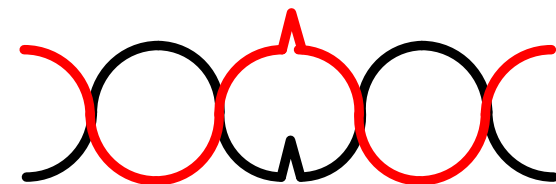
# Paires Differentielles

- Pour analyse le systeme, on va dire que le signal est symmetrique:
  - Quand l'un augmente, l'autre baisse
  - Quand l'un baisse, l'autre augmente
- On appelle ca un “signal differentiel”
  - Moins susceptible au bruit commun
  - Couplage affecte les 2 fils de la meme facon

$V_-$   
 $V_+$

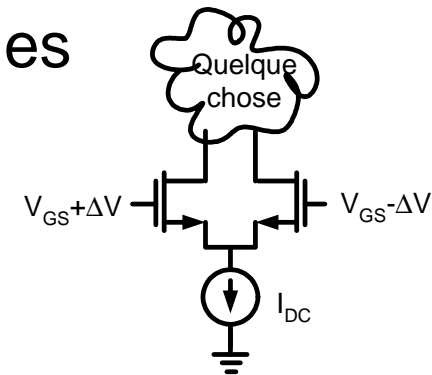


$V_-$   
 $V_+$



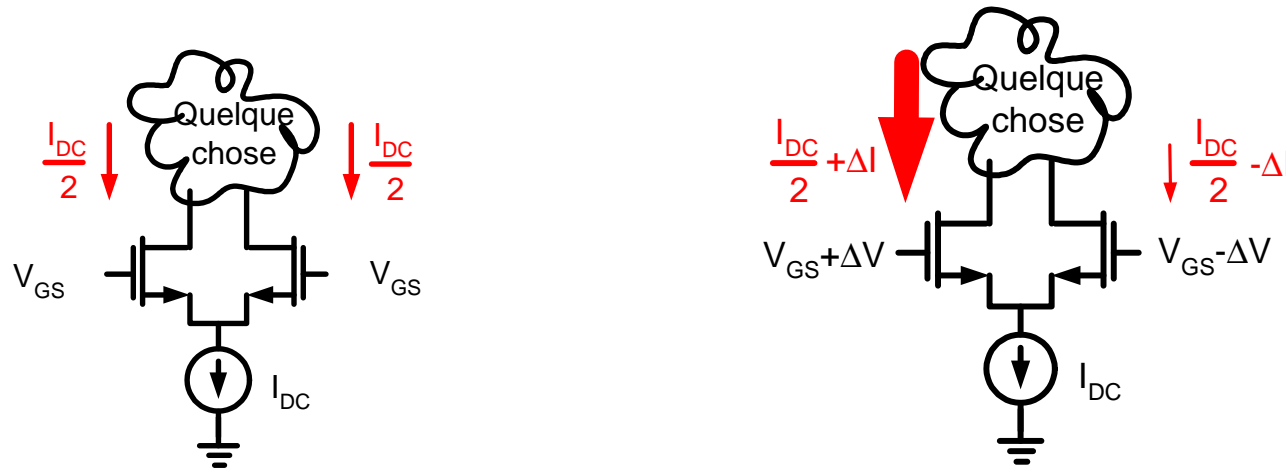
# Paires Differentielles

- Disons qu'ils ont le meme  $V_{GS}$  au debut
- Si l'un monte de  $\Delta V$ , l'autre baisse de  $\Delta V$ 
  - Les changements sont symmetriques
- Quand un bord augmente:
  - Il augmente son  $V_{GS}$
  - Donc, il prend plus de courant
- L'autre bord baisse (signal differentiel)
  - Il baisse son  $V_{GS}$
  - Il prend donc moins de courant



# Paired Differential

- Here how the currents change with a change of  $V_G$ :



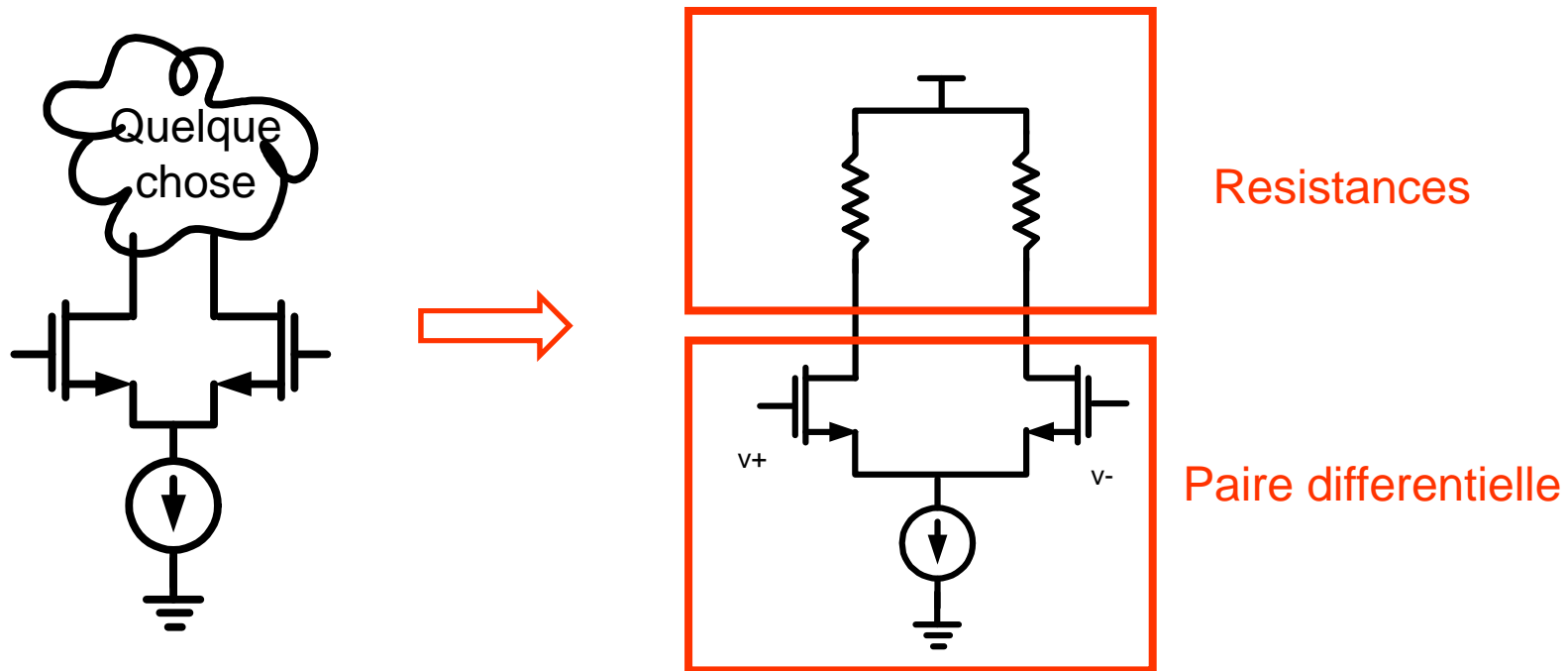
Les  $V_{GS}$  sont égaux

$V_{GS}$  à gauche est plus élevée

Allons voir les amplificateurs différentiels maintenant

# Amplificateurs différentiels

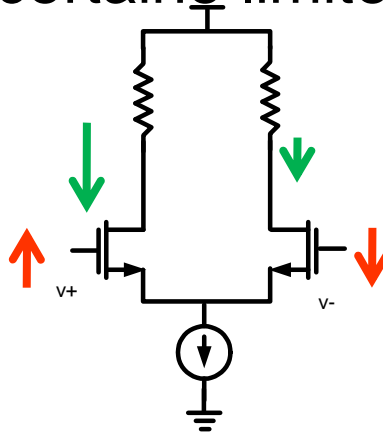
- Un amplificateur différentiel, c'est une paire différentielle avec des résistances...



Comment est-ce que ça fonctionne?

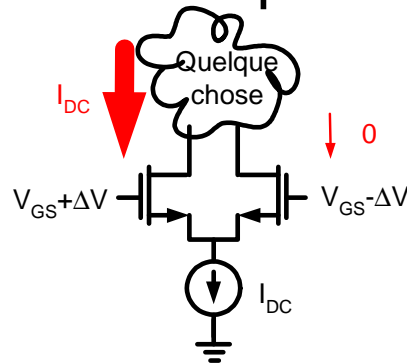
# Amplificateurs différentiels

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



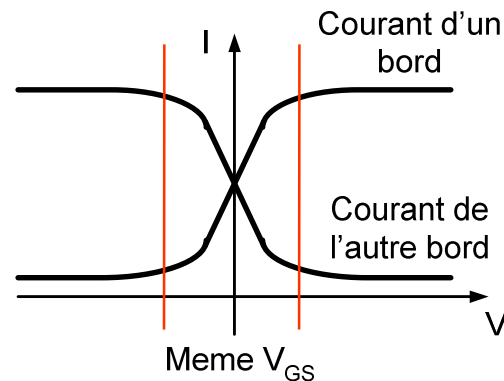
# Amplificateurs différentiels

- Si la tension est trop grande, on arrive au point où  $I_{DC}$  passe juste d'un bord.
- A ce point, notre sortie ne change plus:
  - Pas bon pour les amplificateurs
- A ce point, même si on change  $V_G$ , 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  $V$  sont proches, ca marche
- Quand les 2  $V$  sont loins, ca sature
  - Il y a donc un « point critique » qu'il ne faut pas dépasser

# Amplificateurs différentiels

- Ce point est déterminé principalement par:
    - Taille des transistors
    - $V_{GS}$  (le niveau DC, pas le signal)
    - Courant  $I_{DC}$
- $$\Delta V = \sqrt{\frac{2I}{\mu C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)}}$$
- Ex: Gros W/L. Une petite différence  $V_+ - V_-$  peut faire saturer l'amplificateur
  - Ex: Petit W/L. La différence  $V_+ - V_-$  pourrait ne jamais faire saturer le courant...

La dérivation est dans le livre...



# Amplificateurs différentiels

- Pour faire un ampli, on ne veut jamais que le courant passe seulement d'un bord
  - Raison:  $\Delta V_{GS}$  ne donnera plus  $\Delta I$
  - On n'aura plus d'amplification (pas bon)
- Mais, c'est voulu dans certaines applications non-linéaires...
  - On parle de la notamment de la commutation
  - L'exemple le plus important, ce sont les portes logique...

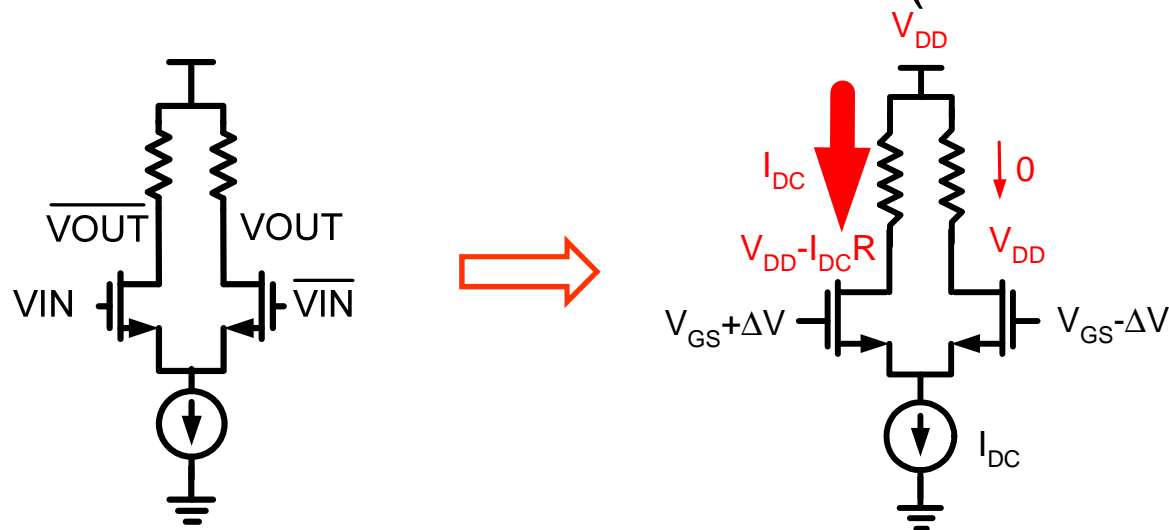
On ouvre une parenthèse « hors cours »

# Portes logiques MCML

- Les systemes de communication modernes vont a 10Gb/s (tres vite)
- Les portes logiques classiques ne sont pas capables de reagir assez rapidement
- On utilise souvent la technique MCML:
  - MOS Current-Mode Logic
  - Base sur les paires differentielles

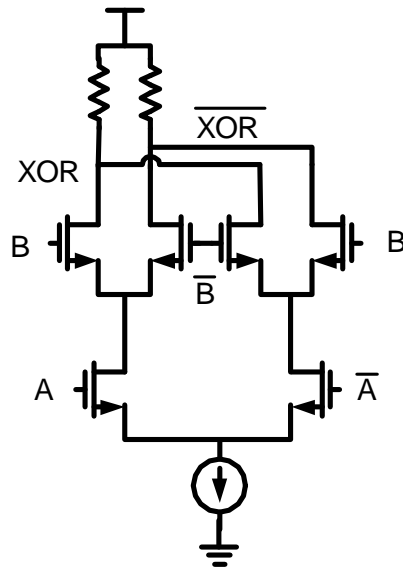
# Portes logiques MCML

- Pensez a l'amplificateur differentiel:
  - On peut s'en servir comme inverseur (porte NON)
  - Si  $\Delta V$  (entre  $V_{IN}$  et son inverse) est assez grand, une branche aura tout le courant et l'autre aura 0
  - Donc, la tension de l'un CHUTERA de  $I \cdot R$
  - L'autre tension montera a  $V_{DD}$  (aucun courant)



# Portes logiques MCML

- Pour faire des portes plus compliquées, on combine les paires différentielles:



Il y a 3 paires différentielles ici

Le courant est dirigé par la paire du bas

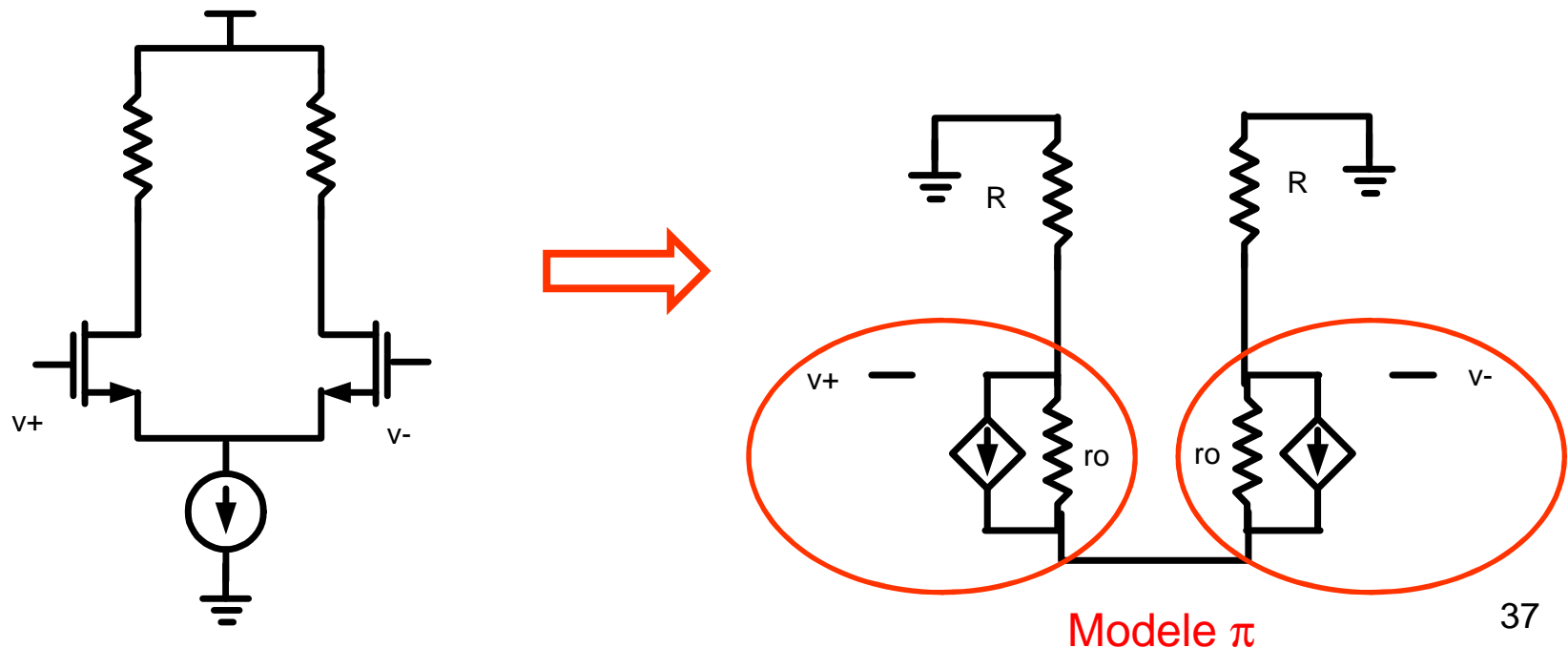
Le courant passe ensuite par une des 2 paires du haut

L'équivalent existe aussi en BJT... on parle du CML

On ferme la parenthèse « hors cours »

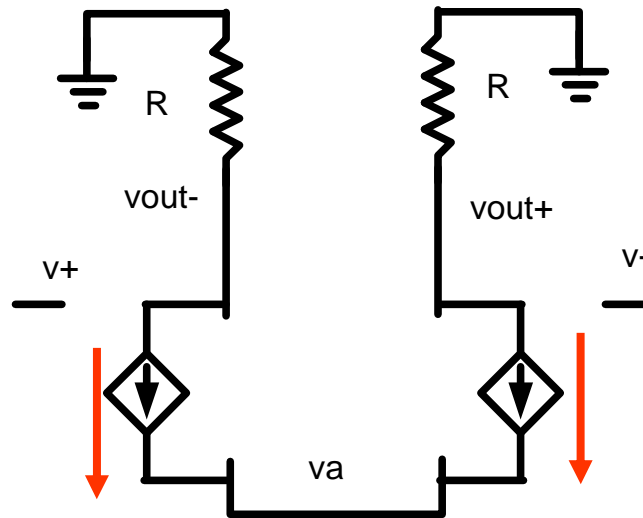
# Amplificateurs différentiels

- Retournons aux amplificateurs...
- Analysons le comportement petit signal d'un amplificateur différentiel:



# Amplificateurs différentiels

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



- On écrit les équations de courant à  $v_a$ :

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

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

# Amplificateurs différentiels

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

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

- On développe le tout:

$$\underline{g_m}v_+ - \underline{g_m}v_a + \underline{g_m}v_- - \underline{g_m}v_a = 0$$

- On voit que  $g_m$  n'a aucun impact:

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

# Amplificateurs différentiels

- Dans un amplificateur différentiel, on s'attend à ce que  $v_+ = -v_-$

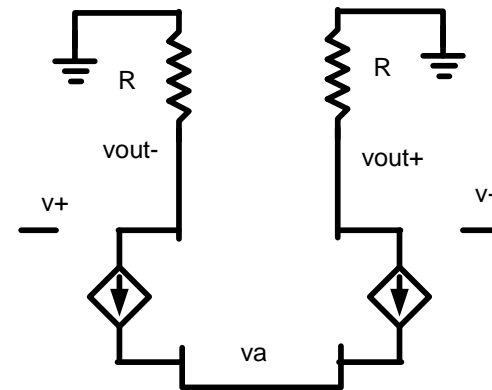
$$\cancel{v_+} - v_a + \cancel{v_-} - v_a = 0 \quad \Rightarrow \quad v_a = 0$$

- Il devient clair que le noeud  $v_a$  est 0.
- La tension de sortie est donnée par:

$$v_{out-} = -i_1 R \quad v_{out+} = -i_2 R$$

- Donc

$$v_{out-} = -g_m v_+ R \quad v_{out+} = -g_m v_- R$$





# Amplificateurs différentiels

- La sortie est aussi différentielle:
  - C'est la différence entre les  $v_{out+}$  et  $v_{out-}$

$$v_{out} = v_{out+} - v_{out-} = (-g_m v_- R) - (-g_m v_+ R)$$

- On substitue  $v_-$  par  $-v_+$

$$v_{out+} - v_{out-} = (g_m v_+ R) + (g_m v_+ R) \quad \Rightarrow \quad \frac{v_{out+} - v_{out-}}{v_+} = 2g_m R$$

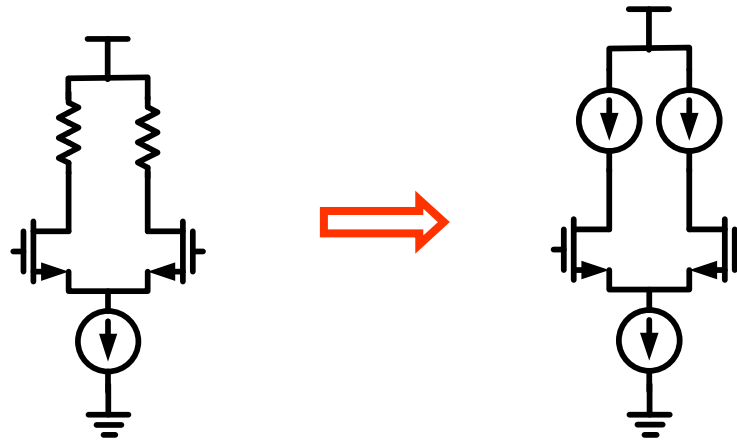
- On peut écrire le gain:

$$Gain = \frac{v_{out+} - v_{out-}}{v_+ - v_-} = \frac{v_{out+} - v_{out-}}{2v_+} = g_m R$$

Ressemble beaucoup a la source commune...

# Amplificateurs différentiels

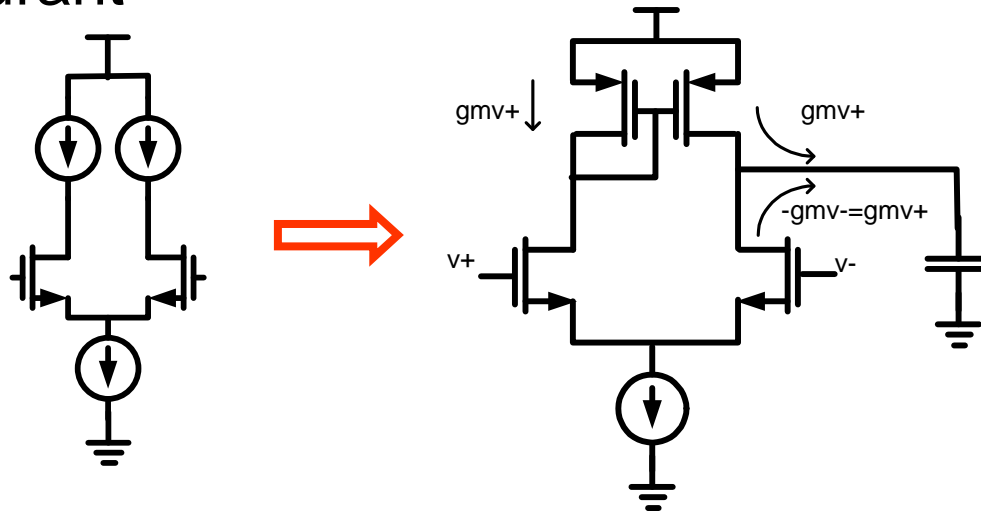
- On voit que le gain est déterminé par  $g_m R$
- Pour avoir un gain plus élevé, on peut utiliser des sources de courant
  - Un peu comme avec les sources communes...



Entree différentielle et sortie différentielle

# Amplificateurs différentiels

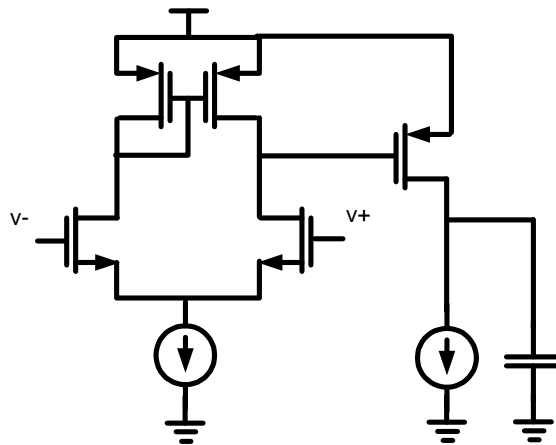
- Dans les ampli idéaux, on avait 2 entrées et 1 sortie:
  - Comment changer notre amplificateur différentiel?
  - La façon “élégante” de le faire c’est avec un miroir de courant



On converge peu à peu vers un amplificateur opérationnel idéal

# Amplificateurs a 2 etages

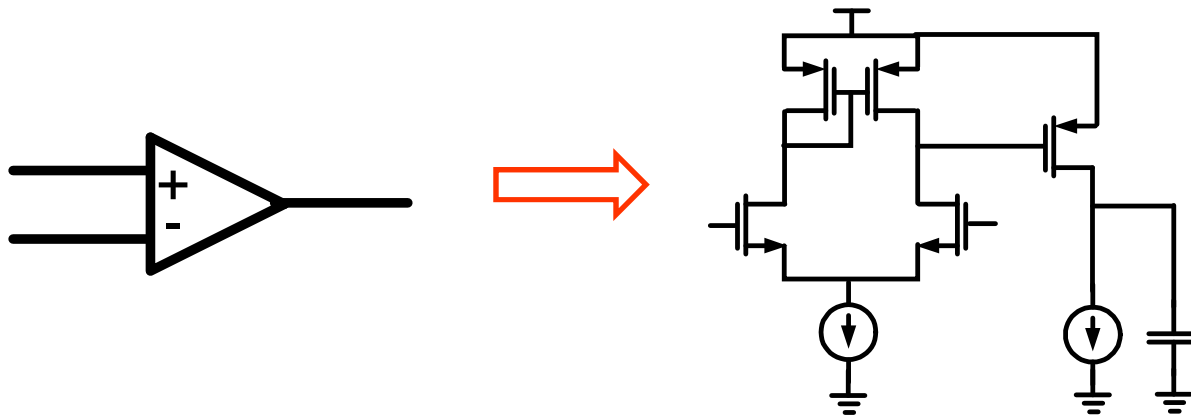
- Ca nous donne un amplificateur avec:
  - 2 entrees et 1 sortie
  - Un gain quand meme eleve...
- Pourrait-on augmenter le gain?
  - Une approche classique: combiner le differentiel avec source commune



Note: Mon  $V_+$  et  $V_-$  ont change de cote... la source commune change la polarite de la sortie

# Amplificateurs a 2 etages

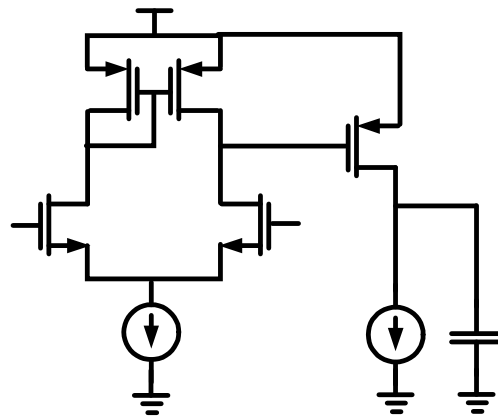
- L'etage d'entrée est un amplificateur differentiel
- On ajoute un autre etage de gain
- Ca commence a ressembler de plus en plus a un amplificateur operationnel ideal



(diagramme incomplet!)

# Amplificateurs a 2 etages

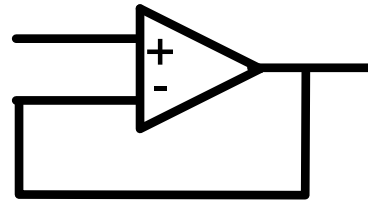
- Le circuit precedent est incomplet...
- Pour voir ce qu'il manque, il va falloir retourner en DS2...
- On ouvre une grosse parenthese...



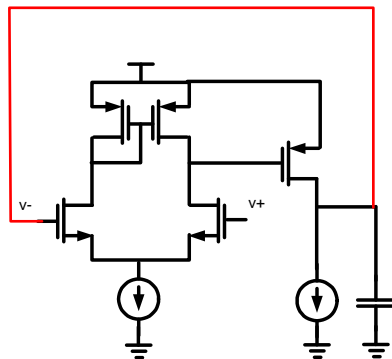
Pourquoi est-ce que c'est incomplet?

# Amplificateurs a 2 etages

- On sait qu'un amplificateur peut etre connecte comme ceci:



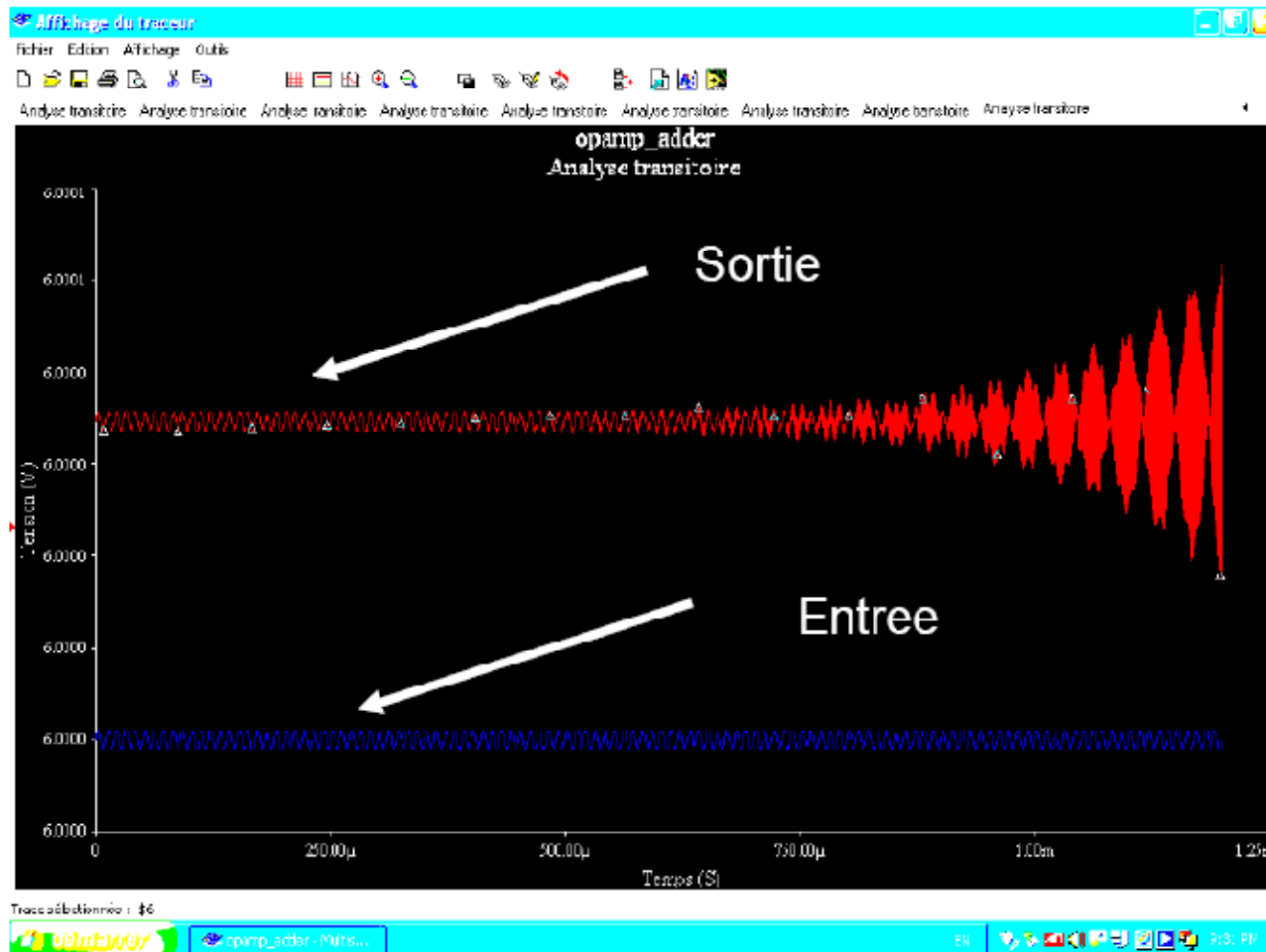
- C'est un buffer: sortie=entrée (gain=1)
- Faisons ca avec notre ampli:



Dessignons ca dans MULTISIM  
et simulons le...

# Amplificateurs a 2 etages

- L'entree ne ressemble pas a la sortie...



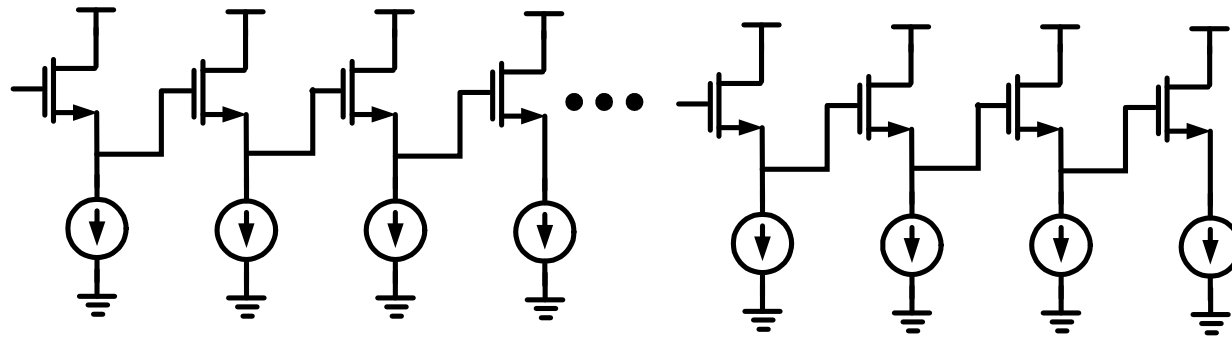


# Amplificateurs a 2 etages

- Qu'est-ce qui vient d'arriver?
  - Je ne sais pas!
- Il va falloir voir ca en plus de details...
- Pour comprendre ca, on va voir ca de 2 facons differentes:
  - Une analyse intuitive
  - Une analyse mathematique

# Amplificateurs a 2 etages

- Premier aspect: le temps
- Imaginez des milliers de drain communs:



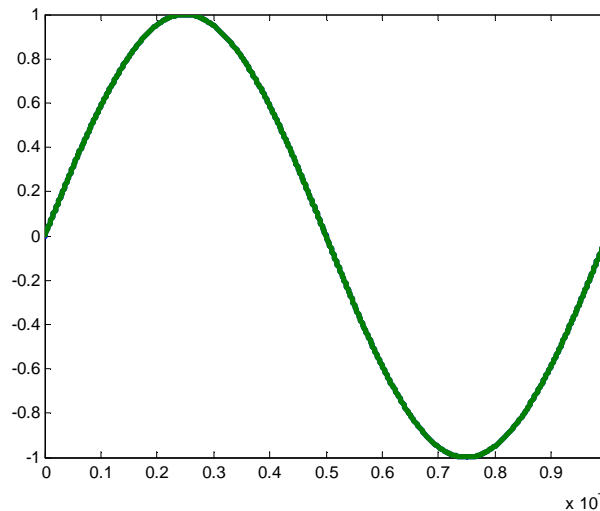
- Si j'entre un signal a l'entrée, ca prend  $\Delta t$  avant de sortir de l'autre bout...
  - Il y a un delai (dephasage) entre l'entrée et la sortie

# Amplificateurs a 2 etages

- Pourquoi? On a des C qui doivent etre charges et decharges...
  - Imaginons par exemple que ce delai est  $\Delta t = 1\mu s$
- Donc, si j'entre  $V_A$ , il se retrouvera a la sortie apres  $1\mu s$
- Allons voir ce que ca represente...

# Amplificateurs a 2 etages

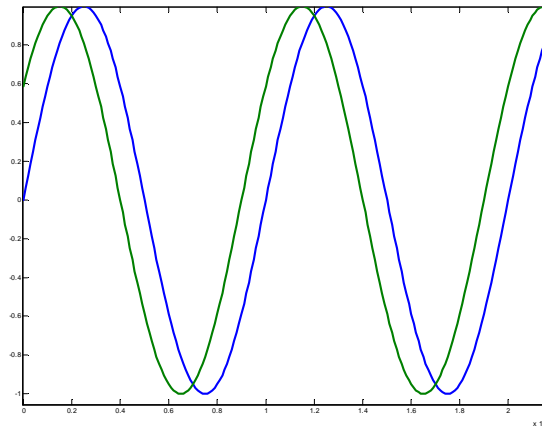
- Mettons 1KHz a l'entree du systeme
  - Apres  $1\mu\text{s}$ , le signal se retrouve a la sortie
- Dans cette figure il y a 2 signaux:



La difference entree/sortie ne se voit pas a l'oeil nu...

# Amplificateurs a 2 etages

- Mettons un signal de 100KHz a l'entree
  - Le signal se retrouvera a la sortie  $1\mu\text{s}$  apres...

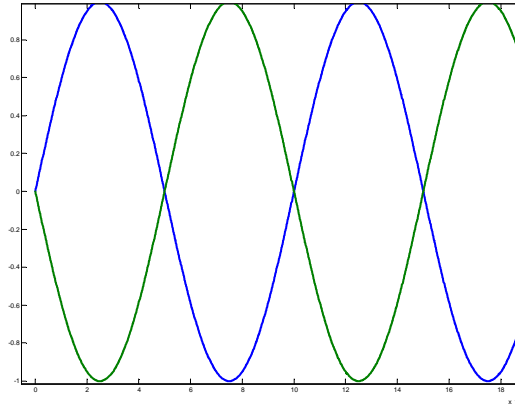


- On commence a voir un decalage:
  - Ce decalage s'exprime en secondes ou en radians

C'est soit un « delai » ou un « dephasage »

# Amplificateurs a 2 etages

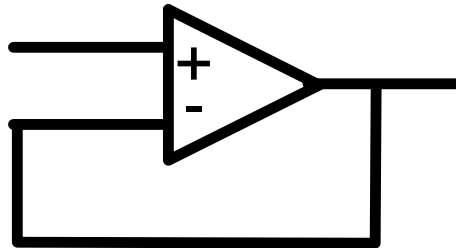
- Si on augmentait encore la vitesse a l'entrée (500KHz), on aurait ceci:



- L'entrée et la sortie sont dephases de 180 degres
  - On peut aussi dire que  $V_{OUT} = -V_{IN}$

# Amplificateurs a 2 etages

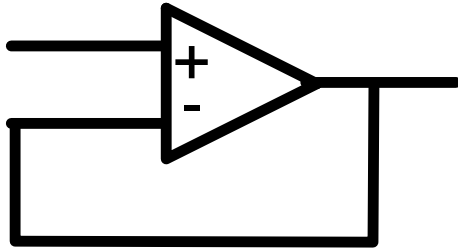
- Ca s'applique pour TOUT amplificateur
- Prenons le cas de l'amplificateur différentiel
- Imaginez qu'on decide de le connecter en buffer...



Avec cette connexion, on s'attendrait a ce que  $V_{OUT} = V_{IN}$

# Amplificateurs a 2 etages

- Quand l'entrée est LENTE, on aurait ceci:



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

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

$$v_{out} = Av_+ - Av_{out}$$

$$\frac{v_{out}}{v_+} = \frac{A}{(1+A)} \cong 1$$

- Le feedback negatif **STABILISE**
  - Le gain est de 1

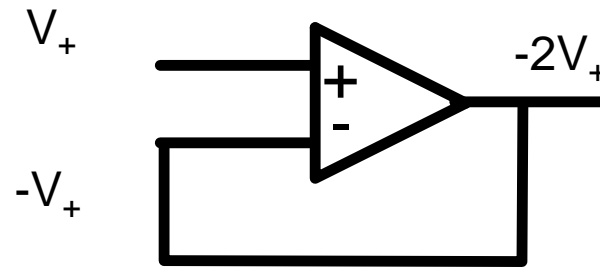


# Amplificateurs a 2 etages

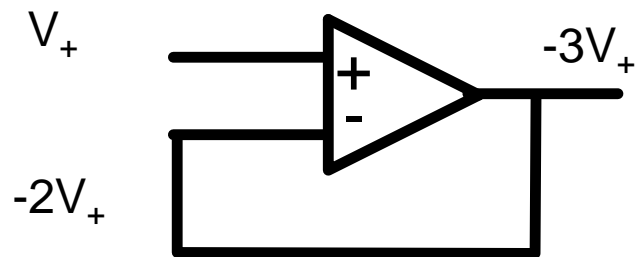
- Quand l'entrée est 500KHz,  $V_{OUT}=V_- = -V_+$

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

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



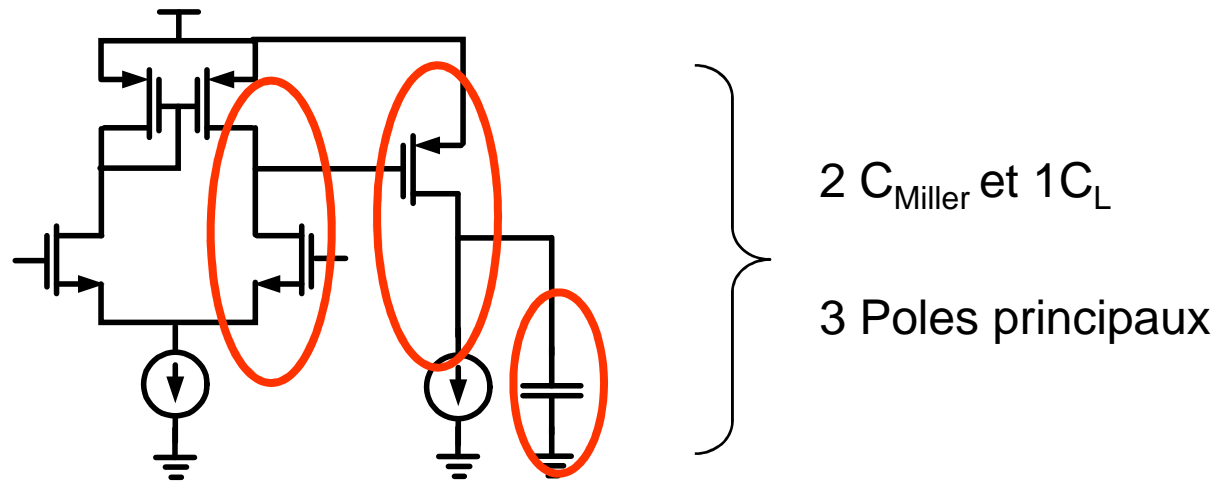
- A la place de se soustraire,  $v_+$  et  $v_-$  s'additionnent.



La sortie va continuer a grossir: c'est INSTABLE

# Amplificateurs a 2 etages

- Voyons ca mathematiquement.
- On reprend le diagramme de l'amplificateur:



# Amplificateurs a 2 etages

- Le  $T(s)$  d'un amplificateur peut etre represente comme ceci:

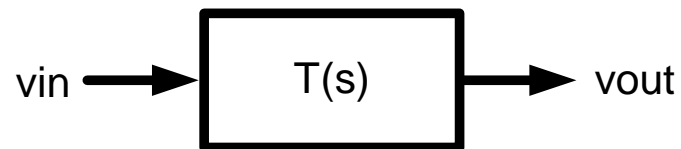
$$T(s) = \frac{GainDC}{\left(\frac{s}{\omega_1} + 1\right)\left(\frac{s}{\omega_2} + 1\right)\left(\frac{s}{\omega_3} + 1\right)}$$

- On pourrait le re-ecrire sous une forme (un peu) plus familiere:

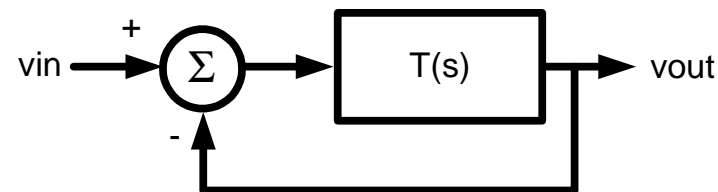
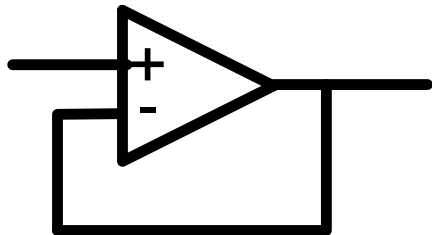
$$T(s) = \frac{\omega_1 \omega_2 \omega_3 GainDC}{(s + \omega_1)(s + \omega_2)(s + \omega_3)}$$

# Amplificateurs a 2 etages

- Un amplificateur peut etre dessine comme



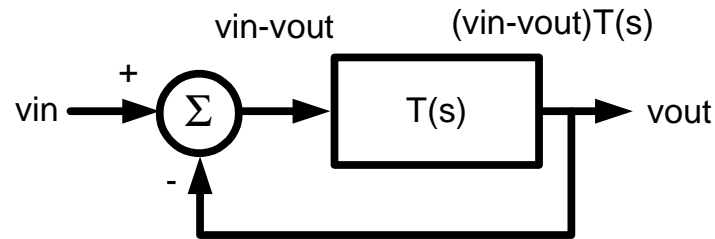
- Un amplificateur avec feedback negatif, c'est comme



# Amplificateurs a 2 etages

- Rappel:

- En feedback negatif, la fonction de transfert change



$$(vin - vout)T(s) = vout$$

- On manipule un peu et ca donne:

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

# Amplificateurs a 2 etages

- En substituant  $T(s)$ , on obtient:

$$\frac{T(s)}{1+T(s)} = \frac{\frac{\omega_1 \omega_2 \omega_3 \text{GainDC}}{(s + \omega_1)(s + \omega_2)(s + \omega_3)}}{1 + \frac{\omega_1 \omega_2 \omega_3 \text{GainDC}}{(s + \omega_1)(s + \omega_2)(s + \omega_3)}}$$

- Avec un peu d'algebre:

$$\frac{\omega_1 \omega_2 \omega_3 \text{GainDC}}{(s + \omega_1)(s + \omega_2)(s + \omega_3) + \omega_1 \omega_2 \omega_3 \text{GainDC}}$$

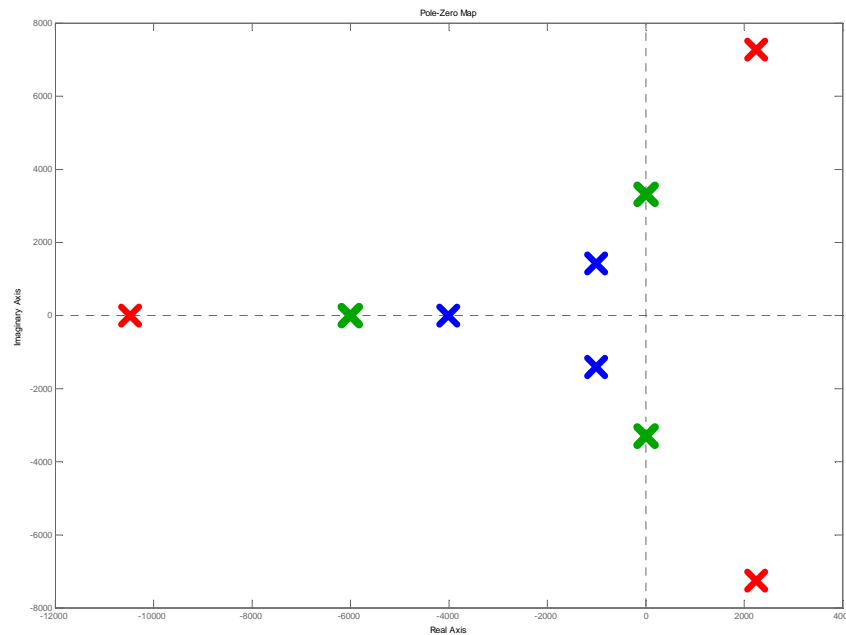
# Amplificateurs a 2 etages

- En regardant le resultat, on remarque:

$$\frac{\omega_1 \omega_2 \omega_3 \text{GainDC}}{(s + \omega_1)(s + \omega_2)(s + \omega_3) + \omega_1 \omega_2 \omega_3 \text{GainDC}}$$

- 1) Les poles ne sont plus a  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  et  $\omega_3$
  - 2) Leur position depend du gain DC
- Essayons quelques valeurs de gain et voyons ou les poles se trouvent...

# Amplificateurs a 2 etages



Bleu: gain faible

Vert: gain medium

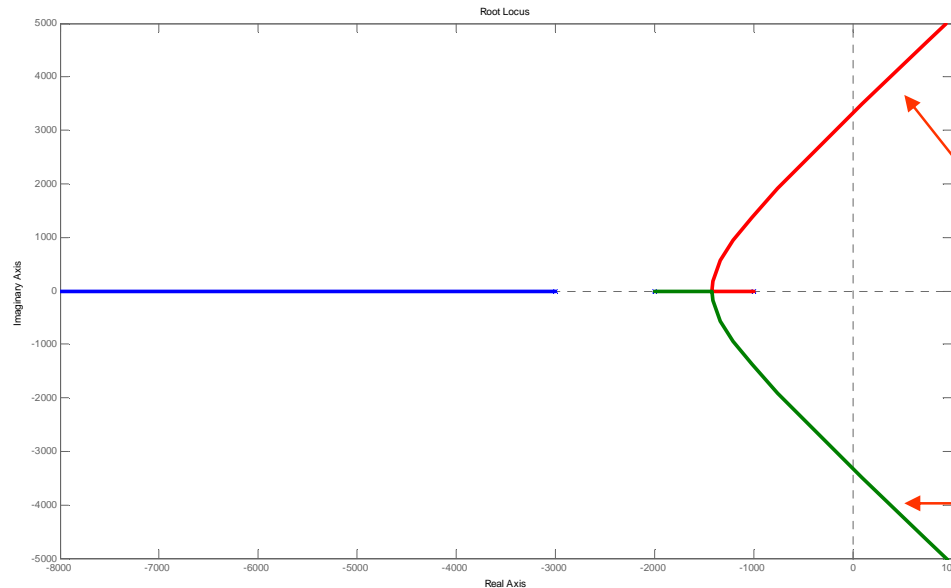
Rouge: gain eleve

- On voit qu'avec un gain de 100 (rouge), les poles se trouvent a droite (instable)
  - Rappel: La position des poles determine la stabilite



# Amplificateurs a 2 etages

- Pour simplifier le travail, une technique de systemes asservis s'appelle Root Locus
- Ca montre le changement de position des poles avec un changement de gain:



Chaque couleur  
represente  
un des 3 poles

Instable

# Amplificateurs a 2 etages

- On peut aussi comprendre d'une autre facon...
- L'instabilite est du a quoi?
  - 1) Le delai entre l'entree et la sortie qui donne un dephasage de 180 degres ( $V_{OUT} = - V_{IN}$ )
  - 2) L'amplificateur qui me donne un GAIN a cette frequence pour donner un effet qui grossit
- Par exemple, si le gain etait 0 a cette frequence, le systeme serait stable

Il ne fonctionnerait pas a cette vitesse, mais il serait STABLE

# Amplificateurs a 2 etages

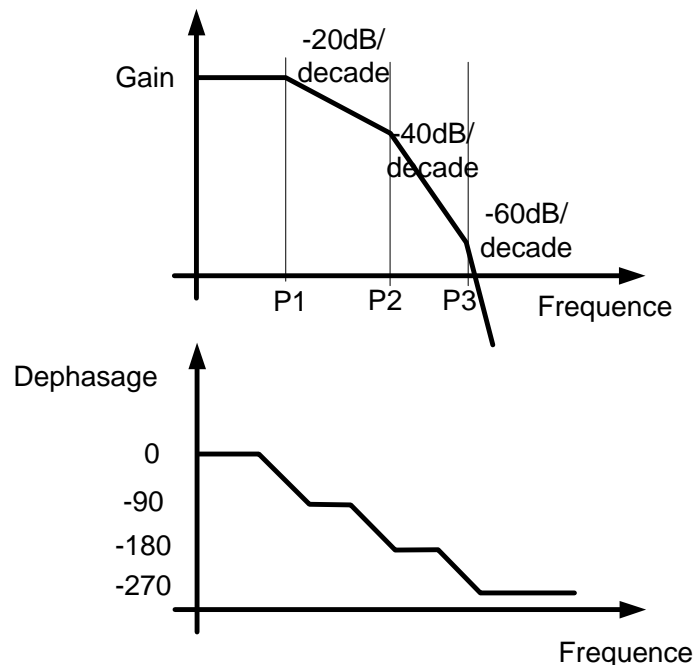
- L'idee est bonne... Comment fait-on ca?
- On connait une facon de voir comment le gain change avec la frequence.
- On connait une facon de voir comment le dephasage change avec la frequence.
  - Diagramme de Bode
- Si le dephasage=180 et gain "faible", on serait stable

La valeur du gain requis, c'est MOINS que 1

# Amplificateurs a 2 etages

- Rappel:

- Un pole baisse de  $-20\text{dB/decade}$  “pour toujours”
- Un pole dephase de  $-45\text{dB/decade}$  de  $P/10$  jusqu’a  $10*P$



Il y a un moment ou dephasage=180

Si le gain  $< 1$  a ce point, ca va etre stable

Sinon, ce sera instable quand connecte en feedback negatif

# Amplificateurs a 2 etages

- On devrait comprendre que la stabilite depend de:
  - Position des poles (en boucle ouverte)
  - Gain DC
  - Frequence de dephasage 180
- Au fond, le gain DC et les poles vont determiner le gain quand dephasage 180
- Si gain=1 ou plus, le systeme est instable

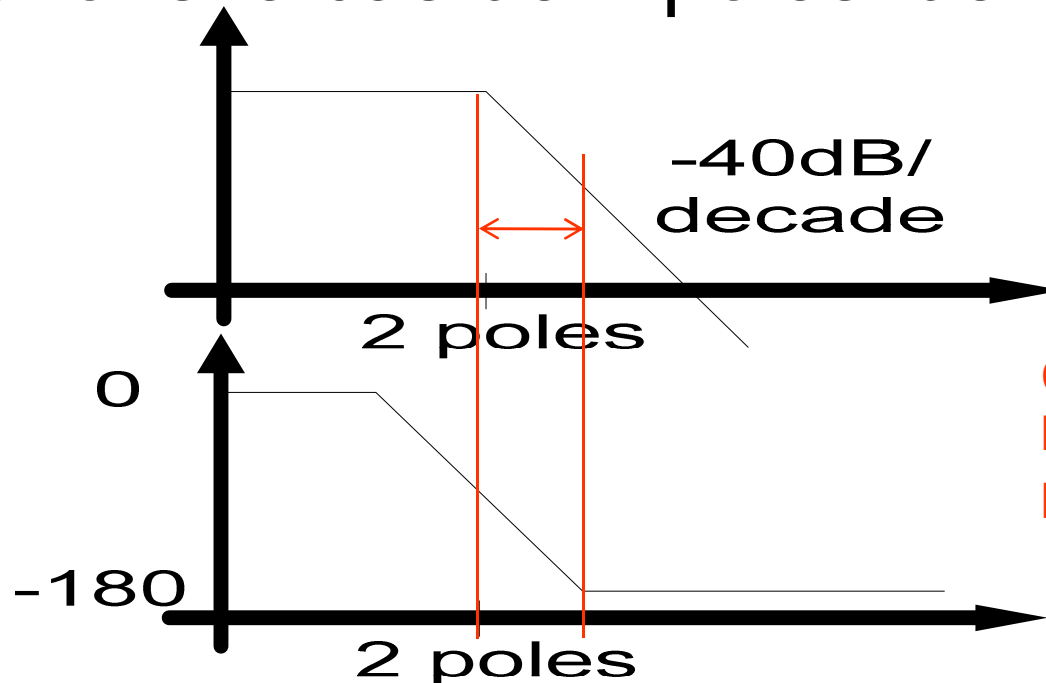
Ca c'est parce que ca arrete d'amplifier

# Amplificateurs a 2 etages

- Comment faire pour stabiliser le systeme?
  - Baisser le gain DC
  - Ajuster le circuit
- La premiere solution est triviale
  - C'est meme un peu poche...
- On va se concentrer sur la 2e solution

# Amplificateurs a 2 etages

- Qu'est-ce qui fait qu'un systeme est instable?
  - C'est quand les poles sont rapproches...
- Prenons le cas de 2 poles identiques



Ca ne lui donne pas beaucoup de « temps » pour chuter de gain

# Amplificateurs a 2 etages

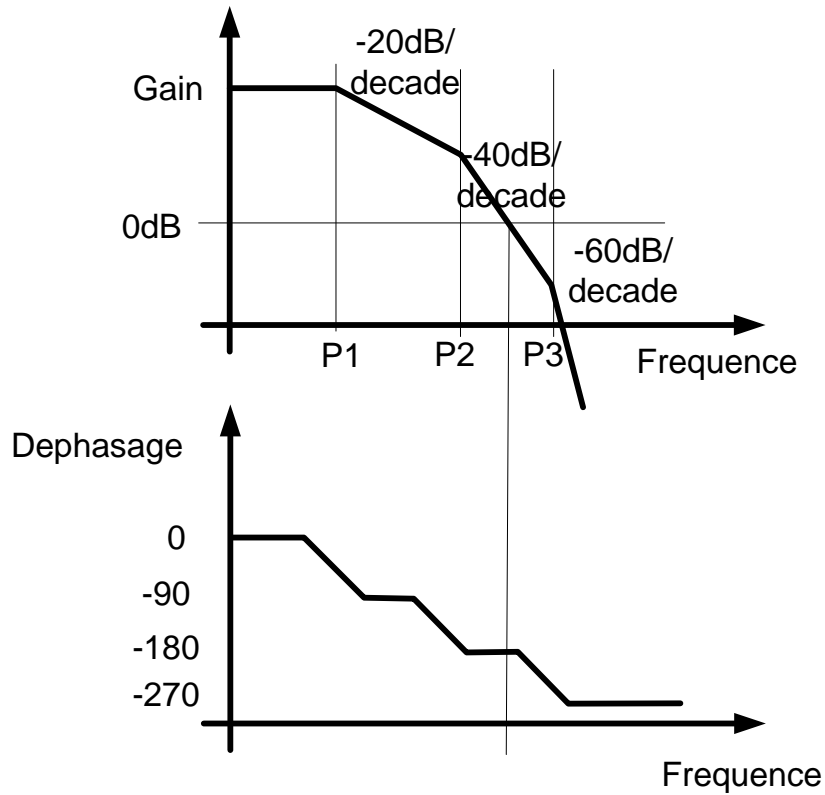
- Le dephasage commence a 1 decade avant le pole et finit 1 decade apres
- La chute commence AU pole et ne finit jamais...
  - Ca donne seulement 1 decade de chute de gain
  - Durant la decade, le gain doit chuter a moins que 1
- Si les poles sont proches, ca ne laisse pas assez de « temps »

Pourquoi c'est mieux quand ils sont loins?

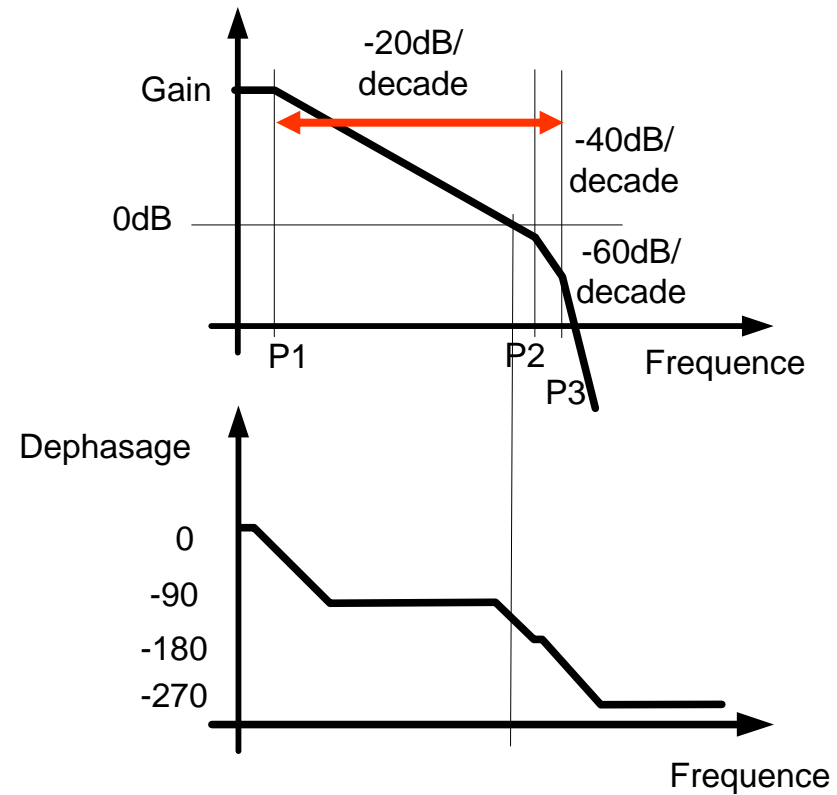


# Amplificateurs a 2 etages

Plus de « temps » pour faire chuter le gain



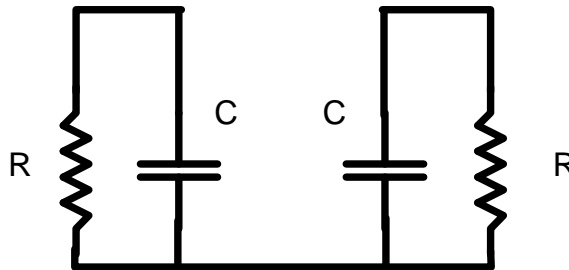
Poles rapproches



Poles éloignes

# Amplificateurs a 2 etages

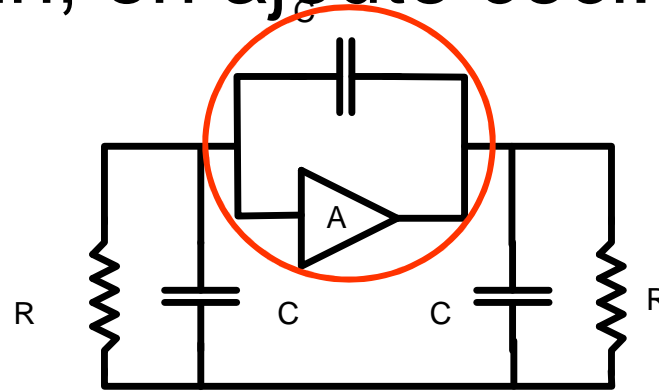
- On va utiliser la technique par separation de poles (“pole splitting”)
- Imaginez qu’on a ce circuit:



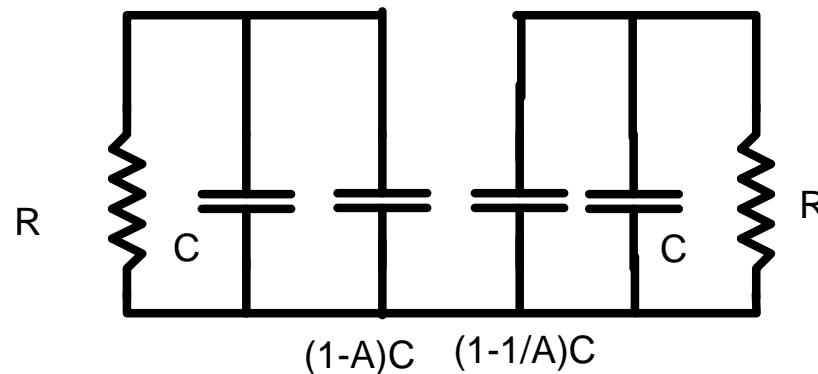
- Les 2 poles se trouvent a  $-CR$  (separation = 0)
- On aimerait maintenant les separer...

# Amplificateurs a 2 etages

- Pour le fun, on ajoute ceci:

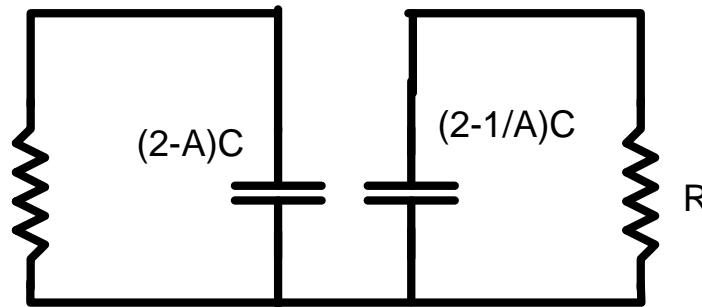


- Avec le theoreme de Miller, ca devient:



# Amplificateurs a 2 etages

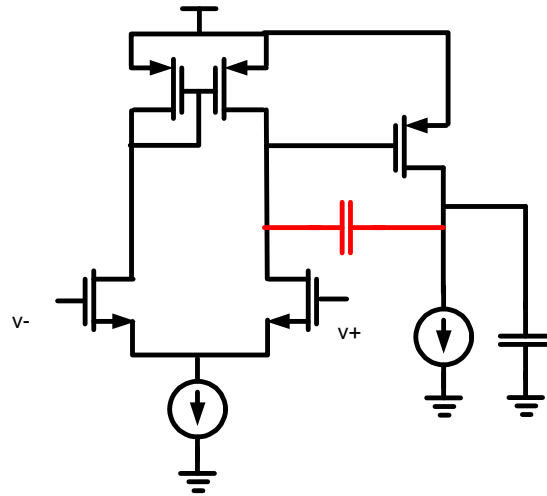
- On combine les condensateurs en parallele:



- Avec un gain  $A=-100$ :
  - Un pole est a  $102RC$
  - L'autre pole est a  $2.01RC$
- On vient de separer les poles...

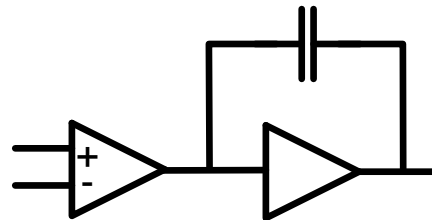
# Amplificateurs a 2 etages

- Alors, si on voulait separer les poles, on pourrait introduire une capacite de Miller



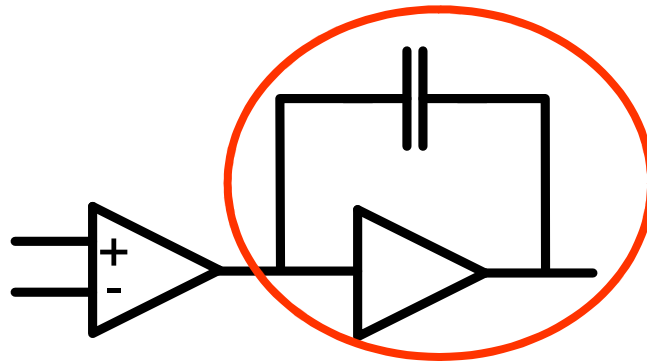
On l'introduit entre l'entree et la sortie de la source commune

- C'est l'equivalent de ce circuit:



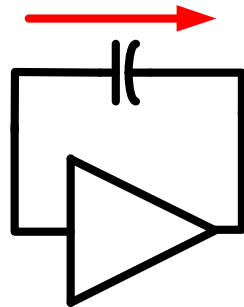
# Amplificateurs a 2 etages

- Miller ajoute une grosse capacite:
  - Le gain va baisser a basse frequence
- Rendu a un dephasage de 180 degres, son gain (on l'espere) sera  $< 1$  (stable)
- Est-ce que c'est fini? Non
- Allons voir cette partie en details...



# Amplificateurs a 2 etages

- Imaginez une transition a l'entree:
  - L'amplificateur va amplifier et donner une sortie
  - En meme temps, une partie du signal va passer par le C

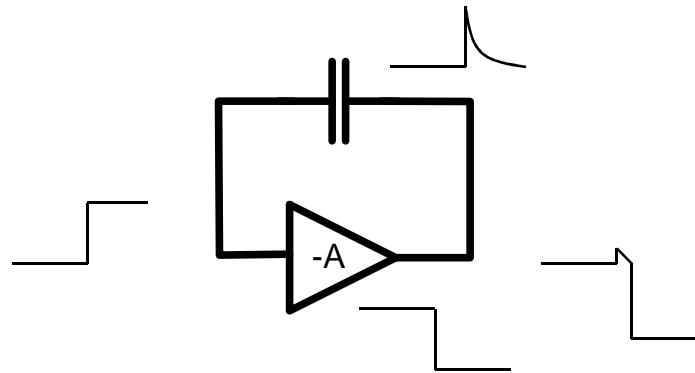


$$I(t) = C \frac{dV}{dt}$$

- Qu'est-ce que ca fait?

# Amplificateurs a 2 etages

- A prendre pour du “cash”: (demonstrable)



- Le petit pic est le symptome d'un zero dans la fonction de transfert.
- “La mauvaise” direction dit que le zero est dans le cote droit du plan  $S$

Si on avait fait l'analyse au complet, on aurait trouve un ZERO dans  $T(s)$  80

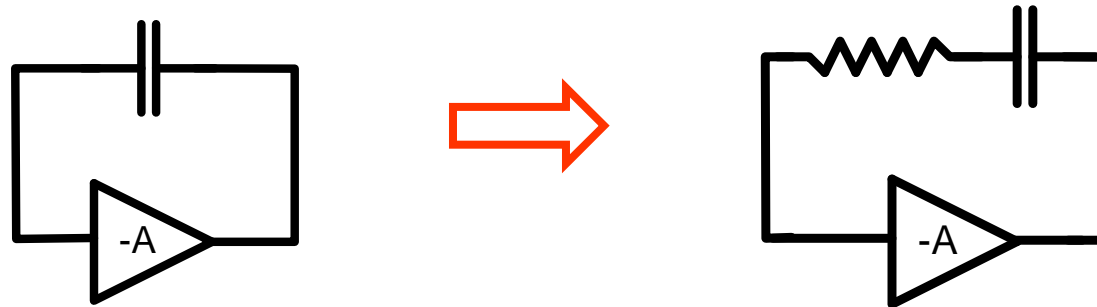


# Amplificateurs a 2 etages

- Ce zero va donner un “coup” dans la mauvaise direction
  - Ca peut generer des oscillations dans la reponse
  - (pensez a un systeme sous amorti)
- Donc, on utilise Miller pour stabiliser
  - Mais, la capacite introduit des oscillations
  - Il faut deplacer le zero vers la gauche
- On peut faire ca en introduisant une resistance

# Amplificateurs a 2 etages

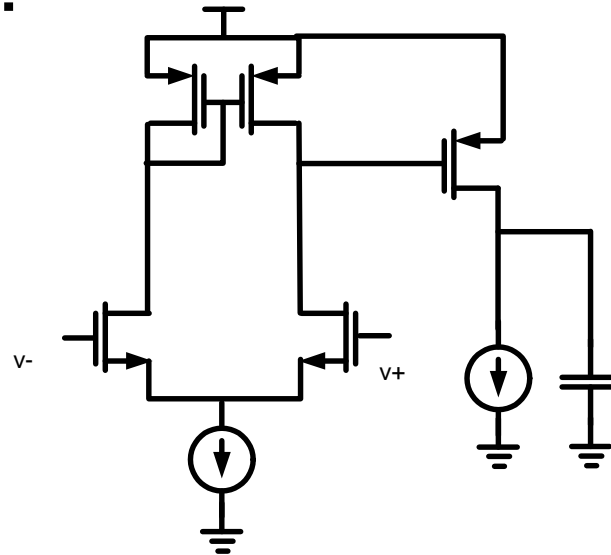
- On pourrait donc faire ceci:



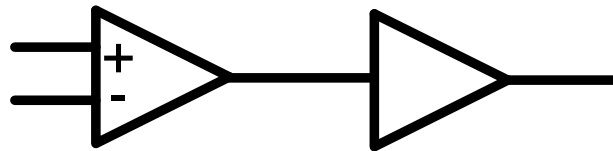
- Reprenons rapidement le raisonnement...

# Amplificateurs a 2 etages

- On avait ceci:

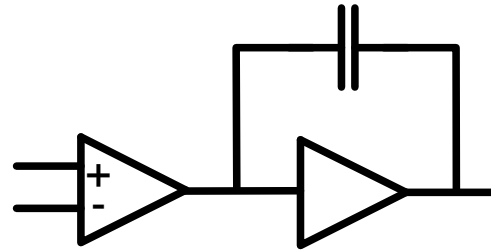


- Ce circuit peut etre vu comme ca:

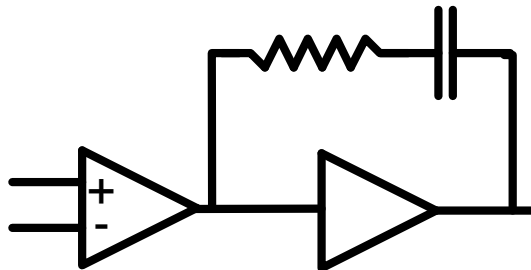


# Amplificateurs a 2 etages

- Pour stabiliser, on ajoute l'effet de Miller:

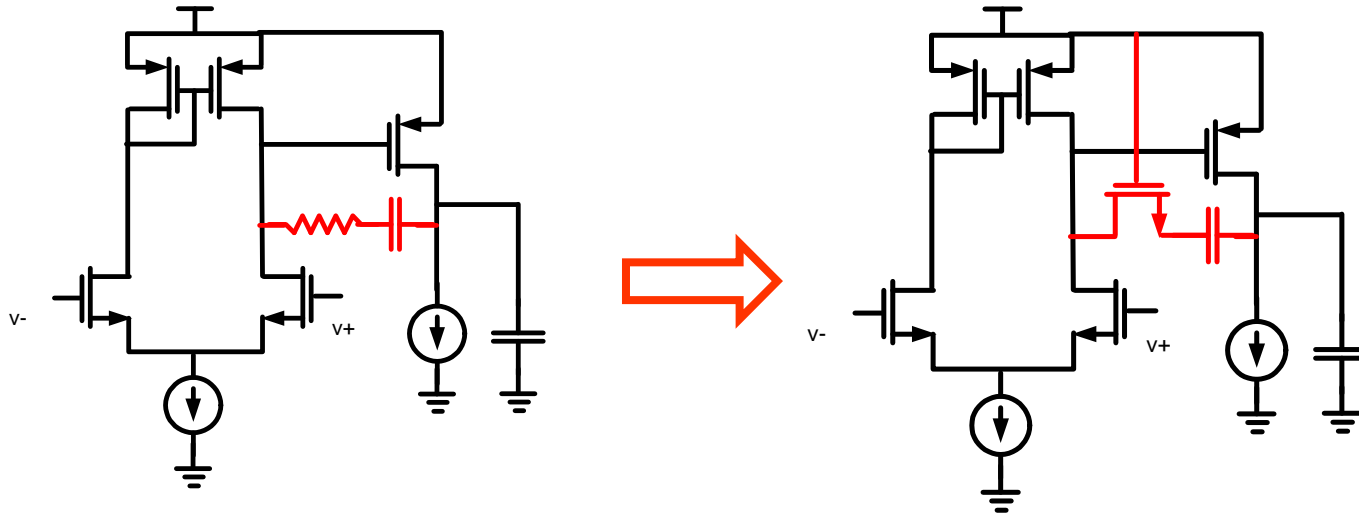


- Ca introduit un zero a droite du plan S
- Pour deplacer le zero vers la gauche, on ajoute une resistance en serie...
- Ca se demontre avec les techniques de DS2...



# Amplificateurs a 2 etages

- Ca nous donne un circuit final comme ceci:



- Le NMOS sera en triode:
  - Le courant sera proportionnel a  $V_{DS}$  (comme R)

$$I_D = \left[ \frac{1}{2} \mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) \right] V_{DS}$$

# Exemple

- Voici la fonction de transfert BOUCLE OUVERTE d'un amplificateur a 2 etages.

$$T(s) = \frac{100 \times 10^9}{(s + 10)(s + 100000)(s + 1000)}$$

- Si je le connectais en boucle fermee, serait-elle instable? Justifiez.

# Amplificateurs a 2 etages

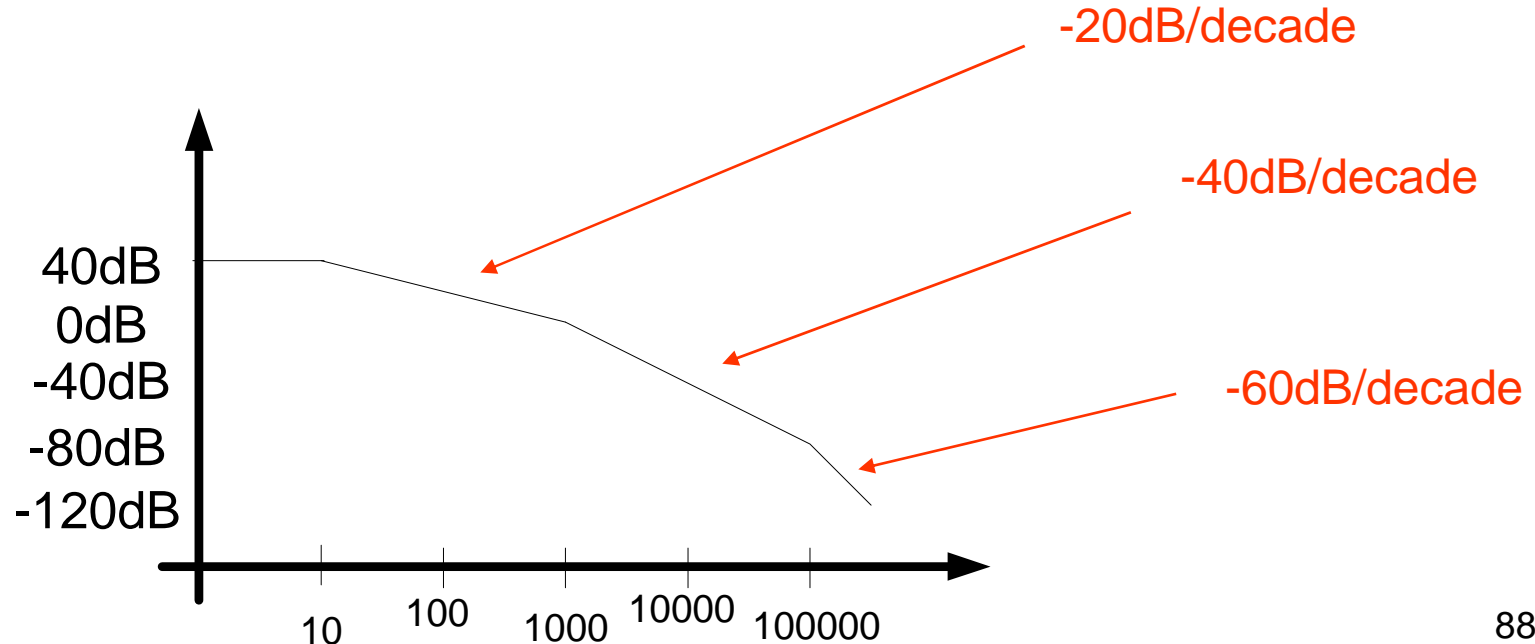
- Le probleme est principalement le Diagramme de Bode (revisez!)

$$T(s) = \frac{100 \times 10^9}{(s+10)(s+100000)(s+1000)}$$

- On identifie le gain DC: on met  $s=0j$
- Ca donne un gain DC de 100
- En dB, ca donne 40dB

# Amplificateurs a 2 etages

- On identifie les poles (10, 1000 et 100000)
- Pour le gain, c'est facile: chaque pole donne un -20dB/decade de plus



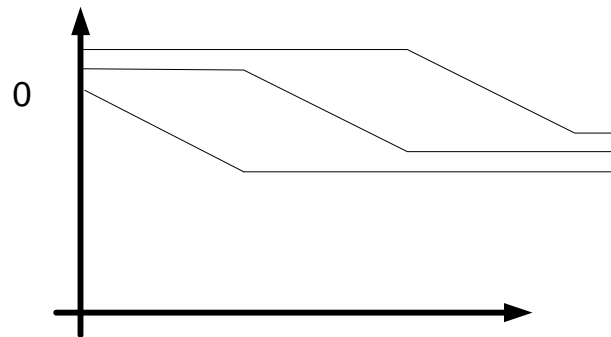


# Amplificateurs a 2 etages

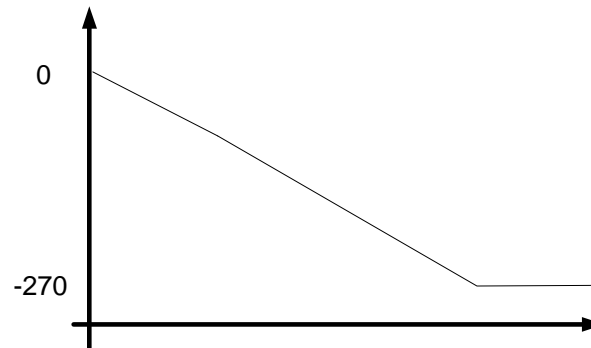
- Pour tracer le dephasage, on identifie  $w/10$ ,  $w$  et  $10*w$ .
  - Un dephasage de  $-45$ degrees/decade commence a  $w/10$
  - Il finit a  $10*w$
- Donc, chaque pole contribue un dephasage max de  $90$  degrees.

# Amplificateurs a 2 etages

- On trace les 3 graphiques les uns a cote des autres:

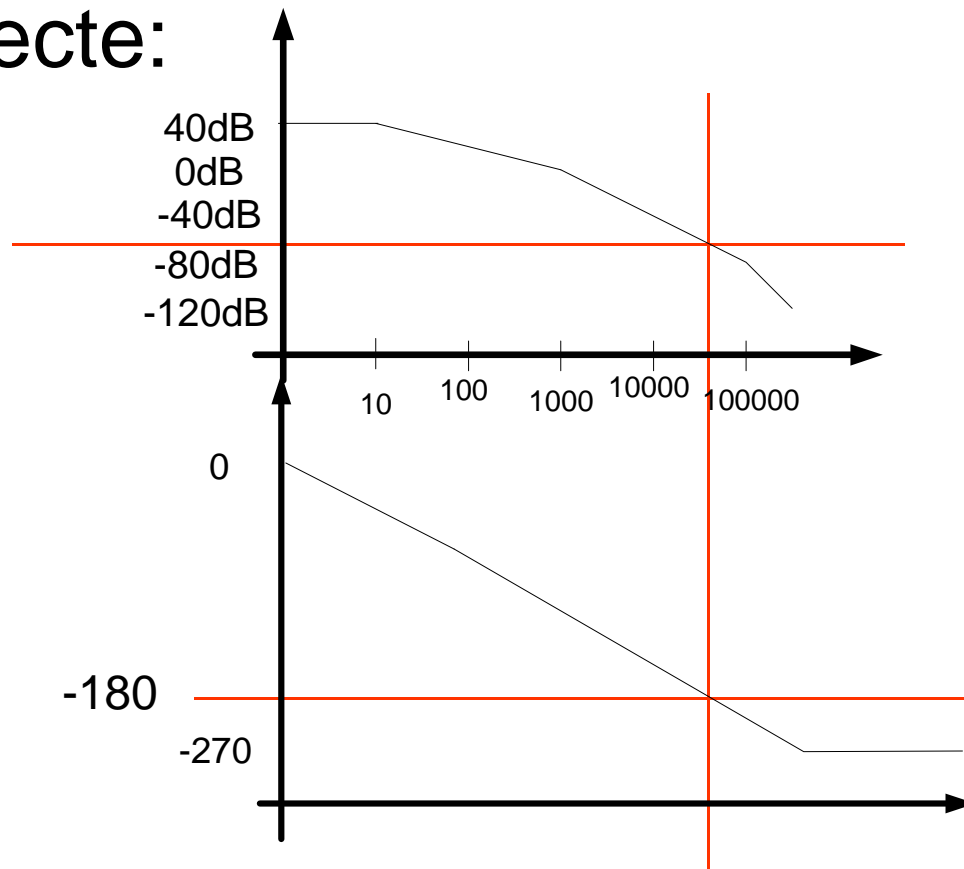


- On ajoute la contribution de chaque:



# Amplificateurs a 2 etages

- Si on a trace les courbes avec la meme echelle, on peut faire une comparaison directe:



Gain < 0dB a 180  
Donc, stable