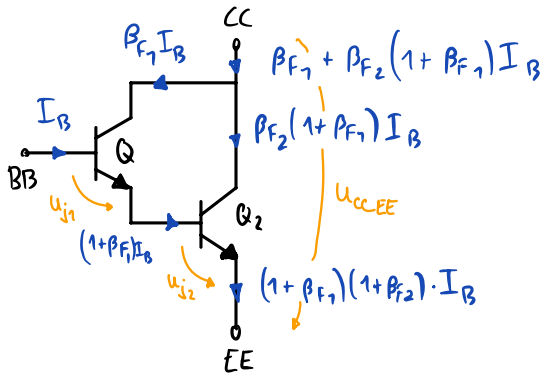


► Combinaison de transistors bipolaires

Paire de Darlington (NPN)



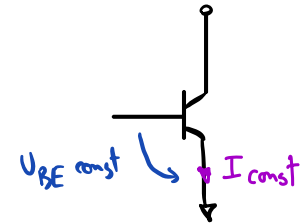
$$I_{CC} \approx \beta_{F1} \cdot \beta_{F2} \cdot I_B$$

$$\text{si } \beta_{F1} \beta_{F2} \gg 1$$

$$U_{BBEE} \approx U_{j1} + U_{j2}$$

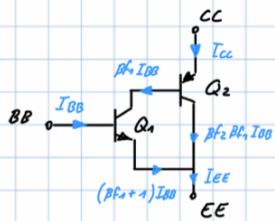
$$U_{CEE} \geq 1,4 \text{ V}$$

Source de courant



Impédance sortie très grande
fonctionnement actif-direct
I const peu import VCE

Paire de Szikloui



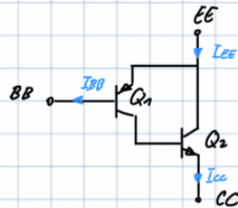
à comportement npn

$$I_{CC} = (\beta_{F2} + 1) I_{BB} \approx \beta_{F2} \beta_{F1} I_{BB}$$

$$I_{EE} = (\beta_{F1} \beta_{F2} + \beta_{F1} + 1) I_{BB} \approx \beta_{F1} (\beta_{F2} + 1) I_{BB}$$

$$U_{BBEE} \approx U_{j1}$$

$$U_{CEE} > U_{j2} + U_{CESAT1}$$

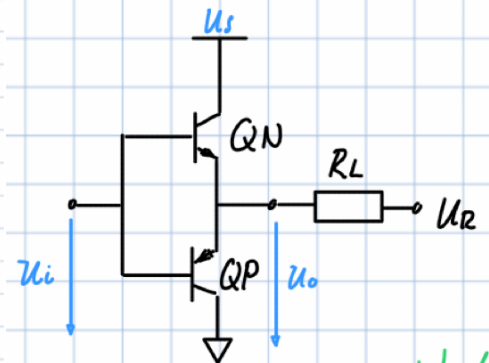


à comportement pnp

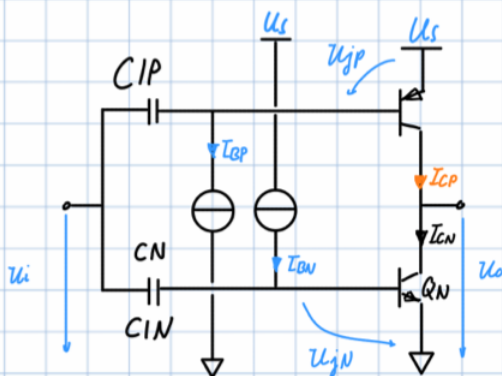
$$U_{BBEE} \approx U_{j1}$$

$$U_{CEE} > U_{j2} + U_{CESAT1}$$

Amplificateur Push-Pull

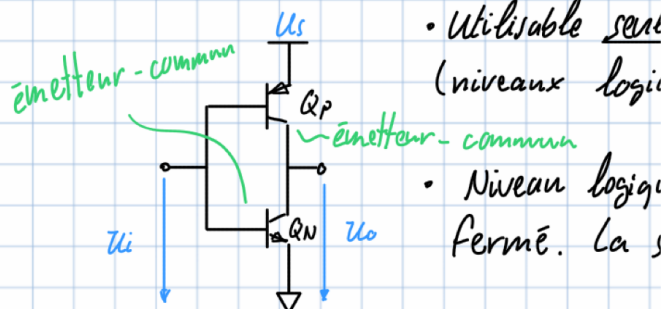


Version inverseur analogique



Inverseur complémentaire bipolaire

Version inverseur logique



- Utilisable sans (niveaux logiques)
- Niveau logique fermé. La s

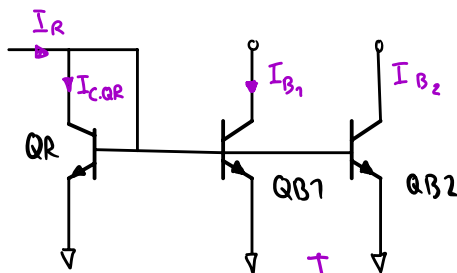
► Appariement (pas en circuit discret)

Composants électriques à caractéristiques aussi similaire que possible. Paramètres aussi similaire que possible.

Conditions d'appariement:

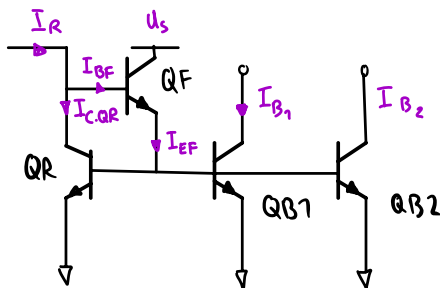
- même fabricant
- même substrat
- même lot
- observation des règles de dessin pour appariement

Miroir de courant simple



$$I_{B1} = I_{B2} = \frac{I_R}{1 + \frac{1+N}{\beta_F}}$$

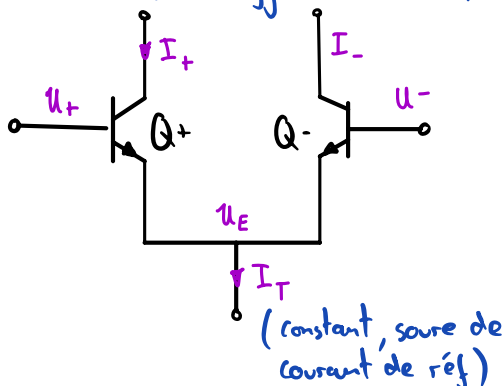
Miroir de courant amélioré



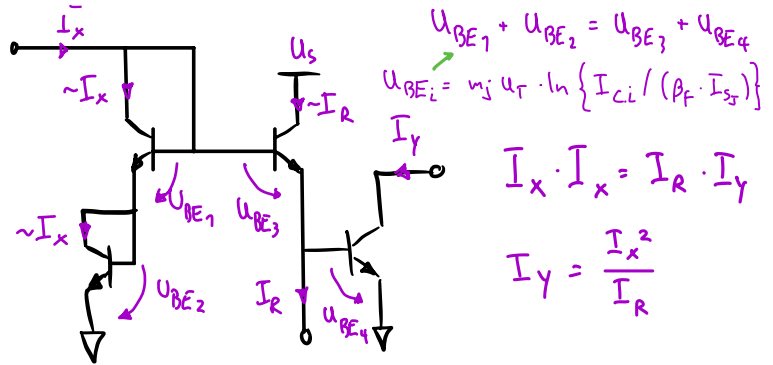
$$I_B = \frac{I_R}{1 + \frac{1+N}{\beta_F(1+\beta_F)}}$$

Paire différentielle

La répartition du courant I_T , entre Q_+ et Q_- , dépend de la tension différentielle $u_+ - u_-$.



► Circuits translinéaires



Circuit éleveur au carré d'un courant d'entrée.
Pondération avec I_R

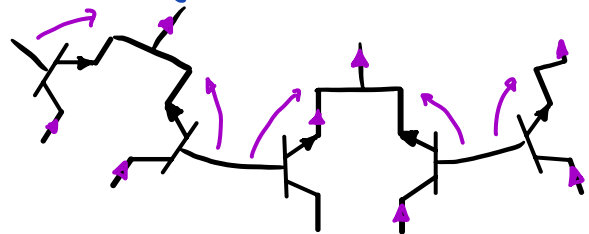
⇒ On peut créer des circuits semblables pour toutes puissances

⇒ On peut aussi sommer les courants

⇒ On peut faire du calcul analogique (approximation en série de Taylor)

Principe général

- Maille fermée de jonctions base-émetteur
- Autant de jonctions d'une orientation que de jonctions d'orientation opposée



Exemple avec jonction alternante

Amplement de jonction également possible

$$\sum_i u_{BE,i} = \sum_j u_{BE,j}$$

$$\prod_i I_{C,i} = \prod_j I_{C,j}$$

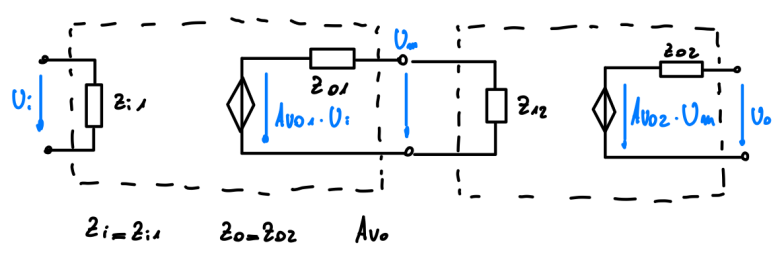
— boucle

Si on ampile trop la tension de l'alimentation doit être plus grande

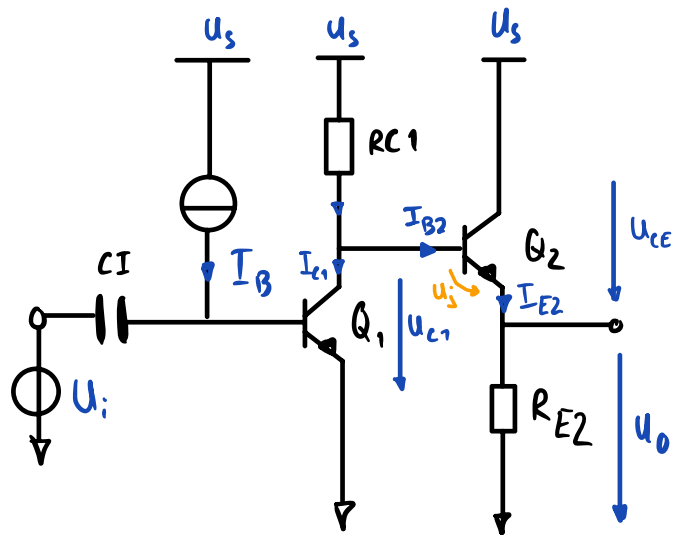
0,7 + 0,7 + 0,7 ...

Le courant base est négligé
⇒ la taille du circuit est limitée par cette approx.

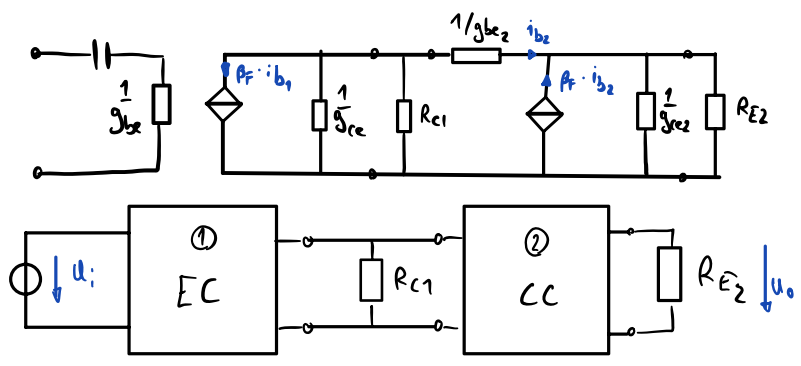
► Cascader des amplificateurs



► Cascade d'émetteur commun avec collecteur commun



1^{er} étage cascade → émetteur commun
2^{ème} → collecteur commun



$$A_{vo1} = - \frac{g_{be} \beta_F}{g_{ce1}}$$

$$Z_{i2} = \frac{1 + \beta_F g_{be2} R_{L2}}{g_{be2} (1 + g_{ce2} R_{L2})}$$

$$Z_{i1} = 1/g_{be1}$$

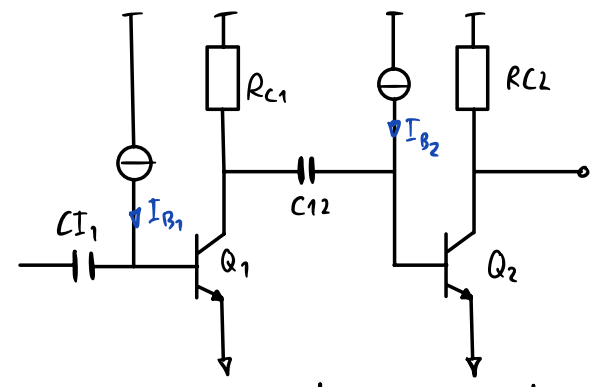
$$Z_{o2} = (1 + g_{be2} R_{S2}) / (\beta_F g_{be2})$$

$$A_{vo} = A_{vo1} \cdot A_{vo2} \cdot \frac{R_{C1} \parallel Z_{i2}}{R_{C1} \parallel Z_{i2} + Z_{o1}}$$

$$Z_i = \frac{1}{g_{be1}} \quad Z_o = Z_{o2} (R_{C1} + g_{ce1})$$

fonction de 2

► Cascade d'émetteurs communs



C_I1, C_I2: Condensateurs de couplage
→ fonction de transfert passe-haut

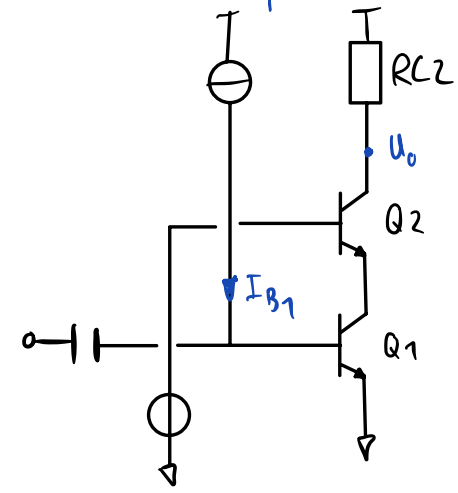
R_C1, R_C2: Réduisent le gain en tension par effet de diviseur résistif, gain en tension élevé

Impédance d'entrée et sortie élevées

Exemple: ampli-audio

► Cascade d'émetteur commun et base commune

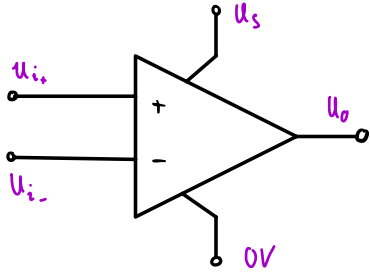
- S'utilise sans charge
- Très grand gain tension à v. de
- Grande impédance sortie



Amplificateurs opérationnels

Une entrée différentielle a deux bornes à haute impédance ($I_{i+}, I_{i-} \approx 0$)
Sortie à impédance faible

Ampl. op. asymétrique

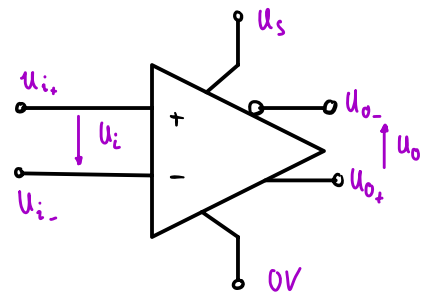


$$U_i = U_{i+} - U_{i-}$$

$$U_o = U_{o.cm} + A_v \cdot U_i$$

(autour de $U_i = 0$)

Ampl. op. différentiel



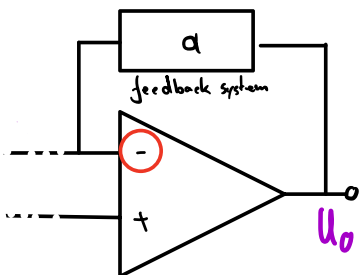
$$U_{o+} = U_{o.cm} + A_v \frac{U_i}{2}$$

$$U_{o-} = U_{o.cm} - A_v \frac{U_i}{2}$$

$$U_o = A_v \cdot U_i$$

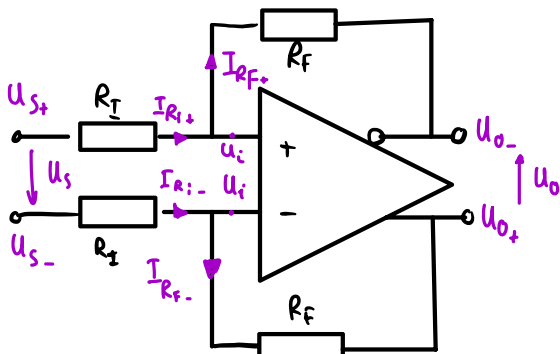
autour de $U_i = 0$

L'Ampl. op. avec réaction négative



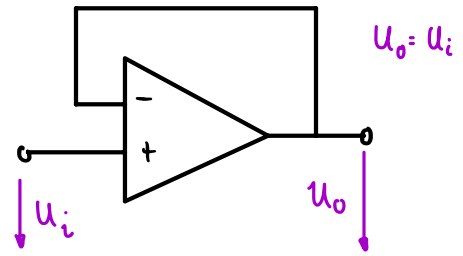
1. $U_i = 0$
2. $I_{i+} = 0$
3. $I_{i-} = 0$

Ampl. op. différentiel



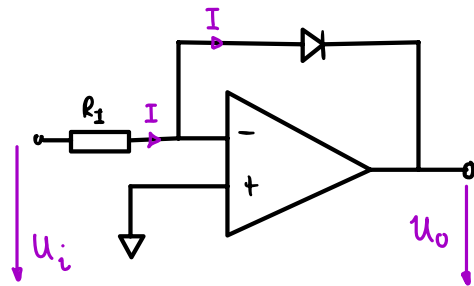
$$\frac{U_s}{R_I} = \frac{U_o}{R_F} \Rightarrow U_o = \frac{R_F}{R_I} U_s$$

Suiveur / Ampli à gain unité



Utilité : adapter l'impédance d'entrée d'un circuit

Amplificateur logarithmique

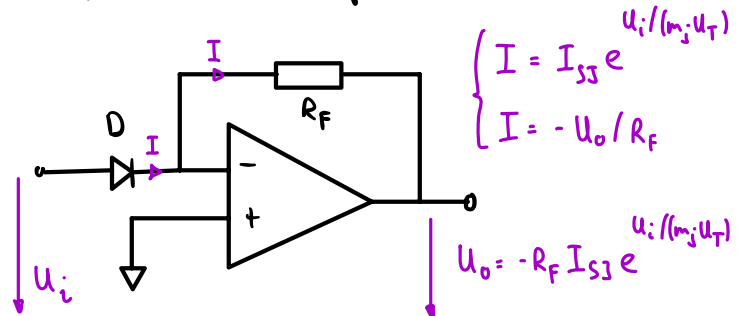


$$\begin{cases} I = U_i / R_I \\ I = I_{SS} e^{-U_o / (m_j \cdot U_T)} \end{cases}$$

$$\frac{U_i}{R_I} = I_{SS} e^{-U_o / (m_j \cdot U_T)}$$

$$U_o = -m_j \cdot U_T \cdot \ln \left[\frac{U_i}{R_I \cdot I_{SS}} \right]$$

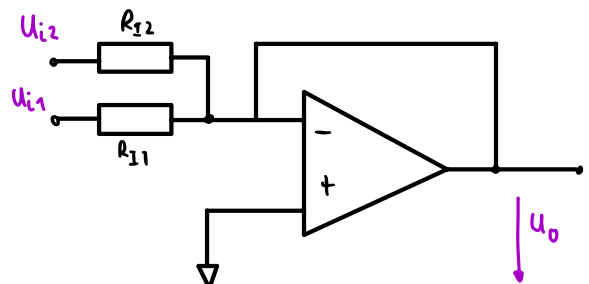
Amplificateur exponentiel



$$\begin{cases} I = I_{SS} e^{U_i / (m_j \cdot U_T)} \\ I = -U_o / R_F \end{cases}$$

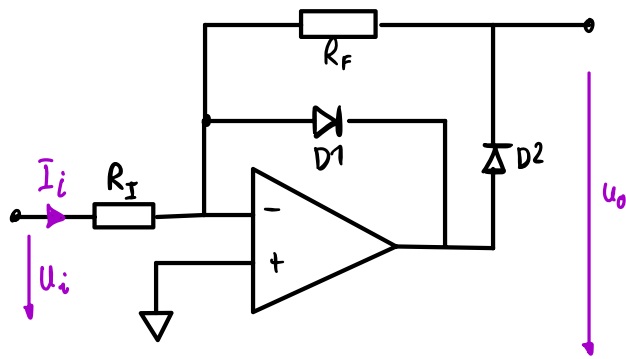
$$U_o = -R_F I_{SS} e^{U_i / (m_j \cdot U_T)}$$

Amplificateur sommateur



$$U_o = \left[\frac{R_F}{R_{I1}} U_{i1} + \frac{R_F}{R_{I2}} U_{i2} \right]$$

Redresseur de précision

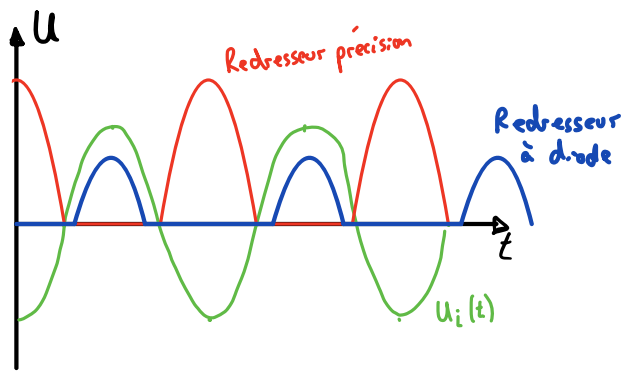
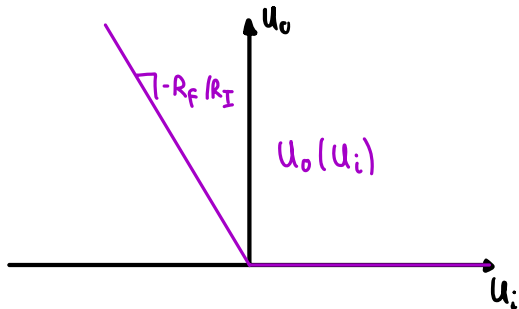


- ① $U_i \geq 0$; $I_i \geq 0$ doit passer par D1 car D2 est bloquant
Le courant à travers R_F est nul

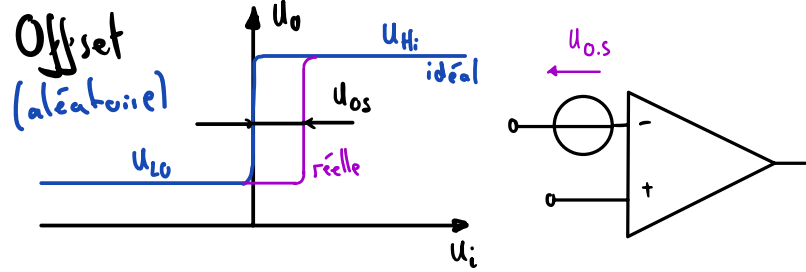
$$\Rightarrow U_o = 0$$

- ② $U_i < 0$; $I_i < 0$ doit passer par D2 car D1 est bloquée. Le courant R_F traverse R_I

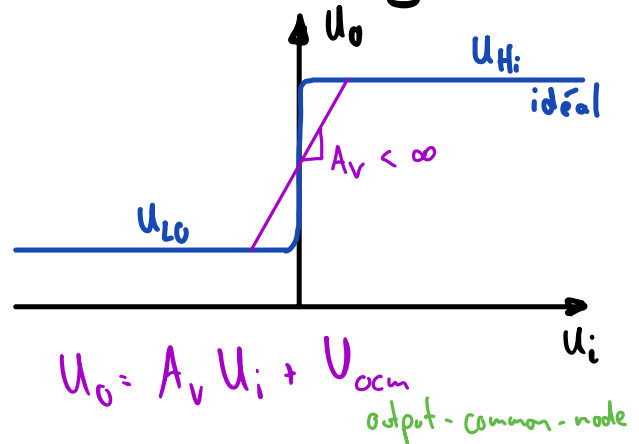
$$U_i / R_I = - \frac{U_o}{R_F} \Rightarrow U_o = - \frac{R_F}{R_I} \cdot U_i$$



Imperfections d'amplis op



Limitation de gain (gain fini)



Rejection de l'alimentation

L'atténuation entre l'alimentation et sortie de l'ampli-op est finie

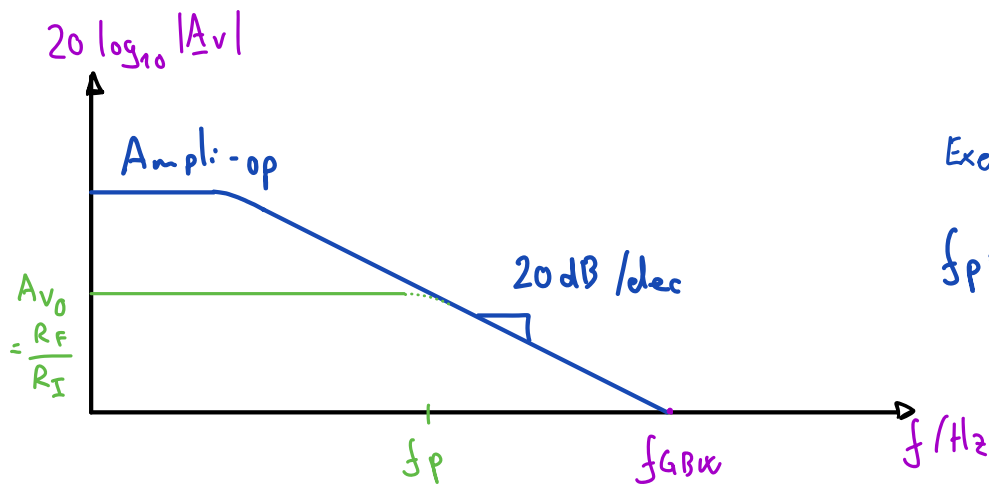
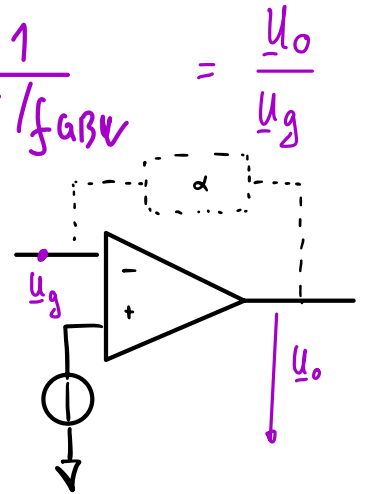
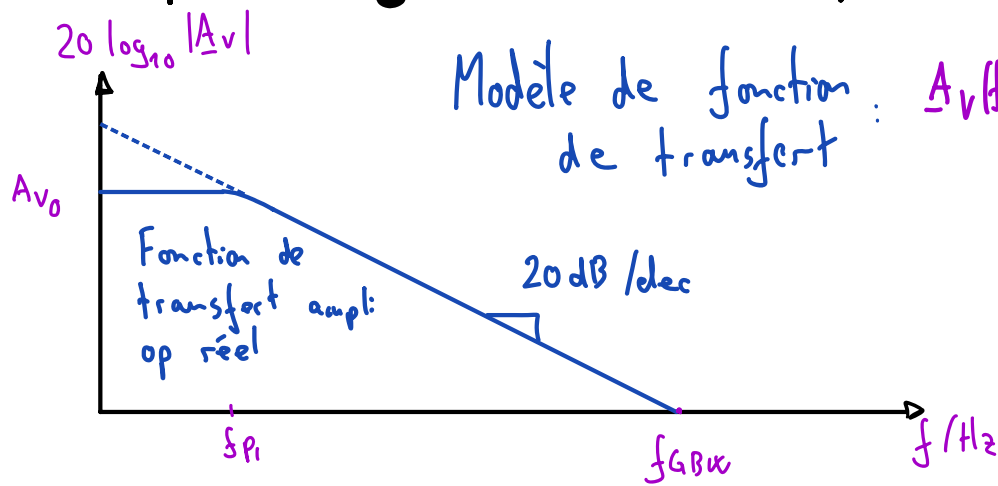
Rejection du mode commun

L'atténuation entre mode commun d'entrée et la sortie est finie

Tension de mode commun

La tension de mode commun se trouve dans une plage définie.

Bande passante finie de l'Ampli-op

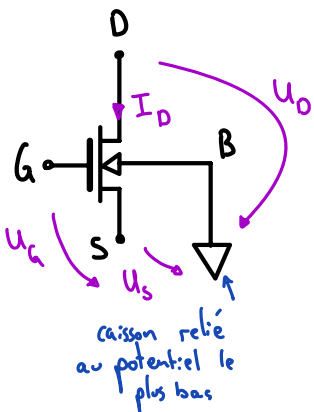


$$\text{Gain}(A_{v0}) \times \text{Bande passante} \approx f_{GBW}$$

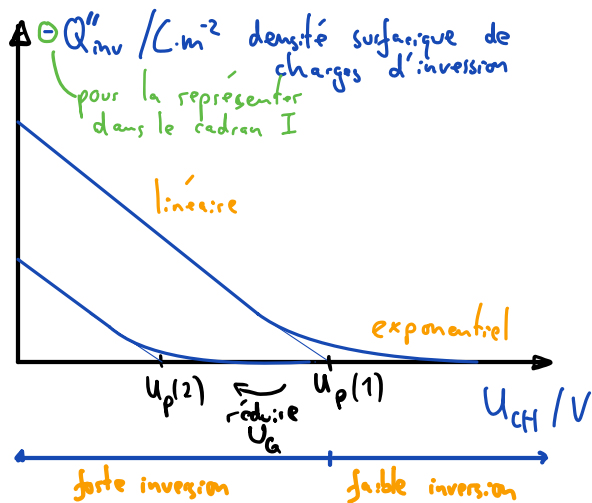
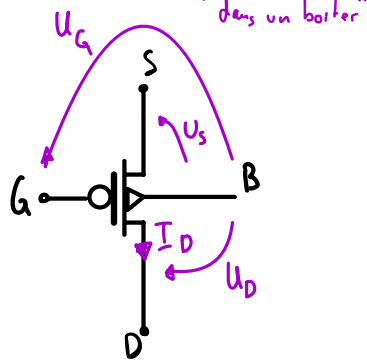
Basic circuit	Common emitter	Common collector	Common base	Cascode
Voltage gain	high	less than unity	high, same as CE	high, same as CB
Current gain	high	high	less than unity	high, same as CE
Power gain	high	moderate	moderate	highest
Phase inversion	yes	no	no	yes
Input impedance	moderate $\approx 1 \text{ k}$	highest $\approx 300 \text{ k}$	low $\approx 50 \Omega$	same as CE, $\approx 1 \text{ k}$
Output impedance	moderate $\approx 50 \text{ k}$	low $\approx 300 \Omega$	highest $\approx 1 \text{ Meg}$	same as CB, $\approx 1 \text{ Meg}$

► Transistor MOS

NMOS



PMOS



charge d'inversion en forte inversion

$$-Q''_{inv} = C_{ox} \cdot n (U_p - U_{CH})$$

$$-Q''_{inv} = C_{ox} \cdot 2 \cdot n U_T e^{\frac{U_p - U_{CH}}{U_T}}$$

n : facteur de pente $\sim 1,2 \sim 1,4$

C_{ox} : capacité surfacique de l'oxyde F/m^2

$C_{ox} = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{d_{ox}}$ d_{ox} : épaisseur d'oxyde

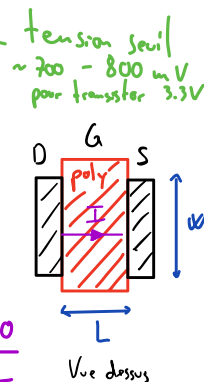
U_G : tension de grille

tension de pincement $U_p = \frac{U_G - V_{TO}}{n}$

$$I_{spec} = 2 \cdot n \mu C_{ox} \cdot U_T^2 \frac{W}{L}$$

$$X_p = \frac{U_p}{U_T}, \quad X_s = \frac{U_s}{U_T}, \quad X_D = \frac{U_D}{U_T}$$

$$Y_F = \frac{I_F}{I_{spec}}, \quad Y_R = \frac{I_R}{I_{spec}}, \quad U_T = 25 mV \text{ à } T_{amb}$$



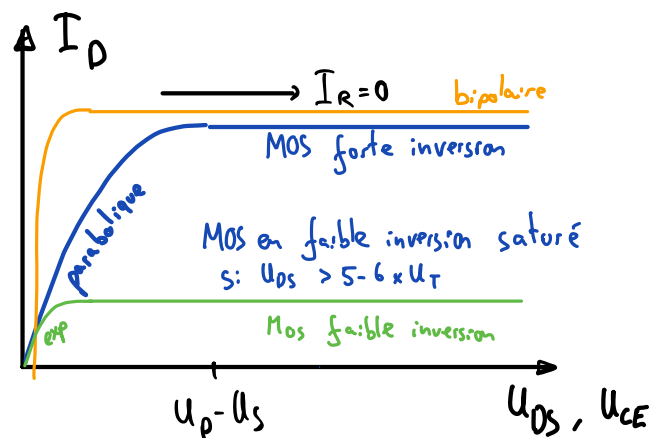
Forte inversion $X_s \ll X_p$
ou si: $\max(Y_F, Y_R) \gg 1$

$$Y_F = \begin{cases} \left(\frac{X_p - X_s}{2}\right)^2 & \text{si: } X_s < X_p \\ 0 & \text{si: } X_s > X_p \end{cases}$$

$$Y_R = \begin{cases} \left(\frac{X_p - X_D}{2}\right)^2 & \text{si: } X_D < X_p \\ 0 & \text{si: } X_D > X_p \end{cases}$$

Faible inversion $X_s \gg X_p$
ou si: $\max(Y_F, Y_R) \ll 1$

$$Y_F = e^{X_p - X_s}, \quad Y_R = e^{X_p - X_D}$$



Interpolation entre faible et forte inversion

$$Y_F = \ln^2 \left[1 + e^{\frac{X_p - X_s}{2}} \right] \Leftrightarrow X_p - X_s = 2 \ln(e^{\sqrt{Y_F}} - 1)$$

$$Y_R = \ln^2 \left[1 + e^{\frac{X_p - X_D}{2}} \right] \Leftrightarrow X_p - X_D = 2 \ln(e^{\sqrt{Y_R}} - 1)$$