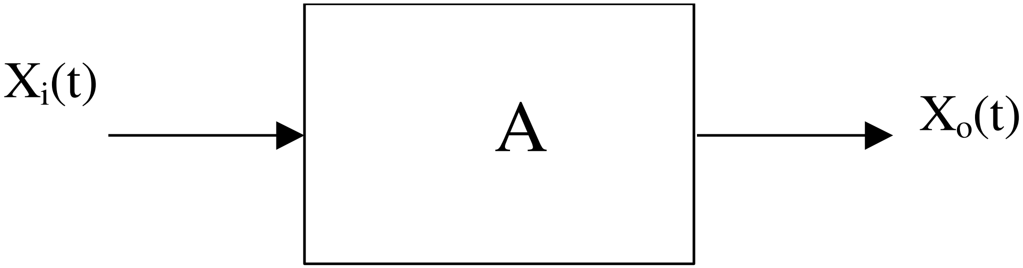
Chapitre 2

Etages amplificateurs

2.1. Introduction

2.1. Introduction



$$X_o(t) = AX_i(t-\tau)$$

$$P_o > P_i$$

(pour amplificateurs linéares)

2.1.1. Paramétres:

$$Z_i = \frac{v_I}{i_I}$$

$$A_i = \frac{i_O}{i_I}$$

$$A_z = \frac{v_O}{i_I}$$

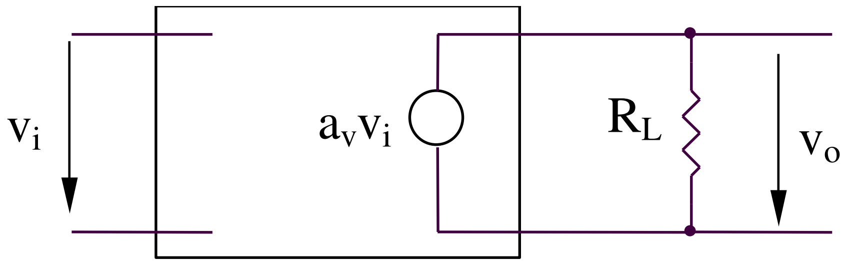
$$Z_o = \frac{v_O}{i_O}$$

$$A_Y = \frac{i_O}{v_I}$$

$$A_v = \frac{v_O}{v_I}$$

$$A_p = \frac{P_O}{P_I}$$

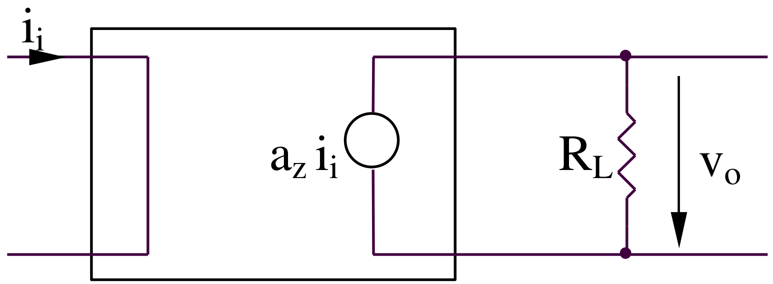
2.1.2. Amplificateurs idéales



Amplificateur de tension

$$v_O = a_v v_I \qquad i_I = 0; P_i = 0$$

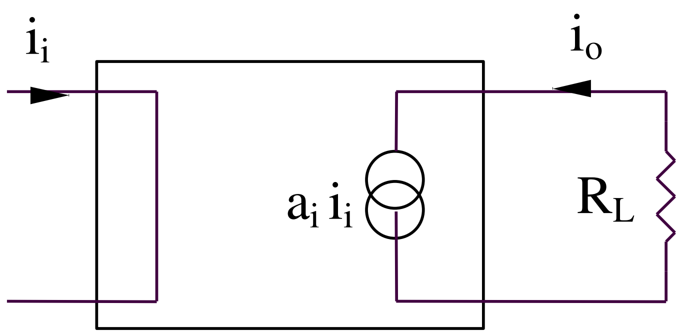
$$R_i \to \infty; R_o = 0$$



Amplificateur transimpédance

$$v_O = a_z i_I \qquad v_I = 0; P_i = 0$$

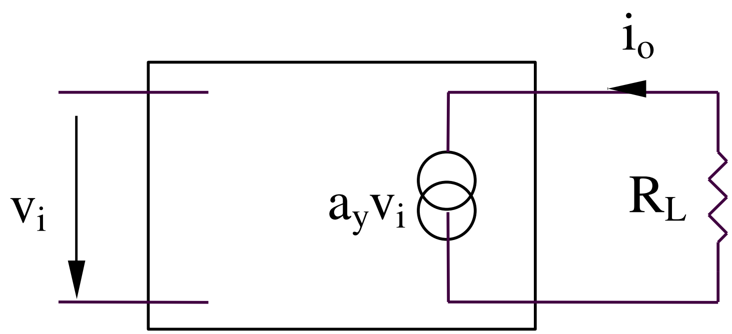
$$R_i = 0; R_o = 0$$



Amplificateur de courant

$$i_O = a_i i_I \qquad v_I = 0; P_i = 0$$

$$R_i = 0; R_o \to \infty$$

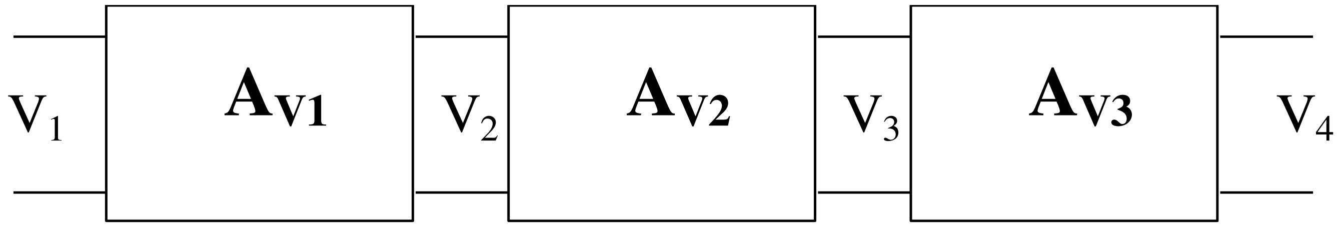


Amplificateur transadmitance

$$i_O = a_y v_I \qquad i_I = 0; P_i = 0$$

$$R_i \to \infty; R_o \to \infty$$

2.2. Le couplage des amplificateurs



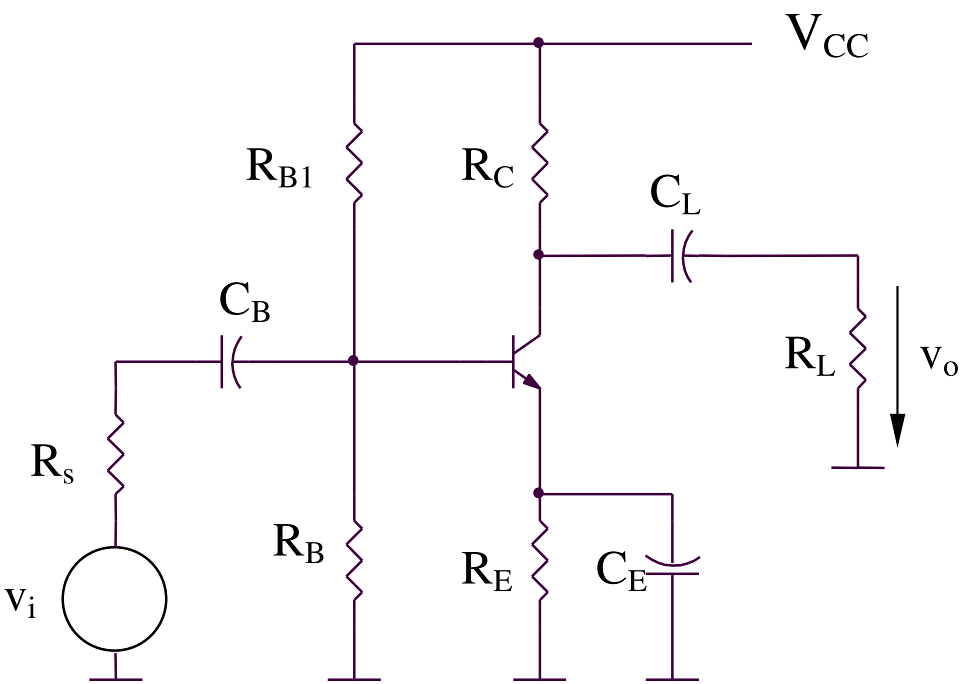
$$A_V = \frac{V_4}{V_1} = A_{V1} A_{V2} A_{V3}$$

$$A_V(dB) = A_{V1}(dB) + A_{V2}(dB) + A_{V3}(dB)$$

2.3. Etages amplificateurs à un transistor

2.3. Etages amplificateurs à un transistor

2.3.1. Montage émetteur commun

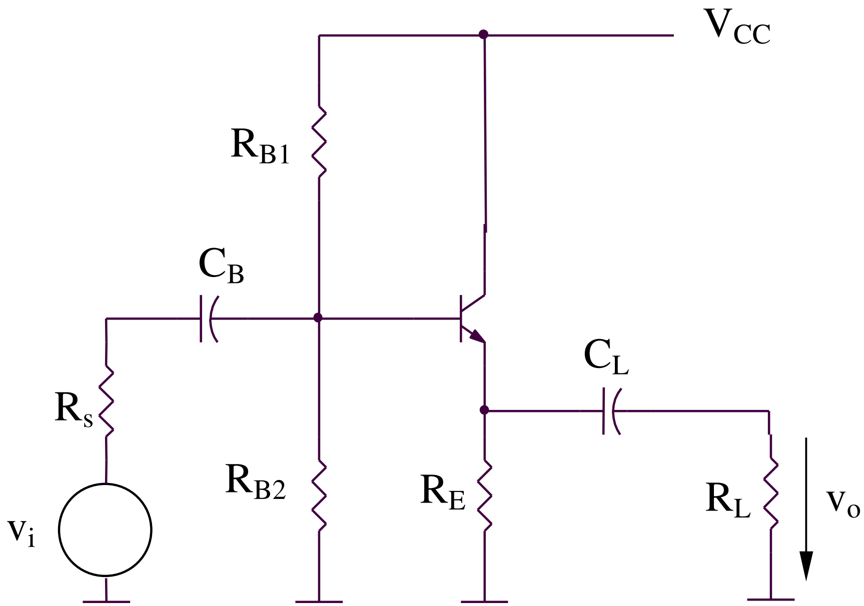


$$A_V = -g_m\left(R_C \,//\, R_L\right)$$

$$R_i = r_\pi \,//\, R_{B1} \,//\, R_{B2}$$

$$R_o = R_L \,//\, R_C \,//\, r_o$$

2.3.2. Montage collecteur commun

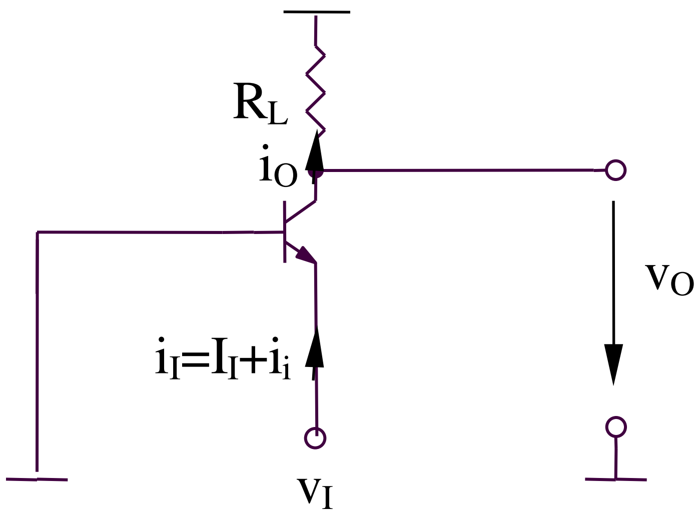


$$A_V = \frac{(\beta+1)(R_E \,//\, R_L)}{r_\pi + (\beta+1)(R_E \,//\, R_L)}$$

$$R_i = R_{B1} \,//\, R_{B2} \,//\, \left[r_\pi + (\beta+1)(R_E \,//\, R_L)\right]$$

$$R_o = R_E \,//\, R_L \,//\, 1/g_m$$

2.3.3. Montage base commune



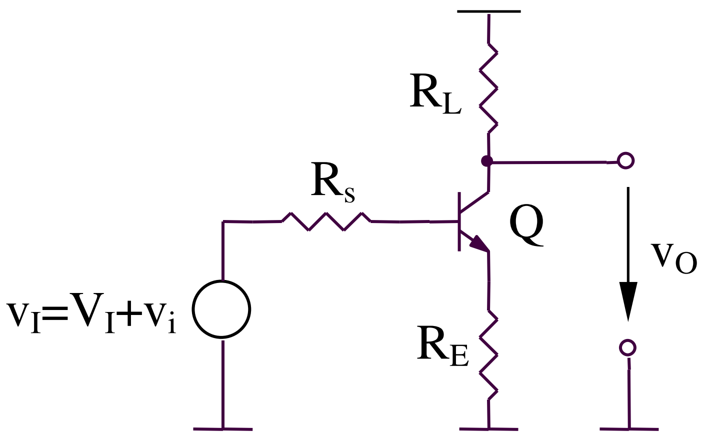
$$A_i = \frac{i_O}{i_I} \cong 1$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = g_m R_L$$

$$R_i = \frac{1}{g_m}$$

$$R_o = R_L // r_o$$

2.3.4. Montage émetteur dégéneré



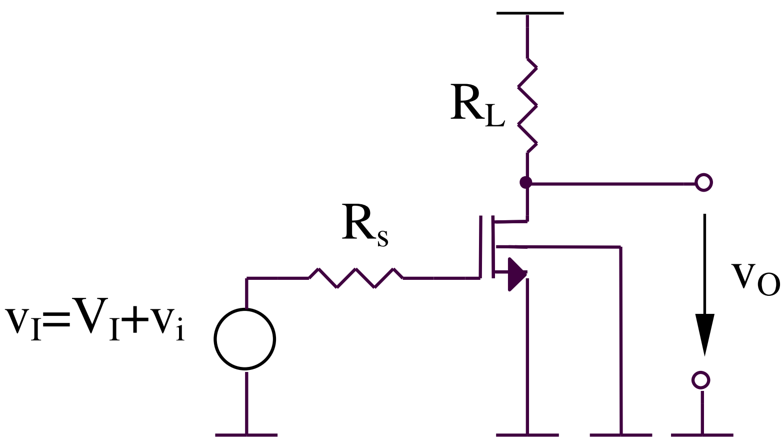
$$A_v = \frac{v_O}{v_I} = \frac{v_O}{i_C}\frac{i_C}{i_B}\frac{i_B}{v_I}$$

$$A_v = -\frac{\beta R_L}{R_s + r_\pi + (\beta + 1)R_E}$$

$$R_i = R_s + r_\pi + (\beta + 1)R_E$$

$$R_o \cong R_L$$

2.3.5. Montage source commune



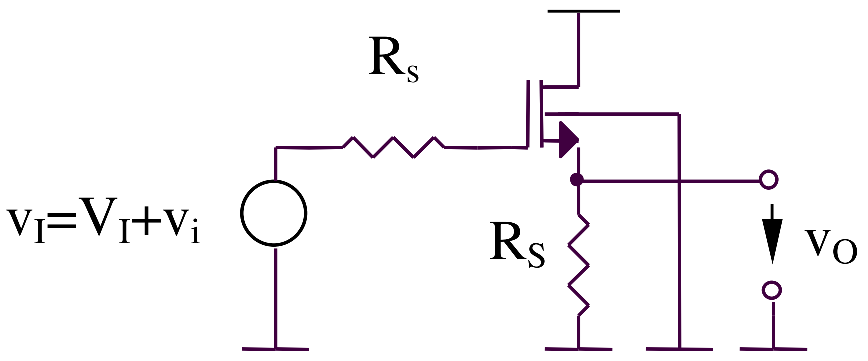
$$A_v = \frac{v_O}{v_I} = \frac{-g_m v_{GS}(R_L // r_{ds})}{v_{GS}}$$

$$A_v = -g_m\left(R_L // r_{ds}\right)$$

$$R_i = \infty$$

$$R_o = R_L // r_{ds}$$

2.3.6. Montage drain commun



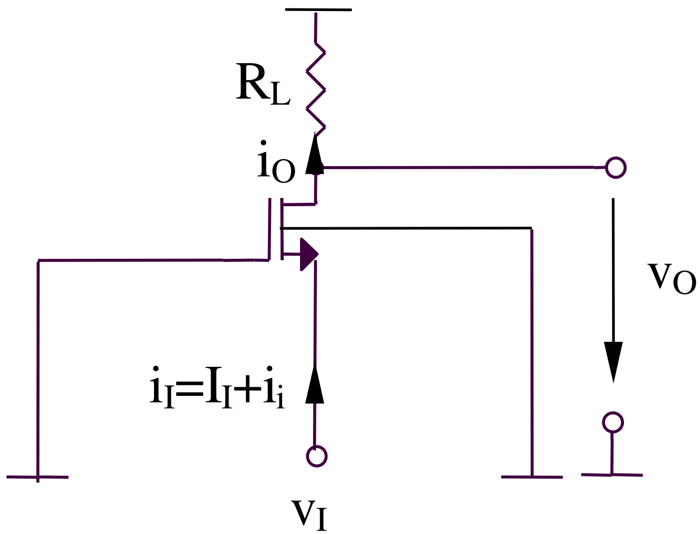
$$A_v = \frac{v_O}{v_I} = \frac{g_m v_{GS} R_s}{v_{GS} + g_m v_{GS} R_s}$$

$$A_v = \frac{g_m R_s}{1 + g_m R_s} \cong 1$$

$$R_i = \infty$$

$$R_o = \frac{1}{g_m} // R_s$$

2.3.7. Montage grille commune



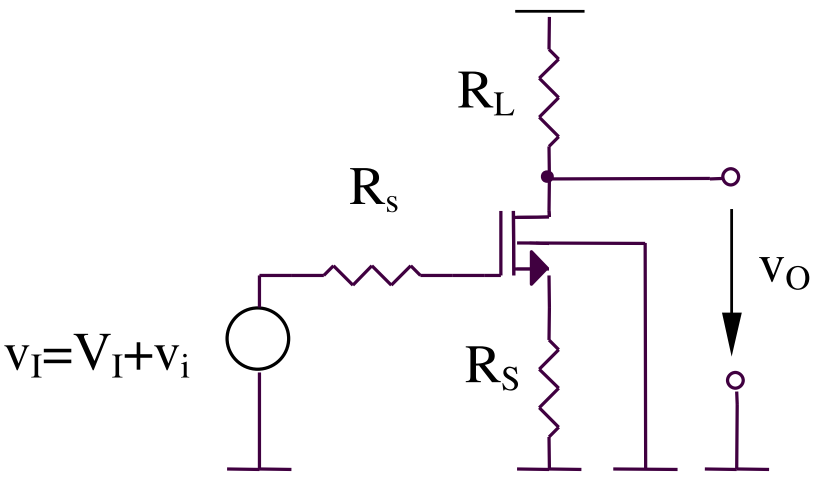
$$A_v = \frac{v_O}{v_I} = \frac{-g_m v_{GS} R_L}{-v_{GS}}$$

$$A_v = g_m R_L$$

$$R_i = \frac{1}{g_m}$$

$$R_o = R_L // r_{ds}$$

2.3.8. Montage source dégéneré



$$A_v = \frac{v_O}{v_I} = \frac{-g_m v_{GS} R_L}{v_{GS} + g_m v_{GS} R_s}$$

$$A_v = -\frac{g_m R_L}{1 + g_m R_s}$$

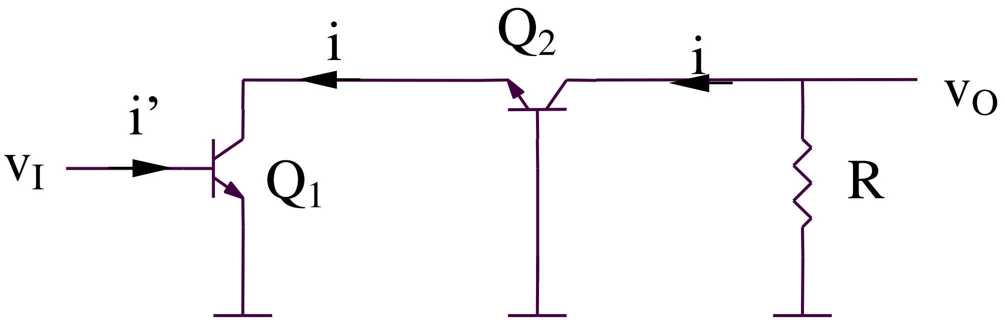
$$R_i = \infty$$

$$R_o \cong R_L$$

2.4. Etages amplificateurs à deux transistors

2.4. Etages amplificateurs à deux transistors

2.4.1. Montage cascode



$$A_V = \frac{v_O}{v_I} = \frac{v_O}{i}\frac{i}{i'}\frac{i'}{v_I} = -R\beta\frac{1}{r_{\pi 1}} = -g_{m1}R$$

2.5. Etage amplificateur différentiel bipolaire

2.5. Etage amplificateur différentiel bipolaire

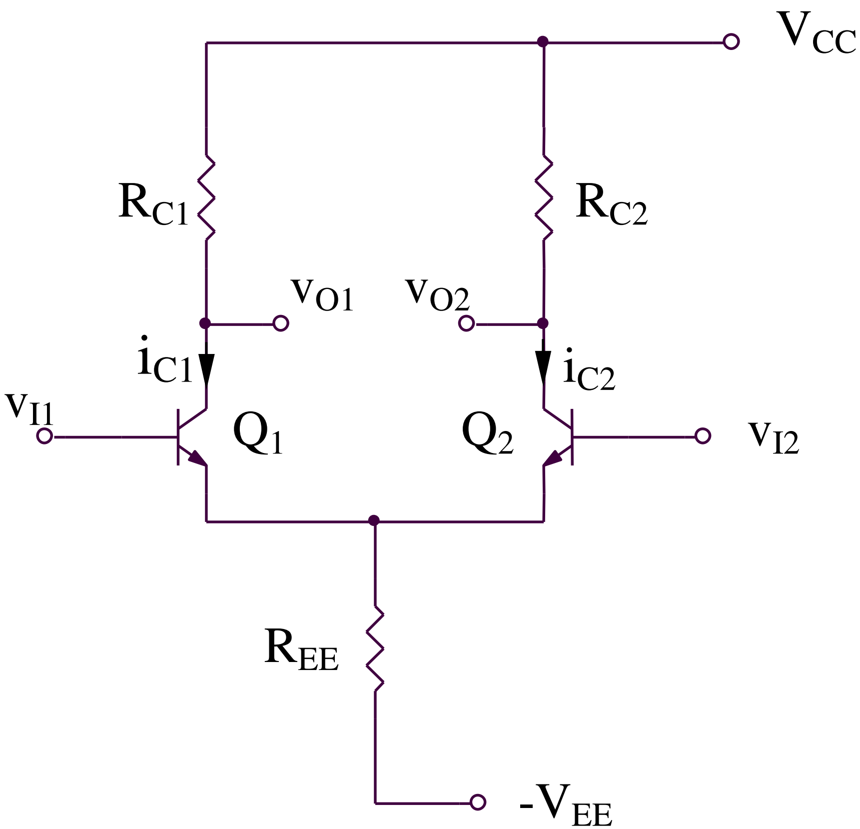
• sous-ensemble de base de la plupart des circuits intégrés analogiques
• les deux transistors doivent avoir des caractéristiques aussi identiques que possible
• la résistance commune de l'émetteur R_{EE} peut être remplacée par une source de courant, qui présente une résistance de sortie trés élevée

La sortie peut être prise:
• soit de façon symétrique:

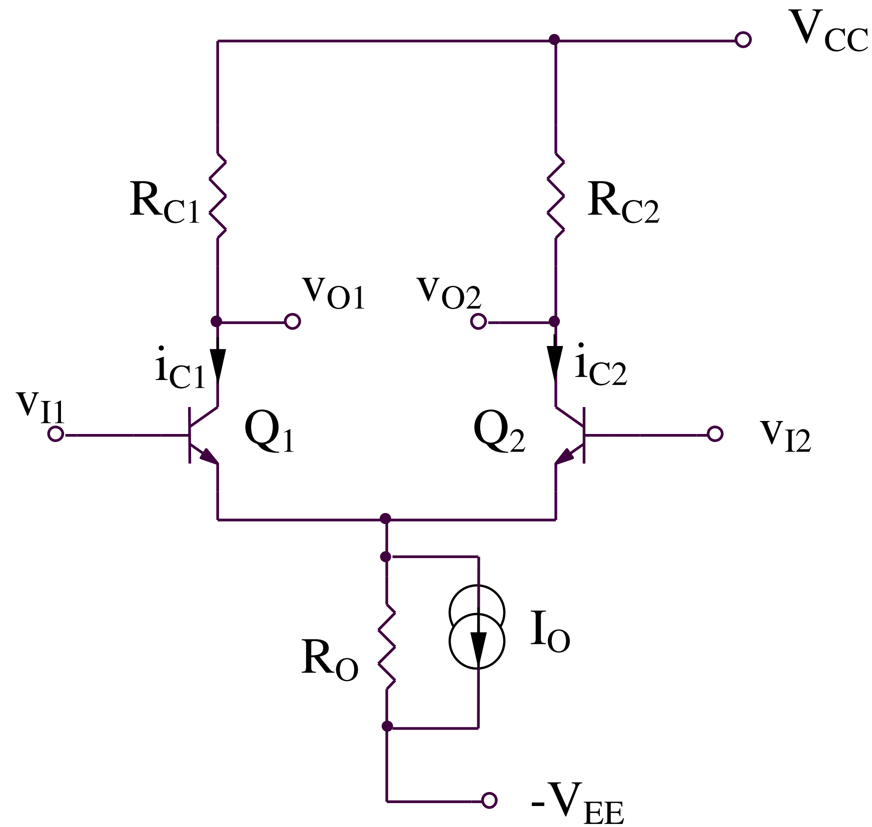
$$R_{C1} = R_{C2} \qquad v_O = v_{O1} - v_{O2} = A(v_{I1} - v_{I2})$$

• soit de façon asymétrique:

$$v_O = v_{O1} \ \text{ou} \ v_{O2} = \pm A(v_{I1} - v_{I2})$$



(a)



(b)

L’étage différentiel a des propriétés bien adaptées à l’intégration:

- fonctionnement en continu
- exigences d’appairement des transistors
- nécéssité d’une même température sur les transistors

2.5.1. Analyse en grand signal

$$I_O = i_{E1} + i_{E2}$$

$$I_O = \frac{i_{C1} + i_{C2}}{\alpha}$$

$$\alpha I_O = I_S \left(e^{\frac{v_{BE1}}{V_{th}}} + e^{\frac{v_{BE2}}{V_{th}}} \right)$$

$$\alpha I_O = I_S e^{\frac{v_{BE1}}{V_{th}}} \left(1 + e^{\frac{v_{BE2} - v_{BE1}}{V_{th}}} \right)$$

Mais comme:

$$i_{C1} = I_S e^{\frac{v_{BE1}}{V_{th}}}$$

$$v_{BE2} - v_{BE1} = v_{I2} - v_{I1}$$

Il est possible d’exprimer les courants collecteurs:

$$i_{C1} = \frac{\alpha I_O}{1 + e^{\frac{v_{I2} - v_{I1}}{V_{th}}}} = \frac{\alpha I_O}{2} \left(1 + th \frac{v_{I1} - v_{I2}}{2V_{th}} \right)$$

$$i_{C2} = \frac{\alpha I_O}{1 + e^{\frac{v_{I1} - v_{I2}}{V_{th}}}} = \frac{\alpha I_O}{2} \left(1 - th \frac{v_{I1} - v_{I2}}{2V_{th}} \right)$$

i_{C1} et i_{C2} peut être exprimer en série Taylor:

$$\frac{i_{C1}(x)}{I_O} = \frac{1}{1+e^{-x}} = \frac{1}{2} + \frac{x}{4} - \frac{x^3}{48} + \dots$$

$$\frac{i_{C2}(x)}{I_O} = \frac{1}{1+e^{x}} = \frac{1}{2} - \frac{x}{4} + \frac{x^3}{48} - \dots$$

$$x = \frac{v_{I1} - v_{I2}}{V_{th}}$$

$$\alpha = 1$$

Donc, la tangente à la caractéristique $i_{C1}(x)/I_O$ a l'équation suivante:

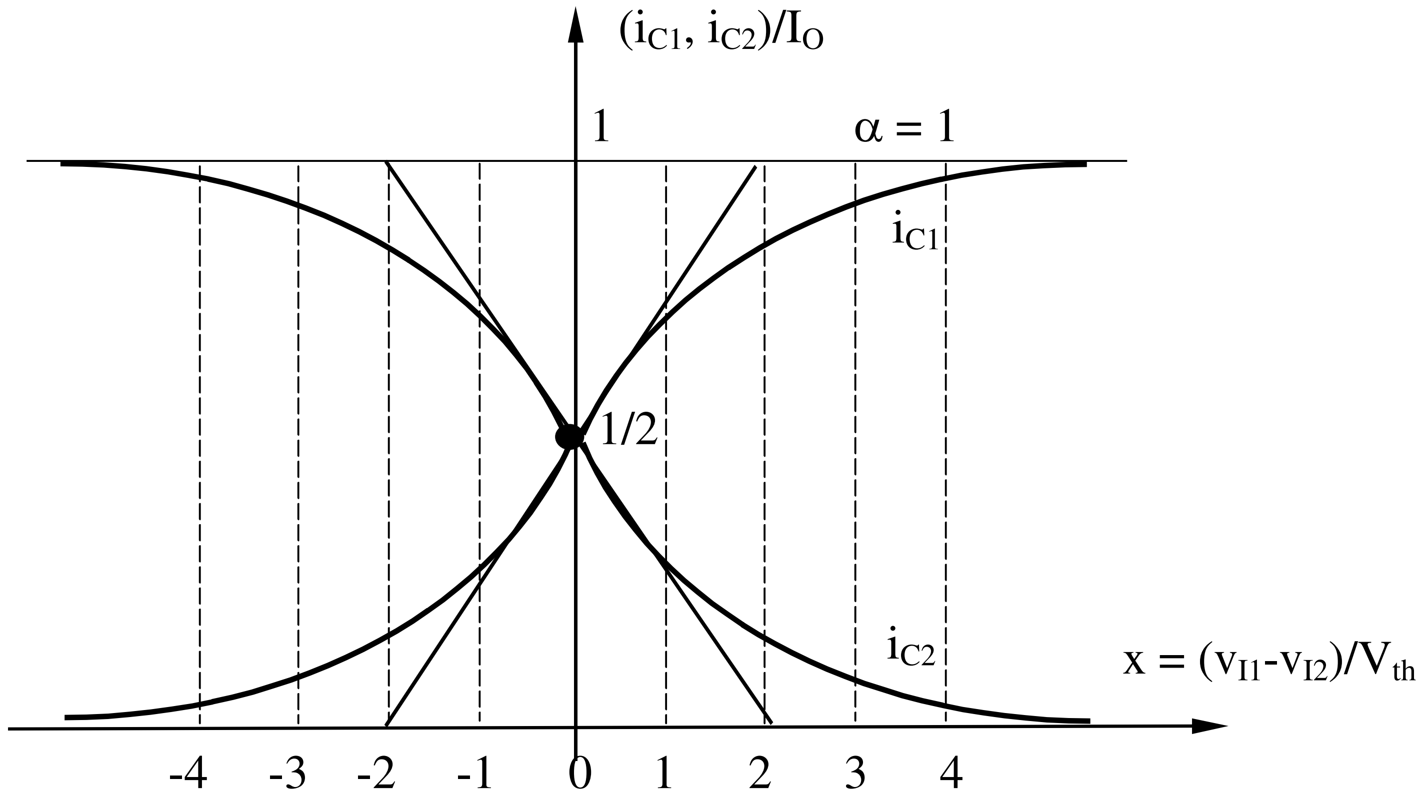
$$y = \frac{1}{2} + \frac{x}{4}$$

Si:

$$y = 0 \Rightarrow x = -2 \Rightarrow v_{I1} - v_{I2} = -2V_{th} = -50mV$$

Remarques:

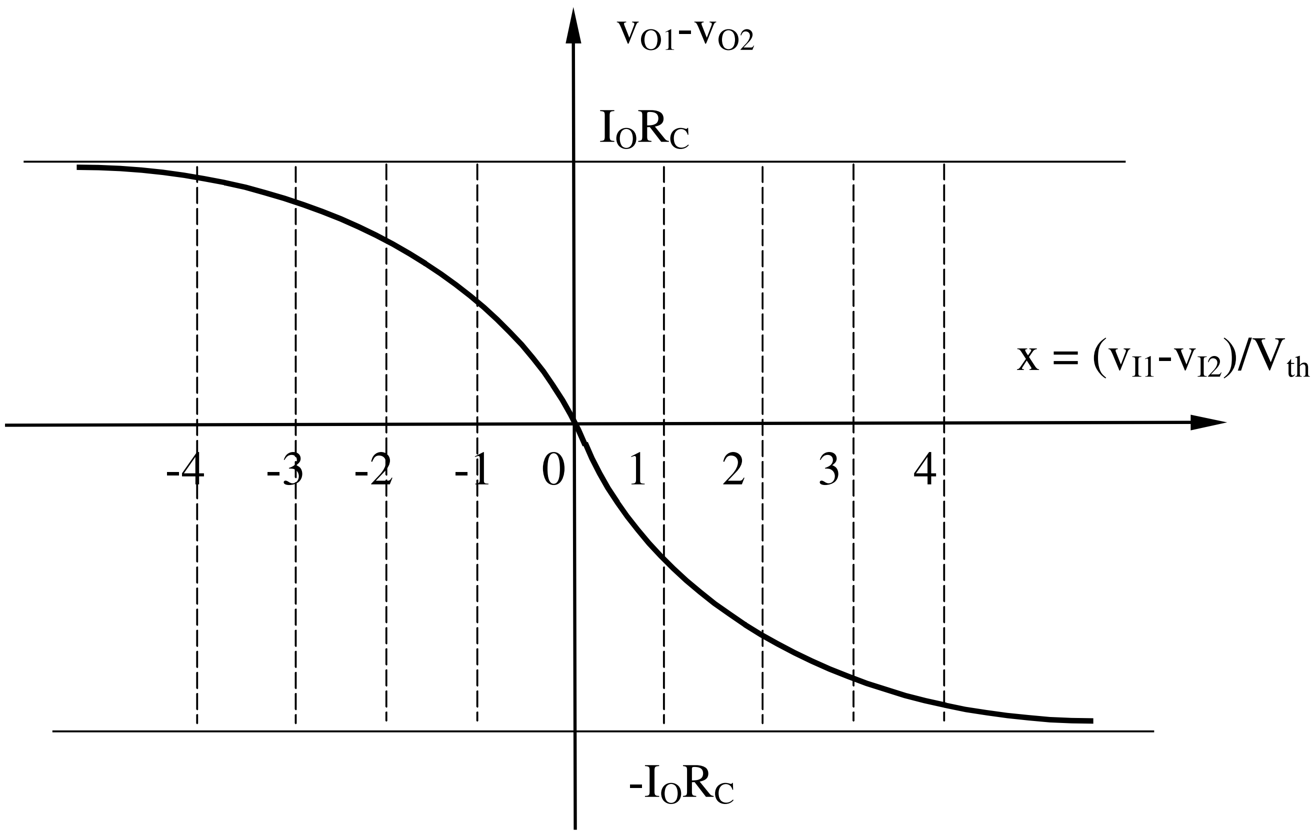
- pour $v_{I1} = v_{I2}$ (ou x = 0), $i_{C1} = i_{C2} = I_O/2$
- pour un fonctionnement quasi-linéaire, l'excursion de la tension d'entrée doit être inférieure à $2V_{th}$ (ou x =2), soit environ 50mV



Caractéristiques statiques $(i_{C1}, i_{C2})/I_O = f\,[(v_{I1}\text{-}v_{I2})/V_{th}]$
pour l'étage différentiel

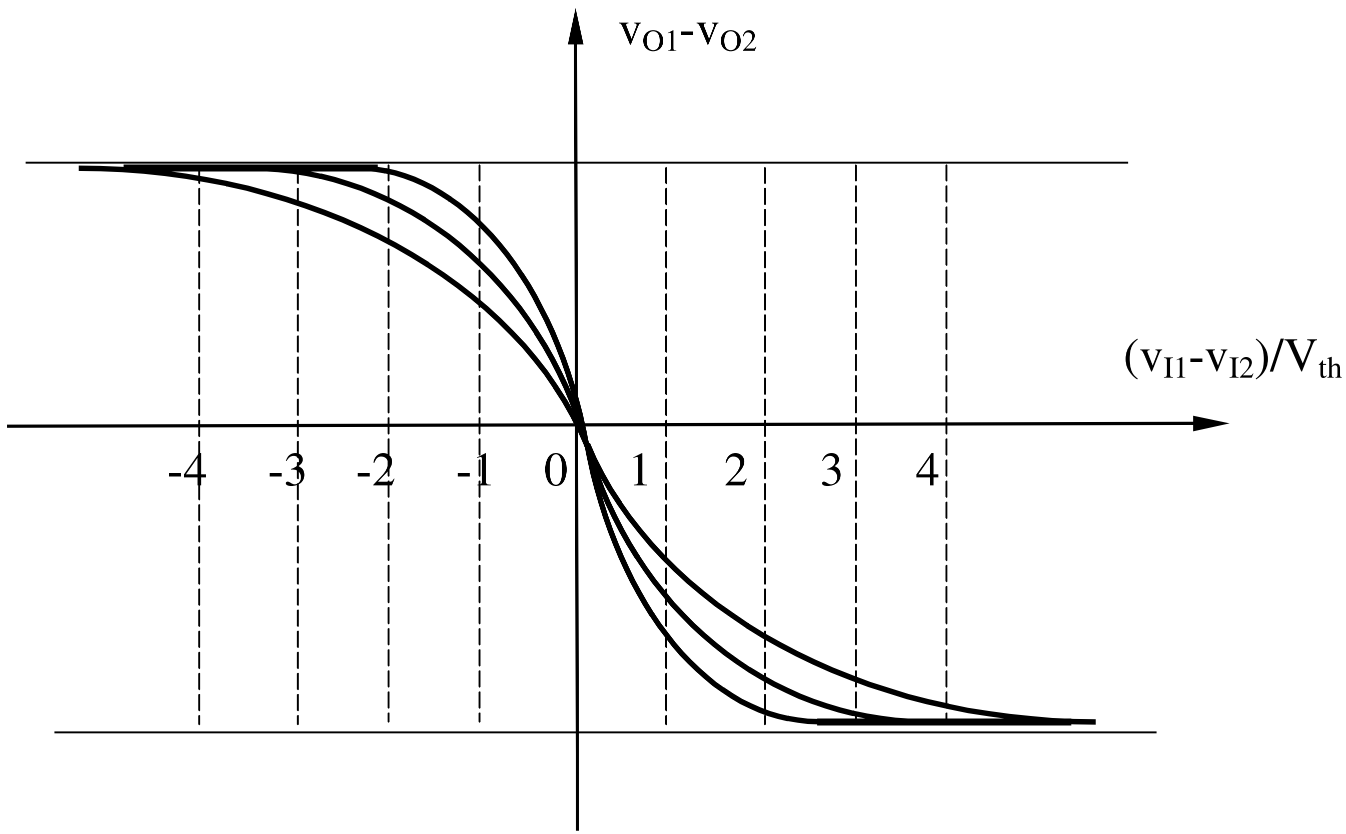
La tension symétrique de sortie est:

$$v_O = v_{O1} - v_{O2} = (i_{C2} - i_{C1})R_C = \left(-\frac{x}{2} + \frac{x^3}{24} - \ldots\right) I_O R_C$$



Caractéristique statique v_{O1}-v_{O2} = f [(v_{I1}-v_{I2})/V_{th}] pour l'étage différentiel

On peut augmenter la plage de tension d'entrée en amplification linéaire par adjonction de résistances en série dans l'émetteur (dégéneration d'émetteur)



2.5.2. Analyse en petit signal

On distingue - le mode différentiel (v_{id}, v_{od})
- le mode commun (v_{ic}, v_{oc})

$$v_{id} = \frac{v_{i1} - v_{i2}}{2}$$ tension d'entrée différentielle

$$v_{od} = \frac{v_{o1} - v_{o2}}{2}$$ tension de sortie différentielle

$$v_{ic} = \frac{v_{i1} + v_{i2}}{2}$$ tension d'entrée en mode commun

$$v_{oc} = \frac{v_{o1} + v_{o2}}{2}$$ tension de sortie en mode commun

$$\Rightarrow v_{i1} = v_{ic} + v_{id} \quad ; \quad v_{o1} = v_{oc} + v_{od}$$

$$v_{i2} = v_{ic} - v_{id} \quad ; \quad v_{o2} = v_{oc} - v_{od}$$

avec les gains en tension:

$$A_{dd} = \left.\frac{v_{od}}{v_{id}}\right|_{v_{ic}=0}$$ gain différentiel

$$A_{cc} = \left.\frac{v_{oc}}{v_{ic}}\right|_{v_{id}=0}$$ gain en mode commun

d'où:

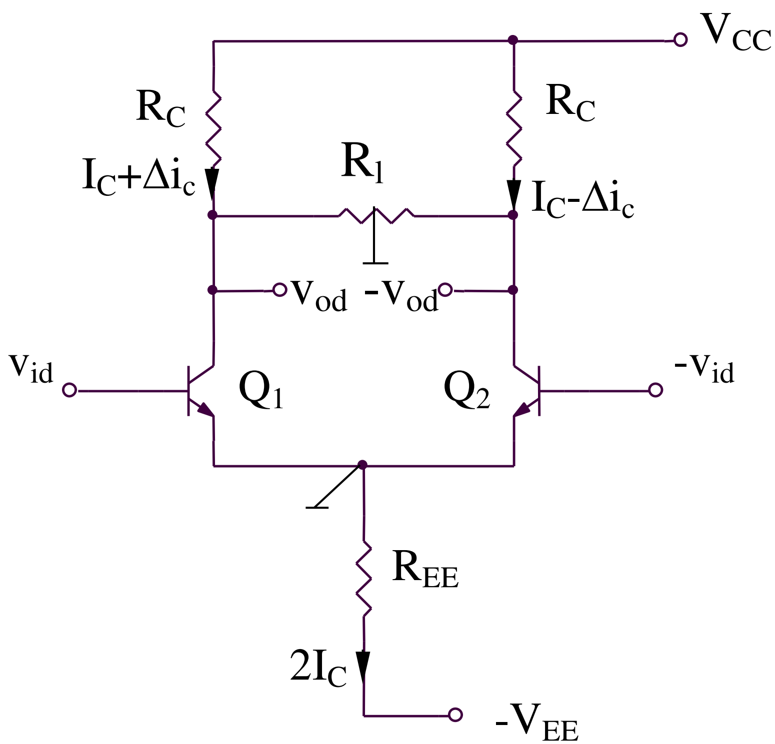
$$v_{o1} = v_{od} + v_{oc} = A_{dd}v_{id} + A_{cc}v_{ic}$$

La Taux de Réjection du Mode Commun doit être aussi élevé que possible:

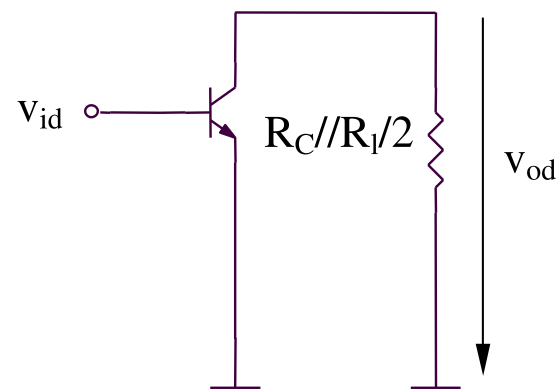
$$TRMC = \left|\frac{A_{dd}}{A_{cc}}\right|$$

Détermination des gains en petit signal: méthode du demi-circuit

Mode différentiel ($v_{id} \neq 0$, $v_{ic} = 0 \Rightarrow v_{i1} = v_{id}$, $v_{i2} = - v_{id}$)



(a)



(b)

Gain différentiel en tension:

$$A_{dd} = \frac{v_{od}}{v_{id}} = -g_m\left(R_C \,//\, \frac{R_l}{2}\right)$$

- sortie symétrique:

$$A = \frac{2v_{od}}{2v_{id}} = A_{dd}$$

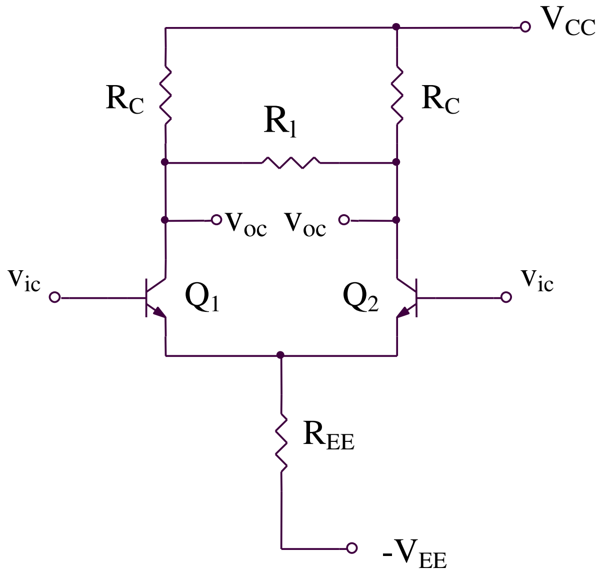
- sortie asymétrique:

$$A = \frac{v_{od}}{2v_{id}} = \frac{A_{dd}}{2}$$

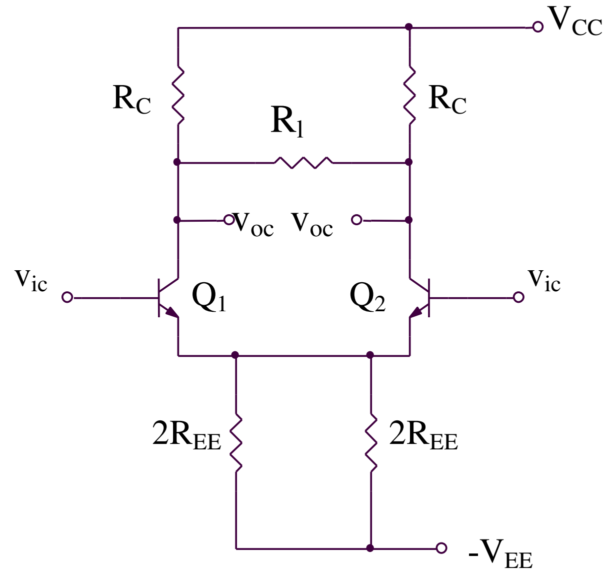
Résistance différentiel d'entrée:

$$R_{id} = 2r_{\pi}$$

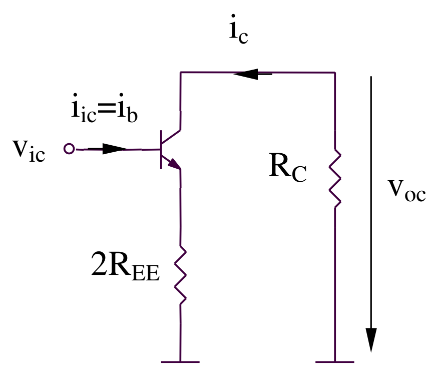
Mode commun ($v_{ic} \neq 0$, $v_{id} = 0 \Rightarrow v_{i1} = v_{ic}$, $v_{i2} = - v_{ic}$)



(a)



(b)



(c)

Gain de mode commun en tension:

$$A_{cc} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}} = -\frac{\beta_0 R_C}{r_\pi + (\beta_0 + 1)2R_{EE}} \cong -\frac{R_C}{2R_{EE}}$$

Résistance d’entrée en mode commun:

$$R_{ic} = \frac{v_{ic}}{i_{ic}} = r_\pi + (\beta_0 + 1)2R_{EE}$$

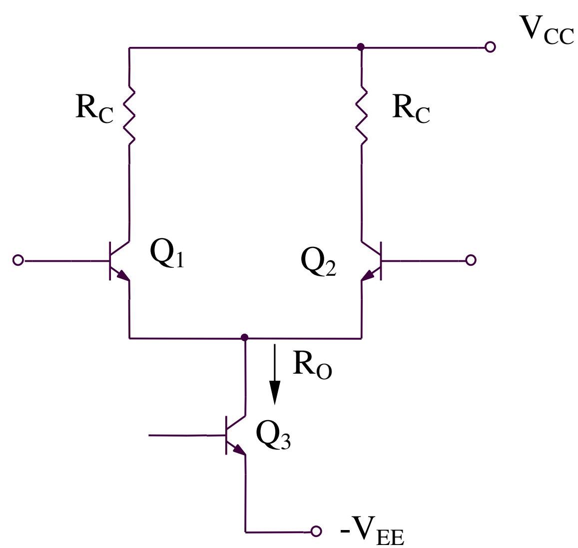
Par conséquent:

$$TRMC = \frac{I_{EE} R_{EE}}{V_{th}} \frac{\frac{R_l}{2} // R_C}{R_C}$$

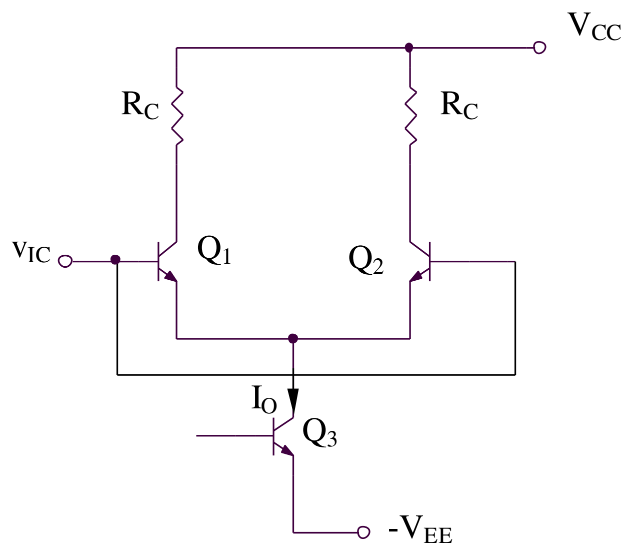
Pour augmenter de TRMC, il faut donc augmenter la chute de tension dans R_{EE}, en remplacent R_{EE} par une source de courant. Alors:

$$A_{cc} = -\frac{R_C}{2R_O}$$

où R_O est la résistance de sortie de Q_3.



Détermination de gamme de tension d'entrée de commun-mode



$$v_{IC}^{max} = V_{CC} - R_C \frac{I_O}{2} - V_{CE1sat} + V_{BE1}$$

$$v_{IC}^{min} = -V_{EE} + V_{CE3sat} + V_{BE1}$$

2.5.3. La tension de décalage d'entrée

Si les deux transistors de l'étage différentiel ne sont pas identiques, il est necessaire d'appliquer un tension d'entrée (nomée tension de décalage d'entrée v_{IO}) pour obtenir une tension de sortie de valeur nulle.

$$v_{IO} = v_{BE1} - v_{BE2} = V_{th} \ln\left(\frac{i_{C1}}{i_{C2}} \frac{I_{S2}}{I_{S1}}\right)$$

Comme:

$$i_{C1} R_{C1} = i_{C2} R_{C2}$$

il résulte:

$$v_{IO} = V_{th} \ln\left(\frac{R_{C2}}{R_{C1}} \frac{I_{S2}}{I_{S1}}\right)$$

Définissant de nouveaux paramètres pour décrire la disparité dans les composants comme suit:

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2} \qquad x_1 = x + \frac{\Delta x}{2}$$

$$\Delta x = x_1 - x_2 \qquad x_2 = x - \frac{\Delta x}{2}$$

il résulte:

$$v_{IO} = V_{th} \ln\left(\frac{R_C - \frac{\Delta R_C}{2}}{R_C + \frac{\Delta R_C}{2}} \frac{I_S - \frac{\Delta I_S}{2}}{I_S + \frac{\Delta I_S}{2}} \right) = V_{th} \ln\left(\frac{1 - \frac{\Delta R_C}{2R_C}}{1 + \frac{\Delta R_C}{2R_C}} \frac{1 - \frac{\Delta I_S}{2I_S}}{1 - \frac{\Delta I_S}{2I_S}} \right)$$

Pour:

$$\Delta R_C << R_C \;\; et \;\; \Delta I_S << I_S$$

$$x = \Delta R_C / 2R_C \;\; ou \;\; x = \Delta I_S / 2I_S$$

on peut écrire:

$$\frac{1-x}{1+x} \cong (1-x)(1-x) \cong 1 - 2x$$

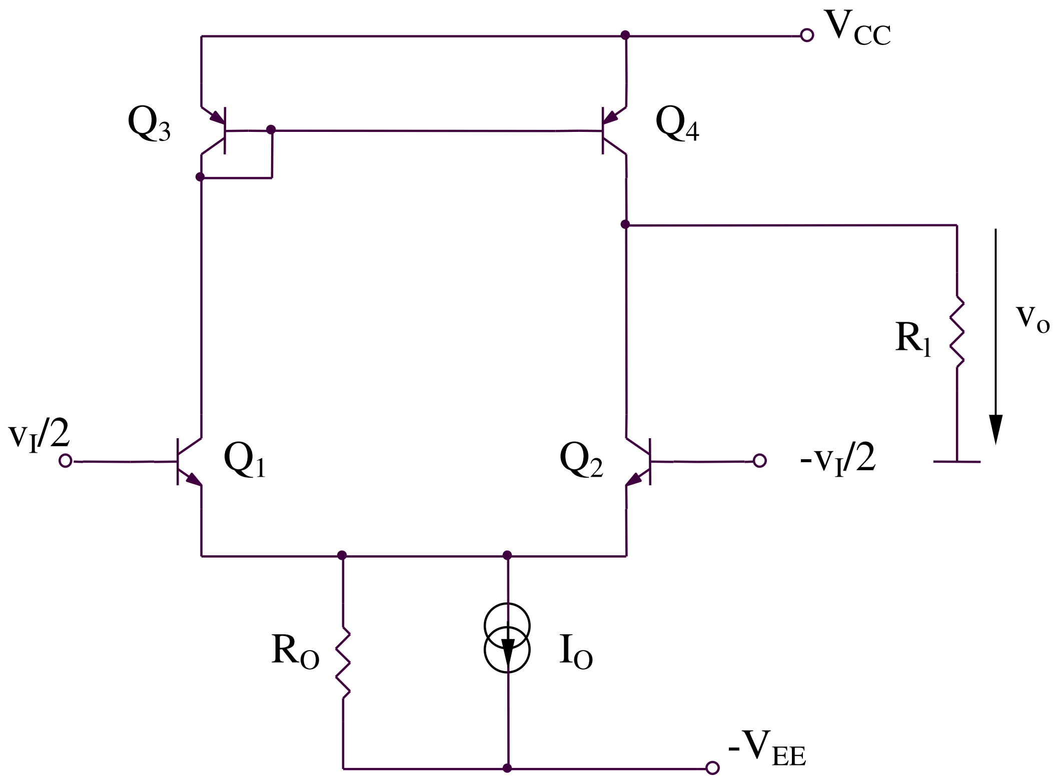
Donc:

$$v_{IO} = V_{th} \ln\left[\left(1 - \frac{\Delta R_C}{R_C} \right)\left(1 - \frac{\Delta I_S}{I_S} \right) \right] = -V_{th}\left(\frac{\Delta R_C}{R_C} + \frac{\Delta I_S}{I_S} \right)$$

Cas habituel:

$$\frac{\Delta R_C}{R_C} = 0.01; \;\; \frac{\Delta I_S}{I_S} = 0.05 \Rightarrow v_{IO} = 1.5mV$$

2.5.4. Principe de la charge active

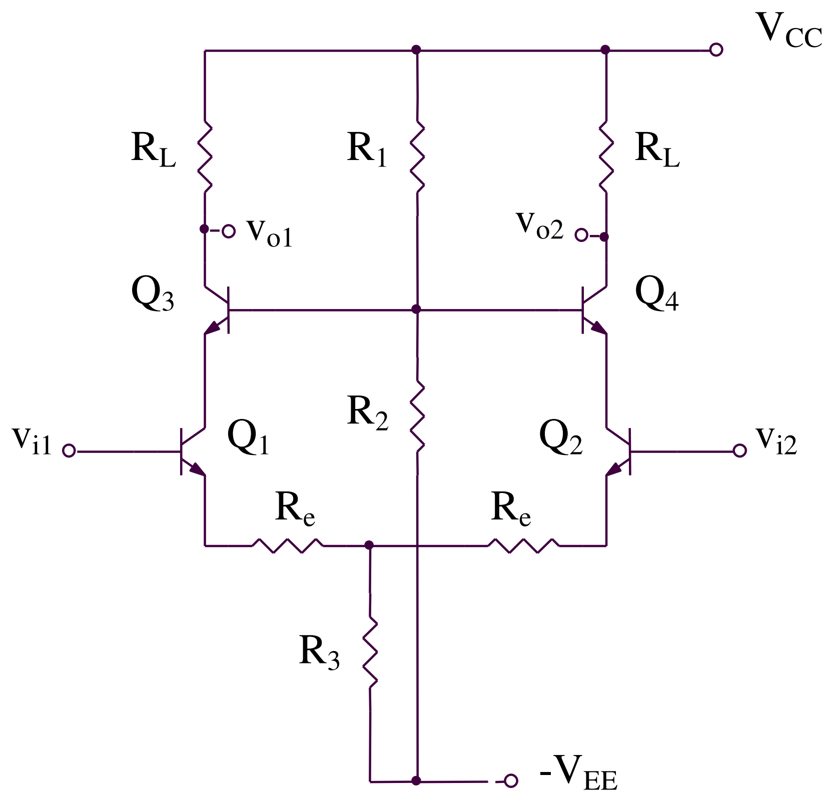


$$v_O = \left(g_{m1} \frac{v_I}{2} + g_{m2} \frac{v_I}{2} \right) \left(R_l \,//\, r_{o2} \,//\, r_{o4} \right) = g_{m1} v_I \left(R_l \,//\, r_{o2} \,//\, r_{o4} \right)$$

$$A_{dd} = g_{m1} \left(R_l \,//\, r_{o2} \,//\, r_{o4} \right)$$

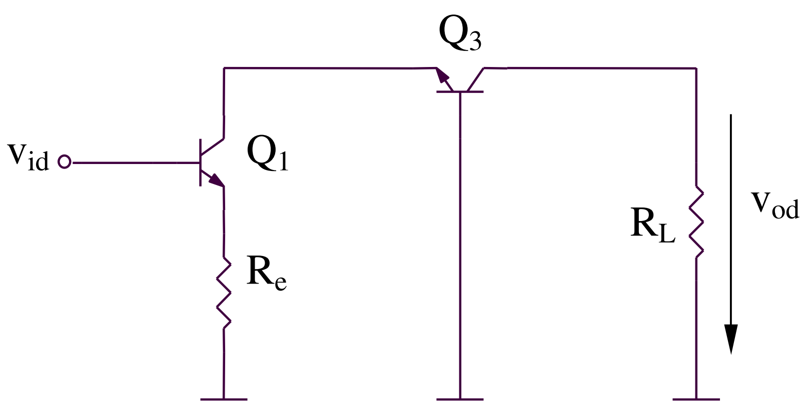
$$A_{dd} \Big|_{R_l \to \infty} = g_{m1} \left(r_{o2} \,//\, r_{o4} \right) = \frac{g_{m1} r_{o2}}{2} = \frac{I_{C1}}{2V_{th}} \frac{V_A}{I_{C1}} = \frac{V_A}{2V_{th}}$$

2.5.5. Amplificateur différentiel cascode

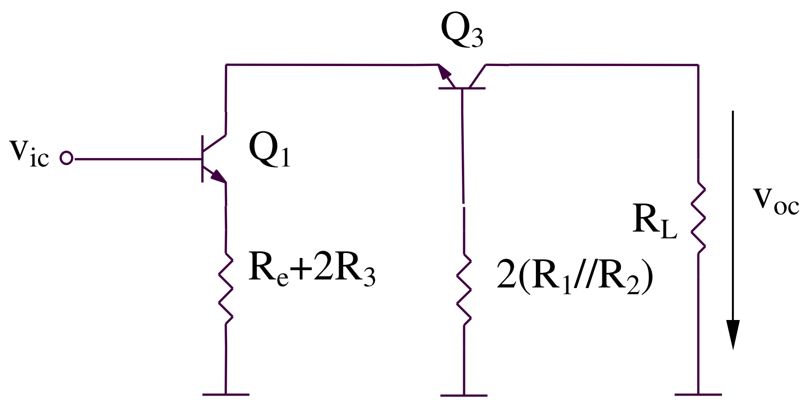


Mode différentiel

Mode commun



Demi-circuit de mode différentiel

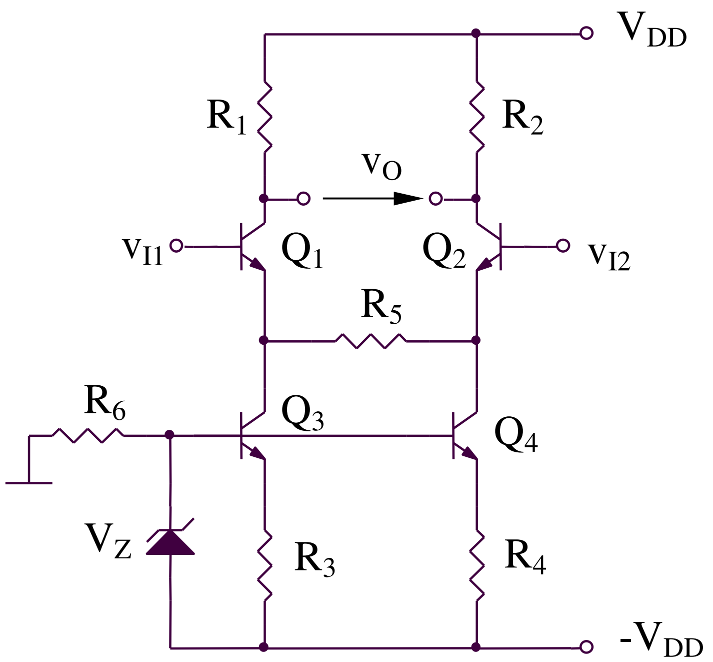


Demi-circuit de mode commun

$$A_{dd} = -\frac{\beta R_L}{r_\pi + (\beta + 1) R_E}$$

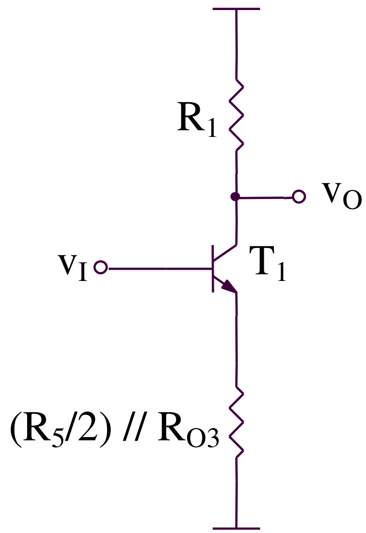
$$A_{cc} = -\frac{\beta R_L}{r_\pi + (\beta + 1)(R_E + 2 R_3)}$$

2.5.6. Amplificateur différentiel polarisé à une source double

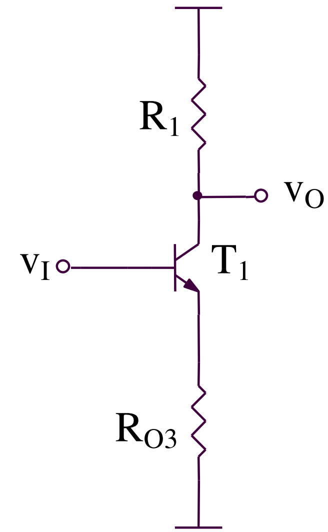


Mode différentiel

Mode commun



Demi-circuit de mode différentiel



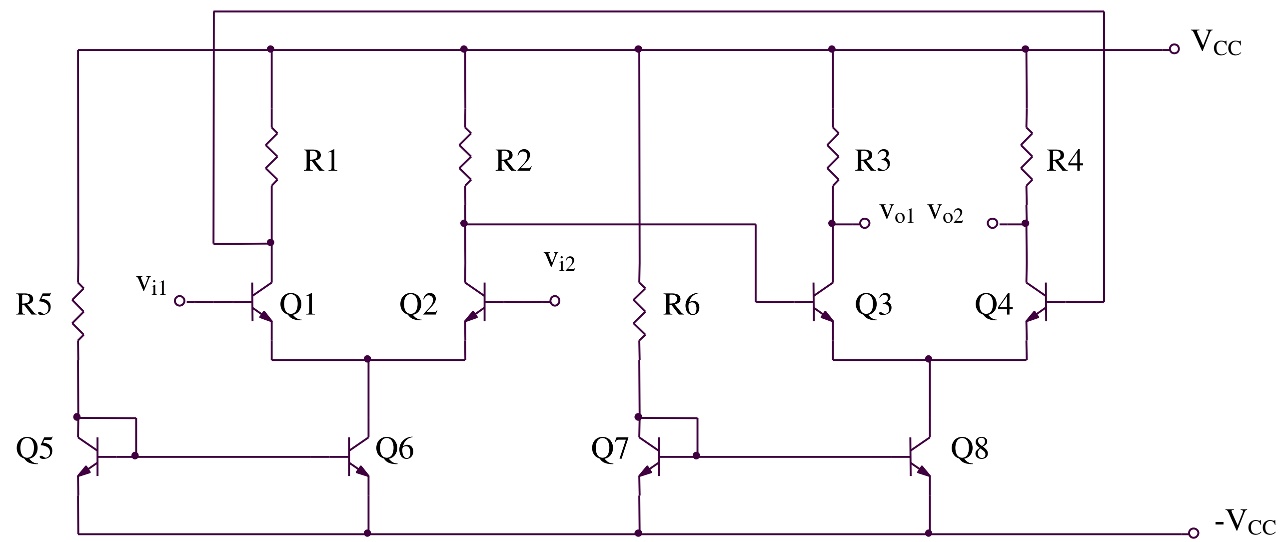
Demi-circuit de mode commun

$$A_{dd} = -\frac{\beta R_1}{r_{\pi 1} + (\beta + 1)\left(\frac{R_5}{2} // R_{O3}\right)}$$

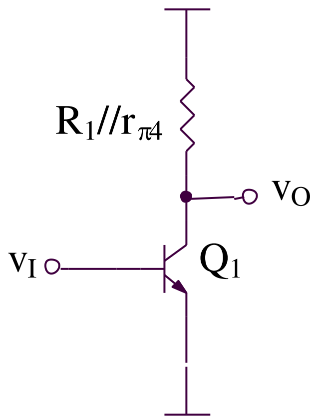
$$A_{cc} = -\frac{\beta R_1}{r_{\pi 1} + (\beta + 1)R_{O3}} \cong -\frac{R_1}{R_{O3}}$$

$$R_{O3} = r_{o3}\left(1 + \frac{\beta R_3}{r_{\pi 3} + R_3 + R_6 // r_Z}\right)$$

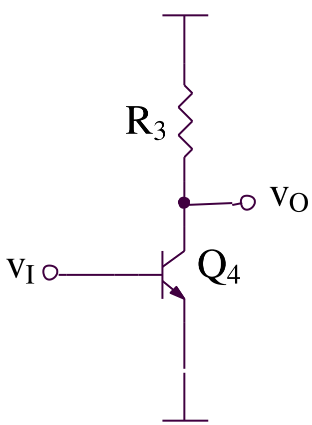
2.5.7. Structure utilisant deux amplificateurs différentiels



Mode différentiel

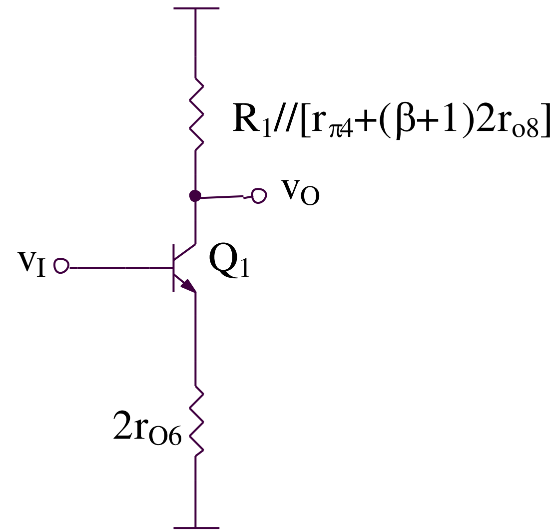


Demi-circuit de mode différentiel (1)

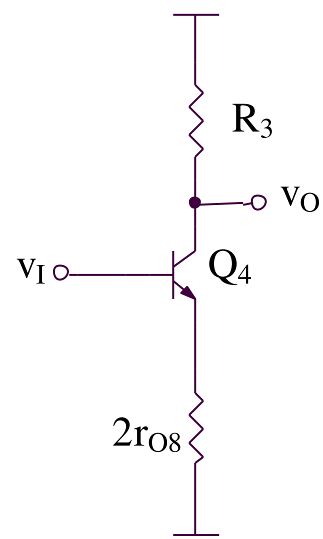


Demi-circuit de mode différentiel (2)

Mode commun



Demi-circuit de mode commun (1)



Demi-circuit de mode commun (2)

Gain de mode différentiel (1)

$$A_{dd1} = -g_{m1}\left(R_1 // r_{\pi 4}\right)$$

Gain de mode commun (1)

$$A_{cc1} = -\beta \frac{R_1 // \left[r_{\pi 4} + (\beta + 1) 2 r_{o8}\right]}{r_{\pi 1} + (\beta + 1) 2 r_{o6}}$$

Gain de mode différentiel (2)

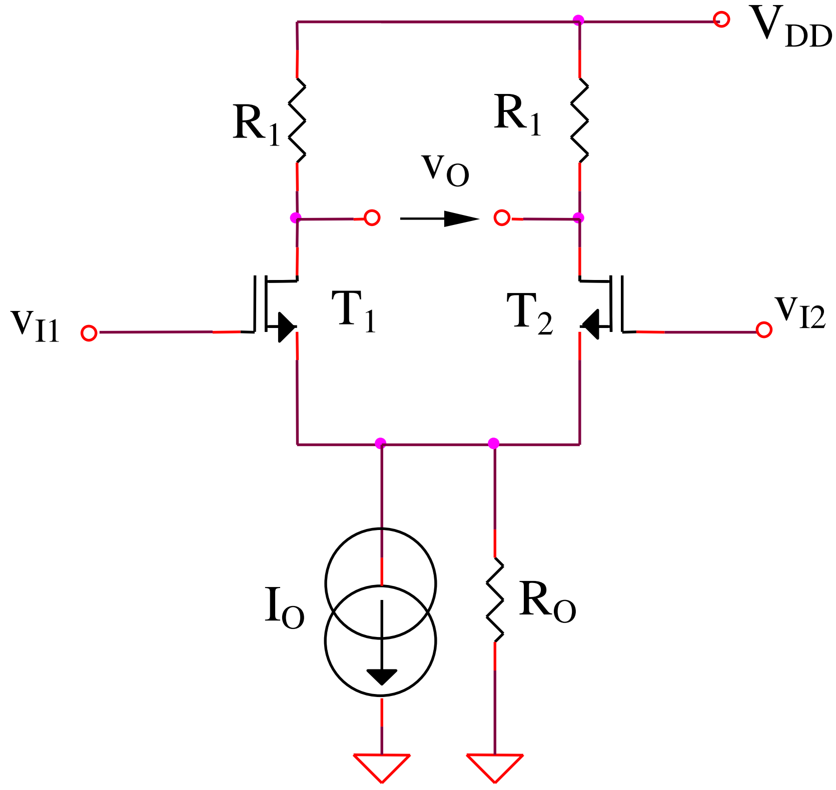
$$A_{dd2} = -g_{m4} R_3$$

Gain de mode commun (2)

$$A_{cc2} = -\beta \frac{R_3}{r_{\pi 1} + (\beta + 1) 2 r_{o8}}$$

2.6. Etage amplificateur différentiel MOS

2.6. Etage amplificateur différentiel MOS



2.6.1. Analyse en grand signal

$$v_{I1} - v_{I2} = v_{GS1} - v_{GS2} = \left(V_T + \sqrt{\frac{2i_{D1}}{K}}\right) - \left(V_T + \sqrt{\frac{2i_{D2}}{K}}\right) = \sqrt{\frac{2}{K}}\left(\sqrt{i_{D1}} - \sqrt{i_{D2}}\right)$$

$$i_{D1} + i_{D2} = I_O \qquad\qquad v_I = v_{I1} - v_{I2}$$

$$\Rightarrow i_{D1}^2 - I_O i_{D1} + \frac{1}{4}\left(I_0 - \frac{Kv_I^2}{2}\right)^2 = 0$$

Donc:

$$i_{D1} = \frac{I_O}{2} + \frac{I_O}{2}\sqrt{\frac{Kv_I^2}{I_O} - \frac{K^2 v_I^4}{4I_O^2}} \qquad\qquad i_{D2} = \frac{I_O}{2} - \frac{I_O}{2}\sqrt{\frac{Kv_I^2}{I_O} - \frac{K^2 v_I^4}{4I_O^2}}$$

Pour $v_I = \sqrt{\frac{2I_O}{K}}$ il résulte $i_{D1} = I_O$, $i_{D2} = 0$.

La tension symétrique de sortie est:

$$v_O = R_1\left(i_{D2} - i_{D1}\right)$$

$$v_O = -I_O R_1 \sqrt{\frac{Kv_I^2}{I_O} - \frac{K^2 v_I^4}{4I_O^2}} = -\frac{R_1 v_I}{2}\sqrt{4KI_O - K^2 v_I^2}$$

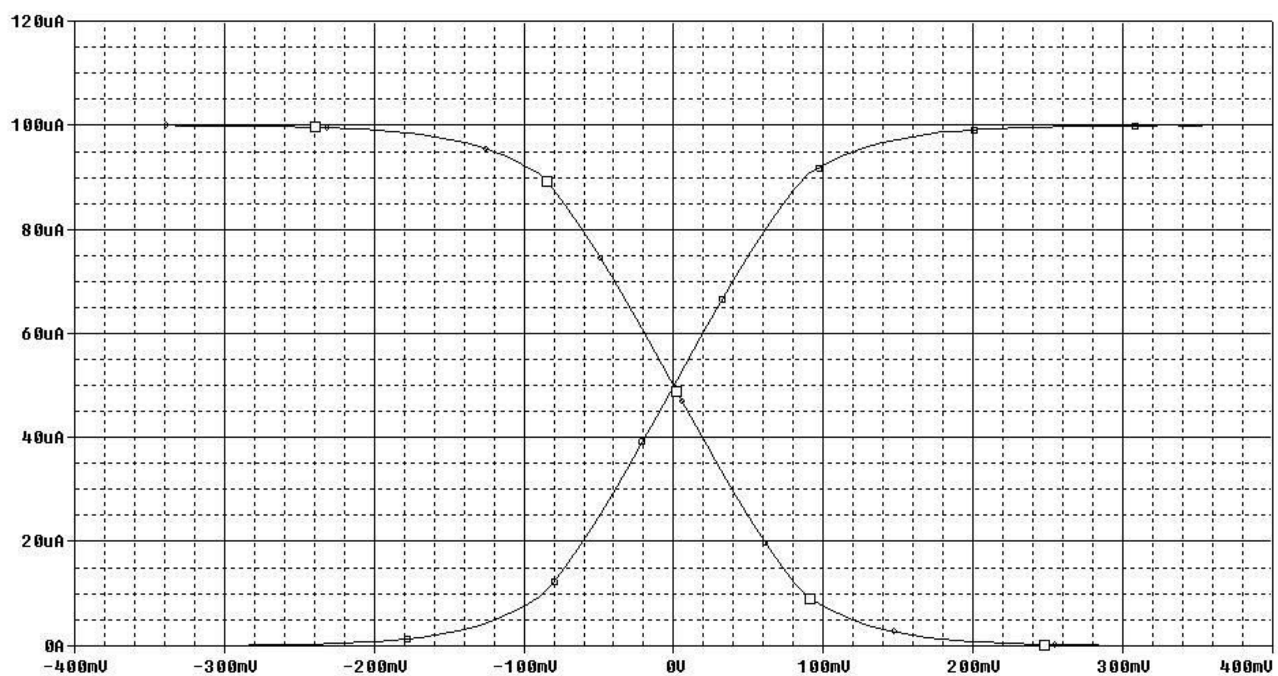
L'expansion en série Taylor de la tension de sortie est:

$$v_O(v_I) = -K^{1/2} I_O^{1/2} R_1 v_I + \frac{K^{3/2} R_1}{8 I_O^{1/2}} v_I^3 + \frac{K^{5/2} R_1}{128 I_O^{3/2}} v_I^5 + \ldots$$

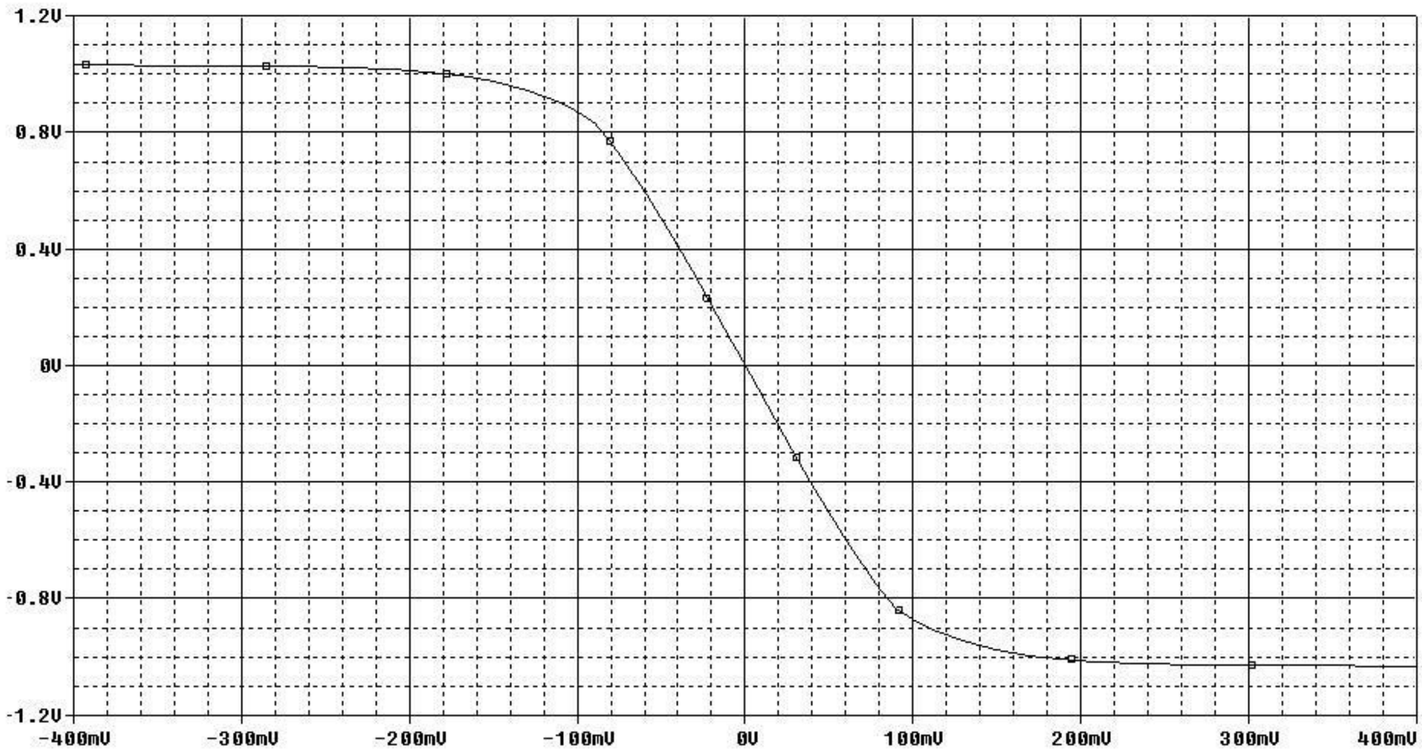
$$v_O(v_I) = a_1 v_I + a_3 v_I^3 + a_5 v_I^5 + \ldots$$

Le gain de mode différentiel a l'éxpression suivante:

$$A_{dd} = a_1 = -R_1 \sqrt{K I_O}$$



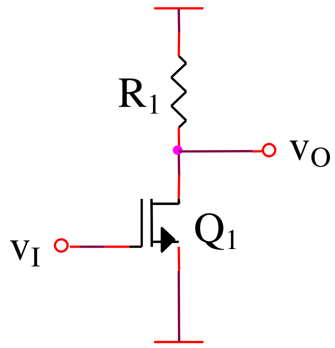
Caractéristiques $i_{D1}, i_{D2}(v_I)$



Caractéristique $v_O(v_I)$

2.6.2. Analyse en petit signal

Mode différentiel

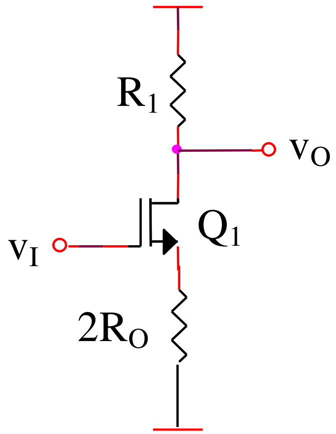


$$A_{dd} = -g_m R_1 = -R_1\sqrt{2KI_{D1}} = -R_1\sqrt{KI_O}$$

$$R_{id} = \infty$$

Demi-circuit de mode différentiel

Mode commun

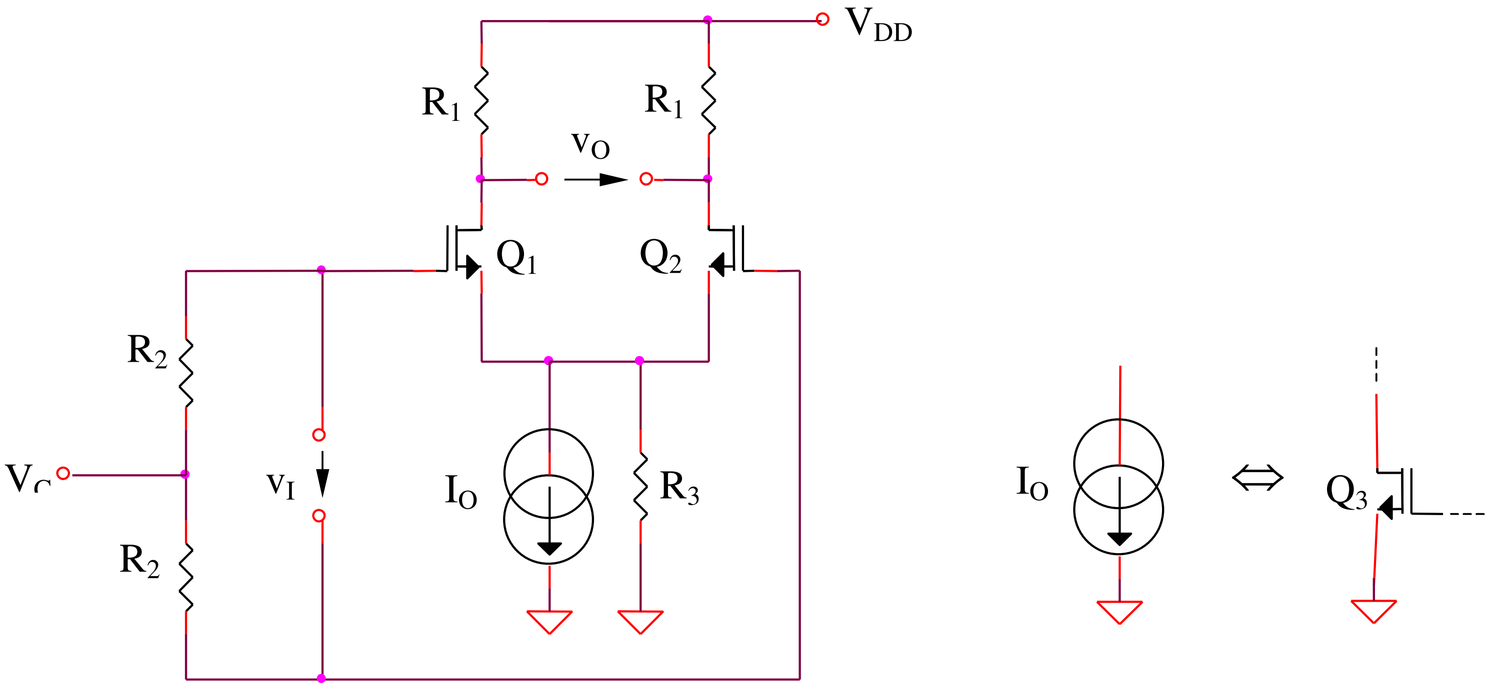


$$A_{cc} = -\frac{g_m R_1}{1 + 2g_m R_O}$$

$$R_{ic} = \infty$$

Demi-circuit de mode commun

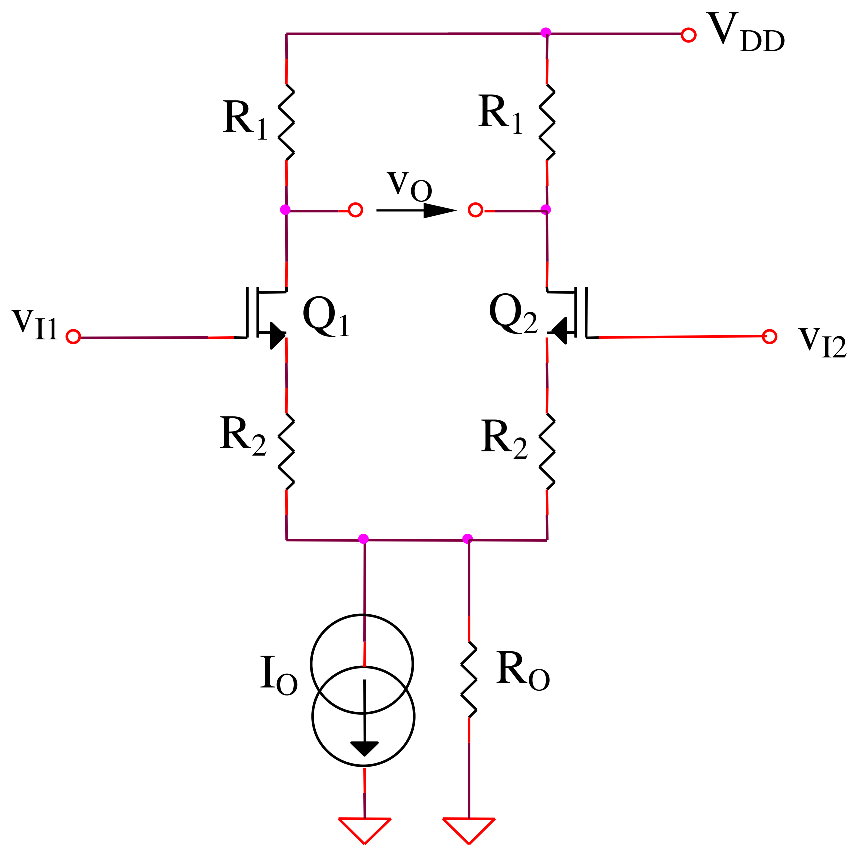
2.6.3. Domain maximal de la tension d'entrée en mode commun



$$V_{C\min} = v_{GS1} + v_{DS3sat} = v_{GS1} + v_{GS3} - V_T = V_T + \left(\sqrt{2}+1\right)\sqrt{\frac{I_O}{K}}$$

$$V_{C\max} = V_{DD} - \frac{I_O R_1}{2} - v_{DS1sat} + v_{GS1} = V_{DD} - \frac{I_O R_1}{2} + V_T$$

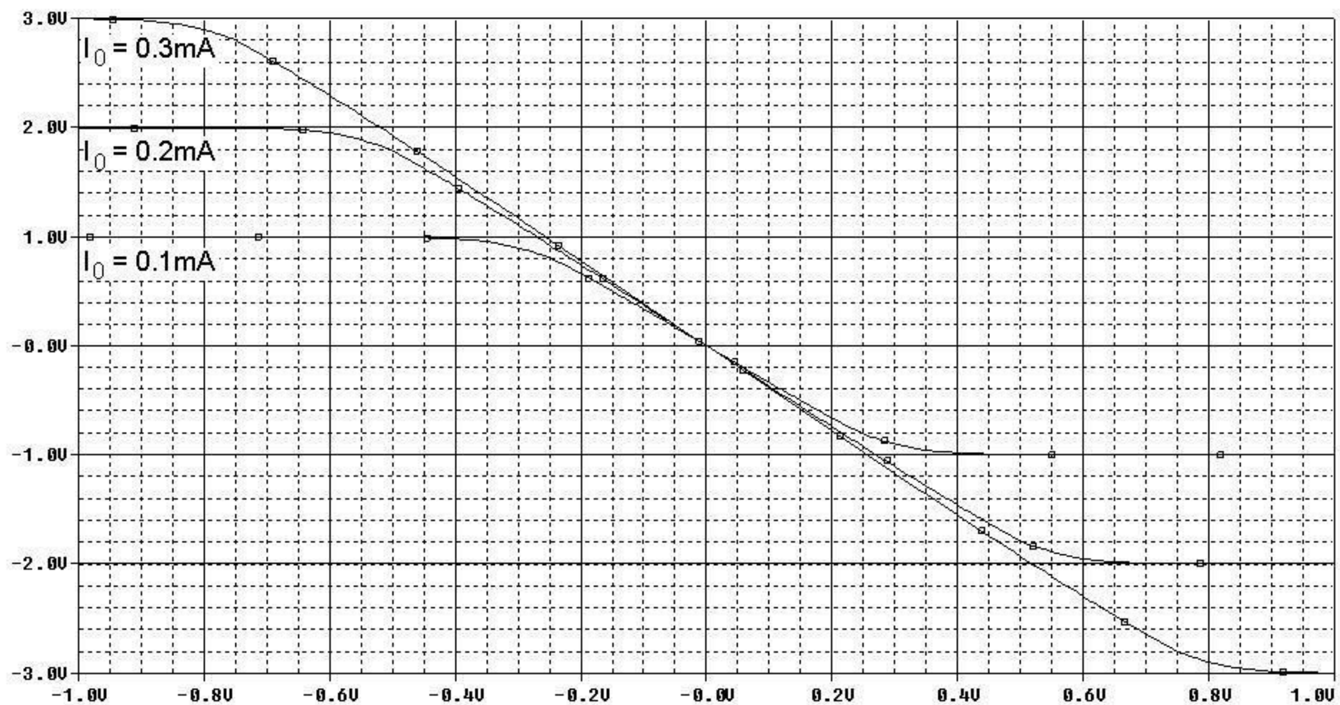
On peut augmenter la plage de tension d'entrée en amplification linéaire par adjonction de résistances en série dans les sources (dégéneration de source).



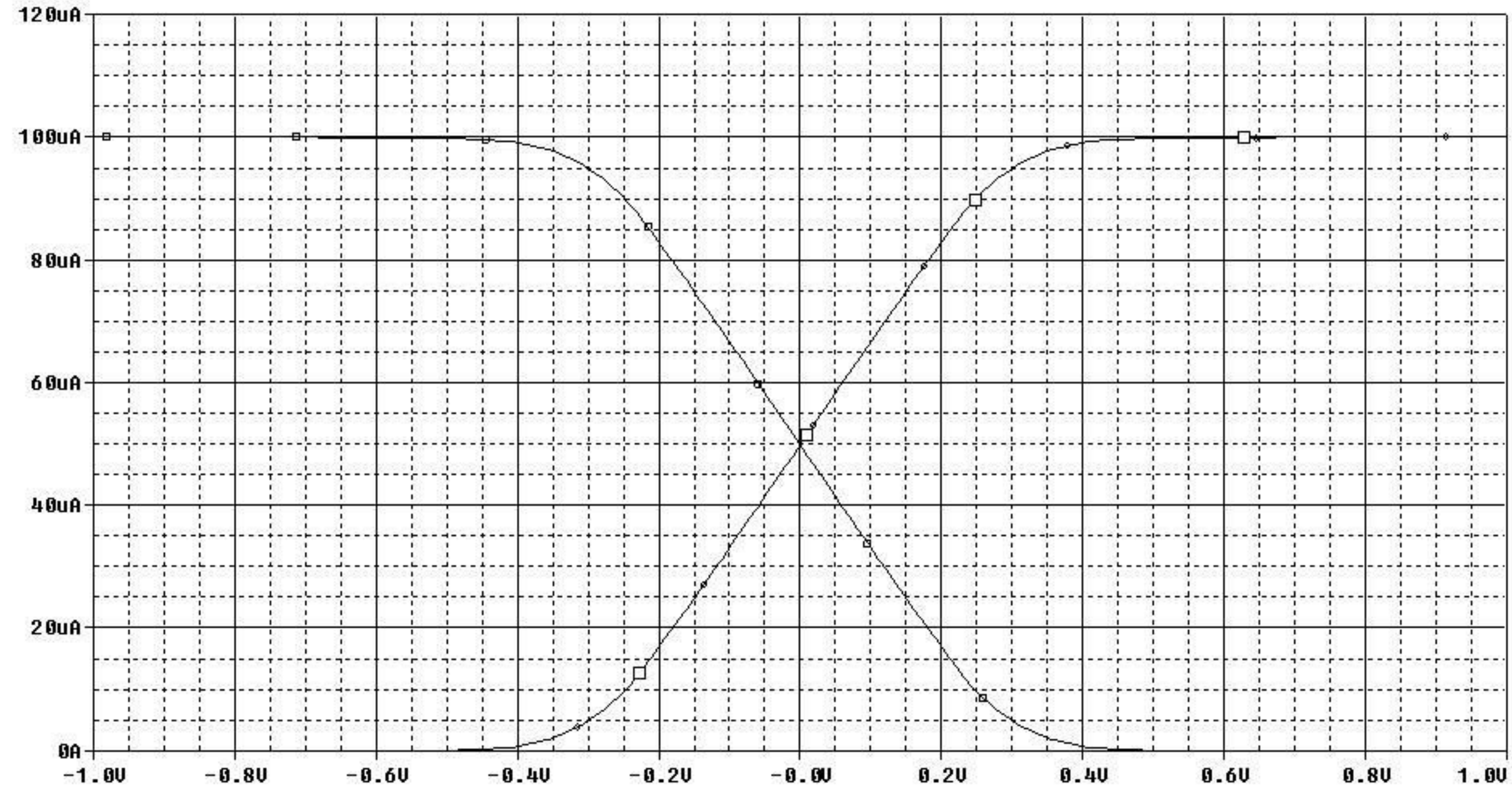
$$A_{dd} = -\frac{g_m R_1}{1 + g_m R_2} \qquad A_{cc} = -\frac{g_m R_1}{1 + g_m (R_2 + 2R_O)}$$

$$V_{C\min} = v_{GS1} + v_{DS3sat} + \frac{I_O R_2}{2} = v_{GS1} + v_{GS3} - V_T + \frac{I_O R_2}{2} = V_T + \left(\sqrt{2} + 1\right)\sqrt{\frac{I_O}{K}} + \frac{I_O R_2}{2}$$

$$V_{C\max} = V_{DD} - \frac{I_O R_1}{2} - v_{DS1sat} + v_{GS1} = V_{DD} - \frac{I_O R_1}{2} + V_T$$



$v_O(v_I)$ caractéristiques pour multiples courants de polarisation



Caractéristiques $i_{D1}, i_{D2}(v_I)$

2.6.4. La tension de décalage d'entrée

Si les deux transistors de l'étage différentiel ne sont pas identiques, il est necéssaire d'appliquer un tension d'entrée (nomée tension de décalage d'entrée V_{IO}) pour obtenir une tension de sortie de valeur nulle.

$$V_{IO} = v_{GS1} - v_{GS2} = (V_{T1} - V_{T2}) + \left(\sqrt{\frac{2i_{D1}}{K'(W/L)_1}} - \sqrt{\frac{2i_{D2}}{K'(W/L)_2}} \right)$$

$$V_{IO} = \Delta V_T + \sqrt{\frac{2(i_D + \Delta i_D/2)}{K'[(W/L) - \Delta(W/L)/2]}} - \sqrt{\frac{2(i_D - \Delta i_D/2)}{K'[(W/L) + \Delta(W/L)/2]}}$$

$$V_{IO} = \Delta V_T + \sqrt{\frac{2i_D}{K'(W/L)}} \left[\sqrt{1 + \frac{\Delta i_D}{2i_D} + \frac{\Delta(W/L)}{2(W/L)}} - \sqrt{1 - \frac{\Delta i_D}{2i_D} - \frac{\Delta(W/L)}{2(W/L)}} \right]$$

Sembleble avec l'amplificateur différentiel bipolaire il résulte:

$$V_{IO} = \Delta V_T + \frac{V_{GS} - V_T}{2} \left[\frac{\Delta i_D}{i_D} + \frac{\Delta(W/L)}{(W/L)} \right]$$

Mais:

$$\left(i_D+\frac{\Delta i_D}{2}\right)\left(R-\frac{\Delta R}{2}\right)=\left(i_D-\frac{\Delta i_D}{2}\right)\left(R+\frac{\Delta R}{2}\right)$$

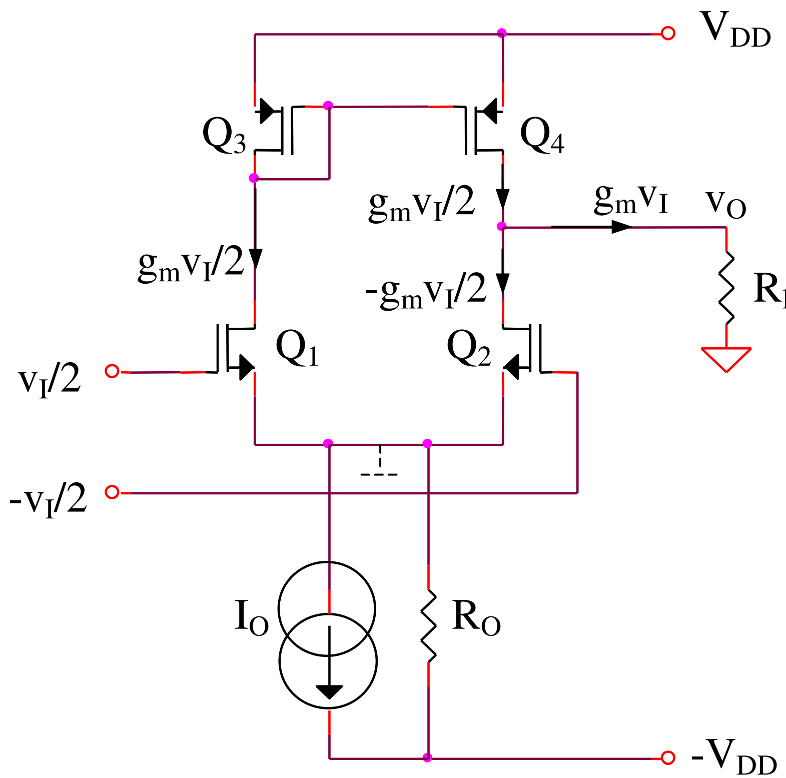
équivalent avec:

$$\frac{\Delta i_D}{i_D}=\frac{\Delta R}{R}$$

Il résulte:

$$V_{IO}=\Delta V_T+\frac{V_{GS}-V_T}{2}\left[\frac{\Delta R}{R}+\frac{\Delta(W/L)}{(W/L)}\right]$$

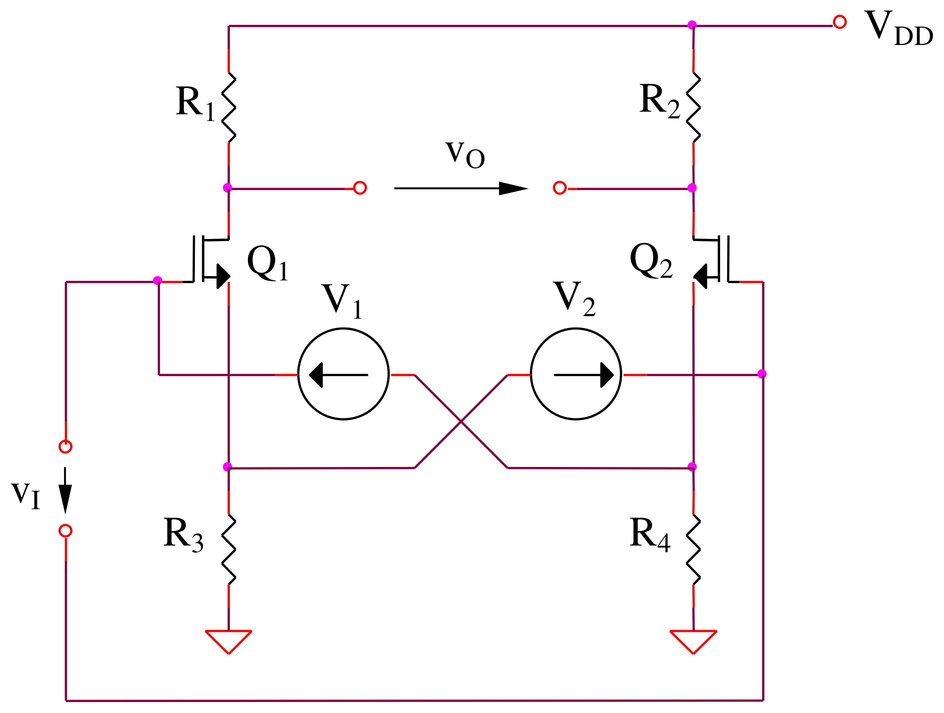
2.6.5. Principe de la charge active



$$A_{dd} = g_m \left(r_{ds2} \,//\, r_{ds4} \,//\, R_l \right)$$

$$A_{dd}\Big|_{R_l \to \infty} = g_m \left(r_{ds2} \,//\, r_{ds4} \right) = g_m \frac{r_{ds}}{2} = \frac{1}{2\lambda} \sqrt{\frac{K}{I_O}}$$

2.6.6. Amplificateur différentiel avec la somme constante de tension de porte-source



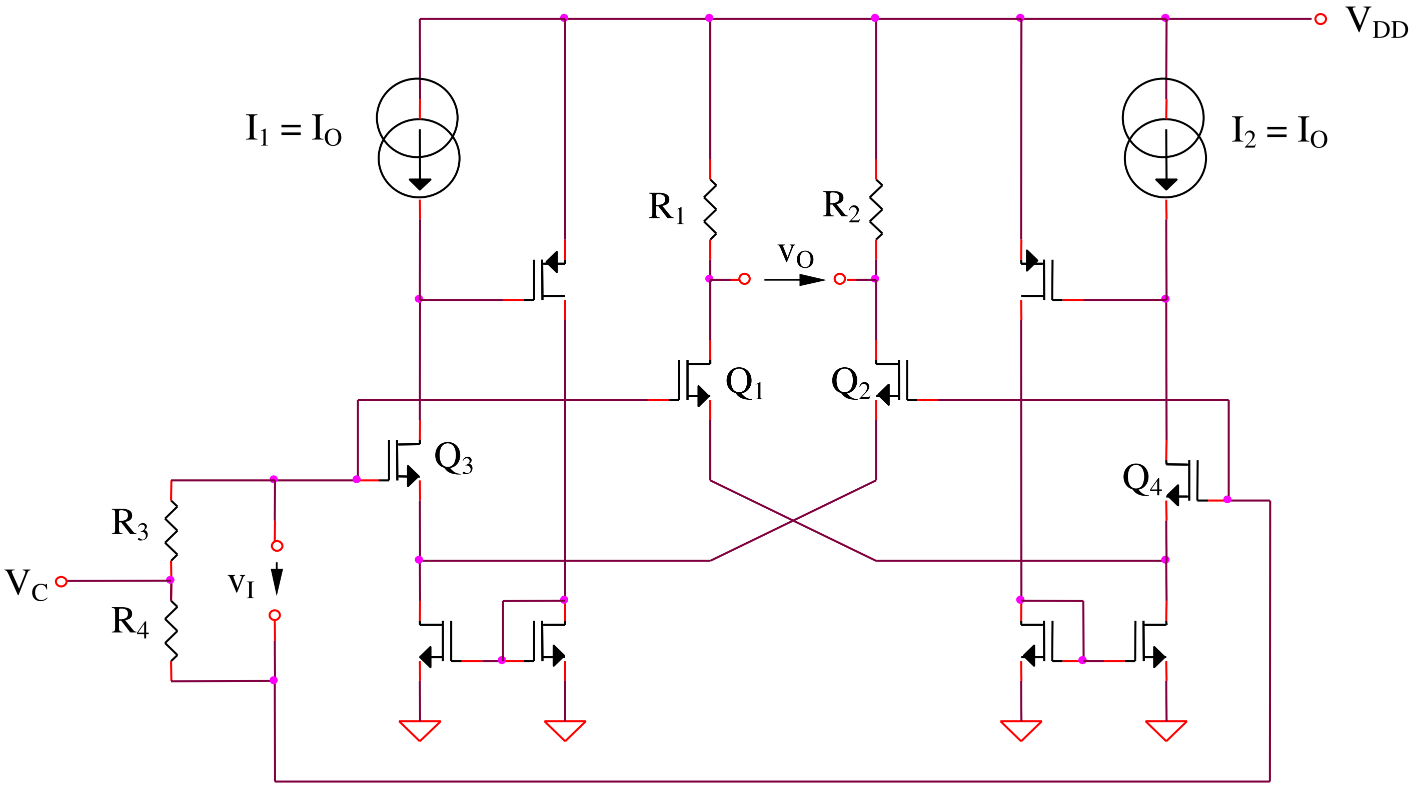
$$i_{D1} = \frac{K}{2}\left(v_{GS1} - V_T\right)^2 \qquad i_{D2} = \frac{K}{2}\left(v_{GS2} - V_T\right)^2$$

$$v_O = R_1\left(i_{D2} - i_{D1}\right) = \frac{KR_1}{2}\left(v_{GS2} - v_{GS1}\right)\left(v_{GS2} + v_{GS1} - 2V_T\right)$$

$$v_I = V_1 - v_{GS2} = v_{GS1} - V_2 \Rightarrow \begin{cases} v_{GS1} - v_{GS2} = 2v_I \\ v_{GS1} + v_{GS2} = 2V \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} v_O = -2KR_1\left(V - V_T\right)v_I \\ A_{dd} = \dfrac{v_O}{v_I} = -2KR_1\left(V - V_T\right) \end{cases} \qquad V_1 = V_2 = V$$

Réalisation possible



$$V_1 = V_2 = V_{GS3} = V_{GS4} = V_T + \sqrt{\frac{2I_O}{K}} \qquad \Rightarrow A_{dd} = -2R_1\sqrt{2KI_O}$$