

Exercice 1 :

$$\beta = 50 \quad \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} = 0,98$$

Les résistances sont en $k\Omega$ et les courants dans les équations sont en mA

a)

$$-3,3I_E - V_{BE} + 6 = 0$$

$$I_E = \frac{6 - V_{BE}}{3,3} = 1,6 mA$$

$$I_C = \alpha I_E \rightarrow I_C = 0,98 I_E = 1,568 mA$$

Maille de sortie :

$$-3,3I_E - V_{CE} - 4,7I_C + 20 = 0$$

$$V_{CE} = -3,3I_E - 4,7I_C + 20$$

$$= -(3,3 - 4,7\alpha)I_E + 20$$

$$= 7,6V$$

$$V_{BC} = V_{BE} - V_{CE} = 0,7 - 7,6 = -6,9V < 0$$

$V_{BC} < 0$, le transistor est effectivement en mode actif direct.

b) On suppose que le transistor est en mode actif normal, on a :

$$6 - V_{BE} - 3,3I_E = 0$$

$$I_E = \frac{6 - V_{BE}}{3,3} = 1,6 mA$$

$$I_C = \alpha I_E \rightarrow I_C = 0,98 I_E = 1,568 mA$$

Calcul de V_{CE}

$$10V - 4,7I_C - V_{CE} - 3,3I_E = 0$$

$$V_{CE} = 10V - (4,7 + 3,3\alpha)I_C$$

$$= -2,44V$$

$$V_B = -6V$$

$$\begin{aligned} V_C &= -10 + 4,7I_C \\ &= -10 + 4,7 \times 1,568 \\ &= -2,63V \end{aligned}$$

$V_{CB} > 0$, le transistor est donc en saturation, la tension $V_{EC} \approx V_{ECsat} = 0,2V$

$$V_C = V_E - 0,2 = \underbrace{-6 + 0,7}_{V_E} - 0,2 = -5,5V$$

$$I_C = \frac{-5,5 - (-10)}{4,7} = 0,957mA$$

$$I_B = I_E - I_C = 1,6 - 0,957 = 0,643mA$$

c) On suppose que le transistor est en mode normal :

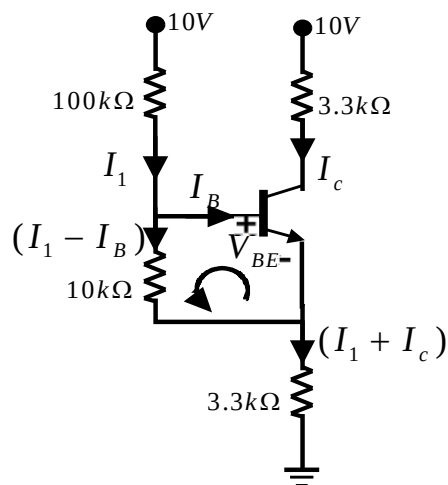
$$V_{EB} = V_E = 0,7 \quad V_B = 0$$

$$V_E = -3,3I_E \rightarrow I_E = \frac{-0,7}{3,3} = -0,21mA$$

$$I_C = \alpha I_E < 0 \rightarrow I_B < 0$$

$$V_{CB} = V_C = -10 + 4,7I_C < 0$$

d)



Loi des mailles :

$$\begin{cases} -3,3(I_1 + I_C) - V_{BE} - 100I_1 + 10 = 0 \\ -V_{BE} + 10(I_1 - \frac{I_C}{\beta}) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 103,3I_1 + 3,3I_C = 10 - V_{BE} \\ 10I_1 - \frac{10}{\beta}I_C = V_{BE} \end{cases}$$

$$I_1 = \frac{100 + 0,1(-100 + 33\beta)V_{BE}}{33\beta + 1033} = 0,385 \text{ mA}$$

$$I_C = \frac{100\beta - 113,3\beta V_{BE}}{33\beta + 1033} = 0,077 \text{ mA}$$

Calcul de V_{CE}

$$-3,3(I_1 + I_C) - V_{CE} - 3,3I_C + 10 = 0$$

$$V_{CE} = -3,3I_1 - 6,6I_C + 10 \approx 7,198 \text{ V}$$

Exercice 2 :

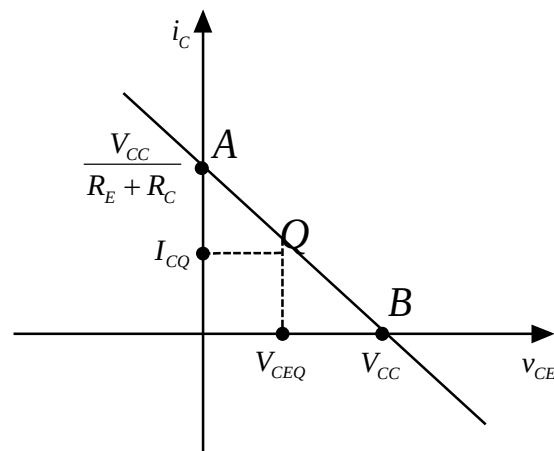
1) A la sortie, on peut écrire :

$$-R_E I_E - V_{CE} - R_C I_C + V_{CC} = 0$$

$$V_{CE} \approx V_{CC} - (R_E + R_C)I_C$$

$$I_C \approx I_E$$

L'équation ci-dessus est l'équation de la droite de charge



Le milieu de la droite de charge correspond au milieu du segment AB, le point de fonctionnement étant au milieu, on en déduit :

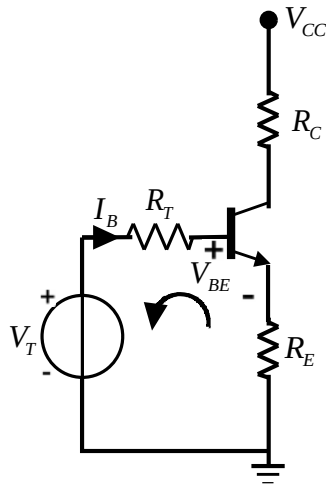
$$V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{2} \text{ et } I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2(R_E + R_C)}$$

$$V_{CEQ} = 2,5 \text{ V}$$

$$I_{CQ} = \frac{5}{2(1 + 0,2)} = 2,08 \text{ mA}$$

Le courant est donc I_C égal à : $I_C = 2,08 \text{ mA}$

Le circuit de la figure 1 est équivalent à celui représenté ci-dessous :



$$V_T = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

$$-R_E I_E - V_{BE} - \frac{R_T}{\beta} I_C + V_T = 0$$

$$V_T - \frac{R_T}{\beta} I_C \approx V_{BE} + R_E I_C$$

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{CC} - \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \frac{I_C}{\beta} \approx V_{BE} + R_E I_C$$

Posons : $a = R_1 + R_2 = 11,25k\Omega$

$$R_1 \left[V_{CC} - R_2 \frac{I_C}{\beta} \right] = a(V_{BE} + R_E I_C)$$

$$\left[a - R_2 \right] \left[V_{CC} - R_2 \frac{I_C}{\beta} \right] = a(V_{BE} + R_E I_C)$$

$$0,02R_2^2 - 5,234R_2 + 43,695 = 0$$

$$R_2 = 8,64k\Omega \rightarrow R_1 = 11,25 - 8,64 = 2,6k\Omega$$

2)

$$R_1 = 2,6k\Omega$$

$$R_2 = 8,6k\Omega$$

Lorsque le courant de saturation de la jonction BC est non nul, on peut écrire :

$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0}$$

$$I_C = \beta I_B + I_{CE0}$$

$$I_{CE0} = (\beta + 1) I_{CB0}$$

I_{CB0} est le courant de saturation de la jonction base collecteur, l'émetteur en circuit ouvert.

Maille d'entrée

$$-R_E I_E - V_{BE} - R_T I_B + V_T = 0$$

$$I_E \simeq I_C - I_{CB0} \quad (\alpha \simeq 1)$$

Soit :

$$-R_E (I_C - I_{CB0}) - V_{BE} - R_T \left(\frac{I_C - I_{CE0}}{\beta} \right) + V_T = 0$$

D'autre part : $\frac{I_{CE0}}{\beta} \simeq I_{CB0}$

Donc :

$$-R_E (I_C - I_{CB0}) - V_{BE} - R_T \left(\frac{I_C}{\beta} - I_{CB0} \right) + V_T = 0$$

$$I_C = \frac{V_T + (R_E + R_T) I_{CB0} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_T}{\beta}}$$

A la température T_1 :

$$V_{BE1} = 0,7V, \quad I_{CB0_1} = 5\mu A$$

A la température $T_2 = T_1 + \Delta T$, $\Delta T = 20^\circ C$

$$\Delta V_{BE} = -2mV \cdot \Delta T = -0,04V$$

$$V_{BE2} = V_{BE1} + \Delta V_{BE} = 0,7 - 0,04 = 0,66V$$

Le courant I_{CB0} double de valeur pour chaque augmentation de $10^\circ C$, on peut donc écrire :

$$I_{CB0_2} = 4I_{CB0_1} = 20\mu A$$

$$\Delta I_{CB0} = 20\mu A - 5\mu A = 15\mu A$$

En termes de facteurs de stabilisation, la variation du courant s'écrit :

$$\Delta I_C = \underbrace{\frac{\partial I_C}{\partial I_{CB0}}}_{S_I} \Delta I_{CB0} + \underbrace{\frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}}}_{S_V} \Delta V_{BE}$$

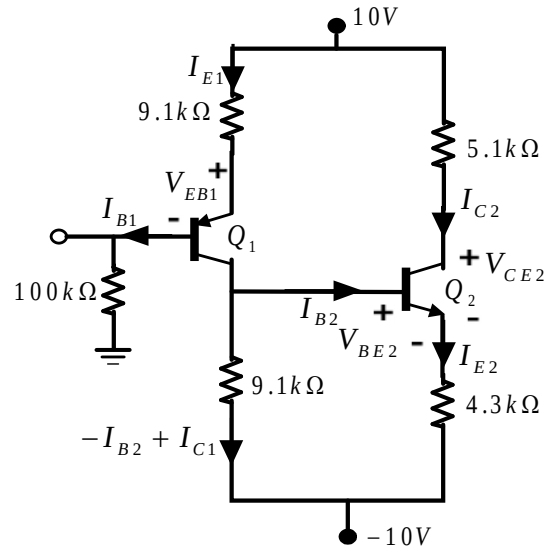
β est considéré constant.

$$S_I = \frac{R_E + R_T}{R_E + \frac{R_T}{\beta}} = \frac{0,2 + 2,6 \parallel 8,6}{0,2 + \frac{2,6 \parallel 8,6}{100}} = 9,98$$

$$S_V = \frac{-1}{R_E + \frac{R_T}{\beta}} = -4,54 mS$$

$$\Delta I_C = -4,54 \times 10^{-3} \times (-0,04) + 9,98 \times 15 = 0,33 mA$$

Exercise 3 :



$$-100I_{B1} - V_{EB1} - 9,1I_{E1} + 10 = 0$$

$$I_{C1} \approx \frac{10 - V_{EB1}}{9,1 + \frac{100}{\beta}} = \frac{10 - 0,7}{9,1 + 1} = 0,92 mA$$

$$-4,3I_{E2} - V_{BE2} + 9,1(I_{C1} - I_{B2}) = 0$$

$$I_{E2} \approx I_{C2}$$

$$I_{C2} = \frac{9,1I_{C1} - V_{BE2}}{4,3 + \frac{9,1}{\beta}} = 1,748 \approx 1,75 mA$$

$$V_{C1} = -10 + 4,3I_{E2} + V_{BE2} = -10 + 4,3I_{C2} + V_{BE2} = -1,78V$$

$$V_{E1} = 10 - 9,1I_{E1} \approx 10 - 9,1 \times 0,92 = 1,628V$$

$$V_{EC1} = 1,628 + 1,78 = 3,4V$$

Calcul de V_{CE2}

$$10 - 4,3I_{E2} - V_{CE2} - 5,1I_{E2} + 10 = 0$$

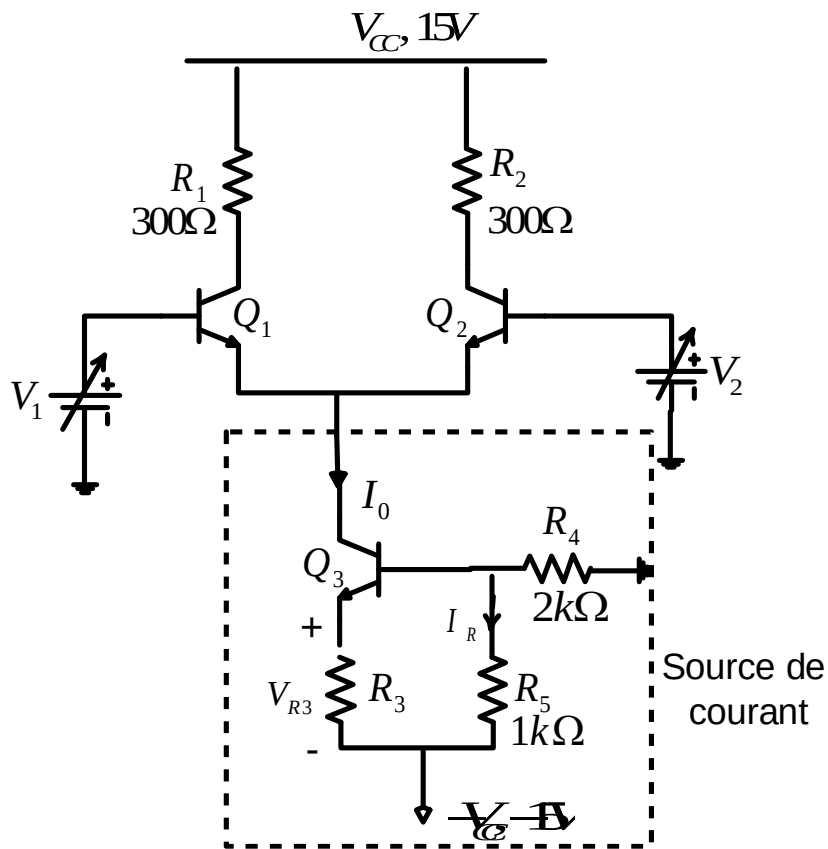
$$V_{CE2} \approx 20 - (4,3 + 5,1)I_{C2} = 3,56V$$

Calcul de V_{B1}

$$\text{Loi d'ohm : } V_{B1} = 100I_{B1} = \frac{100}{\beta} I_{C1} = 0,92V$$

Exercice 4 :

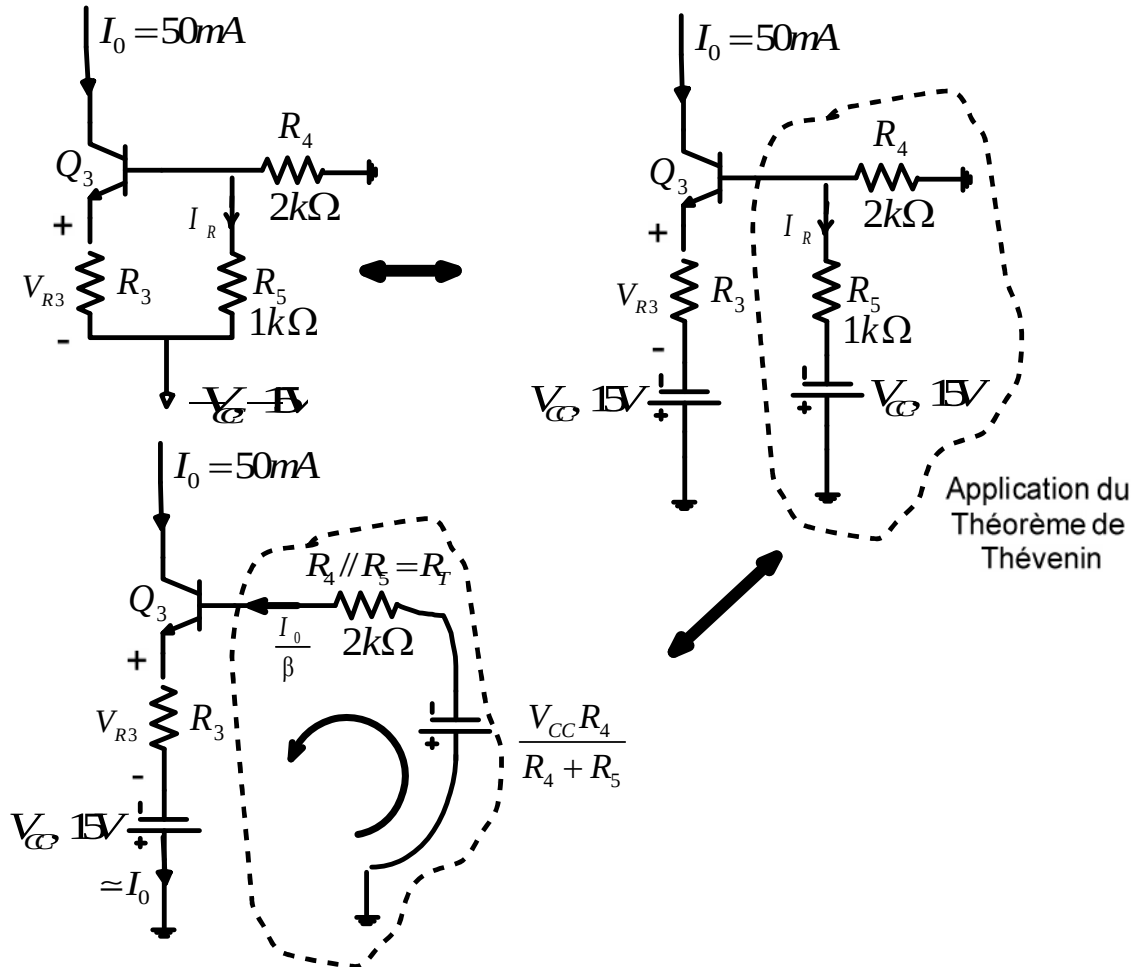
On considère le circuit amplificateur différentiel de la figure ci-dessous :



Données : V_1 et V_2 varient entre $-5V$ et $+5V$. Q_1 , Q_2 et Q_3 sont des transistors bipolaires identiques caractérisés par $\beta = 100$, $V_{BE} = 0.5V$, $V_{CEsat} = 0.2V$.

1°) Détermination R_3

L'amplification du théorème de Thévenin nous permet d'avoir :



Loi des mailles :

$$V_{CC} - R_3 I_0 - V_{BE} - \frac{I_0}{\beta} R_T - \frac{V_{CC} R_4}{R_4 + R_5} = 0$$

$$R_3 = \frac{V_{CC} \frac{R_5}{R_4 + R_5} - V_{BE} - \frac{I_0}{\beta} R_T}{I_0}$$

$$R_3 = \frac{\frac{15}{3} - 0.5 - \frac{50}{3}}{50} \text{ k}\Omega = 83.3\Omega$$

2°)

- On suppose que $V_1 = V_2 = 0V$

Les transistors sont identiques et la configuration de l'ampli-différentiel est symétrique, on déduit que

$$I_{EQ1} = I_{EQ2} = \frac{I_0}{2} = 25mA$$

Le courant collecteur étant quasi égal au courant émetteur ($\beta \gg 1$), on en déduit que :

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} \approx \frac{I_0}{2} = 25mA$$

$$I_{CQ3} = I_0 = 50mA$$

Loi des mailles :

$$V_{CQ1} = V_{CQ2} = V_{CC} - R_2 I_{CQ2} = 15 - 0.3 \times 25 = 7.5V$$

Les potentiels des bases des transistors Q1 et Q2 sont nuls : $V_{BQ1} = V_{BQ2} = 0$

$$V_{CQ3} = V_{EQ1} = V_{EQ2} = -V_{BE} = -0.5V$$

$$V_{BQ1} = V_{BQ2} = 0V$$

Les transistors Q1 et Q2 opèrent dans la zone active ($V_{CE} > V_{CESat}$, $I_C > 0$, $V_{BC} < 0$).

Le potentiel de l'émetteur du transistor V_{EQ3} est donné par :

$$V_{EQ3} = -V_{CC} + R_3 I_0 = -15 + 83.3 \times 50 \times 10^{-3} = -10.83V$$

La loi des mailles à l'entrée du transistor Q3 permet d'écrire :

$$V_{BQ3} = -\frac{R_4}{R_4 + R_5} V_{CC} - \frac{R_T I_0}{\beta} = -\frac{2}{3} \times 15 - \frac{2}{3} \times \frac{50}{100} = -10 - \frac{1}{3} = -10.33V$$

La tension collecteur-base du transistor Q3 vaut $V_{BCQ3} = V_{BQ3} - V_{CQ3} = -10.33 + 0.5 = -9.83V < 0$. Le transistor Q3 est dans la zone active.

Résumé :

Transistor	V_B	V_E	V_C	I_C	Mode d'opération
Q1	0V	-0.5V	7.5V	25mA	normal
Q2	0V	-0.5V	7.5V	25mA	normal
Q3	10.33V	-10.83V	-0.5V	50mA	normal

- On suppose que $V_1 = -5V, V_2 = 0V$

Si les deux transistors Q1 et Q2 opèrent en mode normal ou saturé, la loi des mailles conduira au résultat suivant :

$$-V_1 + V_{BE} - V_{BE} + V_2 = 0V, \quad \text{soit} \quad V_2 - V_1 = 0V \text{ (ce qui est impossible)}$$

L'un /ou les deux transistors est bloqué.

o Supposons que Q1 est bloqué et Q2 est en mode actif direct

Le courant collecteur $I_{CQ2} = I_0 > 0$.

$$V_{EQ2} = -V_{BE} = -0.5V$$

$$V_{CEQ2} = V_{CQ2} - V_{EQ2}$$

$$V_{CQ2} = V_{CC} - R_2 I_0 = 15V - 300 \times 50 \times 10^{-3} = 0V$$

La tension collecteur-Emetteur du transistor Q2 est donc : $V_{CEQ2} = 0 + 0.5V = 0.5V > V_{CEsat}$

$$V_{BCQ2} = 0V$$

Loi des mailles :

$$V_{EQ2} = V_1 - V_{BEQ1}, \text{ soit } V_{BEQ1} = V_1 - V_{EQ2} = -5V + 0.5V = -4.5V < 0$$

$$V_{BCQ1} = V_1 - V_{CC} < 0$$

La supposition concernant l'état des diodes est donc juste.

Le potentiel de l'émetteur du transistor V_{EQ3} est donné par :

$$V_{EQ3} = -V_{CC} + R_3 I_0 = -15 + 83.3 \times 50 \times 10^{-3} = -10.83V$$

$$V_{CQ3} = V_{EQ2} = -0.5V$$

La loi des mailles à l'entrée du transistor Q3 permet d'écrire :

$$V_{BQ3} = -\frac{R_4}{R_4 + R_5} V_{CC} - \frac{R_T I_0}{\beta} = -\frac{2}{3} \times 15 - \frac{2}{3} \times \frac{50}{100} = -10 - \frac{1}{3} = -10.33V$$

La tension collecteur-base du transistor Q3 vaut $V_{BCQ3} = V_{BQ3} - V_{CQ3} = -10.33 + 0.5 = -9.83V < 0$. Le transistor Q3 est dans la zone active.

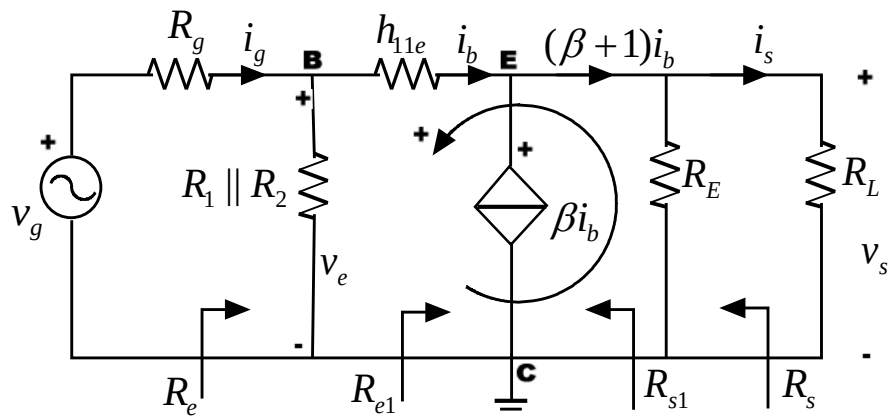
Résumé :

Transistor	V_B	V_E	V_C	I_C	Mode d'opération
Q1	$-5V$	$-0.5V$	$15V$	$0mA$	bloqué
Q2	$0V$	$-0.5V$	$0V$	$50mA$	normal
Q3	$-10.33V$	$-10.83V$	$-0.5V$	$50mA$	normal

Un raisonnement similaire peut être utilisé pour le troisième cas.

Exercice 5 :**A- Interrupteur K à la position 1**Schéma en dynamique :

Le montage est un collecteur commun

**Gain A_v :**

$$v_s = (R_E \parallel R_L)(\beta + 1)i_b$$

$$v_e = h_{11e}i_b + (R_E \parallel R_L)(\beta + 1)i_b$$

$$A_v = \frac{(R_E \parallel R_L)(\beta + 1)}{h_{11e} + (R_E \parallel R_L)(\beta + 1)}$$

$$R_E \parallel R_L = 0,1k\Omega \rightarrow A_v \simeq 0,89$$

Gain A_i :

$$\text{Diviseur de courant en sortie : } \frac{i_s}{(\beta + 1)i_b} = \frac{R_E}{R_E + R_L}$$

Diviseur de tension à l'entrée : $\frac{i_b}{i_g} = \frac{R_1 \parallel R_2}{R_1 \parallel R_2 + h_{11e} + (R_E \parallel R_L)(\beta + 1)}$

$$A_v = \frac{i_s}{i_g} = \frac{R_1 \parallel R_2}{R_1 \parallel R_2 + h_{11e} + (R_E \parallel R_L)(\beta + 1)} \times (\beta + 1) \frac{R_E}{R_E + R_L} = 19,6$$

Résistance d'entrée :

Loi des mailles :

$$-(R_E \parallel R_L)(\beta + 1)i_b - h_{11e}i_b + v_e = 0$$

$$R_{e_i} = \frac{v_e}{i_b} = h_{11e} + (R_E \parallel R_L)(\beta + 1) = 7,5k\Omega$$

$$R_e = R_{e_i} \parallel [R_1 \parallel R_2] = 7,5 \parallel 19 = 4,38k\Omega$$

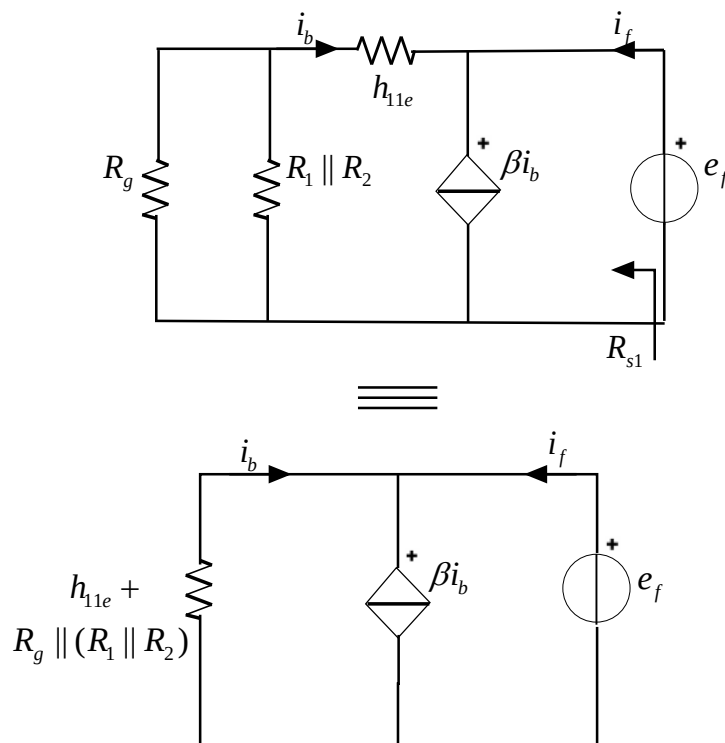
Résistance de sortie :

La résistance de sortie R_s est $R_s = R_{s1} \parallel R_E$

Calculons R_{s1} :

On élimine R_E et R_L , on éteint la source indépendante (ici v_g) et on alimente la sortie par un générateur e_f débitant un courant i_f

La résistance R_{s1} est donc par définition : $R_{s1} = \frac{e_f}{i_f}$



$$i_f = -(\beta + 1)i_b$$

$$e_f = -[h_{11e} + R_g \parallel (R_1 \parallel R_2)]i_b$$

$$R_{s1} = \frac{e_f}{i_f} = \frac{[h_{11e} + R_g \parallel (R_1 \parallel R_2)]}{(\beta + 1)}$$

$$R_{s1} = \frac{0,6 + (0,6 \parallel 19)}{51} = 23,17\Omega$$

$$R_s = R_{s1} \parallel R_E = 20,7\Omega$$

B- Interrupteur k à la position 2 et la capacité C_3 déconnectée :

Le circuit devient :

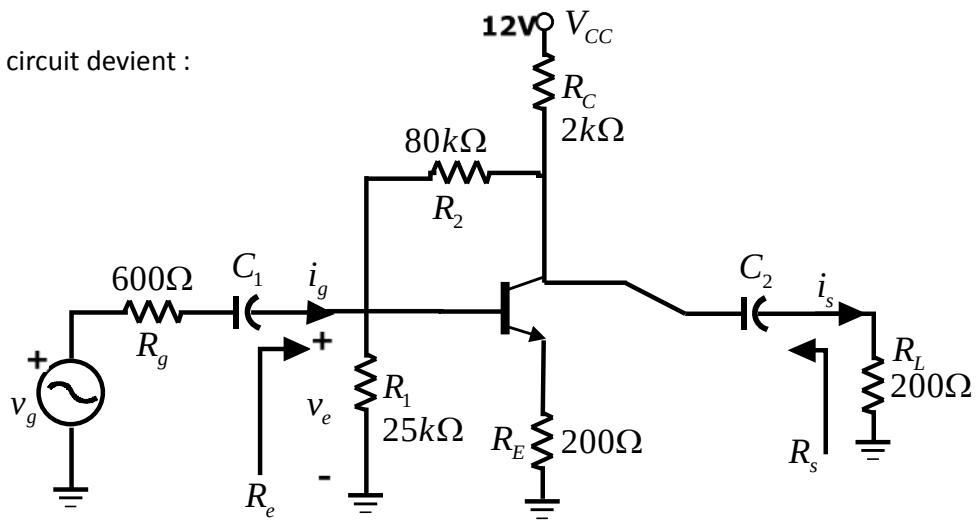
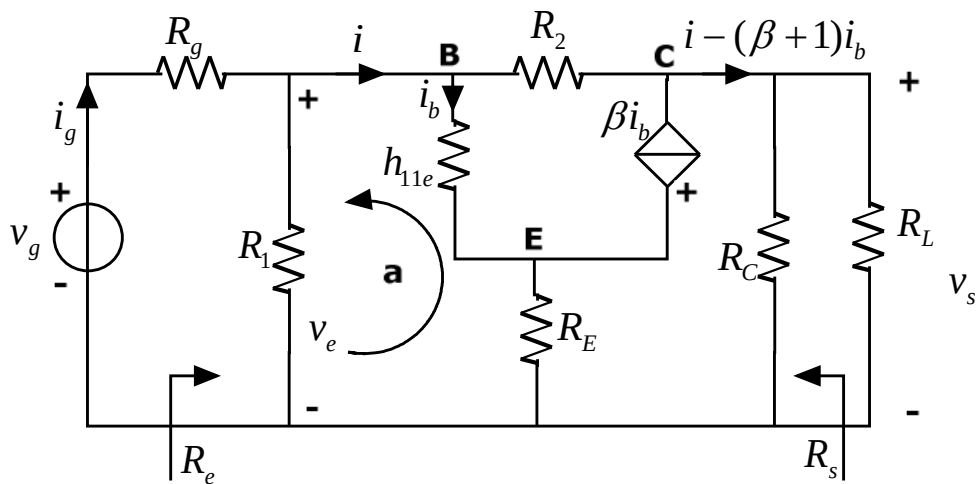


Schéma en dynamique :



Résistance d'entrée :

$$R_e = \frac{v_e}{i_g} = \left(\frac{v_e}{i} \right) \parallel R_1$$

Loi des nœuds au point B :

$$i = i_b + \frac{v_e - v_s}{R_2} \quad (1)$$

Loi des mailles (maille a) :

$$v_e = (h_{11e} + (\beta + 1)R_E) i_b \quad (2)$$

Loi d'ohm et loi des nœuds à la sortie :

$$v_s = (R_L \parallel R_C) (i - (\beta + 1)i_b) \quad (3)$$

Le report des équations (2) et (3) dans l'équation (1) conduit à la relation suivante :

$$\begin{aligned} i &= \frac{v_e}{h_{11e} + R_E(\beta + 1)} + \frac{v_e}{R_2} - \frac{(R_L \parallel R_C)}{R_2} \left(i - \frac{(\beta + 1)v_e}{h_{11e} + R_E(\beta + 1)} \right) \\ i \left(1 + \frac{(R_L \parallel R_C)}{R_2} \right) &= v_e \left(\frac{1}{h_{11e} + R_E(\beta + 1)} \left(1 + \frac{(\beta + 1)(R_L \parallel R_C)}{R_2} \right) + \frac{1}{R_2} \right) \\ \frac{v_e}{i} &= R_2 + (R_L \parallel R_C) \cdot \frac{h_{11e} + R_E(\beta + 1)}{R_2 + h_{11e} + (\beta + 1)(R_E + (R_L \parallel R_C))} \end{aligned}$$

La résistance d'entrée est donc :

$$\begin{aligned} R_e &= \left((R_2 + (R_C \parallel R_L)) \frac{h_{11e} + R_E(\beta + 1)}{h_{11e} + (\beta + 1)(R_E + (R_L \parallel R_C))} \right) \parallel R_1 \\ R_e &= (80 + 2 \parallel 0,2) \left(\frac{0,6 + 51 \times 0,2}{0,6 + 51 \times (0,2 + 2 \parallel 0,2)} \right) \parallel 25 \\ &= 43,14 k\Omega \parallel 25 k\Omega \\ &= 15,83 k\Omega \end{aligned}$$

A partir de l'équation (3), on obtient le gain en tension A_v en exprimant i et i_b en fonction de v_e :

$$\begin{aligned} v_s &= (R_L \parallel R_C) \left(\frac{v_e}{R_e} - \frac{(\beta + 1)v_e}{h_{11e} + R_E(\beta + 1)} \right) \\ A_v &= (R_L \parallel R_C) \left(\frac{1}{R_e} - \frac{(\beta + 1)}{h_{11e} + R_E(\beta + 1)} \right) \\ &= (2 \parallel 0,2) \left(\frac{1}{15,83} - \frac{51}{0,6 + 51 \times 0,2} \right) \\ &= -0,847 \end{aligned}$$

Gain en courant :

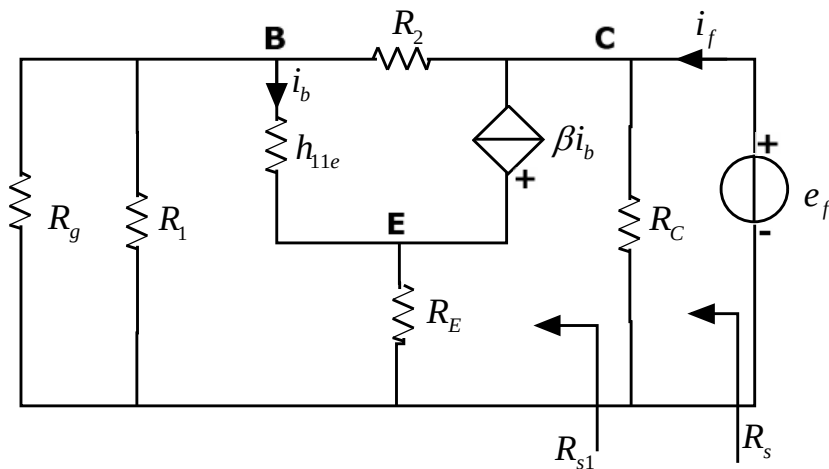
$$A_i = \frac{i_s}{i_g} = \frac{v_s / R_L}{v_e / R_e} = \frac{R_e}{R_L} A_v$$

$$= \frac{15,83}{0,2} (-0,847) = -67$$

Résistance de sortie :

On éteint la source v_g et on connecte à la place de la charge R_L un générateur de tension idéal e_f qui débite un courant i_f . La résistance de sortie vaut (voir figure ci-dessous) :

$$R_s = \frac{e_f}{i_f}$$

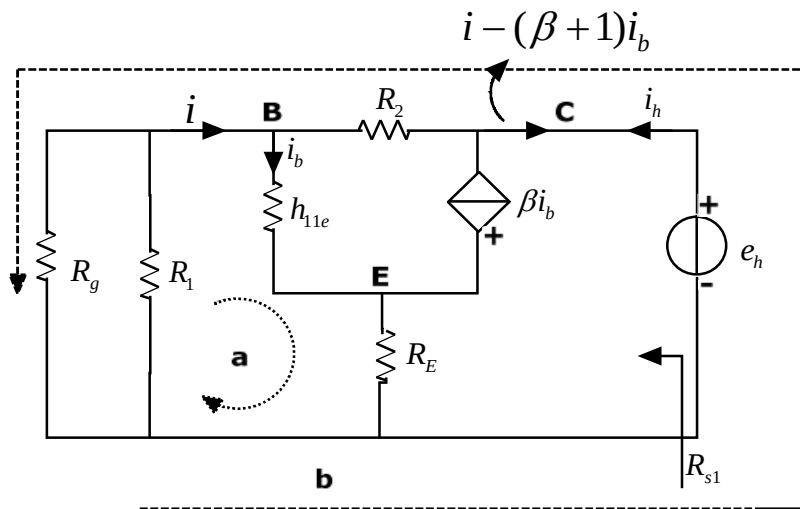


La résistance de sortie est donnée par :

$$R_s = R_{s1} \parallel R_C$$

Où R_{s1} est définie par la relation suivante (cf. figure ci-dessous) :

$$R_{s1} = \frac{e_h}{i_h}$$



Maille a :

$$(h_{11e} + (\beta + 1)R_E)i_b + (R_g \parallel R_1)i = 0 \quad (4)$$

Loi des nœuds au point C :

$$i_h = (\beta + 1)i_b - i \quad (5)$$

Maille b :

$$-e_h - R_2(i - i_b) - (R_g \parallel R_1)i = 0 \quad (6)$$

Manipulations algébrique des équations (4-6) :

$$i_b = -\frac{R_g \parallel R_1}{h_{11e} + (\beta + 1)R_E} i$$

$$\begin{aligned} i_h &= -\frac{(\beta+1)(R_1 \parallel R_g)}{h_{11e} + (\beta+1)R_E} i - i \\ &= -\frac{h_{11e} + (\beta+1)(R_E + (R_1 \parallel R_g))}{h_{11e} + (\beta+1)R_E} i \end{aligned}$$

$$i = -\frac{h_{11e} + R_E(\beta + 1)}{h_{11e} + (\beta + 1)(R_E + (R_1 \parallel R_q))} i_h$$

Soit :

$$i_b = -\frac{(R_1 \parallel R_g)}{h_{11e} + R_E(\beta + 1)} \times \left(-\frac{h_{11e} + R_E(\beta + 1)}{h_{11e} + (\beta + 1)(R_E + (R_1 \parallel R_g))} \right) i_h$$

$$i_b = \frac{(R_1 \parallel R_g)}{h_{11e} + (\beta + 1)(R_E + (R_1 \parallel R_q))} i_h$$

La relation (6) donne :

$$e_h = -(R_2 + (R_g \parallel R_1))i + R_2 i_b$$

$$= \frac{(R_2 + (R_g \parallel R_1))(h_{11e} + (\beta + 1)R_E) + R_2(R_1 \parallel R_g)}{h_{11e} + (\beta + 1)(R_E + (R_1 \parallel R_g))} i_h$$

$$R_{s1} = \frac{e_h}{i_h} = \frac{(R_2 + (R_g \parallel R_1))(h_{11e} + (\beta + 1)R_E) + R_2(R_1 \parallel R_g)}{h_{11e} + (\beta + 1)(R_E + (R_1 \parallel R_g))}$$

Et : $R_s = R_{s1} \parallel R_C$

$$R_{s1} = \frac{(80 + 0,6 \parallel 25)(0,6 + 51 \times 0,2) + 80(0,6 \parallel 25)}{0,6 + 51(0,2 + 0,6 \parallel 25)} = 22,54k\Omega$$

$$R_s = R_{s1} \parallel R_C = 22,54k\Omega \parallel 2k\Omega = 1,837k\Omega$$

Exercice 6 :

On considère le montage amplificateur cascode de la figure ci-contre.

1°) Calcul du point de fonctionnement de chaque transistor

Loi des mailles :

$$R_{B1}I_1 + R_{B2}I_2 + R_{B3}I_3 = V_{CC} \quad (1)$$

$$R_{B3}I_3 = V_{BE} + R_E I_{E1} \quad (2)$$

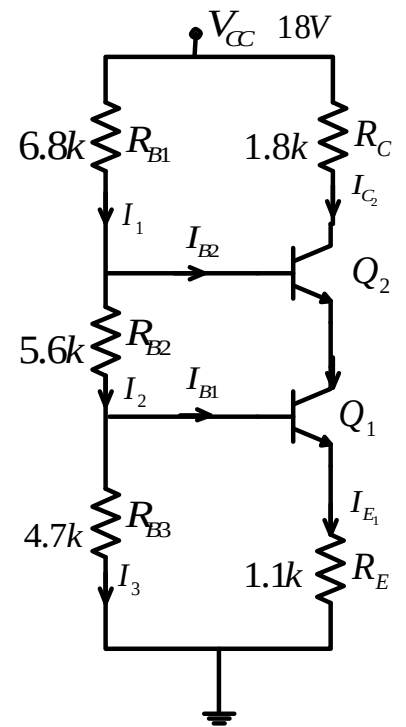
$$I_{E1} \square I_{C1} \square I_{C2} = I_C$$

$$I_{CQ1} = I_{C1}, I_{CQ2} = I_{C2}$$

Loi des nœuds :

$$I_1 = I_{B2} + I_2 \quad (3)$$

$$I_2 = I_{B1} + I_3 \quad (4)$$



La combinaison des relations 2, 3 et 4 conduit au résultat suivant :

$$R_{B1} \left(\frac{I_C}{\beta} + \frac{I_C}{\beta} + \frac{V_{BE}}{R_{B3}} + \frac{R_E}{R_{B3}} I_C \right) + R_{B2} \left(\frac{I_C}{\beta} + \frac{V_{BE}}{R_{B3}} + \frac{R_E}{R_{B3}} I_C \right) + V_{BE} + R_E I_C = V_{CC}$$

$$I_C \left(R_{B1} \left(\frac{2}{\beta} + \frac{R_E}{R_{B3}} \right) + R_{B2} \left(\frac{1}{\beta} + \frac{R_E}{R_{B3}} \right) + R_E \right) = V_{CC} - V_{BE} \left(1 + \frac{R_{B1}}{R_{B3}} + \frac{R_{B2}}{R_{B3}} \right)$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE} \left(1 + \frac{R_{B1}}{R_{B3}} + \frac{R_{B2}}{R_{B3}} \right)}{\left(R_{B1} \left(\frac{2}{\beta} + \frac{R_E}{R_{B3}} \right) + R_{B2} \left(\frac{1}{\beta} + \frac{R_E}{R_{B3}} \right) + R_E \right)}$$

A.N.

$$I_C = \frac{18 - 0.7(1 + \frac{6.8}{4.7} + \frac{5.6}{4.7})}{6.8(\frac{2}{200} + \frac{1.1}{4.7}) + 5.6(\frac{1}{200} + \frac{1.1}{4.7}) + 1.1} = \frac{15.45}{1.66 + 1.34 + 1.1} = \frac{15.45}{4.1} = 3.77mA$$

On peut procéder d'une façon plus pratique pour estimer le courant I_C en supposant les courants des bases négligeables.

Diviseur de tension en entrée :

$$V_{B1} \approx \frac{R_{B3}}{R_{B1} + R_{B2} + R_{B3}} V_{CC}$$

$$V_{B2} = \frac{R_{B3} + R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2} + R_{B3}} V_{CC}$$

$$V_{B1} = V_{BE} + R_E I_E \approx V_{BE} + R_E I_C$$

$$I_C \approx \frac{V_{B1} - V_{BE}}{R_E}$$

A.N. :

$$V_{B1} \approx 4.7V = 4.9V$$

$$V_{B2} = \frac{18 \times (4.7 + 5.6)}{6.8 + 4.7 + 5.6} = 10.8V$$

$$I_C = \frac{4.395 - 0.7}{1.1} = 3.8mA$$

Notons que l'erreur n'est pas très grande.

La tension entre les bases vaut :

$$V_{B2} - V_{B1} = V_{CBQ1} + V_{BE2} = V_{CEQ1} = 5.9V$$

La tension V_{CE2} est obtenue à partir de la relation :

$$V_{B2} - V_{BE2} + V_{CE2} + R_C I_C \approx V_{CC}$$

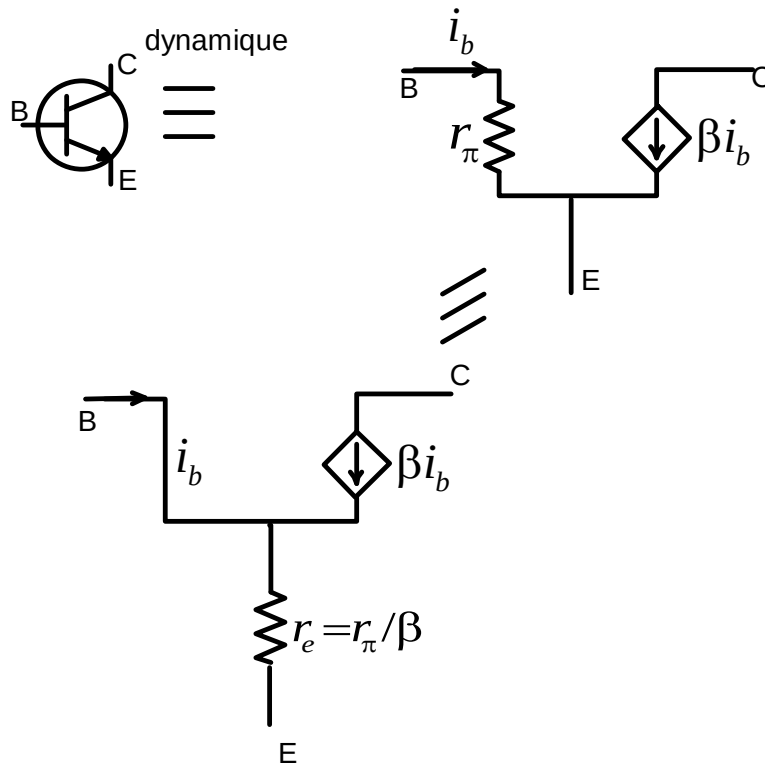
$$V_{CEQ2} \approx V_{BE2} - V_{B2} + V_{CC} - R_C I_C$$

$$V_{CEQ2} = 0.7 - 10.8 + 18 - 1.8 \times 3.8 = 1.06V$$

Paramètres petits signaux :

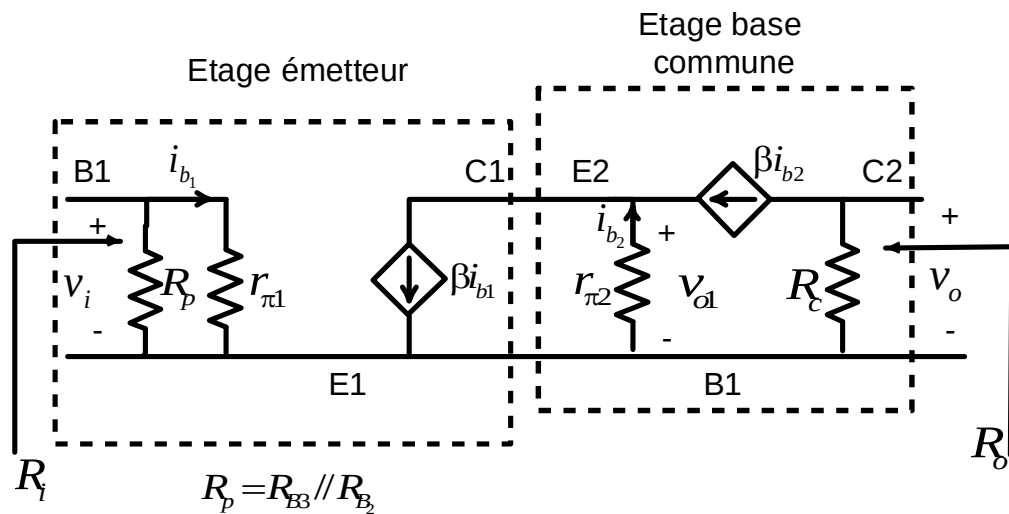
$$r_{\pi} = h_{11e} = \frac{\beta V_T}{I_C}, \quad h_{21e} \approx \beta$$

Schémas équivalents en dynamique du transistor :



2°)

Schéma en dynamique :



R_i désigne la résistance d'entrée et R_o la résistance de sortie.

$$r_{\pi} = r_{\pi 1} = r_{\pi 2} = \frac{26mV}{I_C} \beta = r_e \beta, \quad (I_C = I_{CQ1} = I_{CQ2})$$

$$r_e = \frac{26mV}{I_C} = \frac{26mV}{3.8mA} = 6.8\Omega$$

$$r_{\pi} = 1.36k\Omega$$

Gain en tension de l'étage EC :

$$A_{v1} = \frac{v_{o1}}{v_i} = \frac{r_{\pi 2} i_{b2}}{r_{\pi 1} i_{b1}}$$

$\beta \gg 1$ entraîne $i_{b2} \approx i_{b1}$

$$A_{v1} \approx -\frac{r_{\pi 2}}{r_{\pi 1}} \approx -1$$

Gain en tension de l'étage base commune:

$$A_{v2} = \frac{v_o}{v_{o1}} = \frac{-R_C i_{b2}}{-r_{\pi 2} i_{b2}} = \frac{R_C}{r_{\pi 2}}$$

Gain de l'amplificateur Cascode :

$$A_v = A_{v1} A_{v2} = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_C}{r_{\pi}}$$

A.N. $A_v = -\frac{1.8}{6.8} \times 10^3 \approx -265$

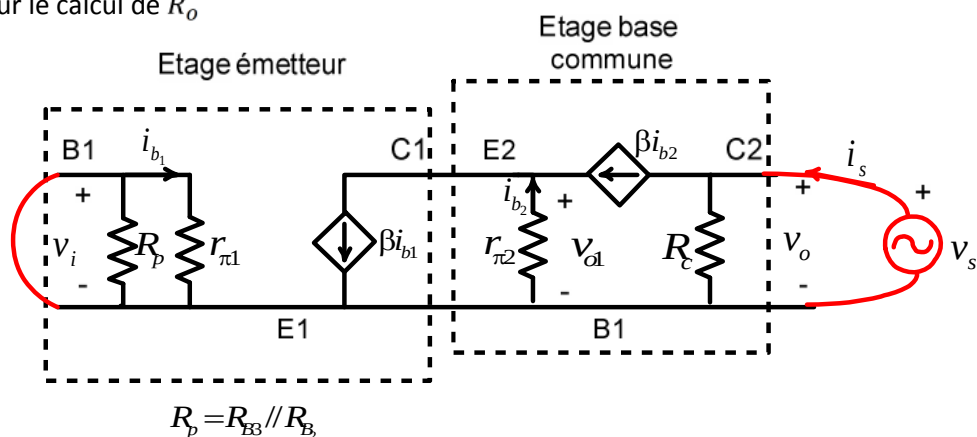
Résistance d'entrée

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{R_p r_{\pi}}{R_p + r_{\pi}} = (2.55 || 1.36)k = 887\Omega$$

Le symbole $||$ désigne la mise en parallèle.

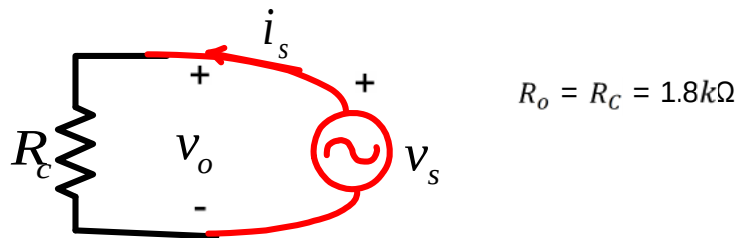
Résistance de sortie :

Schéma pour le calcul de R_o



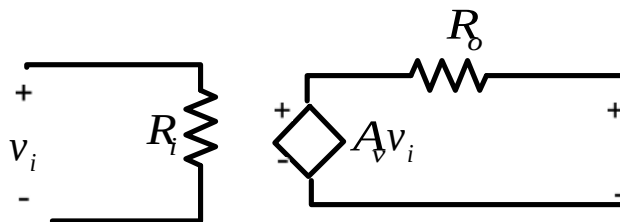
La résistance de sortie est définie par : $R_o = v_s / i_s$

Il est clair que $i_{b1} = 0$, ce qui entraîne $i_{b2} = 0$. Le circuit ci-dessus se réduit à celui représenté ci-dessous :



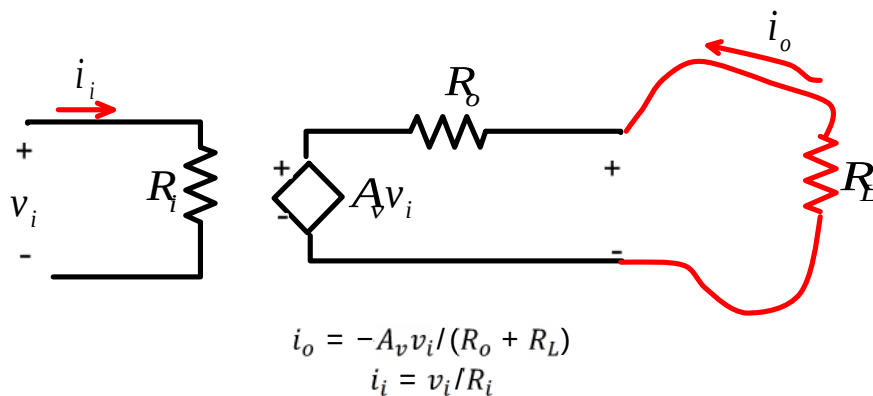
4°)

L'amplificateur de la figure 5 peut donc être représenté par le circuit équivalent suivant :



A_v désigne le gain à vide de l'amplificateur (pas de charge).

En connectant la charge $R_L = 10k\Omega$, on obtient le schéma :



Gain en courant :

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = -A_v R_i / (R_L + R_o)$$

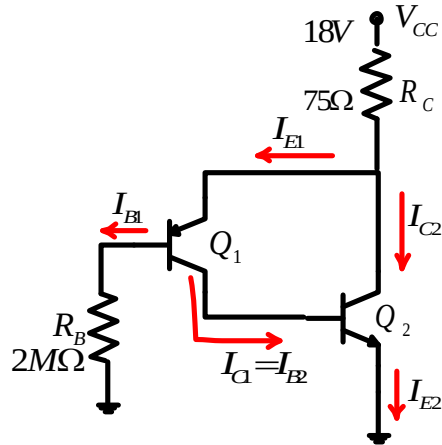
A.N. :

$$A_i = 265 \times \frac{0.887}{1.8 + 10} \approx 20$$

Exercice 7 :

1°) Etude en statique

Le schéma statique de l'amplificateur est représenté ci-dessous :



Le transistor Q_1 est du type PNP et le transistor Q_2 du type NPN. Remarquez les sens des courants pour chaque type du transistor.

Loi des mailles :

$$R_B I_{B1} + V_{EB1} + R_C (I_{E1} + I_{C2}) = V_{CC}$$

Compte tenu du fait que $\beta_1 \gg 1$ et $\beta_2 \gg 2$, on peut réécrire la relation ci-dessus sous la forme suivante :

$$\frac{R_B I_{C1}}{\beta_1} + V_{EB1} + R_C (I_{C1} + I_{C2}) \approx V_{CC}$$

$$I_{C1} = \frac{I_{C2}}{\beta_2}, \quad \frac{R_B I_{C2}}{\beta_1 \beta_2} + V_{EB1} + R_C \left(\frac{I_{C2}}{\beta_2} + I_{C2} \right) \approx V_{CC}$$

Soit :

$$\frac{R_B I_{C2}}{\beta_1 \beta_2} + V_{EB1} + R_C I_{C2} \approx V_{CC}$$

$$I_{C2} \approx \frac{V_{CC} - V_{EB1}}{R_C + \frac{R_B}{\beta_1 \beta_2}}$$

$$I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta_2} = I_{B1}$$

$$I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta_1} = \frac{V_{CC} - V_{EB1}}{R_B + R_C \beta_1 \beta_2}$$

Remarquons que $I_{C2} = \beta_1 \beta_2 I_{B1}$. Le courant traversant la résistance R_C vaut :

$$I_C = I_{C2} + I_{E1} \approx I_{C2} + I_{B2} \approx I_{C2}$$

A. N. :

$$I_{B1} = \frac{18V - 0.7}{2M\Omega + 140 \times 180 \times 75\Omega} = 4.45\mu A$$

$$I_{B2} = I_{C1} = \beta_1 I_{B1} = 140 \times 4.45\mu A = 0.623mA$$

$$I_{C2} = \beta_2 I_{B2} = 180 \times 0.623mA = 112mA$$

$$I_{BQ1} = I_{B1}, I_{BQ2} = I_{B2}, I_{CQ1} = I_{C1}, I_{CQ2} = I_{C2}$$

Loi des mailles :

$$V_{CEQ2} = V_{CC} - R_C \underbrace{I_C}_{I_{CQ2}}$$

A.N. $V_{CEQ2} = 18V - 75 \times 0.112 = 9.6V$

2°)

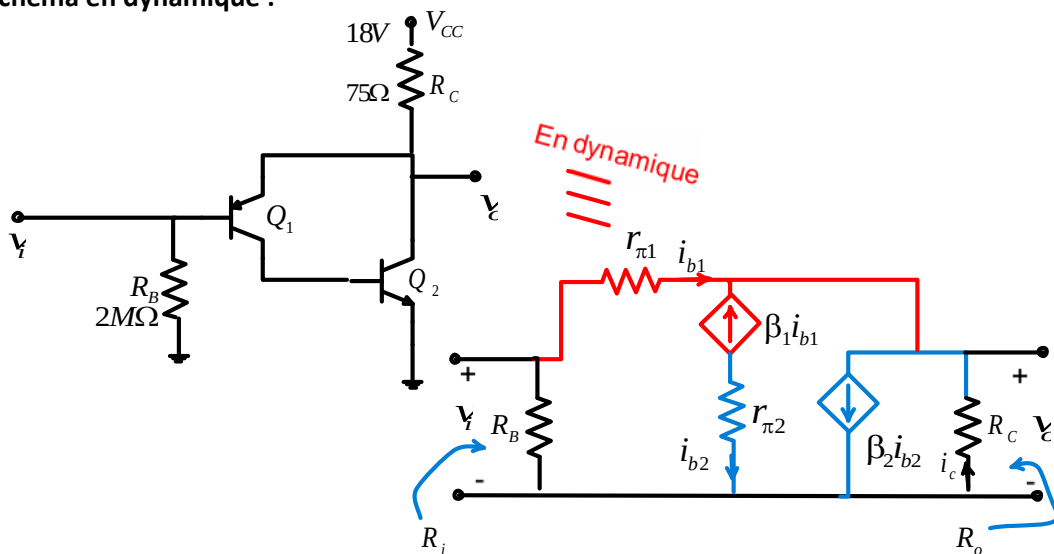
Paramètres petits signaux des transistors :

$$r_{\pi1} \approx \frac{26mV}{I_{CQ1}} \beta_1$$

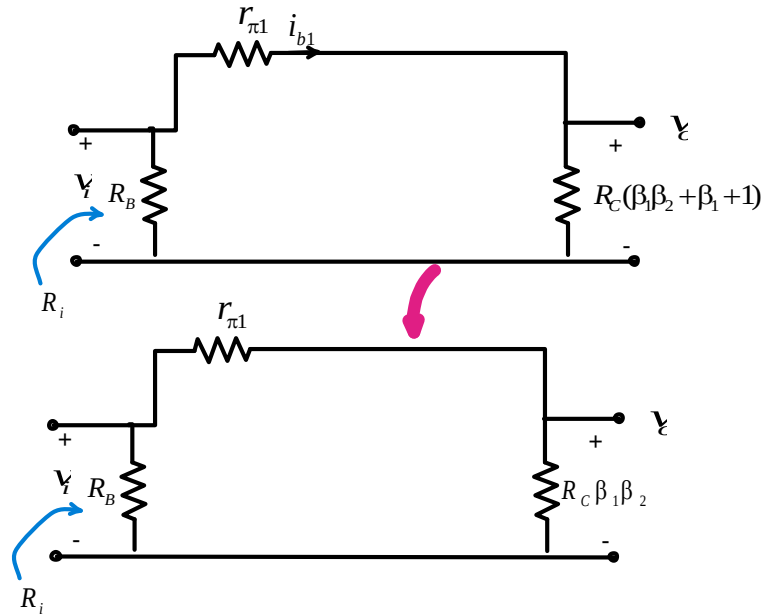
$$r_{\pi2} \approx \frac{26mV}{I_{CQ2}} \beta_2$$

Le paramètre hybride h_{21e} , Q_i du transistor Q_i étant égal à β_i .

3°) Schéma en dynamique :



En éliminant les sources de courant, on peut remplacer le schéma ci-dessus par le schéma équivalent :



Gain en tension et résistance d'entrée :

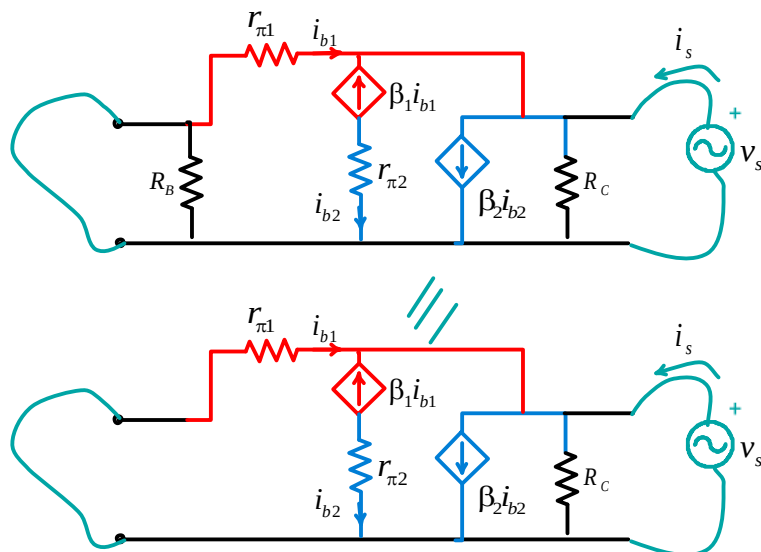
Diviseur de tension :

$$A_v = \frac{R_C\beta_1\beta_2}{R_C\beta_1\beta_2 + r_{\pi 1}}$$

$$R_i = R_B || (r_{\pi 1} + R_C\beta_1\beta_2)$$

Résistance de sortie :

Schéma à adopter pour le calcul :



$$\begin{aligned}
 i_s &= \frac{v_s}{R_C} + \beta_2 i_{b_2} - (\beta_1 + 1) i_{b_1} \\
 &= \frac{v_s}{R_C} - \beta_2 \beta_1 i_{b_1} - (\beta_1 + 1) i_{b_1} \\
 &\square \frac{v_s}{R_C} + \frac{\beta_1 \beta_2 v_s}{r_{\pi_1}} = 1/R_o
 \end{aligned}$$

La résistance de sortie vaut donc :

$$R_o = R_C || \left(r_{\pi_1} \frac{1}{\beta_1 \beta_2} \right) \square r_{\pi_1} \frac{1}{\beta_1 \beta_2}$$

Remarque :

Le gain en courant de l'amplificateur en court-circuit est de l'ordre de $\beta_1 \beta_2$ (fort gain en courant) (à démontrer).

Le gain en tension est proche de l'unité (semblable à celui du montage collecteur commun).

Notons que l'amplificateur admet une très faible résistance de sortie.