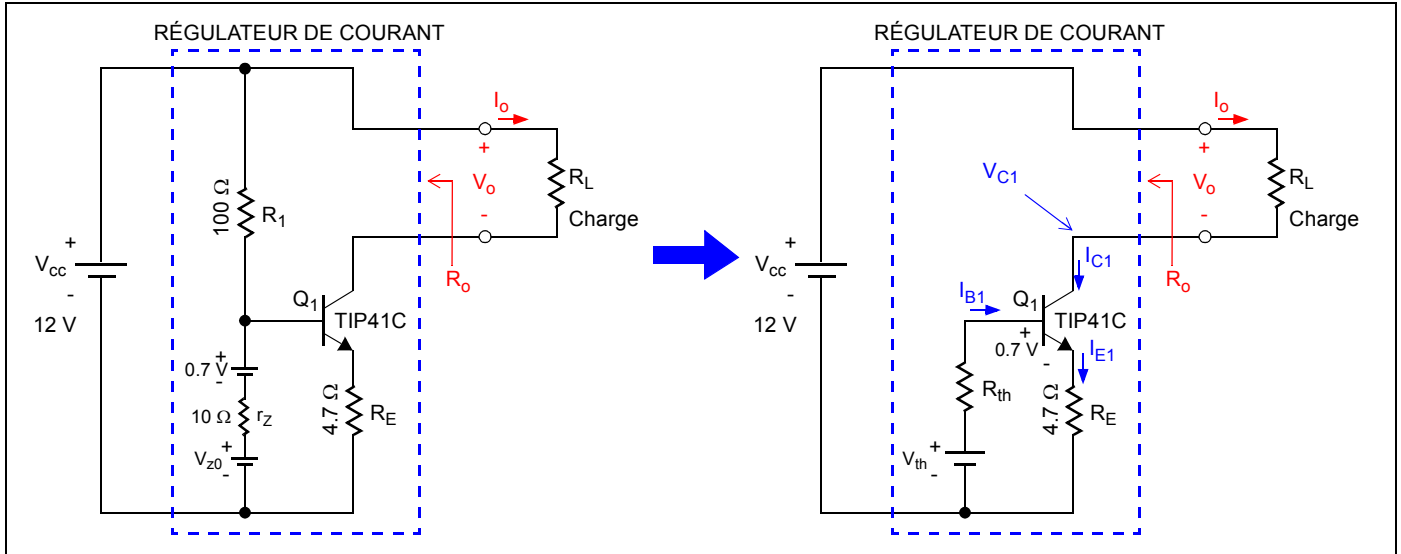


Solution de l'examen final H2013

Problème no. 1 (25 points)

a) Circuit équivalent



La tension V_{Z0} est $V_{Z0} = V_Z - r_Z I_Z = 3.3\text{V} - (10\Omega \times 76\text{mA}) = 2.54\text{V}$.

La tension V_{th} est $V_{th} = \left(\frac{r_Z}{R_1 + r_Z}\right)V_{CC} + \left(\frac{R_1}{R_1 + r_Z}\right)(V_{Z0} + 0.7) = \left(\frac{10}{100 + 10}\right)12\text{V} + \left(\frac{100}{100 + 10}\right)3.24\text{V} = 3.769\text{V}$

La résistance R_{th} est $R_{th} = 10\Omega \parallel 100\Omega = 9.09\Omega$

Équation du circuit de base de Q_1 : $V_{th} = R_{th}I_{B1} + V_{BE1} + R_E I_{E1}$

On a: $I_{B1} = \frac{I_{E1}}{\beta + 1}$

Alors: $V_{th} = \left(\frac{R_{th}}{\beta + 1} + R_E\right)I_{E1} + V_{BE1}$

On déduit: $I_{E1} = \frac{V_{th} - V_{BE1}}{\left(\frac{R_{th}}{\beta + 1} + R_E\right)} = \frac{3.769 - 0.7}{\left(\frac{9.09\Omega}{81} + 4.7\Omega\right)} = \frac{3.069\text{V}}{4.812\Omega} = 0.638\text{A}$

Le courant dans la charge est $I_o = I_{C1} = \alpha I_{E1} = \frac{\beta}{\beta + 1} I_{E1} = \frac{80}{81} \times 0.638\text{A} = 0.630\text{A}$

La tension du collecteur de Q_1 est $V_{C1} = V_{CC} - R_L I_{C1}$

La tension de l'émetteur de Q_1 est $V_{E1} = R_E I_{E1} = \left(\frac{\beta + 1}{\beta}\right) R_E I_{C1}$

On déduit: $V_{CE1} = V_{C1} - V_{E1} = V_{CC} - \left(R_L + \frac{\beta + 1}{\beta} R_E\right) I_{C1}$

La valeur de R_L est maximale lorsque $V_{CE1} = V_{CE1}(\text{sat}) = 0.3\text{V}$:

$$0.3\text{V} = 12\text{V} - \left(R_{L\text{max}} + \frac{81}{80} 4.7\Omega\right) 0.630\text{A} \rightarrow R_{L\text{max}} = \frac{12\text{V} - 0.3\text{V}}{0.630\text{A}} - \frac{81}{80} 4.7\Omega = 13.812\Omega$$

La valeur minimale de R_L est 0Ω

b) La résistance interne de la source de courant est $R_o = r_o = 1.5\text{k}\Omega$

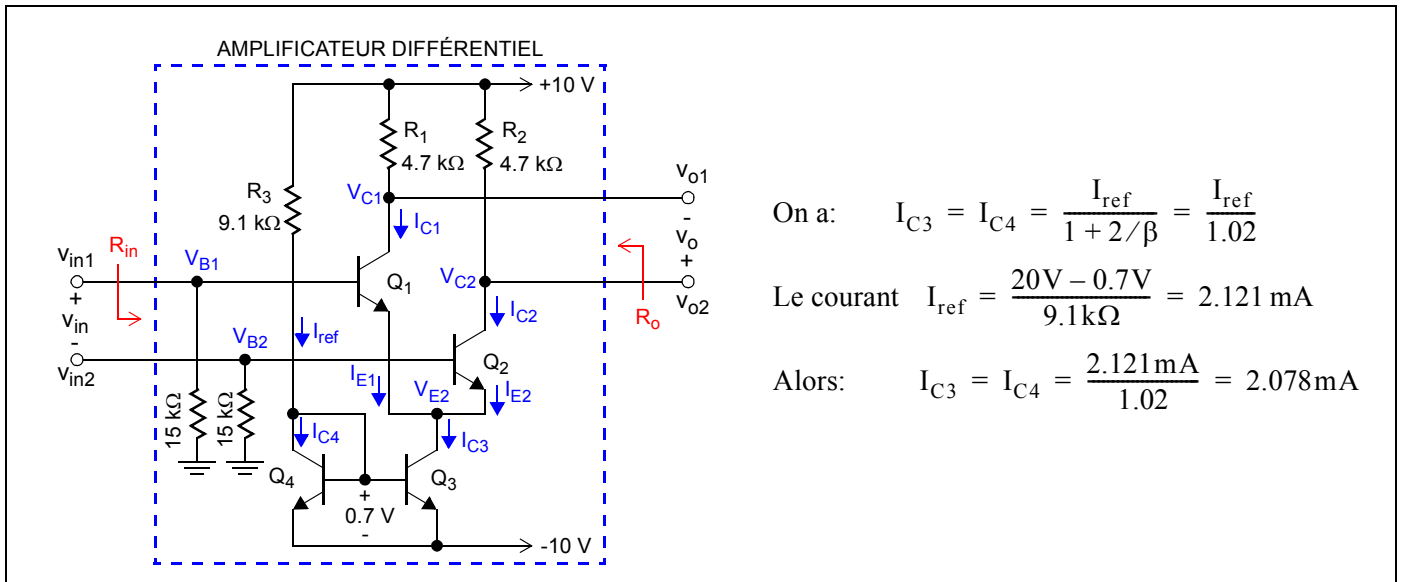
c) Dans le cas où $R_L = 2\ \Omega$, la tension V_{CE} du transistor Q_1 est

$$V_{CE1} = V_{CC} - \left(R_L + \frac{\beta + 1}{\beta} R_E \right) I_{C1} = 12\text{V} - \left(2\Omega + \frac{81}{80} 4.7\Omega \right) 0.630\text{A} = 7.742\text{V}$$

La puissance dissipée dans le transistor Q_1 est $P_{DQ1} = V_{CE1} \times I_{C1} = 7.742\text{V} \times 0.630\text{A} = 4.88\text{W}$.

Problème no. 2 (25 points)

a) Analyse DC



Les courants I_{E1} et I_{E2} sont: $I_{E1} = I_{E2} = \frac{I_{C3}}{2} = \frac{2.078 \text{ mA}}{2} = 1.039 \text{ mA}$

Les courants I_{C1} et I_{C2} sont: $I_{C1} = I_{C2} = \frac{\beta}{\beta + 1} I_{E1} = \frac{100}{101} \times 1.039 \text{ mA} = 1.029 \text{ mA}$

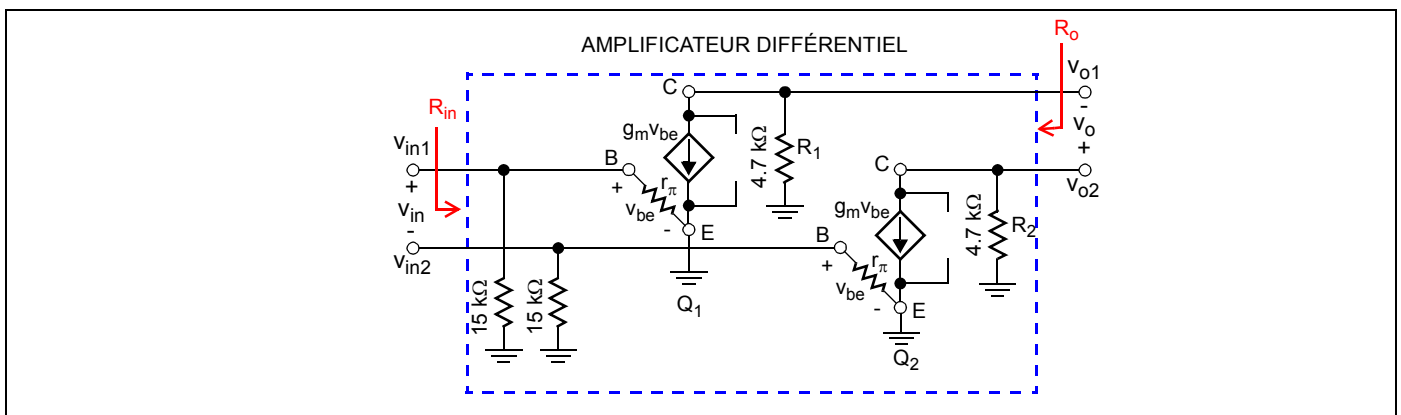
Les tensions V_{C1} et V_{C2} sont: $V_{C1} = V_{C2} = V_{CC} - R_1 I_{C1} = 10V - (4.7k\Omega \times 1.029 \text{ mA}) = 5.164 \text{ V}$

Les tensions V_{B1} et V_{B2} sont: $V_{B1} = V_{B2} = -15k\Omega \times \frac{1.029 \text{ mA}}{100} = -0.154 \text{ V}$

La tension V_{E2} est: $V_{E2} = V_{B2} - 0.7V = (-0.154V) - 0.7V = -0.854 \text{ V}$

b) La transconductance g_m des transistors Q_1 et Q_2 est: $g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1.029 \text{ mA}}{25 \text{ mV}} = 41.16 \text{ mS}$

Modèle petit signal de l'amplificateur:



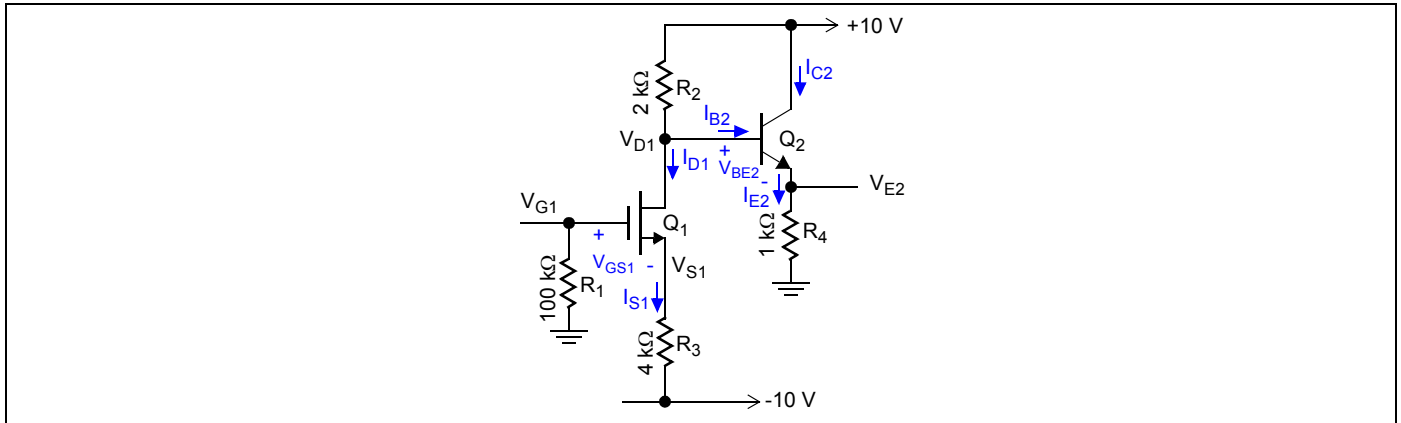
c) Gain différentiel en tension: $A_d = \frac{v_o}{v_{in}} = g_m R_2 = 41.16 \text{ mS} \times 4.7k\Omega = 193$

Résistance d'entrée: $R_{in} = 15k\Omega + 15k\Omega = 30k\Omega$

Résistance de sortie: $R_o = 4.7k\Omega + 4.7k\Omega = 9.4k\Omega$

Problème no. 3 (25 points)

a) Analyse DC



Caractéristique de transfert du MOSFET: $I_D = \frac{1}{2}k_n(V_{GS} - V_t)^2 = 0.002(V_{GS} - 1)^2$

Équation de l'entrée: $V_{GS} = 10V - 4k\Omega \times I_D$

En combinant ces deux équations, on obtient: $V_{GS} = 10V - 4k\Omega \times [0.002(V_{GS} - 1)^2]$

Ou bien: $V_{GS} = 10 - 8(V_{GS}^2 - 2V_{GS} + 1) = 10 - 8V_{GS}^2 + 16V_{GS} - 8$

On obtient l'équation suivante: $8V_{GS}^2 - 15V_{GS} - 2 = 0$

Une solution de cette équation est: $V_{GS} = 2V$

Le courant I_{D1} est donné par: $I_{D1} = 0.002(V_{GS} - 1)^2 = 2mA$

La tension V_{G1} est égale à $V_{G1} = 0V$

La tension V_{S1} est égale à $V_{S1} = -V_{GS1} = -2V$

La tension V_{D1} est égale à $V_{D1} = 10V - R_2 \times (I_{D1} + I_{B2})$

Le courant I_{B2} est donné par: $I_{B2} = \frac{V_{D1} - 0.7}{(\beta + 1)R_{E2}} = \frac{V_{D1} - 0.7}{101k\Omega}$

Remarque: On pourra négliger le courant I_{B2} .

L'équation de V_{D1} devient: $V_{D1} = 10V - 2k\Omega \times \left(2mA + \frac{V_{D1} - 0.7}{101k\Omega}\right) = 6V - 0.002(V_{D1} - 0.7)$

On déduit: $V_{D1} = \frac{6V + 0.014V}{1.002} = 6.002V$

La tension V_{E2} est égale à: $V_{E2} = V_{D1} - 0.7 = 6.002 - 0.7 = 5.302V$

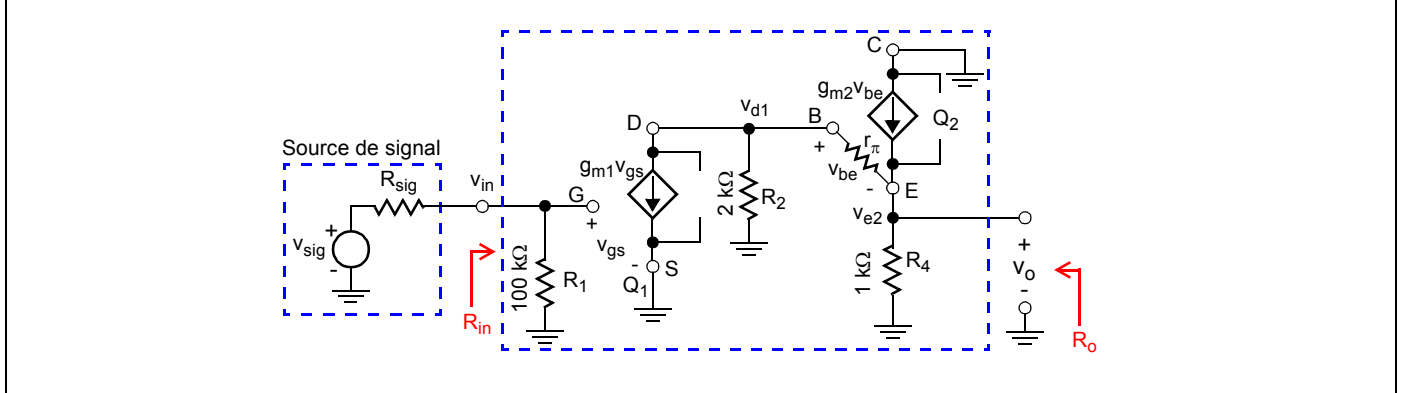
Le courant I_{E2} est égal à: $I_{E2} = \frac{V_{D1} - 0.7}{R_{E2}} = \frac{6.002 - 0.7}{1k\Omega} = 5.302mA$

Le courant I_{C2} est égal à: $I_{C2} = \frac{\beta}{\beta + 1}I_{E2} = \frac{100}{101} \times 5.302mA = 5.25mA$

b) La transconductance du MOSFET Q_1 est: $g_{m1} = \frac{I_D}{0.5V_{ov}} = \frac{2mA}{0.5V} = 4mS$

La transconductance du transistor bipolaire Q_2 est: $g_{m2} = \frac{I_C}{V_T} = \frac{5.25mA}{25mV} = 0.21S$

Modèle petit-signal de l'amplificateur:



Gain en tension sans charge: $A_{vo} = \frac{v_o}{v_{in}} = \frac{v_o}{v_{d1}} \times \frac{v_{d1}}{v_{in}}$

Le 2e étage est un montage collecteur commun. Son gain en tension est égal à 1:

$$\frac{v_o}{v_{d1}} = 1$$

Le 1er étage est un montage source commune. Son gain en tension est donné par:

$$\frac{v_{d1}}{v_{in}} = -g_{m1}R_2 = -4mS \times 2k\Omega = -8$$

Alors: $A_{vo} = 1 \times (-8) = -8$

La résistance d'entrée: $R_{in} = 100k\Omega$

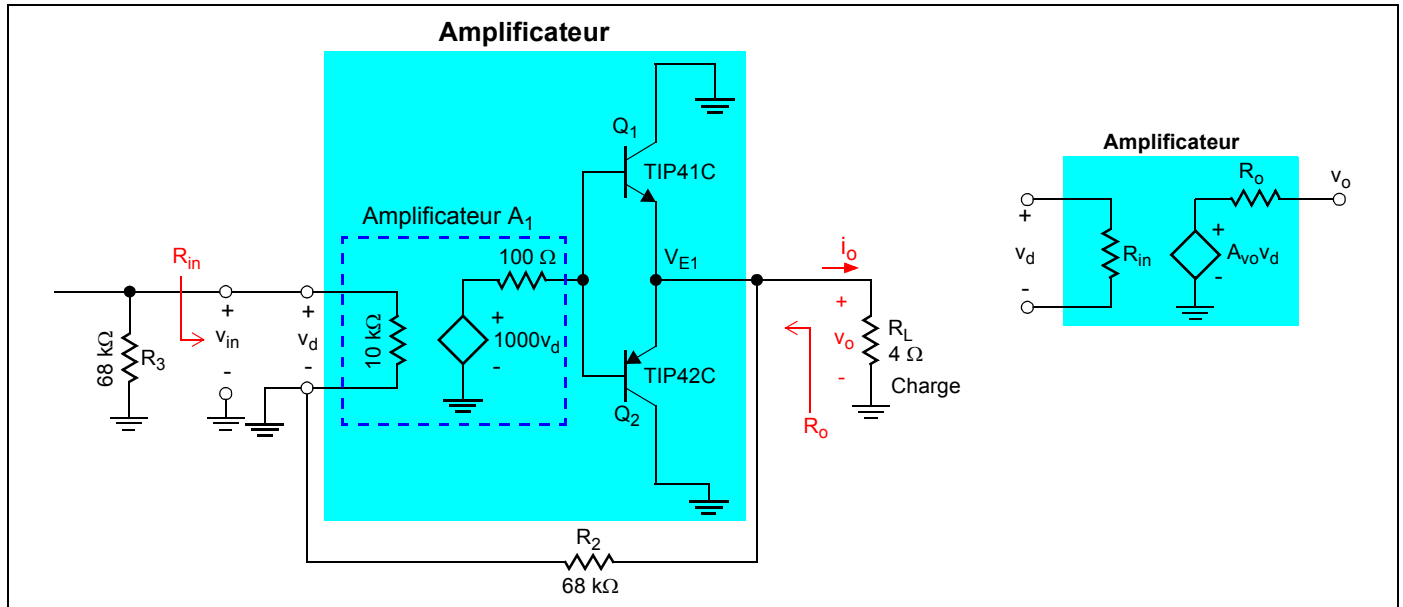
La résistance de sortie: $R_o = R_4 \parallel \left(r_{e2} + \frac{R_2}{\beta + 1} \right)$

On a: $\beta = 100$ et $r_{e2} = \frac{V_T}{I_{E2}} = \frac{25mV}{5.302mA} = 4.72\Omega$

Alors: $R_o = 1k\Omega \parallel \left(4.72\Omega + \frac{2k\Omega}{101} \right) = 1k\Omega \parallel 24.52\Omega = 23.9\Omega$

Problème no. 4 (25 points)

a) Amplificateur sans rétroaction



L'étage de sortie (classe B) a un gain en tension égal à 1.

Le gain en tension avec charge de l'amplificateur A_1 est donné par:

$$A_{v1} = \frac{(60 \times 4\Omega)}{(60 \times 4\Omega) + 100\Omega} \times 1000 = 706$$

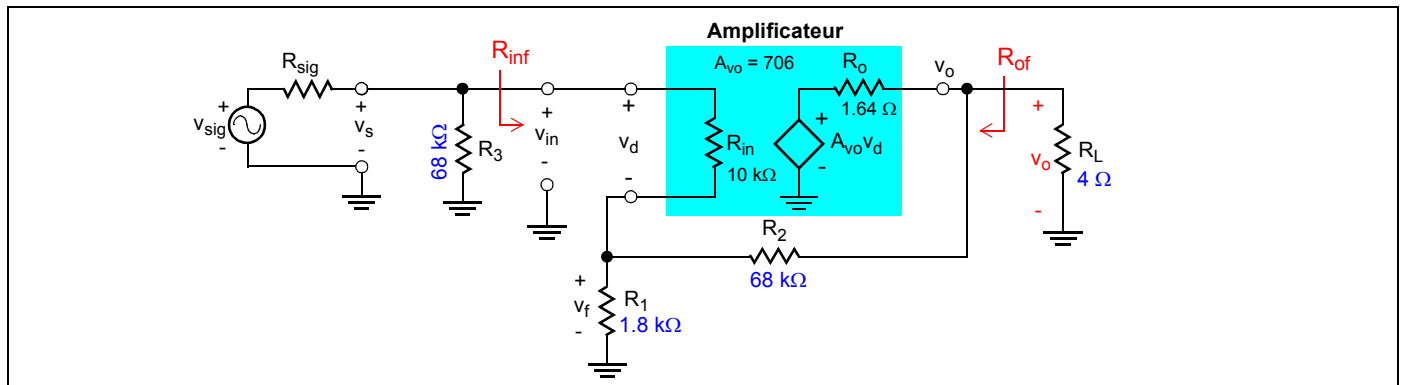
Le gain en tension sans charge global est égal à: $A_{vo} = 706 \times 1 = 706$

La résistance d'entrée est $R_{in} = 10k\Omega$

La résistance de sortie est $R_o = r_e + \frac{100\Omega}{\beta + 1} \approx \frac{100\Omega}{\beta + 1} = \frac{100\Omega}{61} = 1.64\Omega$

La résistance d'émetteur r_e est très faible par rapport à $\frac{100\Omega}{\beta + 1}$ (pour un courant I_E moyen de 1 A, r_e est égale à 25 mΩ)

b) Amplificateur avec rétroaction



Le facteur de rétroaction β est $\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1.8k\Omega}{1.8k\Omega + 68k\Omega} = 0.02579$

Le gain en tension (sans charge) avec rétroaction est $A_{vof} = \frac{A_{vo}}{1 + \beta A_{vo}} = \frac{706}{1 + (0.02579 \times 706)} = 36.8$

La résistance d'entrée avec rétroaction est

$$R_{inf} = R_{in}(1 + \beta A_{vo}) = 10k\Omega[1 + (0.02579 \times 706)] = 192k\Omega$$

La résistance de sortie avec rétroaction est $R_{of} = \frac{R_o}{1 + \beta A_{vo}} = \frac{1.64\Omega}{1 + (0.02579 \times 706)} = 0.085\Omega$

c)

La puissance à la charge est $P_o = \frac{V_m^2}{R_L} = \frac{V_m^2}{4\Omega} = 20W$

On déduit: $V_m = 12.65V$

L'amplitude du courant de sortie est $I_m = \frac{V_m}{R_L} = \frac{12.65V}{4\Omega} = 3.16A$

La puissance fournie par la source +15 V est $P_{dcpos} = V_{dc} \times \frac{I_m}{\pi} = 15V \times \frac{3.16A}{\pi} = 15.09W$

La puissance fournie par la source -15 V est $P_{dcneg} = V_{dc} \times \frac{I_m}{\pi} = 15V \times \frac{3.16A}{\pi} = 15.09W$

La puissance totale fournie par les sources est $P_{dc} = P_{dcpos} + P_{dcneg} = 15.09W + 15.09W = 30.18W$

La puissance totale dissipée dans Q1 et Q2 est $P_d = P_{dc} - P_o = 30.18W - 20W = 10.18W$