

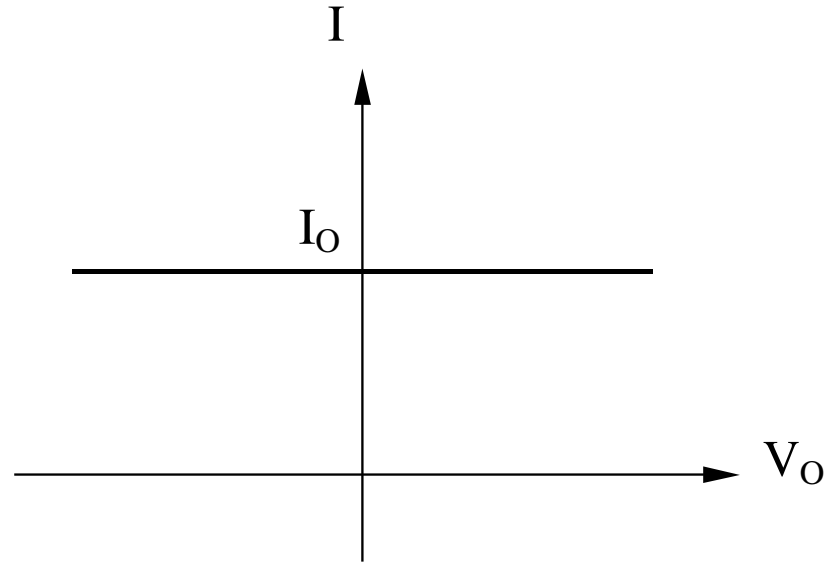
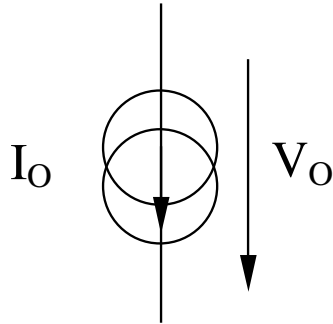
Chapitre 4

Sources de courant et de tension

4.1. Sources de courant

4.1. Sources de courant

4.1.1. Introduction



Paramètres:

- Le courant de sortie I_O est le courant produit par la source [A]
- La résistance de sortie [Ω]

$$R_O = \left. \frac{dV_O}{dI_O} \right|_{V_{CC}, T=ct.}$$

- Tension minimale de sortie [V]
- Coefficient de la température [A/K]

$$TC_{I_O} = \left. \frac{dI_O}{dT} \right|_{R_L, V_{CC}=ct.}$$

- Coefficient relatif de la température [1/K]

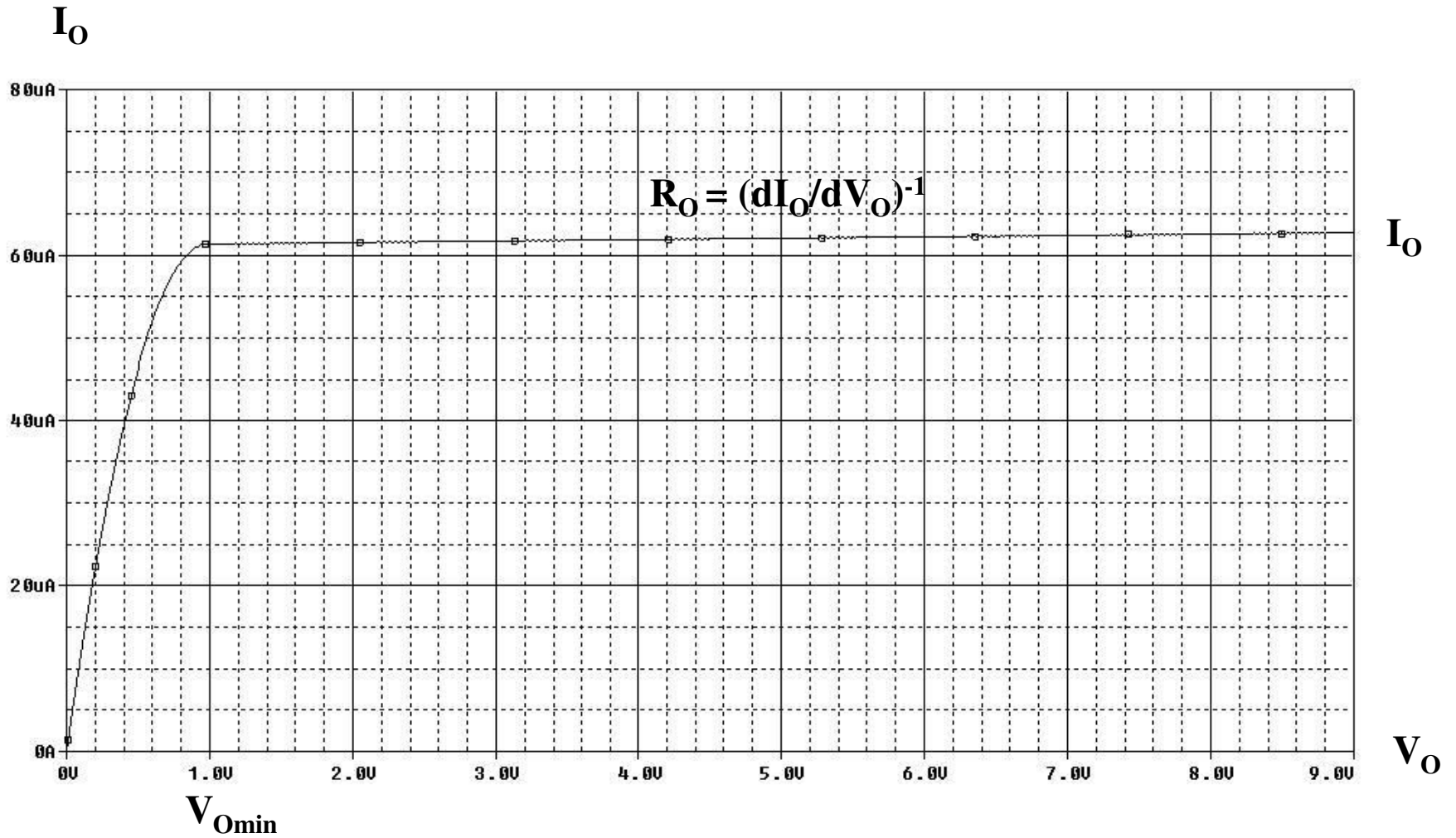
$$RTC_{I_O} = \left. \frac{1}{I_O} \frac{dI_O}{dT} \right|_{R_L, V_{CC}=ct.}$$

- Rapport de rejet d'alimentation [A/V]

$$PSRR = \left. \frac{dI_O}{dV_{CC}} \right|_{R_L, T=ct.}$$

- Sensibilité du courant de sortie sur la variation d'alimentation [-]

$$S_{V_{CC}}^{I_O} = \left. \frac{dI_O / I_O}{dV_{CC} / V_{CC}} \right|_{R_L, T=ct.} = \left. \frac{V_{CC}}{I_O} \frac{dI_O}{dV_{CC}} \right|_{R_L, T=ct.}$$



Caractéristique de sortie d'une source de courant

Classification

I. Sources de courant élémentaires

- complexité réduite
- faibles performances

II. Sources de courant cascode

- augmentation de la résistance de sortie
- augmentation de la tension de sortie minimale
- augmentation de la tension d'alimentation minimale

III. Sources de courant avec auto-polarisation

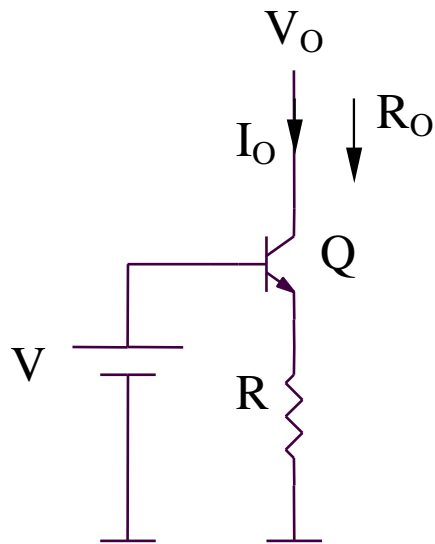
- une dépendance réduite $I_O (V_{CC})$
- exige un circuit démarrant

IV. Température-compensée sources de courant

- une dépendance réduite de température pour la courant de sortie
- grand complexité

4.1.2. Sources de courant élémentaires

Bipolar source de courant avec un transistor

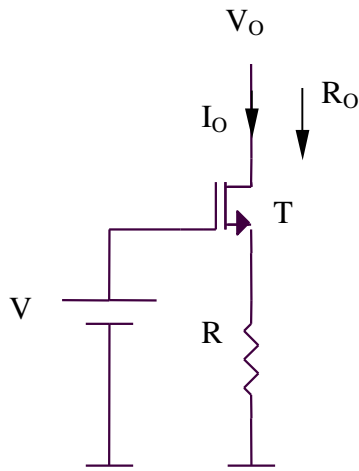


$$I_O = \frac{V - V_{BE}}{R}$$

$$R_O = r_o \left(1 + \frac{\beta R}{r_\pi + R} \right)$$

$$V_{O\min} = V - V_{BE} + V_{CEsat}$$

MOS source de courant avec un transistor



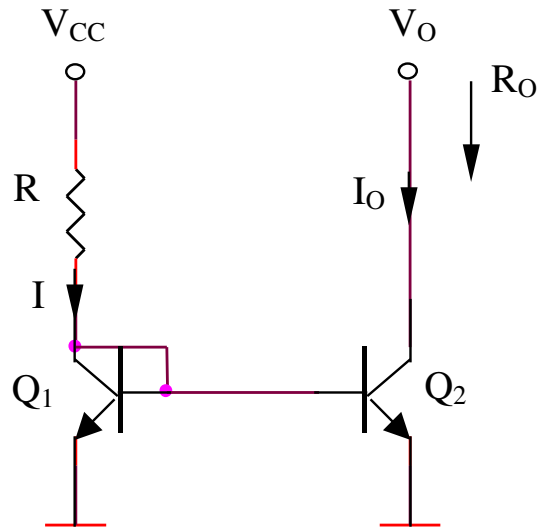
$$\left. \begin{aligned} V &= V_{GS} + I_O R \\ I_O &= \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow V = V_{GS} + \frac{KR}{2} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$\Rightarrow V_{GS} (> V_T) \Rightarrow I_O$$

$$R_O = r_{ds} (1 + g_m R)$$

$$V_{O \min} = V - V_{GS} + (V_{GS} - V_T) = V - V_T$$

Miroir de courant bipolaire



Le courant de sortie

$$\left. \begin{aligned}
 I &= \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R} \cong I_{S1} \exp\left(\frac{V_{BE1}}{V_{th}}\right) \\
 I_O &\cong I_{S2} \exp\left(\frac{V_{BE2}}{V_{th}}\right) \\
 V_{BE1} &= V_{BE2}
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{I_O}{I} \cong \frac{I_{S2}}{I_{S1}} \Rightarrow I_O \cong \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R} \frac{I_{S2}}{I_{S1}}$$

La résistance de sortie

$$R_O = r_o = \frac{V_A}{I_{C2}} = \frac{V_A}{I_O}$$

La tension de sortie minimale

$$V_{O\min} = V_{CE2sat.}$$

L'effet Early

$$I = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R} = I_{S1} \exp\left(\frac{V_{BE1}}{V_{th}}\right) \left(1 + \frac{V_{CE1}}{V_A}\right)$$

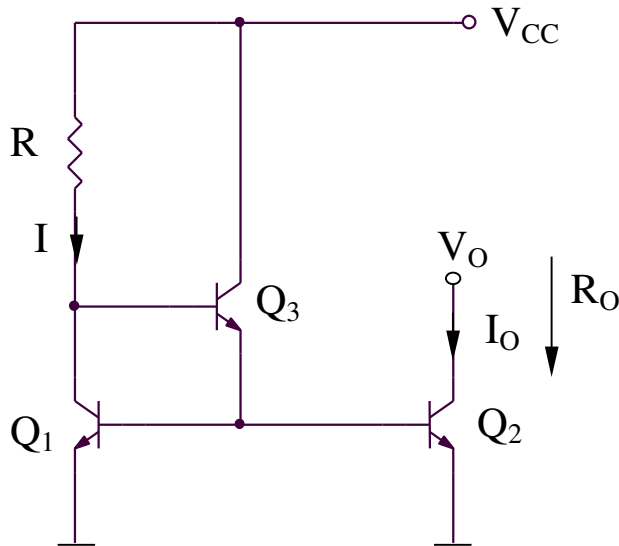
$$I_O = I_{S2} \exp\left(\frac{V_{BE2}}{V_{th}}\right) \left(1 + \frac{V_{CE2}}{V_A}\right)$$

$$\frac{I_O}{I} = \frac{I_{S2}}{I_{S1}} \frac{1 + \frac{V_{CE1}}{V_A}}{1 + \frac{V_{CE2}}{V_A}} = \frac{I_{S2}}{I_{S1}} \frac{1 + \frac{V_{BE1}}{V_A}}{1 + \frac{V_O}{V_A}}$$

L'influence de β

$$\frac{I_O}{I} = \frac{\beta I_B}{\beta I_B + 2I_B} = \frac{\beta}{\beta + 2}$$

Miroir de courant avec réduction de l'influence de β (1)



Le courant de sortie

$$I_O \cong I = \frac{V_{CC} - 2V_{BE}}{R}$$

La résistance de sortie

$$R_O = r_o = \frac{V_A}{I_{C2}} = \frac{V_A}{I_O}$$

La tension de sortie minimale

$$V_{O\min} = V_{CE2\text{sat.}}$$

L'influence de β

$$\frac{I_O}{I} = \frac{\beta I_B}{\beta I_B + \frac{2I_B}{\beta + 1}} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta^2 + \beta}} \cong 1$$

Miroir de courant avec réduction de l'influence de β (2)

Le courant de sortie

$$I_O \cong I = \frac{V_{CC} - 2V_{BE}}{R}$$

La résistance de sortie

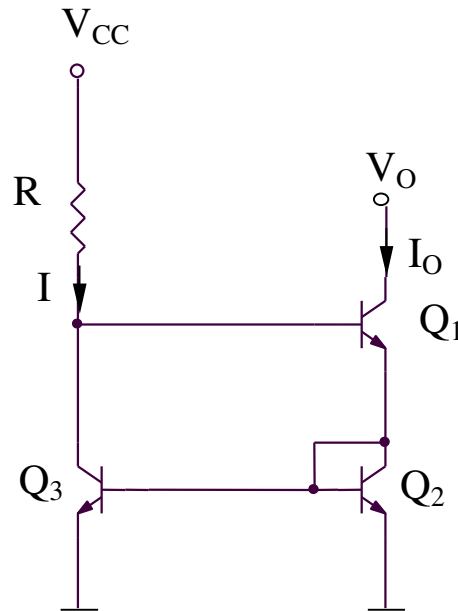
$$R_O \cong \frac{\beta r_{o1}}{2}$$

La tension de sortie minimale

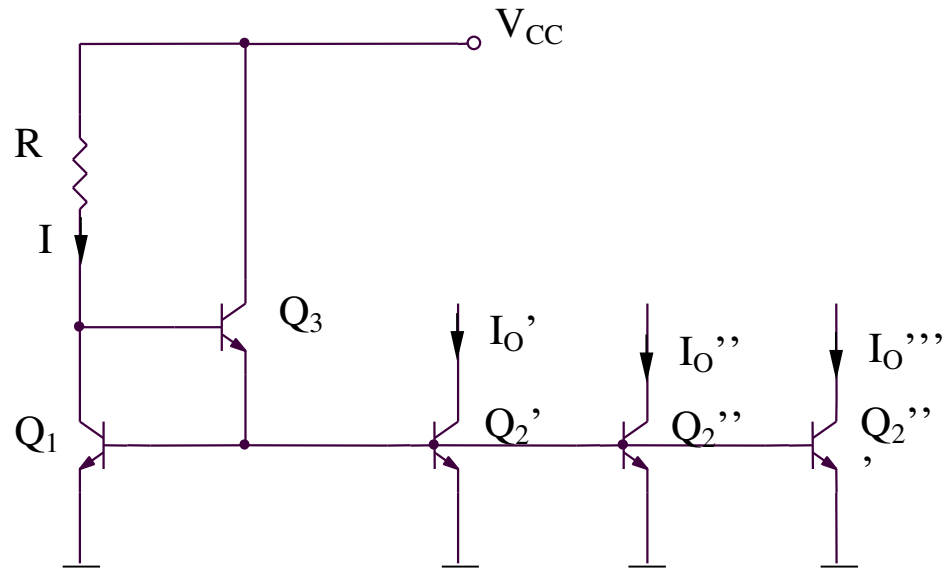
$$V_{Omin} = V_{BE2} + V_{CE1sat}.$$

L'influence de β

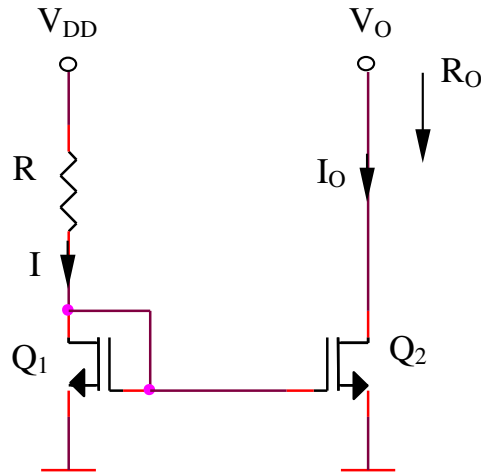
$$\frac{I_O}{I} = \frac{\frac{\beta(\beta+2)}{\beta+1} I_B}{\beta I_B + \frac{\beta+2}{\beta+1} I_B} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta^2 + 2\beta}} \cong 1$$



Miroir de courant multiple avec réduction de l'influence de β



Miroir de courant MOS



Le courant de sortie

$$\left. \begin{aligned} V_{DD} &= I_O R + V_{GS1} \\ I_O &= \frac{K}{2} (V_{GS1} - V_T)^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_{DD} = \frac{KR}{2} (V_{GS1} - V_T)^2 + V_{GS1} \Rightarrow \\
 \Rightarrow (V_{GS1})_{1,2} &= V_T - \frac{1}{KR} \pm \frac{1}{KR} \sqrt{1 + 2KR(V_{DD} - V_T)}$$

Comme V_{GS} soit être plus grand que V_T , il résulte:

$$V_{GS1} = V_T - \frac{I}{KR} + \frac{I}{KR} \sqrt{1 + 2KR(V_{DD} - V_T)}$$

$$\Rightarrow I_O = \frac{I}{KR^2} \left[1 + KR(V_{DD} - V_T) - \sqrt{1 + 2KR(V_{DD} - V_T)} \right]$$

La résistance de sortie

$$R_O = r_{ds2} = \frac{1}{\lambda I_O}$$

La tension de sortie minimale

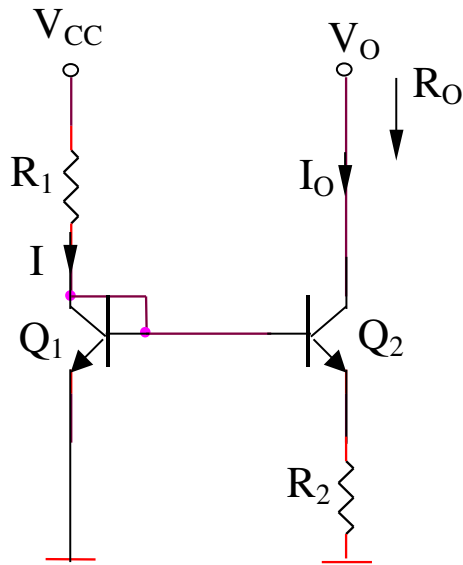
$$V_{O\min} = V_{DS2sat} = V_{GS2} - V_T = \sqrt{\frac{2I_O}{K}}$$

L'effet de la modulation du canal:

$$\frac{I_O}{I} = \frac{\frac{K}{2} (V_{GS2} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS2})}{\frac{K}{2} (V_{GS1} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS1})} = \frac{1 + \lambda V_{DS2}}{1 + \lambda V_{DS1}} = \frac{1 + \lambda V_O}{1 + \lambda V_{GS1}}$$

Source de courant Widlar bipolaire

Le courant de sortie



$$I = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_1}$$

$$I_O = \frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{R_2} = \frac{V_{th} \ln\left(\frac{I}{I_S}\right) - V_{th} \ln\left(\frac{I_O}{I_S}\right)}{R_2}$$

$$I_O = \frac{V_{th}}{R_2} \ln\left(\frac{I}{I_O}\right) = \frac{V_{th}}{R_2} \ln\left(\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_1 I_O}\right)$$

La tension de sortie minimale

$$V_{O\min} = V_{CE2sat.} + I_O R_2$$

La résistance de sortie

$$R_O = r_o \left(1 + \frac{\beta R_2}{r_{\pi 2} + R_2 + (1/g_{m1}) // R_1} \right) = \frac{V_A}{I_O} \left(1 + \frac{\beta R_2}{r_{\pi 2} + R_2 + (1/g_{m1}) // R_1} \right)$$

Raport de rejet d'alimentation

$$\frac{dI_O}{dV_{CC}} = \frac{d}{dV_{CC}} \left[\frac{V_{th}}{R_2} \ln \left(\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_1 I_O} \right) \right]$$

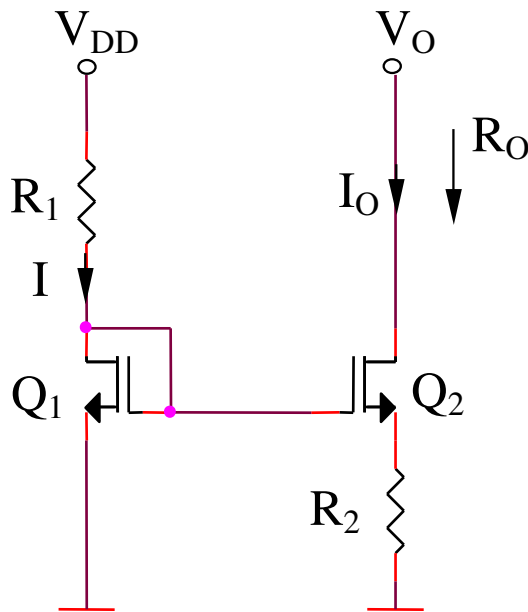
$$\frac{dI_O}{dV_{CC}} = \frac{V_{th}}{R_2} \frac{R_1 I_O}{V_{CC} - V_{BE}} \frac{R_1 I_O - (V_{CC} - V_{BE}) R_1 \frac{dI_O}{dV_{CC}}}{(R_1 I_O)^2}$$

$$\frac{dI_O}{dV_{CC}} = \frac{1}{1 + \frac{V_{th}}{R_2 I_O}} \frac{V_{th}}{R_2 V_{CC} - V_{BE}}$$

Sensibilité du courant de sortie sur la variation d'alimentation

$$S_{V_{CC}}^{I_O} = \frac{V_{CC}}{I_O} \frac{dI_O}{dV_{CC}} = \frac{1}{1 + \frac{R_2 I_O}{V_{th}}} = \frac{1}{1 + \ln \left(\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_1 I_O} \right)}$$

Source de courant Widlar MOS



Le courant de sortie

$$V_{GS1} = V_T - \frac{I}{KR_1} + \frac{I}{KR_1} \sqrt{1 + 2KR_1 (V_{DD} - V_T)}$$

$$V_{GS1} = V_{GS2} + I_O R_2 = V_{GS2} + \frac{KR_2}{2} (V_{GS2} - V_T)^2$$

$$(V_{GS2} > V_T)$$

$$I_O = \frac{K}{2} (V_{GS2} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS2})$$

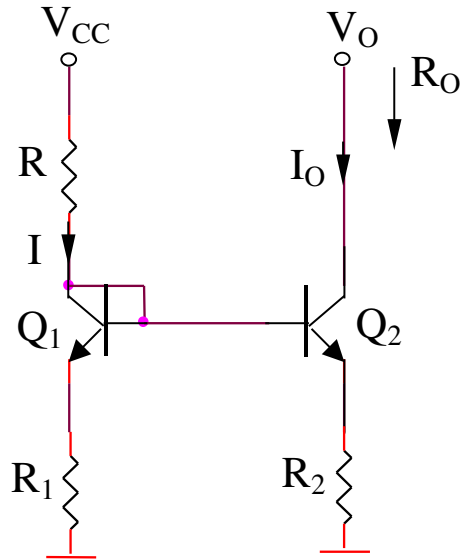
La tension de sortie minimale

$$V_{O\min} = V_{DS2\text{sat}} + I_O R_2 = \sqrt{\frac{2I_O}{K}} + I_O R_2$$

La résistance de sortie

$$R_O = r_{ds2} (1 + g_{m2} R_2)$$

Source de courant standard



Le courant de sortie

$$v_{BE1} + R_1 I = v_{BE2} + R_2 I_O$$

$$I_O = \frac{I}{R_2} (R_1 I + v_{BE1} - v_{BE2})$$

$$\frac{I_O}{I} = \frac{R_1}{R_2} + \frac{V_{th}}{R_2 I} \ln \left(\frac{I}{I_O} \frac{I_{S2}}{I_{S1}} \right)$$

On peut déterminer I/I_O car:

$$I = \frac{V_{CC} - v_{BE}}{R + R_1}$$

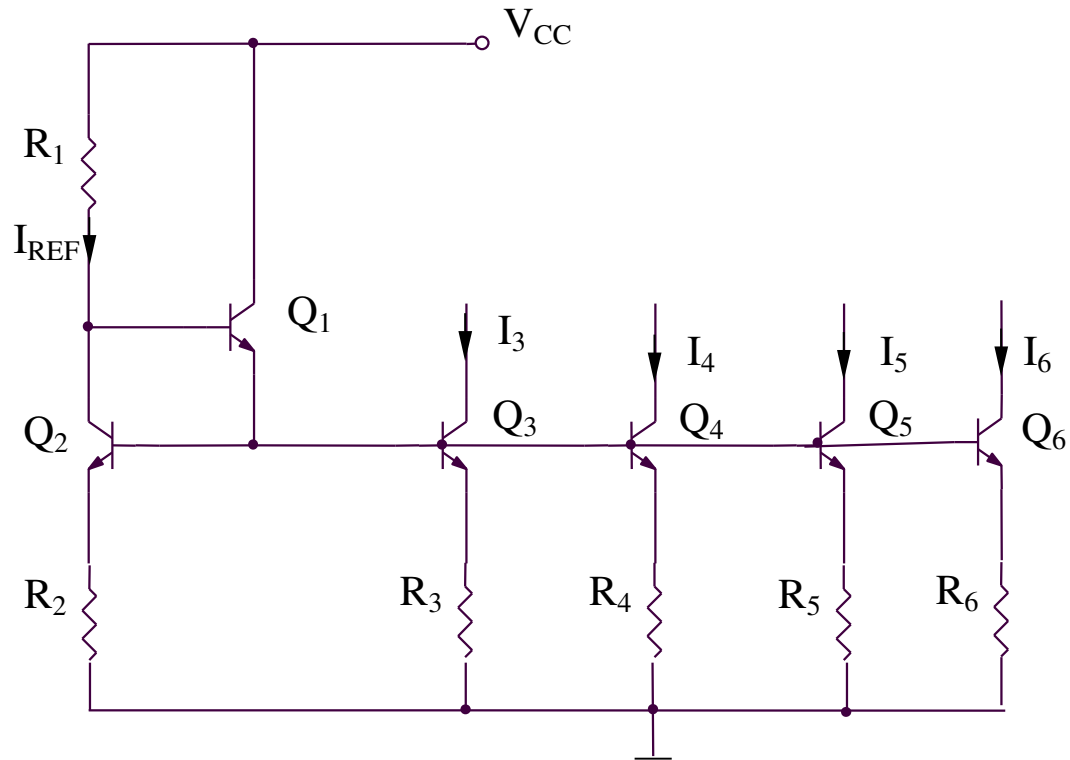
Si $R_1 I \gg v_{BE1} - v_{BE2}$:

$$\frac{I_O}{I} = \frac{R_1}{R_2}$$

La résistance de sortie

$$R_O = r_{o2} \left(1 + \frac{\beta R_2}{R_2 + r_{\pi 2} + R // (1/g_{m1} + R_1)} \right)$$

Source de courant standard avec plusieurs sorties



Si les secteurs d'émetteur des transistors sont mesurés de sorte que la densité de courant j soit identique, la tension d'émetteur de base de tous ces transistors sera identique.

$$v_{BE2} - v_{BE3} = V_{th} \ln\left(\frac{I_{REF} I_{S3}}{I_3 I_{S2}}\right) = V_{th} \ln\left(\frac{jA_2 A_3}{jA_3 A_2}\right) = 0$$

Donc:

$$v_{BE2} = \dots = v_{BE6}$$

et:

$$I_3 R_3 = I_4 R_4 = I_5 R_5 = I_6 R_6 = I_{REF} R_2$$

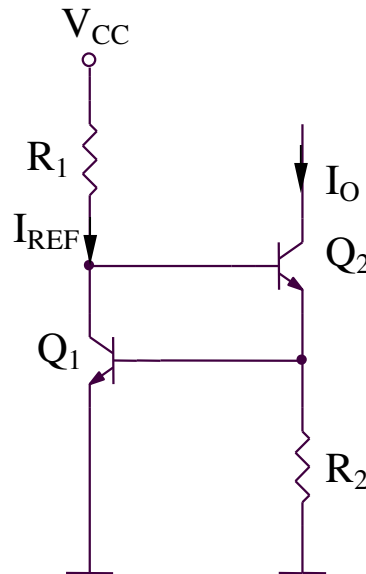
Les quatre courants de sortie sont:

$$I_3 = I_{REF} \frac{R_2}{R_3}; \dots; I_6 = I_{REF} \frac{R_2}{R_6}$$

où:

$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - 2v_{BE}}{R_1 + R_2}$$

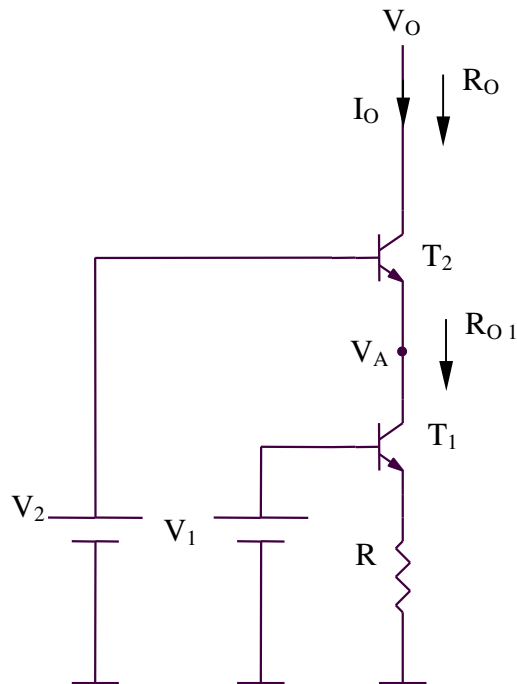
Source de courant en utilisant comme référence la tension base-émetteur



$$I_O = \frac{v_{BE1}}{R_2} = \frac{V_{th}}{R_2} \ln \frac{V_{CC} - 2v_{BE}}{R_1 I_S}$$

4.1.3. Sources de courant cascode

Source de courant cascode bipolaire (1)



Le courant de sortie

$$I_O = \frac{V_1 - V_{BE1}}{R}$$

La résistance de sortie

$$R_O = r_{o2} \left(1 + \frac{\beta R_{O1}}{r_{\pi 2} + R_{O1}} \right) \cong \beta r_{o2}$$

$$R_{O1} = r_{o1} \left(1 + \frac{\beta R}{r_{\pi 1} + R} \right) \gg r_{\pi 2}$$

Tension minimale de sortie

$$V_{O \min} = V_A + V_{CE2 \text{sat}} = V_2 - V_{BE2} + V_{CE2 \text{sat}}$$

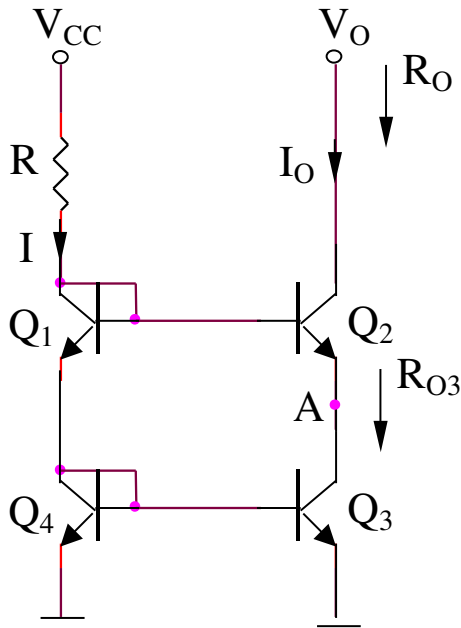
Il faut que:

$$V_{CE1} > V_{CE1 \text{sat}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow (V_2 - V_{BE2}) - (V_1 - V_{BE1}) > V_{CE1 \text{sat}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow V_2 - V_1 > V_{CE1 \text{sat}}$$

Source de courant cascode bipolaire (2)



Le courant de sortie

$$I_O = I = \frac{V_{CC} - 2v_{BE}}{R}$$

La résistance de sortie

$$R_O = r_{o2} \left(1 + \beta \frac{R_{O3}}{r_{\pi 2} + R_{O3} + R // (2 / g_{m1})} \right)$$

$$R_{O3} = r_{o3} \gg r_{\pi 2}, R // (2 / g_{m1})$$

Donc:

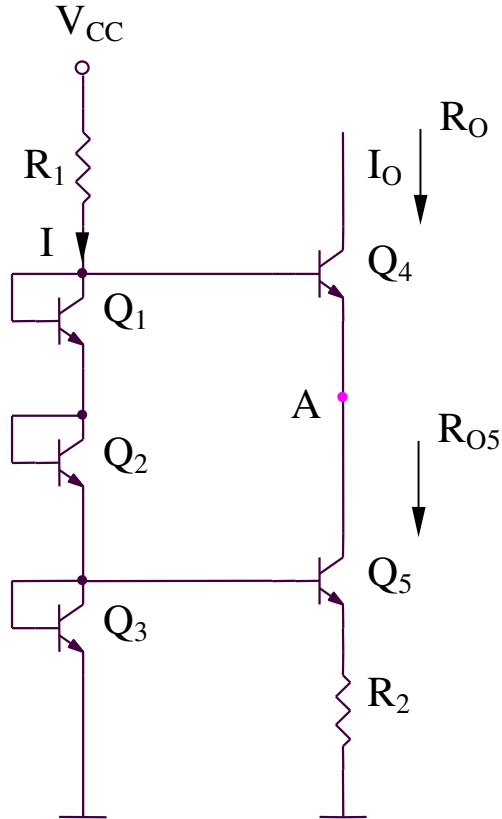
$$R_O \cong \beta r_{o2}$$

Tension minimale de sortie

$$V_{O\min} = V_A + V_{CE2\text{sat}}$$

$$V_A = v_{BE1} + v_{BE4} - v_{BE2} = v_{BE}$$

Source de courant cascode bipolaire (3)



Le courant de sortie

$$I_O = \frac{v_{BE3} - v_{BE5}}{R_2} = \frac{V_{th}}{R_2} \ln\left(\frac{I}{I_O}\right)$$

$$I = \frac{V_{CC} - 3v_{BE}}{R_1}$$

La résistance de sortie

$$R_O = r_{o4} \left(1 + \beta \frac{R_{O5}}{r_{\pi4} + R_{O5} + R_1 // (3/g_{m1})} \right)$$

$$R_{O5} \cong r_{o5} \left(1 + \frac{\beta R_2}{r_{\pi5} + R_2 + 1/g_{m3}} \right)$$

$$R_{O5} \gg r_{\pi4}, R_1 // (3/g_{m1})$$

Donc:

$$R_O \cong \beta r_{o4}$$

Tension minimale de sortie

$$V_{Omin} = V_A + V_{CE4sat}$$

$$V_A = 2v_{BE}$$

Source de courant cascode MOS (1)

Le courant de sortie

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= V_{GS1} + I_O R \\ I_O &= \frac{K}{2} (V_{GS1} - V_T)^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_1 = V_{GS1} + \frac{KR}{2} (V_{GS1} - V_T)^2$$

$$\Rightarrow V_{GS1} (> V_T) \Rightarrow I_O$$

La résistance de sortie

$$R_O = r_{ds2} (1 + g_m R_{O1}) \cong g_m r_{ds}^2$$

$$R_{O1} = r_{ds1} (1 + g_m R)$$

Tension minimale de sortie

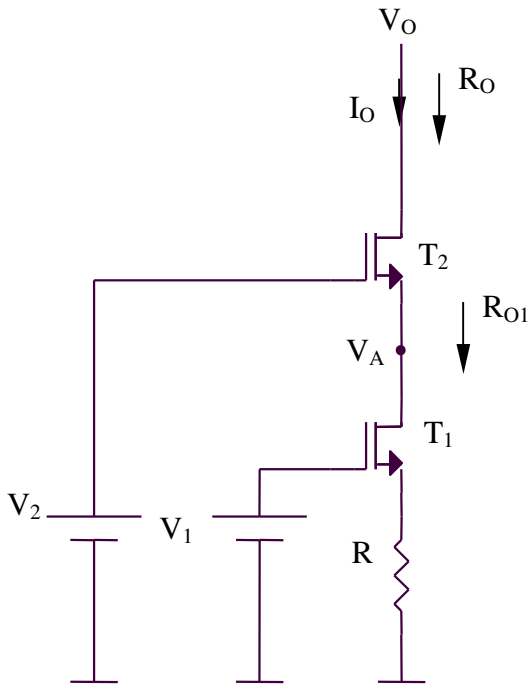
$$V_{Omin} = V_2 - V_{GS2} + (V_{GS2} - V_T) = V_2 - V_T$$

Il faut que:

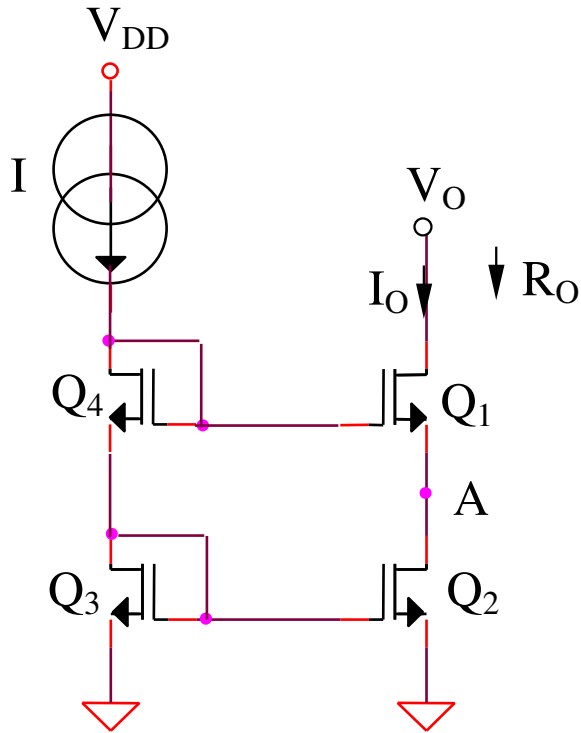
$$V_{DS1} > V_{DS1sat} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow (V_2 - V_{GS2}) - (V_1 - V_{GS1}) > V_{DS1sat} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow V_2 - V_1 > V_{DS1sat} = V_{GS} - V_T = \sqrt{\frac{2I_O}{K}}$$



Source de courant cascode MOS (2)



Le courant de sortie

$$\frac{I_O}{I} = \frac{1 + \lambda V_{DS2}}{1 + \lambda V_{DS3}}$$

La résistance de sortie

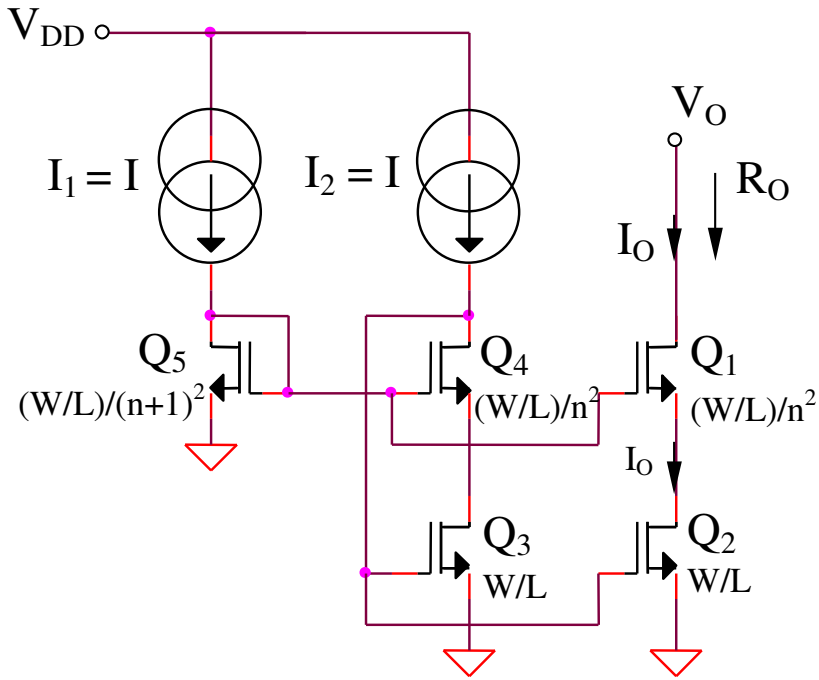
$$R_O = r_{ds1} (1 + g_{m1} r_{ds2}) \cong g_{m1} r_{ds2}^2$$

Tension minimale de sortie

$$V_{O\min} = V_A + V_{DS1sat} = V_{GS} + (V_{GS} - V_T)$$

$$V_{O\min} = 2V_{GS} - V_T \cong V_T + 2\sqrt{\frac{2I}{K}}$$

Source de courant cascode MOS (3)



Le courant de sortie

$$I_O = I$$

La résistance de sortie

$$R_O = r_{ds1} (1 + g_{m1} r_{ds2}) \cong g_{m1} r_{ds2}^2$$

Tension minimale de sortie

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{K'}{2} \frac{W/L}{(n+1)^2} (V_{GS5} - V_T)^2 \\ I &= \frac{K'}{2} \frac{W/L}{n^2} (V_{GS1(4)} - V_T)^2 \\ I &= \frac{K'}{2} (W/L) (V_{GS2(3)} - V_T)^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{GS5} - V_T = (n+1)(V_{GS2(3)} - V_T) \\ V_{GS1(4)} - V_T = n(V_{GS2(3)} - V_T) \end{cases}$$

Le drain-source tension pour transistor T_2 est:

$$V_{DS2} = V_{GS5} - V_{GS1} = (V_{GS5} - V_T) - (V_{GS1} - V_T) = V_{GS2} - V_T = V_{DS2sat}$$

Donc, T_2 est polarisée sur la limite de saturation et il résulte:

$$V_{Omin} = V_{DS1sat} + V_{DS2} = (n+1)(V_{GS2} - V_T) = (n+1)\sqrt{\frac{2I}{K}}$$

4.1.4. Sources de courant avec auto-polarisation

Miroir de courant

$$I_O = \frac{V_{CC} - v_{BE}}{R}$$

$$S_{V_{CC}}^{I_O} = \frac{V_{CC}}{I_O} \frac{\partial I_O}{\partial V_{CC}} \cong 1$$

Source de courant Widlar

$$I_O = \frac{V_{th}}{R_2} \ln \frac{I}{I_O}$$

$$\frac{\partial I_O}{\partial V_{CC}} = \frac{V_{th}}{R_2} \frac{I_O}{I} \left(\frac{1}{I_O} \frac{\partial I}{\partial V_{CC}} - \frac{I}{I_O^2} \frac{\partial I_O}{\partial V_{CC}} \right)$$

$$\frac{\partial I_O}{\partial V_{CC}} = \frac{\frac{V_{th}}{IR_2}}{1 + \frac{V_{th}}{R_2 I_O}} \frac{\partial I}{\partial V_{CC}}$$

$$S_{V_{CC}}^{I_O} = \frac{V_{CC}}{I_O} \frac{\partial I_O}{\partial V_{CC}} = \frac{V_{CC}}{I} \frac{1}{1 + \frac{R_2 I_O}{V_{th}}} \frac{\partial I}{\partial V_{CC}} \cong \frac{1}{1 + \frac{R_2 I_O}{V_{th}}}$$

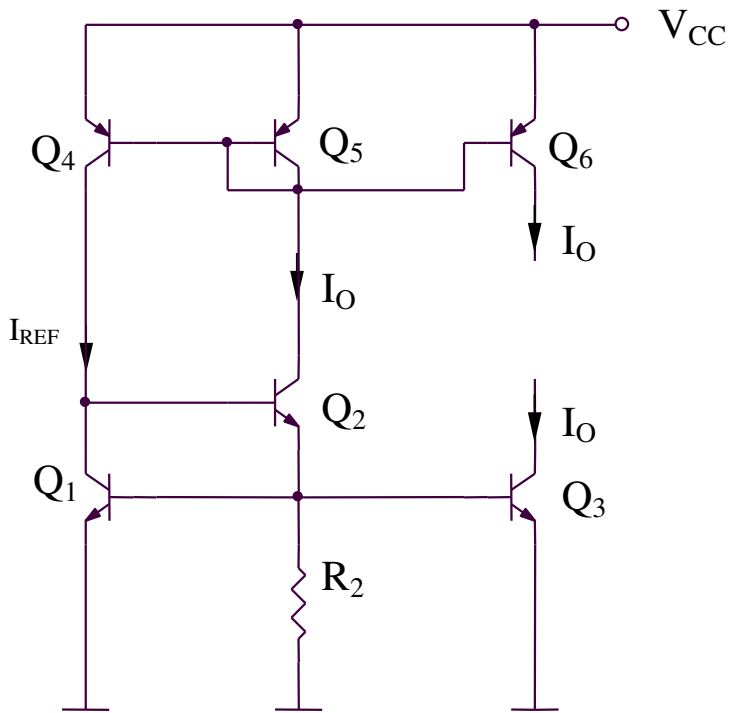
Source de courant en utilisant comme référence la tension base-émetteur

$$I_O = \frac{V_{th}}{R_2} \ln \frac{V_{CC} - 2v_{BE}}{R_1 I_S}$$

$$\frac{\partial I_O}{\partial V_{CC}} \cong \frac{V_{th}}{R_2} \frac{R_1 I_S}{V_{CC} - 2v_{BE}} \frac{1}{R_1 I_S}$$

$$S_{V_{CC}}^{I_O} \cong \frac{V_{th}}{v_{BE}} \cong 4\%$$

Source de courant avec auto-polarisation en utilisant comme référence la tension base-émetteur



$$I_O = \frac{v_{BE1}}{R_2} = \frac{V_{th}}{R_2} \ln \frac{I_{REF}}{I_S}$$

$$\frac{I_{REF}}{I_O} = \frac{1 + \frac{V_{CC} - 2v_{BE}}{V_A}}{1 + \frac{v_{BE}}{V_A}} \cong 1 + \frac{V_{CC} - 2v_{BE}}{V_A}$$

$$\Rightarrow I_O = \frac{V_{th}}{R_2} \ln \frac{I_O}{I_S} + \frac{V_{th}}{R_2} \ln \left(1 + \frac{V_{CC} - 2v_{BE}}{V_A} \right)$$

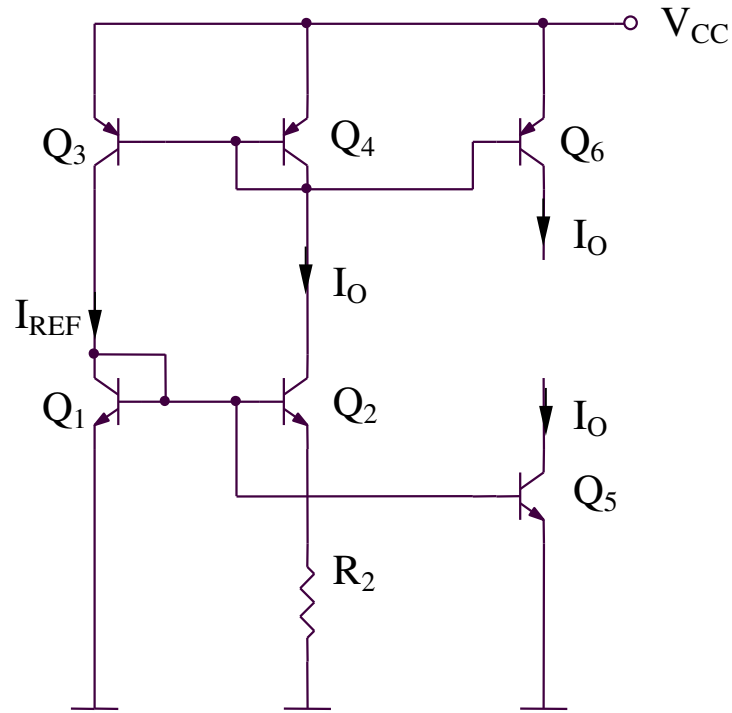
En dérivant:

$$\frac{\partial I_O}{\partial V_{CC}} = \frac{V_{th}}{R_2 (V_A + V_{CC})}$$

il résulte:

$$S_{V_{CC}}^{I_O} \cong \frac{V_{th}}{v_{BE}} \frac{I}{1 + \frac{V_A}{V_{CC}}}$$

Source de courant Widlar avec auto-polarisation



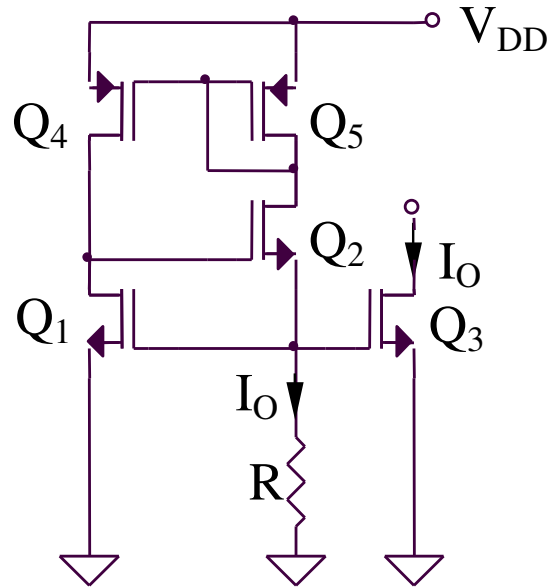
$$I_O = \frac{v_{BE1} - v_{BE2}}{R_2}$$

$$I_O = \frac{V_{th}}{R_2} \ln\left(\frac{I_{REF}}{I_O}\right) + \frac{V_{th}}{R_2} \ln\left(\frac{I_{S2}}{I_{S1}}\right)$$

$$I_O \cong \frac{V_{th}}{R_2} \ln\left(1 + \frac{V_{CC}}{V_A}\right) + \frac{V_{th}}{R_2} \ln\left(\frac{I_{S2}}{I_{S1}}\right)$$

$$S_{V_{CC}}^{I_O} \cong \frac{V_{CC}}{V_A} \frac{1}{\ln\left(\frac{I_{S2}}{I_{S1}}\right)}$$

Source de courant MOS avec auto-polarisation



Le courant de sortie

$$I_O = \frac{V_{GS}}{R} = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$\frac{KR}{2} V_{GS}^2 - (1 + KR V_T) V_{GS} + \frac{KR}{2} V_T^2 = 0$$

Il résulte:

$$V_{GS1,2} = V_T + \frac{1}{KR} \pm \frac{\sqrt{2KR V_T + 1}}{KR}$$

$$V_{GS} = V_T + \frac{1}{KR} + \frac{\sqrt{2KR V_T + 1}}{KR}$$

Donc:

$$I_O = \frac{1}{KR^2} \left(1 + KR V_T + \sqrt{1 + 2KR V_T} \right)$$

4.2. Sources de tension de référence

4.2. Sources de tension de référence

4.2.1. Classification

I. Sources de tension élémentaires

- complexité réduite
- faibles performances

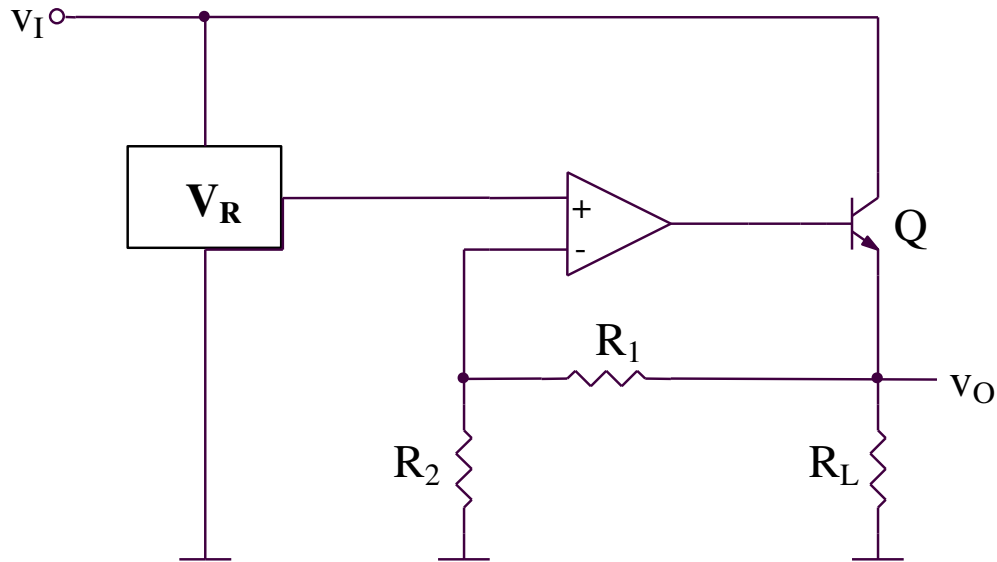
II. Sources de tension avec réaction

- réduction de la résistance de sortie
- grand complexité

III. Température-compensée sources de tension

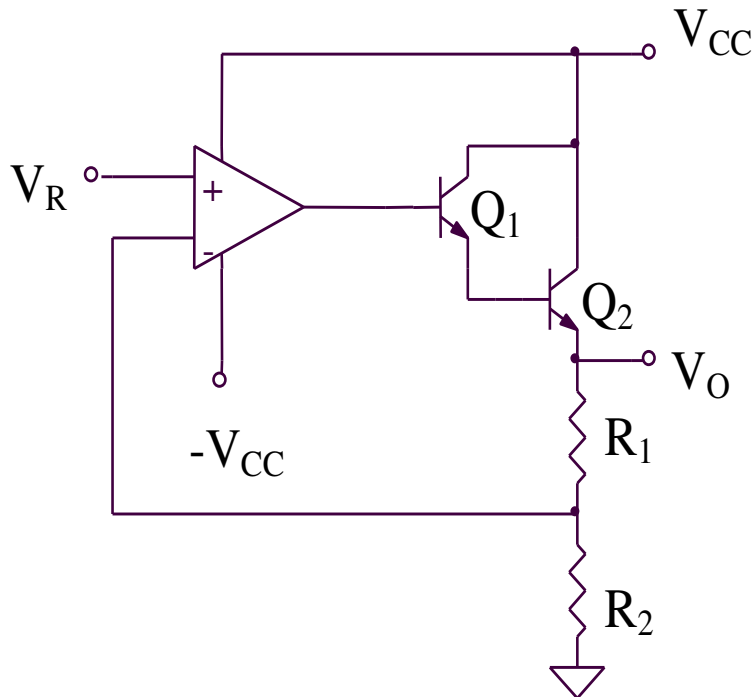
- une dépendance réduite de température pour la tension de sortie
- grand complexité

4.2.2. Sources de tension avec réaction



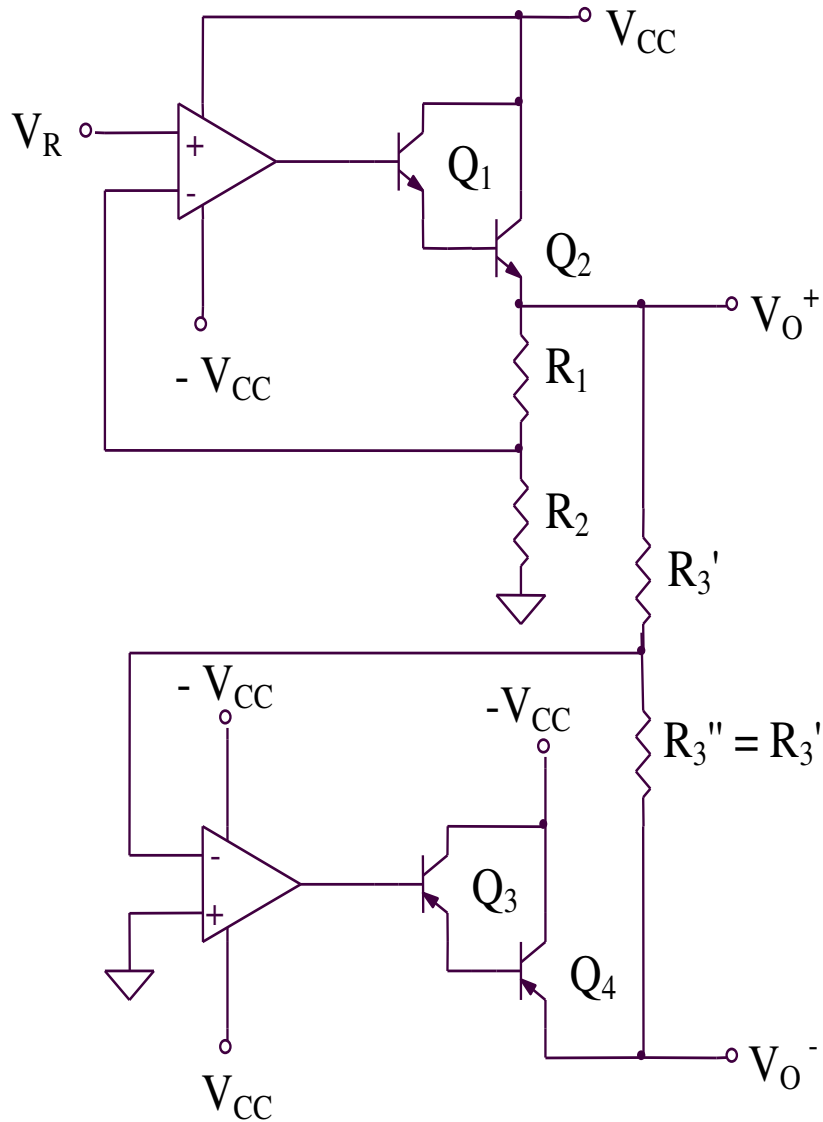
$$V_R = V_O \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_O = V_R \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$



$$V_R = V_O \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

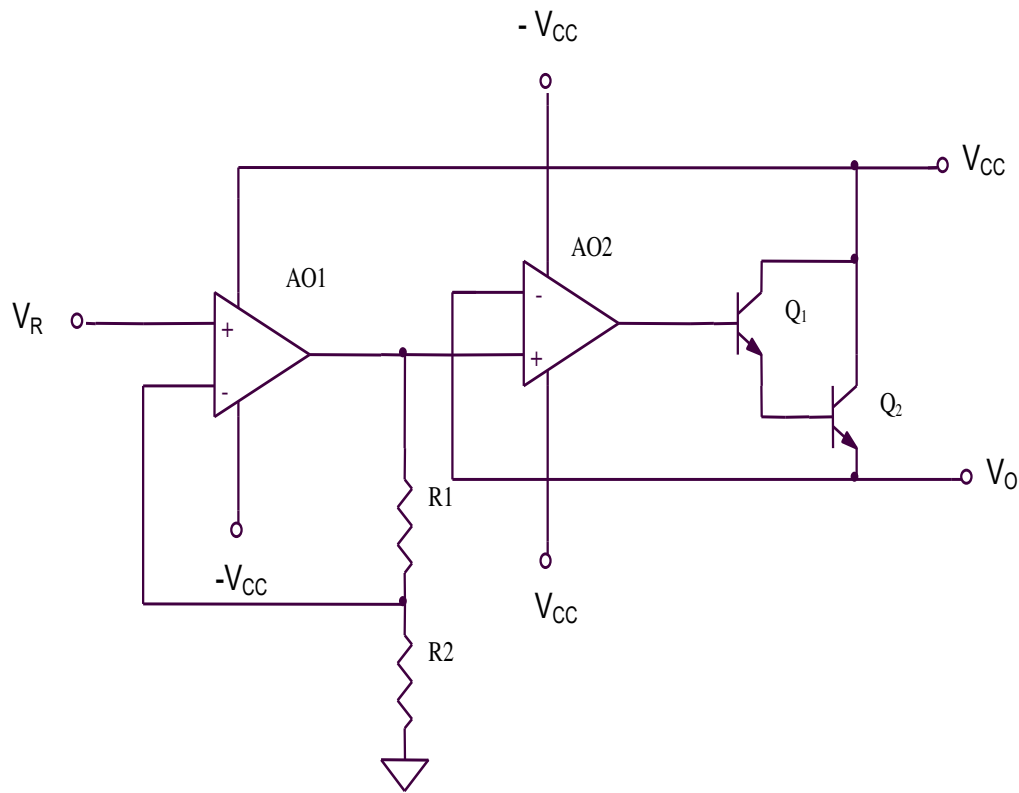
$$V_O = V_R \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$



$$V_R = V_{O^+} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_{O^+} = V_R \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

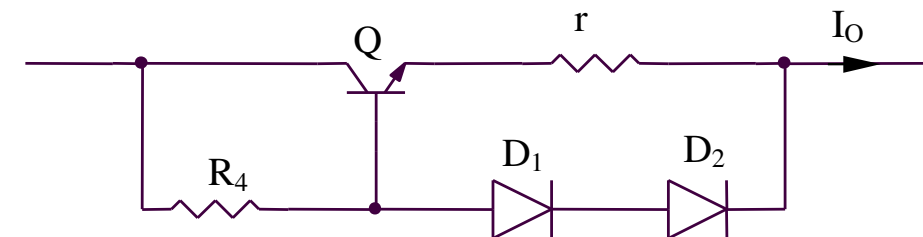
$$\frac{V_{O^+}}{R_3'} = -\frac{V_{O^-}}{R_3''} \Rightarrow V_{O^-} = -V_{O^+}$$



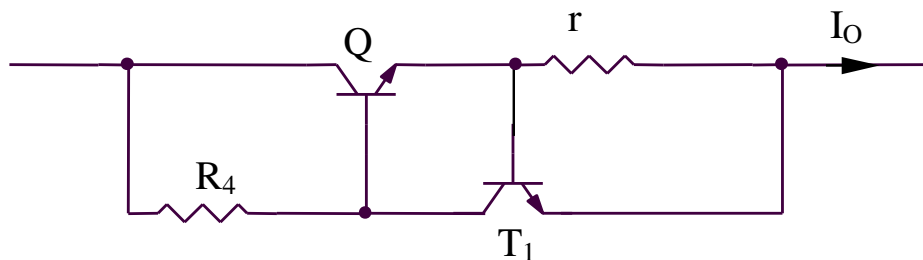
$$V_R = V_O \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_O = V_R \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

Protéction de surcharge (1)

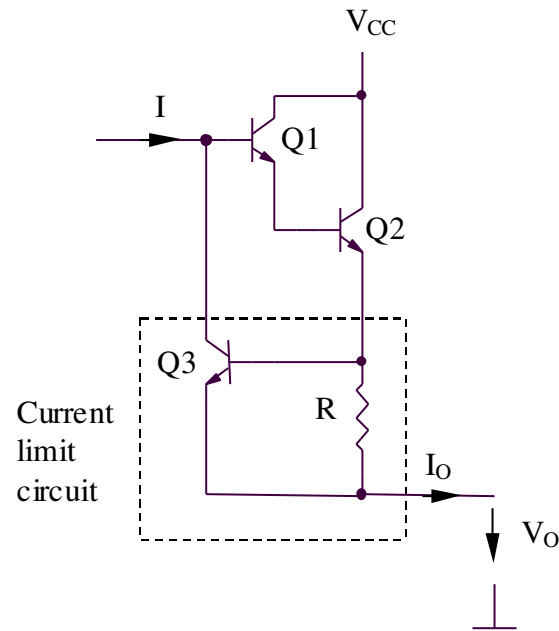


$$I_{OL} = \frac{V_{D1} + V_{D2} - V_{BE}}{r} \cong \frac{V_D}{r}$$



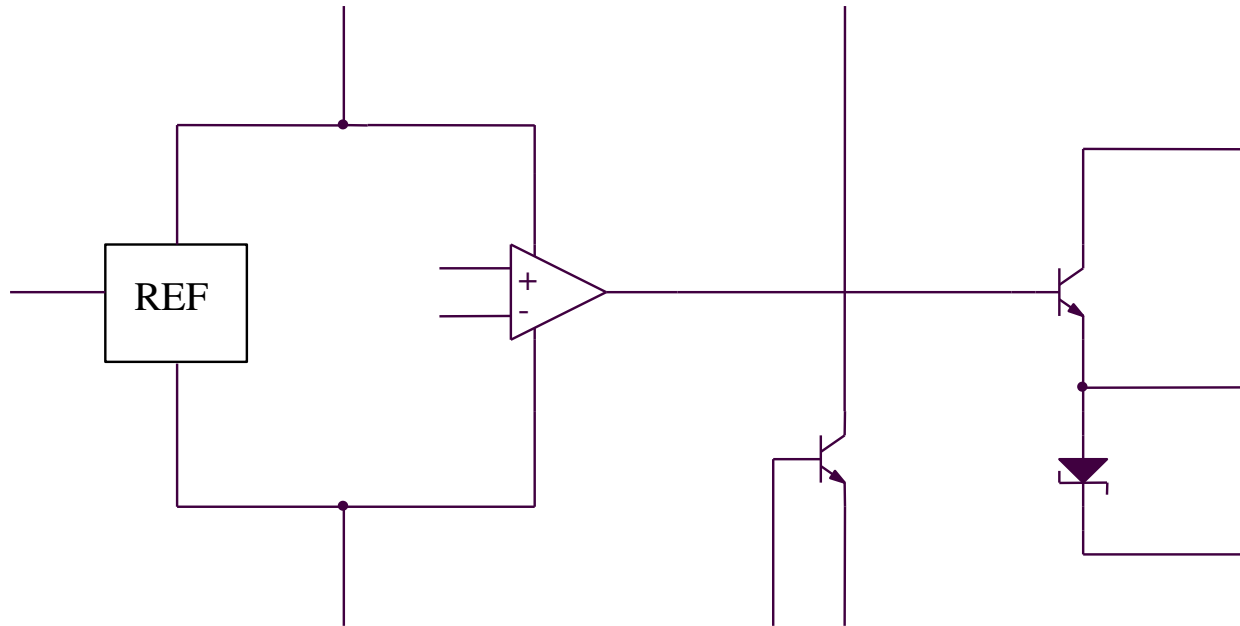
$$I_{OL} = \frac{V_{BE}}{r}$$

Protéction de surcharge (2)

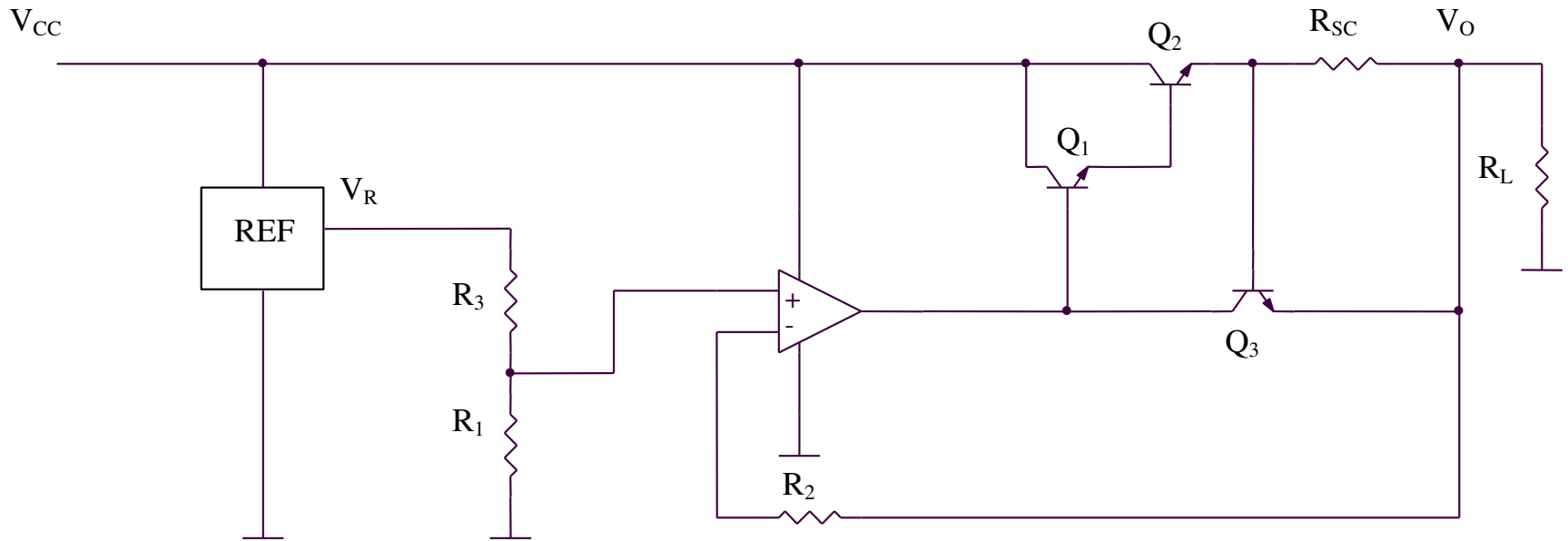


$$I_{OL} = \frac{V_{BE3}}{R}$$

Circuit BA 723



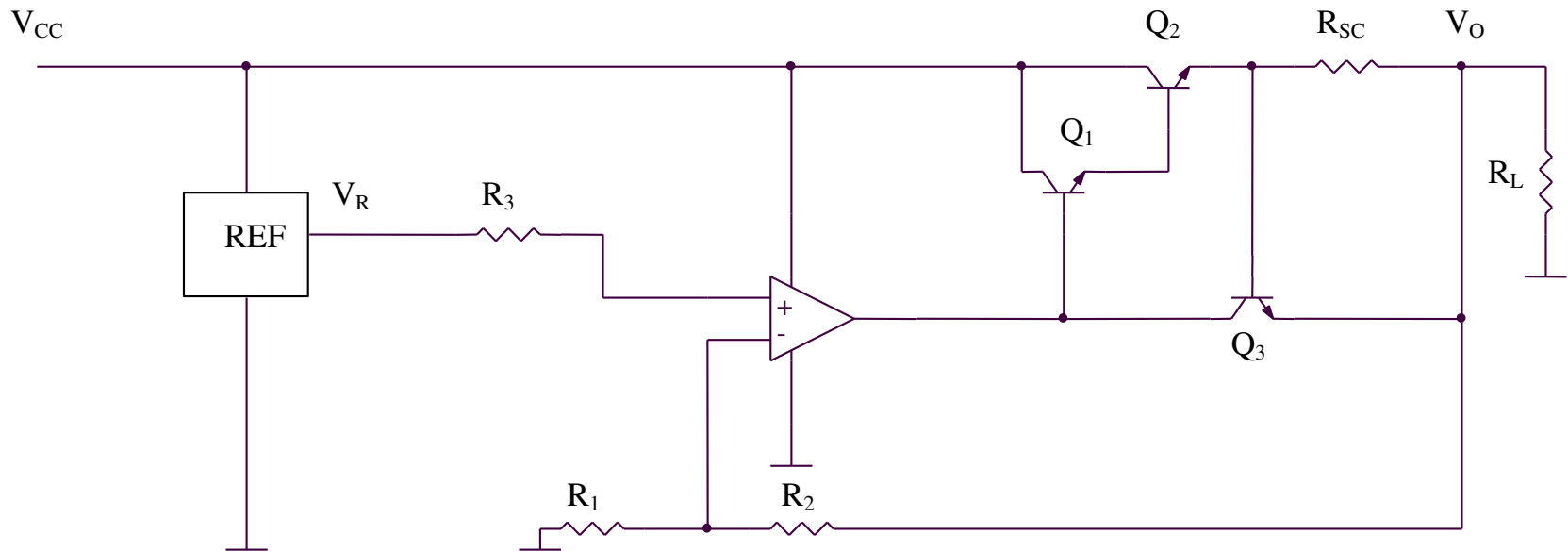
Application pour $V_O < V_R$



$$V_O = V_R \frac{R_1}{R_1 + R_3} < V_R$$

$$I_{Osc} = \frac{V_{BE}}{R_{sc}}$$

Application pour $V_O > V_R$



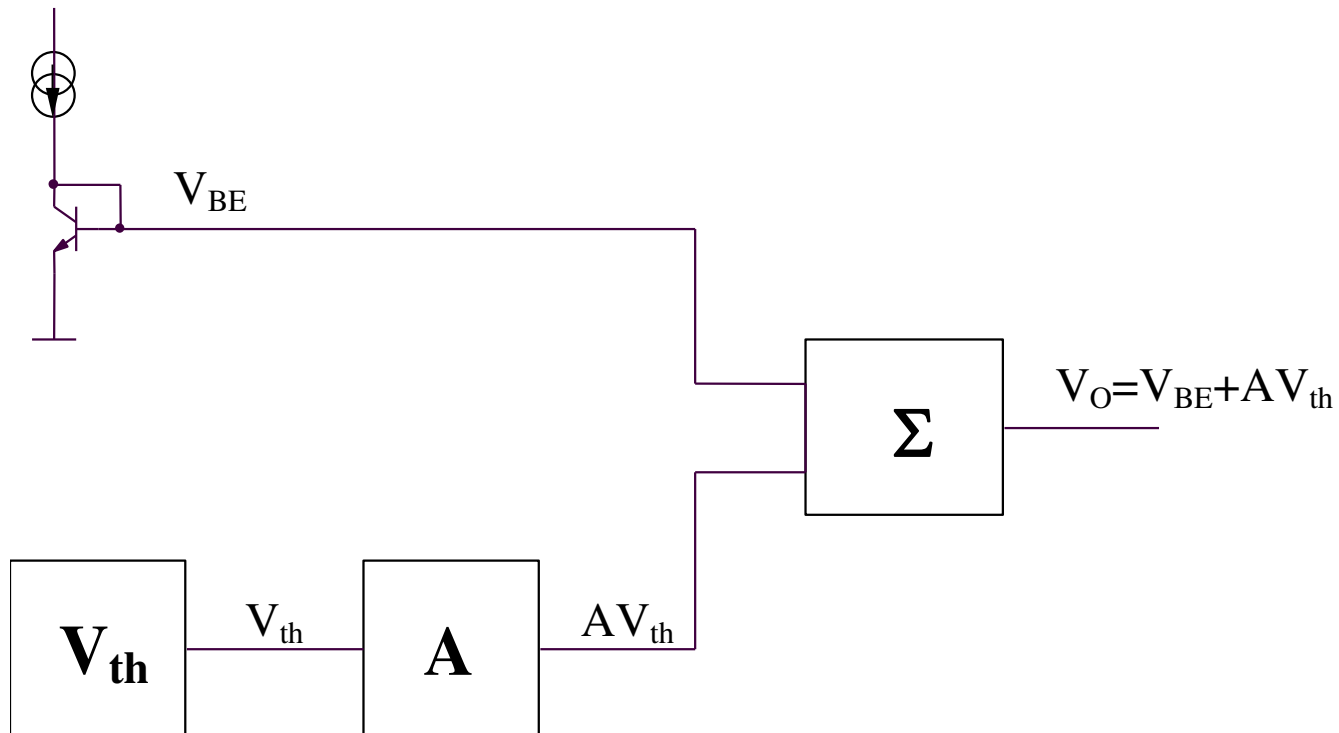
$$V_O \frac{R_1}{R_1 + R_2} = V_R \Rightarrow V_O = V_R \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) > V_R$$

$$I_{Osc} = \frac{V_{BE}}{R_{sc}}$$

4.2.3. Température-compensée sources de tension

Références de tension a bande interdite

Elle utilise le fait que la variation avec la température est de sens opposé pour V_{BE} et $V_{th} = kT/q$. On peut donc obtenir un coefficient de température nulle par utilisant une sommation pondérée adéquate de ces deux terms.



La dépendance de température de V_{BE}

$$\left. \begin{aligned} V_{BE}(T) &= V_{th} \ln \left[\frac{I_C(T)}{I_S(T)} \right] \\ I_S(T) &= CT^\eta \exp \left(-\frac{E_{GO}}{V_{th}} \right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_{BE}(T) = E_{GO} + \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_C(T)}{CT^\eta} \right]$$

$$\left. \begin{aligned} V_{BE}(T_0) &= E_{GO} + \frac{kT_0}{q} \ln \left[\frac{I_C(T_0)}{CT_0^\eta} \right] \\ I_C(T) &= BT^\alpha \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{REF}(T) = E_{GO} + \frac{V_{BE}(T_0) - E_{GO}}{T_0} T + (\alpha - \eta) \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

$$\frac{V_{BE}(T_0) - E_{GO}}{T_0} \cong -2.1mV / K < 0$$

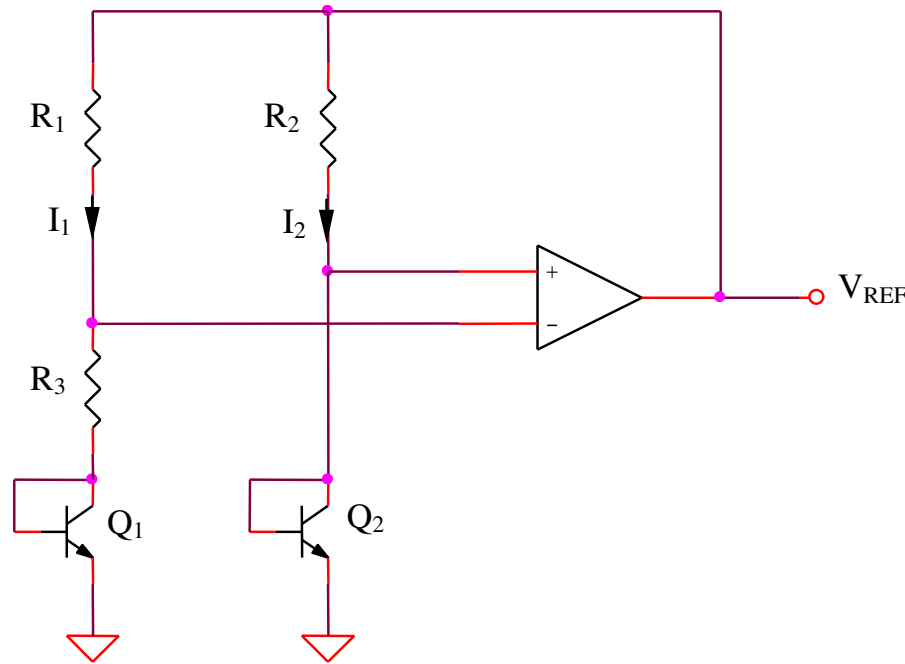
Le fonctionnement de la référence de tension

$$\left. \begin{aligned} V_{REF}(T) &= DV_{th} + V_{BE2}(T) \\ V_{BE}(T) &= A + BT + CT \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{REF}(T) = A + \left(B + D\frac{k}{q}\right)T + CT \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)$$

$$B + D\frac{k}{q} = 0 \Rightarrow V_{REF}(T) = A + CT \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)$$

Exemple (1)



$$I_1 = \frac{V_{BE2} - V_{BE1}}{R_3} = \frac{kT}{qR_3} \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \Rightarrow I_1 R_1 = I_2 R_2$$

$$\Rightarrow I_1 = \frac{kT}{qR_3} \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$$

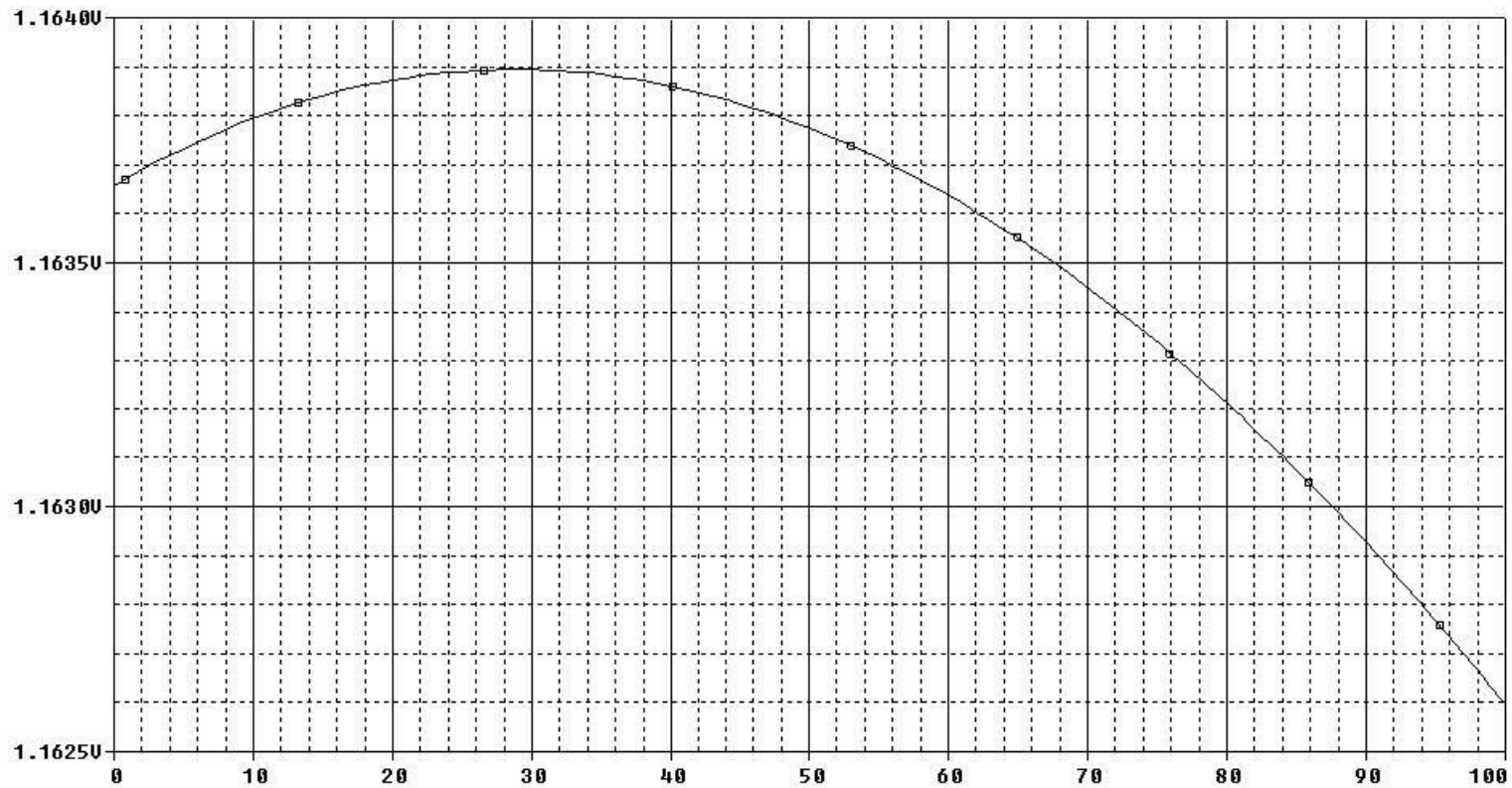
$$V_{REF}(T) = I_1(T)R_1 + V_{BE2}(T)$$

$$V_{BE}(T) = A + BT + CT \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{REF}(T) = A + \left[B + \frac{k}{q} \frac{R_1}{R_3} \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \right] T + CT \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)$$

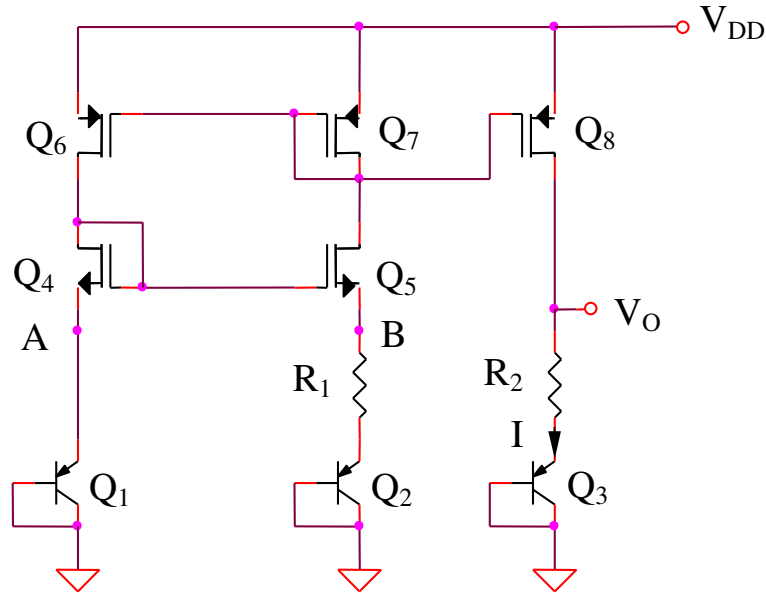
$$B + \frac{k}{q} \frac{R_1}{R_3} \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) = 0 \Rightarrow V_{REF}(T) = A + CT \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \cong A \cong 1,2V$$

V_{REF}



t

Exemple (2)



$$V_A - V_B = V_{GS5} - V_{GS4} = (V_{GS5} - V_T) - (V_{GS4} - V_T) = \sqrt{\frac{2I_{D5}}{K_5}} - \sqrt{\frac{2I_{D4}}{K_4}}$$

$$V_A - V_B = \sqrt{\frac{2I_{D5}}{K_5}} \left(1 - \sqrt{\frac{I_{D4} K_5}{I_{D5} K_4}} \right) = \sqrt{\frac{2I_{D5}}{K_5}} \left(1 - \sqrt{\frac{I_{D6} (W/L)_5}{I_{D7} (W/L)_4}} \right)$$

$$V_A - V_B = \sqrt{\frac{2I_{D5}}{K}} \left(1 - \sqrt{\frac{(W/L)_5 (W/L)_6}{(W/L)_4 (W/L)_7}} \right)$$

Pour: $\frac{(W/L)_4}{(W/L)_5} = \frac{(W/L)_6}{(W/L)_7} \Rightarrow V_A = V_B$

$$\Rightarrow V_O(T) = /V_{BE_3}(T)/ + I(T)R_2 = /V_{BE_3}(T)/ + \frac{/V_{BE_1}(T)/ - /V_{BE_2}(T)/}{R_1} R_2$$

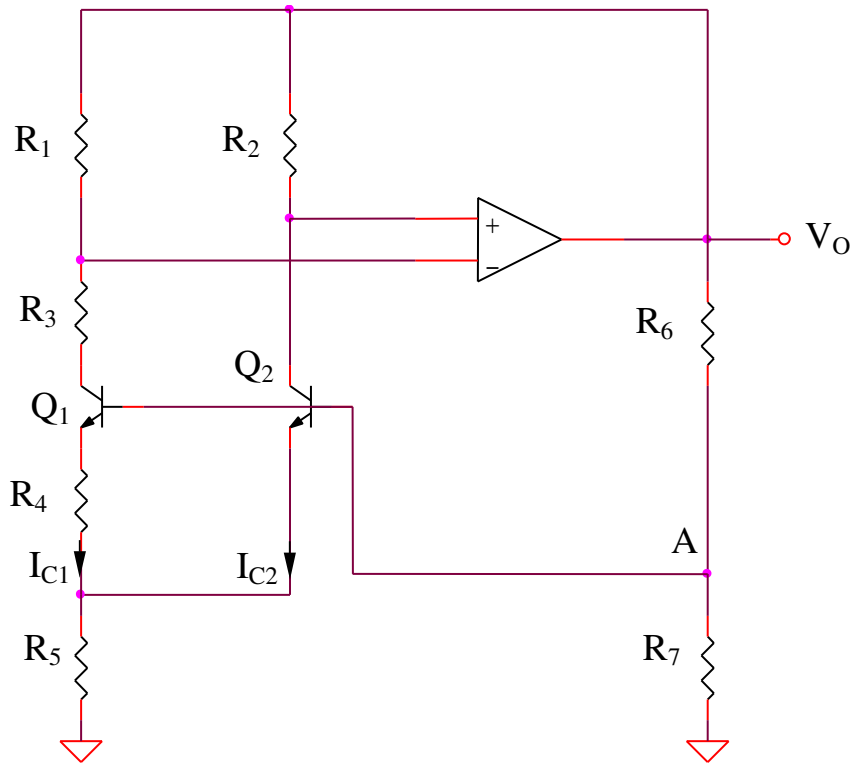
$$V_O(T) = /V_{BE_3}(T)/ + \frac{R_2}{R_1} \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{D6}}{I_{D7}}$$

$$V_O(T) = /V_{BE_3}(T)/ + \frac{R_2}{R_1} \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{(W/L)_6}{(W/L)_7} \right]$$

$$/V_{BE}(T)/ = A + BT + CT \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \left. \vphantom{\frac{T}{T_0}} \right\} \Rightarrow V_O(T) = A + CT \ln \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

$$B + \frac{R_2}{R_1} \frac{k}{q} \ln \left[\frac{(W/L)_6}{(W/L)_7} \right] = 0$$

Exemple (3)



$$I_{C1} = \frac{V_{BE2} - V_{BE1}}{R_4} = \frac{V_{th}}{R_4} \ln \frac{I_{C2}}{I_{C1}} \quad \Rightarrow$$

$$I_{C1} R_1 = I_{C2} R_2$$

$$\Rightarrow I_{C1} = \frac{V_{th}}{R_4} \ln \frac{R_1}{R_2}$$

$$V_A(T) = (I_{C1} + I_{C2}) R_5 + V_{BE2}(T)$$

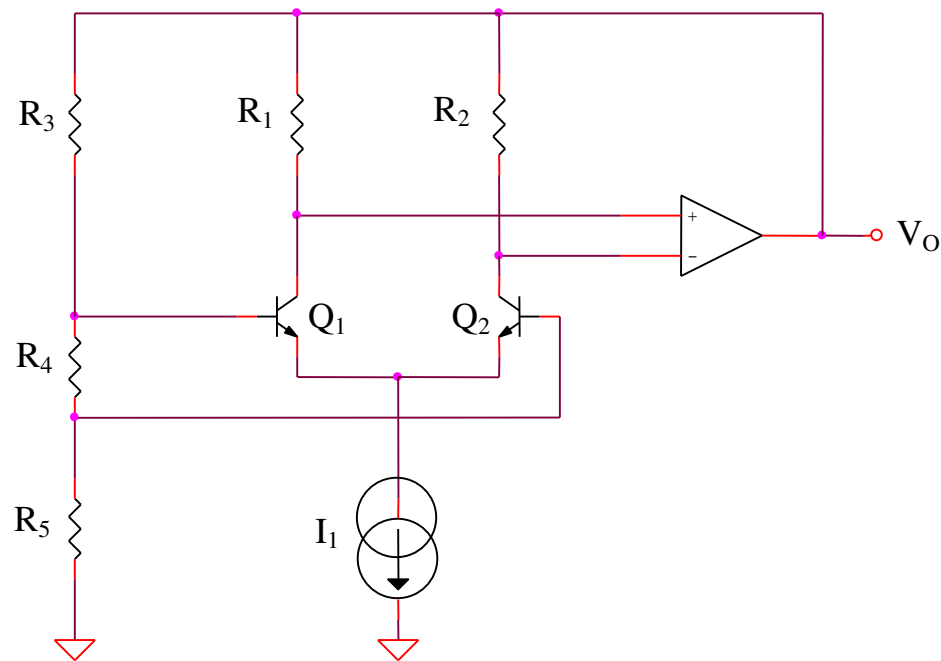
$$V_A(T) = V_O(T) \frac{R_7}{R_6 + R_7} \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_O(T) = \left(1 + \frac{R_6}{R_7} \right) \left[V_{BE2}(T) + \frac{R_5}{R_4} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) V_{th} \ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \right]$$

$$\frac{R_5}{R_4} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{k}{q} \ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right) + B = 0 \quad \Rightarrow V_O(T) = \left(1 + \frac{R_6}{R_7} \right) \left[A + CT \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right]$$

Circuits dérivés: sondes de température

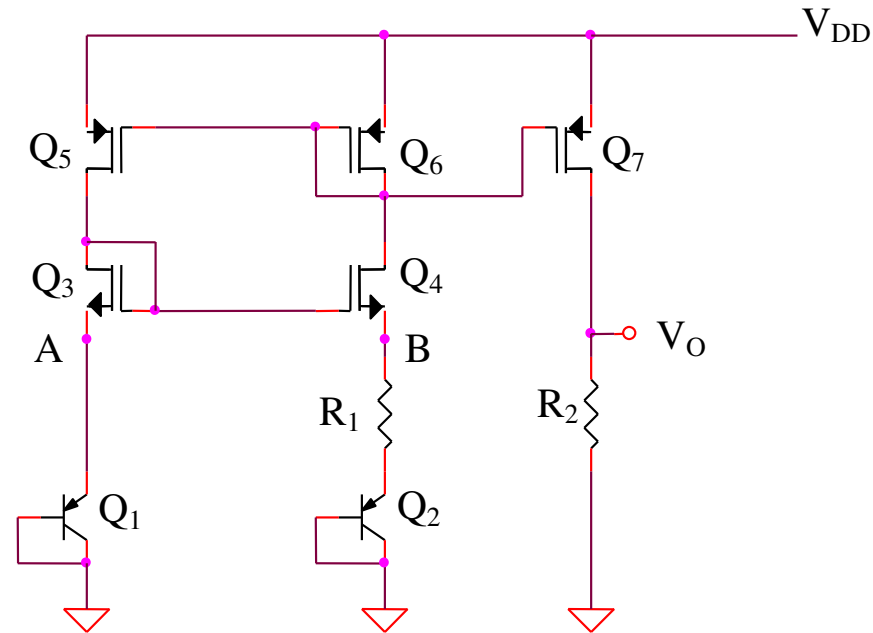
Exemple (1)



$$V_O(T) \frac{R_4}{R_3 + R_4 + R_5} = V_{BE1} - V_{BE2} = V_{th} \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}} = V_{th} \ln \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow$$

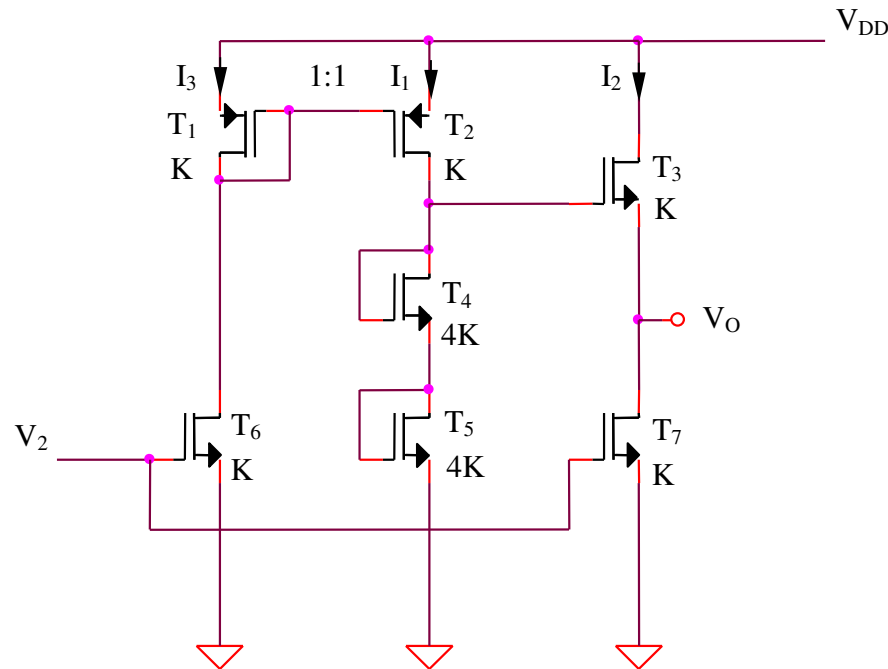
$$\Rightarrow V_O(T) = \left(1 + \frac{R_3 + R_5}{R_4} \right) V_{th} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) = ct.T$$

Exemple (2)



$$V_O = R_2 I_{D7}(T) = R_2 I_{D4}(T) = R_2 \frac{|V_{BE1}| - |V_{BE2}|}{R_1} = \frac{R_2}{R_1} V_{th} \ln \left[\frac{(W/L)_5}{(W/L)_6} \right] = ct.T$$

Exemple (3) - le circuit d'extracteur de tension de seuil



$$V_O = 2V_{GS4} - V_{GS3} = 2\left(V_T + \sqrt{\frac{2I}{4K}}\right) - \left(V_T + \sqrt{\frac{2I}{K}}\right) = V_T = V_{T0} + a(T - T_0)$$