

Chapitre 3

Etages de sortie

3.1. Rôle et propriétés

3.1. Rôle et propriétés

- fournir de la puissance dans la charge selon les conditions du rendement énergétique le plus élevé et de la puissance dissipée par les transistors les plus faibles
- basse impédance de sortie
- excursion de tension maximale permise par V_{CC}
- éviter d'introduire de la distorsion
- réduire les risques d'instabilité

Classe A:

- distorsion très faible
- rendement aussi faible

Classe B:

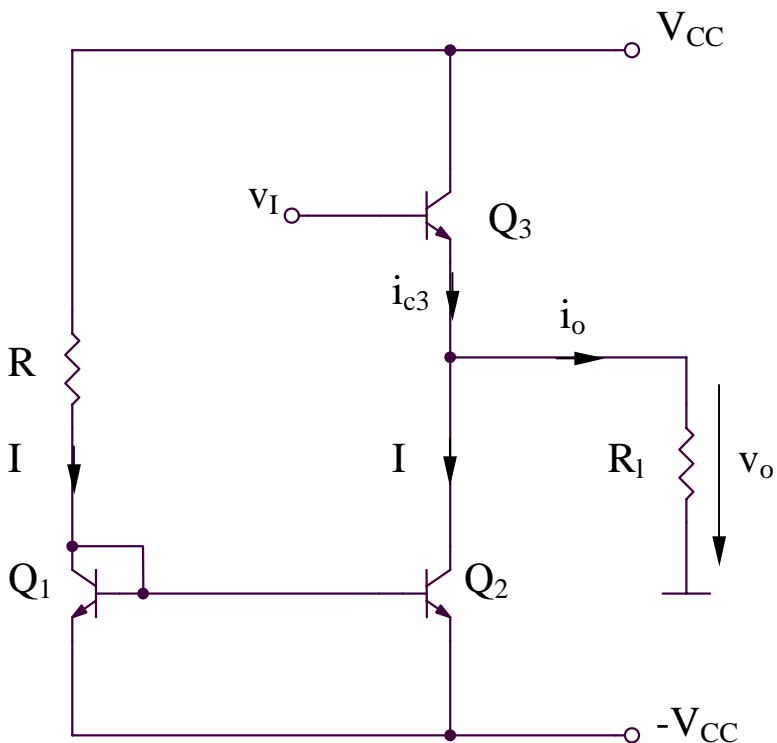
- distorsion important
- rendement plus élevé

Class AB:

- distortion faible
- rendement élevé

3.2. Etage amplificateur de sortie en classe A, montage collecteur commun

3.2. Etage amplificateur de sortie en classe A, montage collecteur commun



En repos:

$$v_O = 0; i_O = 0$$

$$I_{C3} = I; V_{CE3} = V_{CC}$$

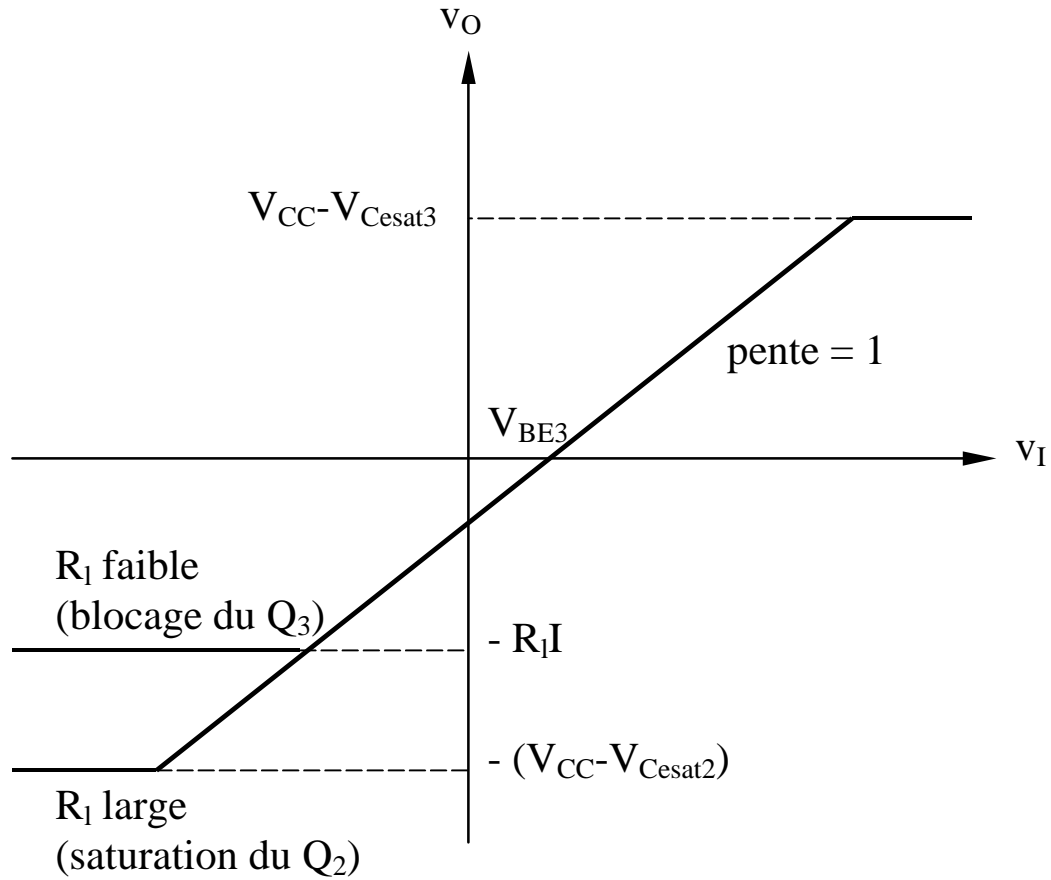
$$V_I = V_{BE3} = V_{th} \ln\left(\frac{I}{I_S}\right)$$

Caractéristique de transfert $v_O = f(v_I)$

$$\left. \begin{aligned} v_I &= v_{BE3} + v_O \\ v_{BE3} &= V_{th} \ln\left(\frac{i_{c3}}{I_S}\right) \\ i_{c3} &= I + \frac{v_O}{R_L} \end{aligned} \right\} \Rightarrow v_I = v_O + V_{th} \ln\left(\frac{I + \frac{v_O}{R_L}}{I_S}\right)$$

Avec $\frac{v_O}{R_L} \ll I$, $V_{th} \ln\left(\frac{I}{I_S}\right) = V_{BE3}$, l'expression de la caractéristique de transfert

devient par conséquent, $v_I = v_O + v_{BE3}$, donc linéaire.



$$i_{C3} = I + \frac{v_O}{R_l}$$

$$i_{C3} = 0 \Rightarrow v_{CE3} = V_{CC} + IR_l$$

$$i_{C3} = I + \frac{V_{CC} - v_{CE3}}{R_l}$$

La valeur maximale positive du signal de sortie est:

$$V_{OM} = V_{CC} - V_{CEsat3}$$

La valeur maximale négative du signal de sortie dépend de la valeur de R_1 :

- pour R_1 large, l'accroissement négatif de tension est limité par la saturation de Q_2

$$V_{OM}^- = V_{CC} - V_{CEsat2}$$

$$I_{OM}^- < I$$

- pour R_1 faible l'accroissement négatif de tension est limité par le blocage de Q_3

$$V_{OM}^- = IR_1 < V_{CC} - V_{CEsat2}$$

$$I_{OM}^- = I$$

Relations énergétiques fondamentales

On convient de noter:

$$\hat{V}_O = KV_{CC}$$

où K est le facteur d'utilisation de la tension d'alimentation, $0 \leq K < 1$. Alors:

$$\hat{I}_O = \frac{\hat{V}_O}{R_l} = \frac{KV_{CC}}{R_l} = KI$$

La puissance dissipée sur le transistor Q_3 est:

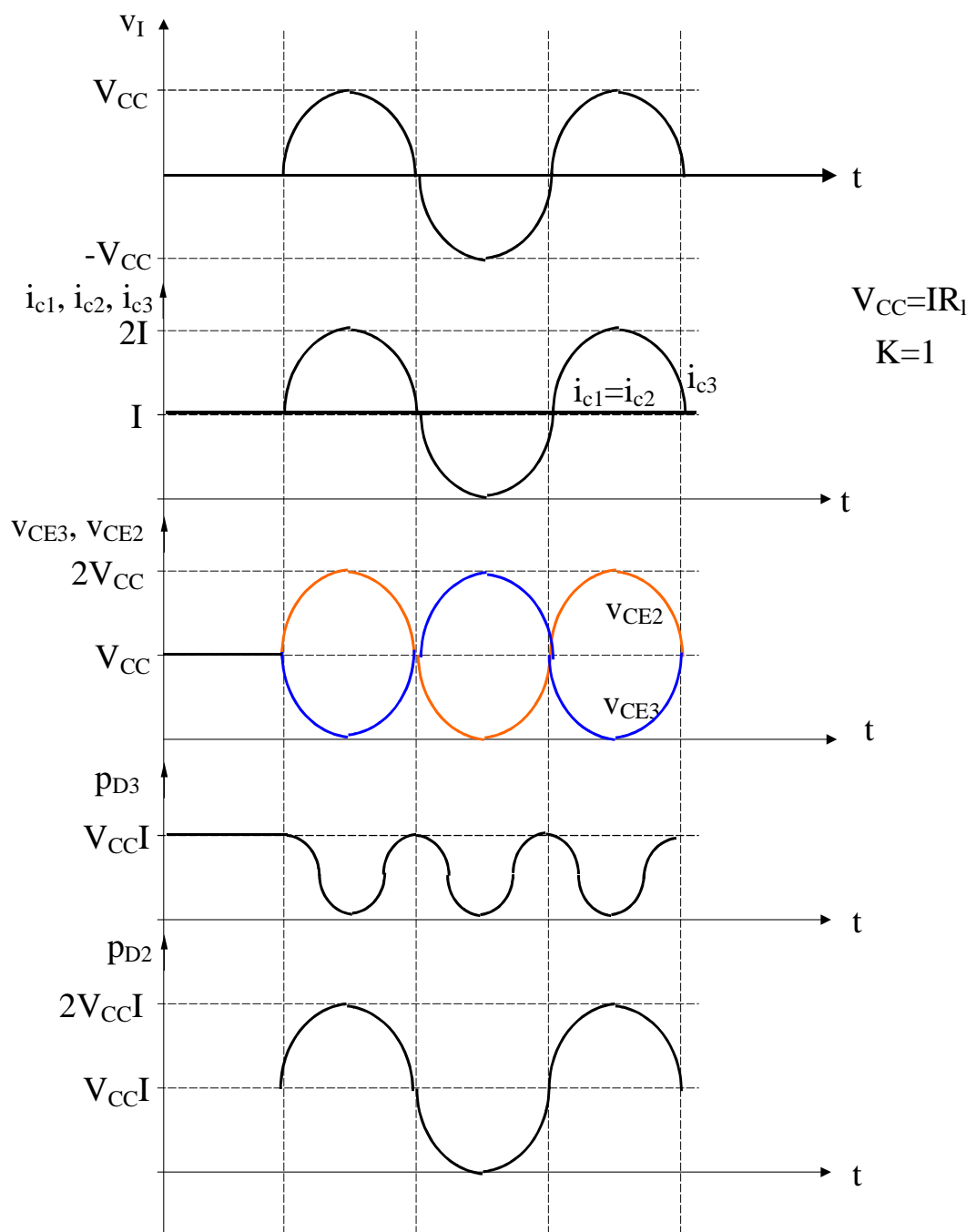
$$p_{D3} = v_{CE3}i_{C3} = \left(V_{CC} - \hat{V}_O \sin \omega t \right) \left(I + I_O \sin \omega t \right)$$

$$p_{D3} = V_{CC}I(1 - K \sin \omega t)(1 + K \sin \omega t)$$

$$p_{D3} = V_{CC}I(1 - K^2 \sin^2 \omega t) = V_{CC}I \left(1 - \frac{K^2}{2} + \frac{K^2}{2} \cos 2\omega t \right)$$

Donc, la puissance moyenne est:

$$P_{D3} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p_{D3} d\omega t = V_{CC}I \left(1 - \frac{K^2}{2} \right)$$



La puissance dissipée sur le transistor Q_2 est:

$$P_{D2} = i_{C2} v_{CE2} = I \left(V_{CC} + \hat{V}_O \sin \omega t \right) = I V_{CC} (1 + K \sin \omega t)$$

Donc, la puissance moyenne est:

$$P_{D2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p_{D2} d\omega t = V_{CC} I$$

La puissance absorbée peut être écrit:

$$p_A = V_{CC} i_{C3} + V_{CC} i_{C2} = V_{CC} (2I + KI \sin \omega t)$$

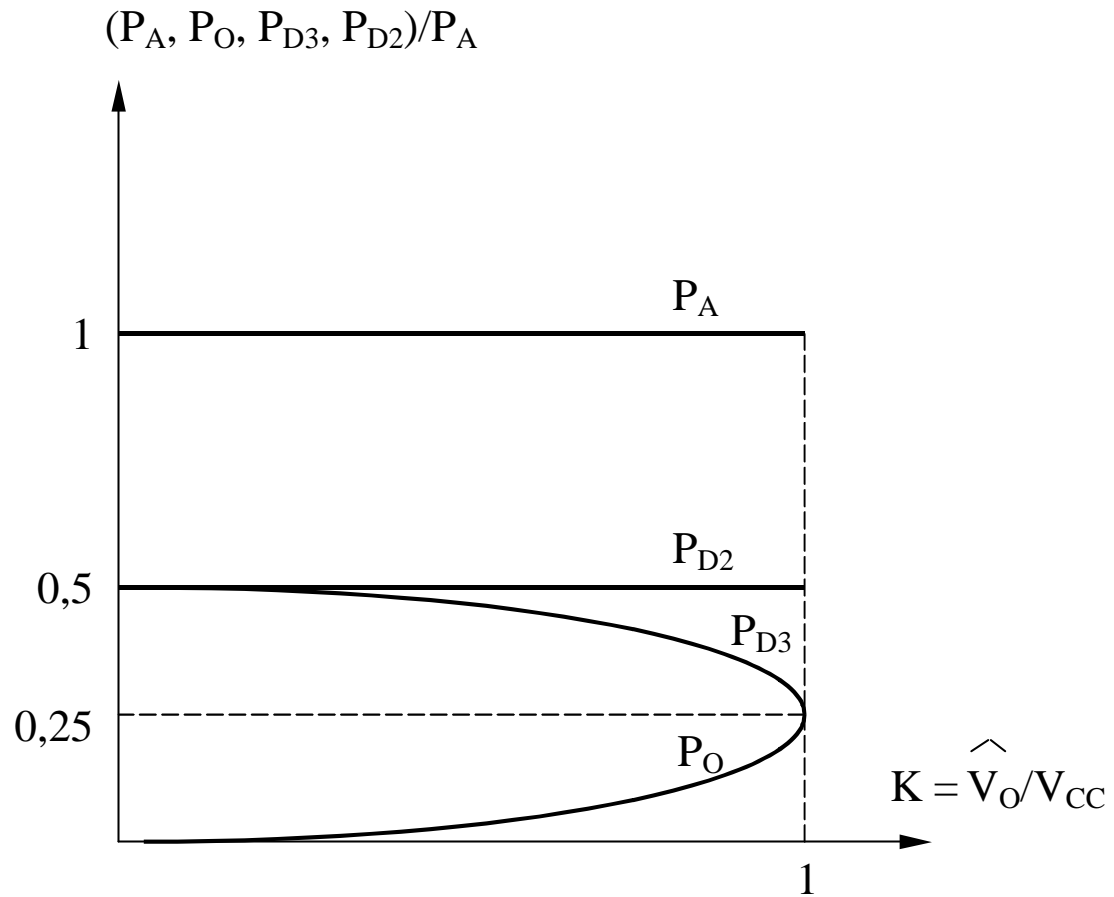
$$P_A = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p_A d\omega t = 2V_{CC} I$$

La puissance moyenne de sortie:

$$P_O = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p_O d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (KV_{CC} \sin \omega t)(KI \sin \omega t) d\omega t = \frac{K^2 V_{CC} I}{2}$$

$$\eta_A = \frac{P_O}{P_A} = 25\% K^2$$

donc a une valeur maximale de 25%.

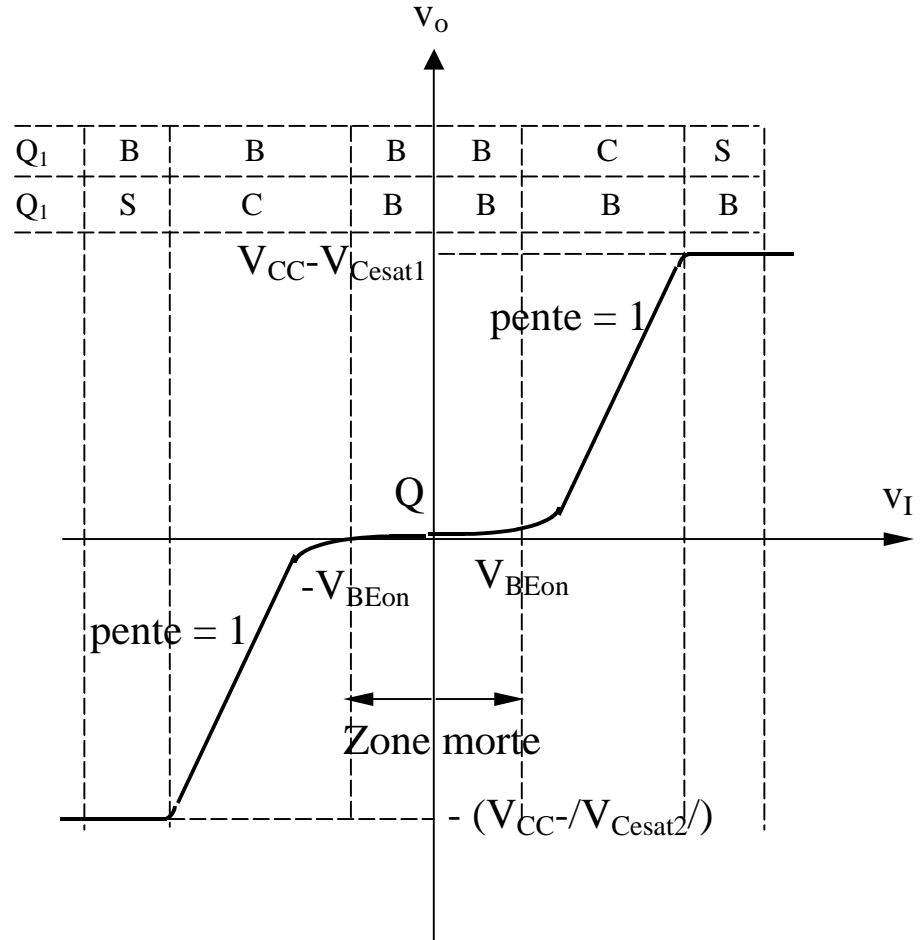
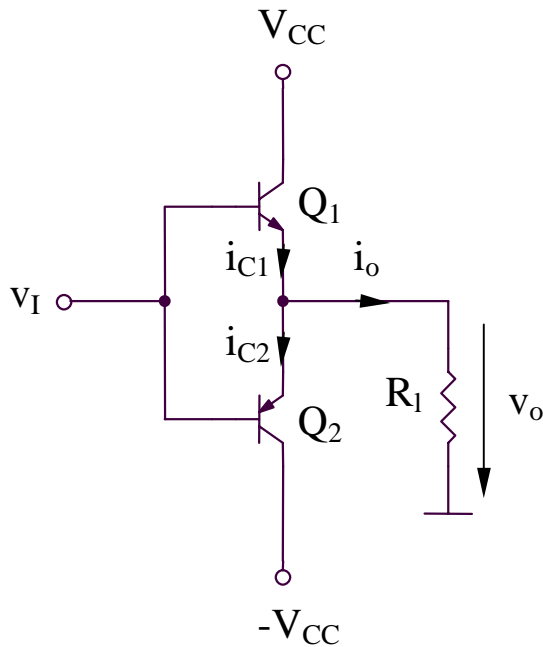


$$P_{D2} = P_{D3} + P_O$$

$$P_A = P_{D2} + P_{D3} + P_O = 2P_{D2}$$

3.3. Etage amplificateur de sortie en classe B élémentaire

3.3. Etage amplificateur de sortie en classe B élémentaire

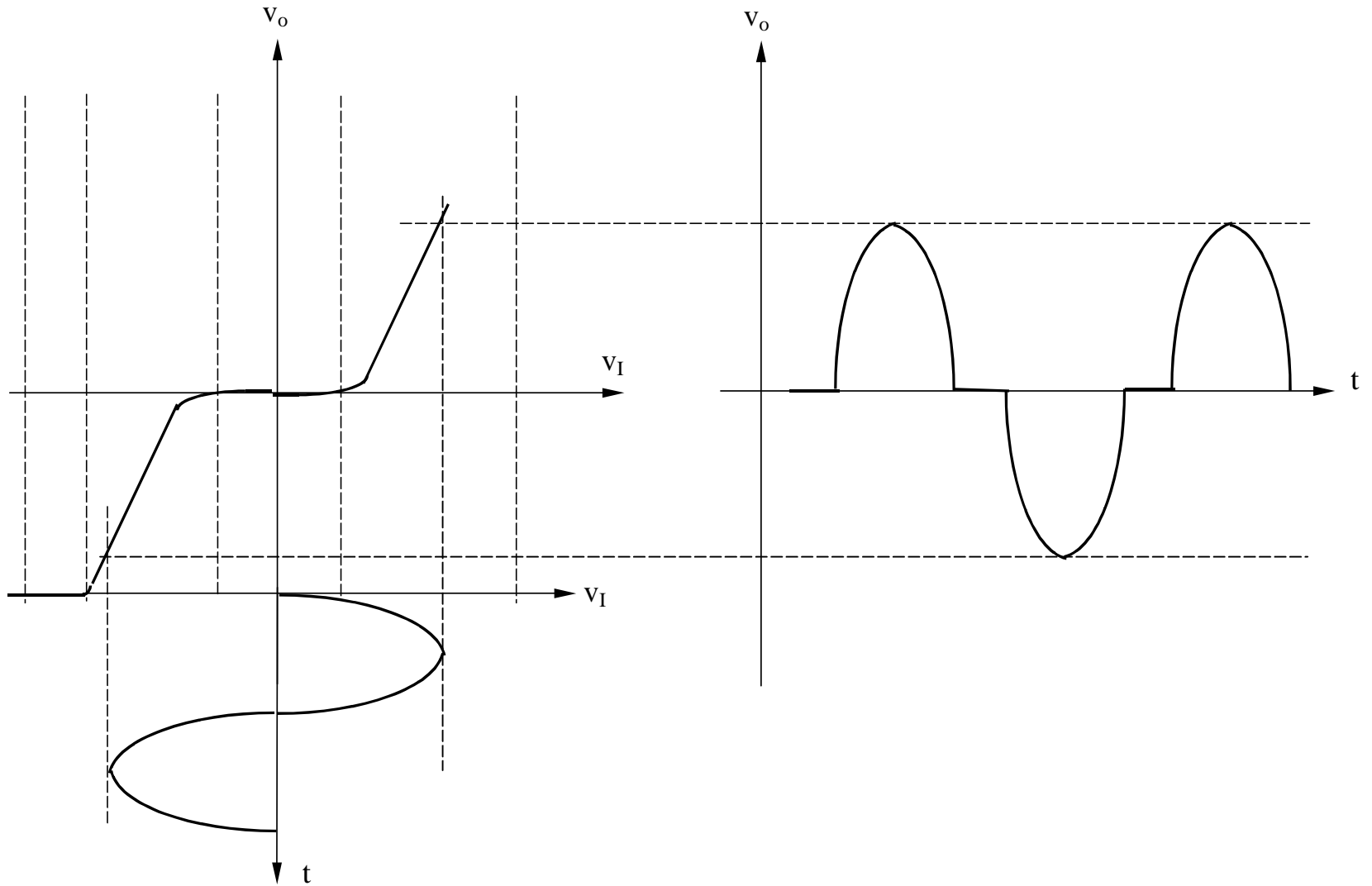


En repos:

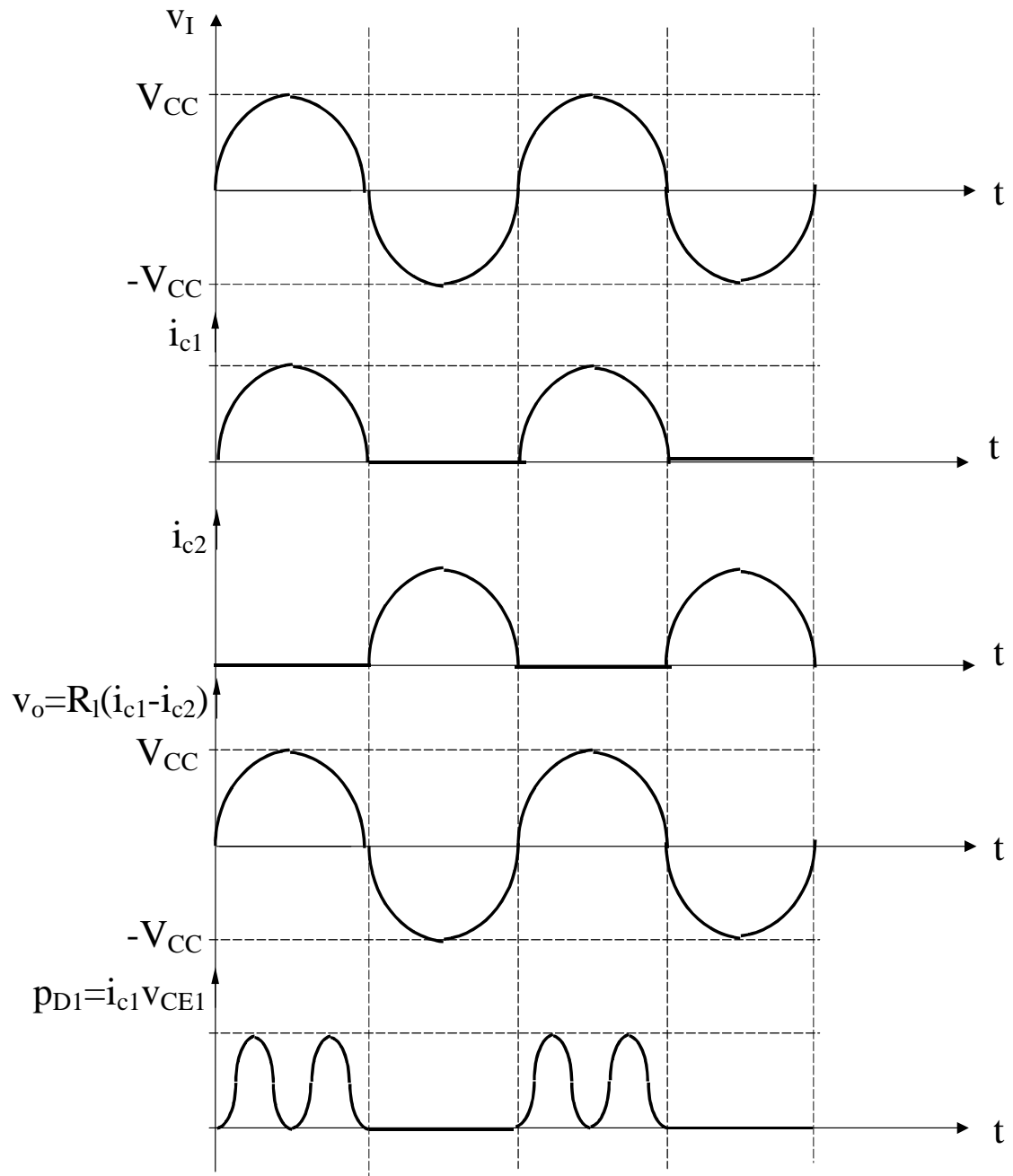
$$v_O = 0; i_O = 0; i_{c1} = i_{c2} = I; v_{BE1} + v_{EB2} = 0$$

Si:

$$Q_1 \equiv Q_2; I_{S1} = I_{S2} = I_S \Rightarrow 2V_{th} \ln\left(\frac{I}{I_S} + 1\right) = 0 \Rightarrow I = 0 \Rightarrow i_{c1} = i_{c2} = 0$$



Caractéristique de transfert



Inconvénient d'un étage push-pull class B

- zone morte (distortion)
- nécessite PNP (encombrant, peu performant)

Remèdes

- evolution vers classe AB
- solution "tout NPN"

Relations énergétiques fondamentales

On convient de noter:

$$\hat{V}_O = KV_{CC}$$

où K est un facteur d'utilisation de la tension d'alimentation, $0 \leq K < 1$.

La puissance moyenne de sortie P_O est:

$$P_O = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p_O d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (KV_{CC} \sin \omega t) \left(K \frac{V_{CC}}{R_l} \sin \omega t \right) d\omega t = \frac{K^2 V_{CC}^2}{2R_l}$$

On note avec P_A la puissance fournie total, par les deux sources d'alimentation:

$$P_A = 2V_{CC}I_{CC}$$

où la composante continue I_{CC} est:

$$I_{CC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_C \sin \omega t d\omega t = \frac{1}{\pi} \hat{I}_C = \frac{1}{\pi} \frac{\hat{V}_O}{R_l} = \frac{KV_{CC}}{\pi R_l}$$

donc:

$$P_A = K \frac{2V_{CC}^2}{\pi R_l}$$

La puissance dissipée moyenne P_D par une paire de transistors en classe B est:

$$P_D = P_A - P_O = \frac{V_{CC}^2}{2R_l} \left(\frac{4K}{\pi} - K^2 \right)$$

L'expression ci-dessus représente l'équation d'une parabole en K , dont le maximum s'obtient en annulant la dérivée de l'expression comprise entre parenthèses:

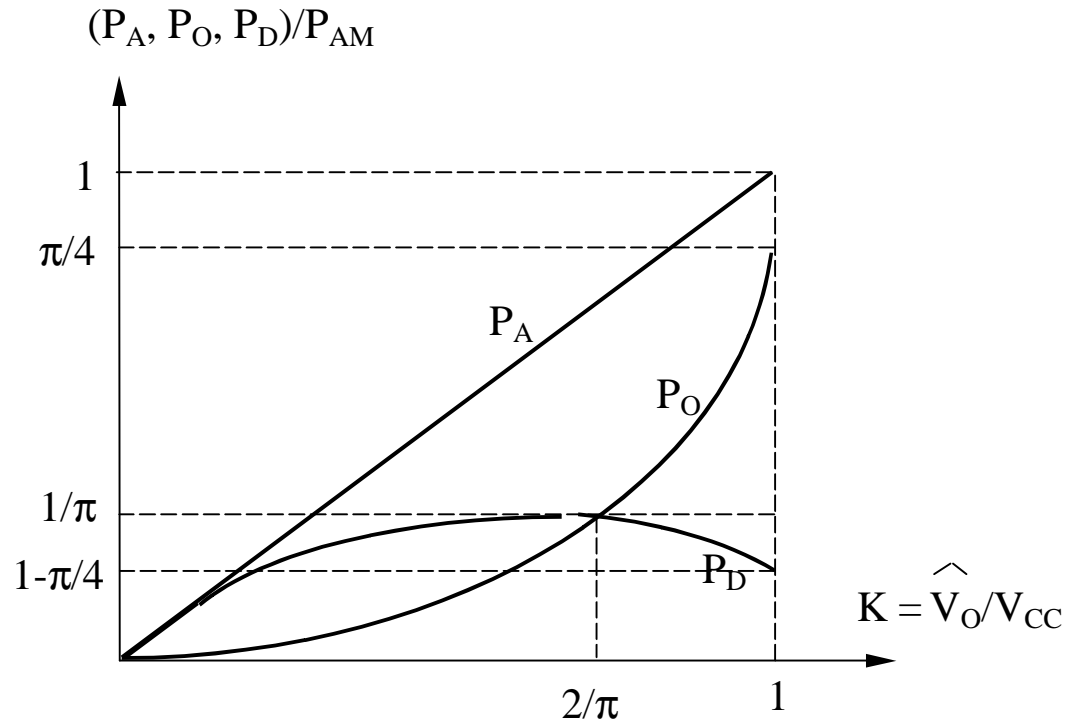
$$\frac{4}{\pi} - 2K = 0 \Rightarrow K = \frac{2}{\pi}$$

Pour cette valeur de K on obtient la puissance dissipée moyenne maximale par l'ensemble des deux transistors:

$$P_{DM} = \frac{2}{\pi^2} \frac{V_{CC}^2}{R_l} = \frac{4}{\pi^2} \frac{V_{CC}^2}{2R_l} = \frac{4}{\pi^2} P_{OM} \qquad P_{OM} = \frac{V_{CC}^2}{2R_l}$$

Sur les graphiques suivants on a représenté les diverses puissances normalisées en fonction de K:

$$\frac{P_A}{P_{AM}} = K; \quad \frac{P_O}{P_{AM}} = \frac{\pi K^2}{4}; \quad \frac{P_D}{P_{AM}} = K \left(1 - \frac{K\pi}{4} \right)$$



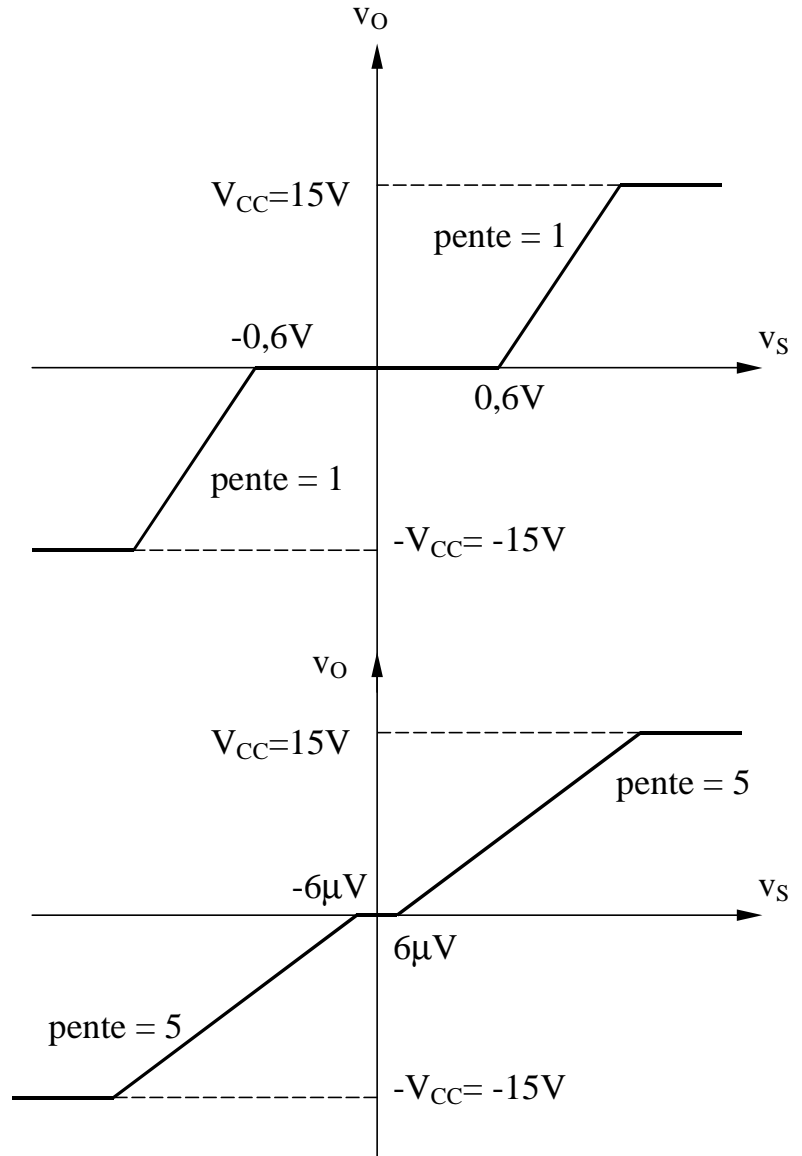
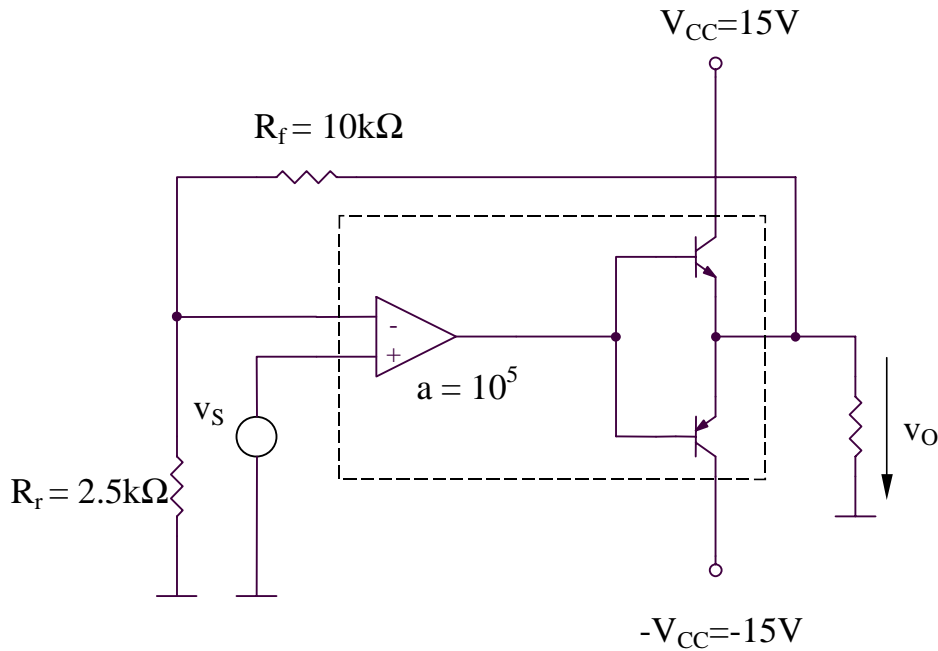
Le rendement dépend de l'amplitude du signal de sortie selon la relation:

$$\eta = \frac{P_O}{P_A} = K \frac{\pi}{4}$$

Son maximum est obtenu pour $K=1$ et il est $\pi/4$ (78.5%).

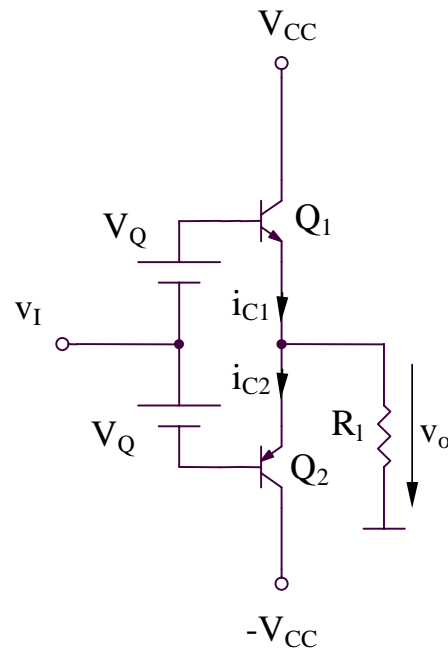
3.4. La réduction de non-linéarité d'une classe B étage **due à la réaction négative**

3.4. La réduction de non-linéarité d'une classe B étage due à la réaction négative



3.5. Etage amplificateur de sortie en classe AB

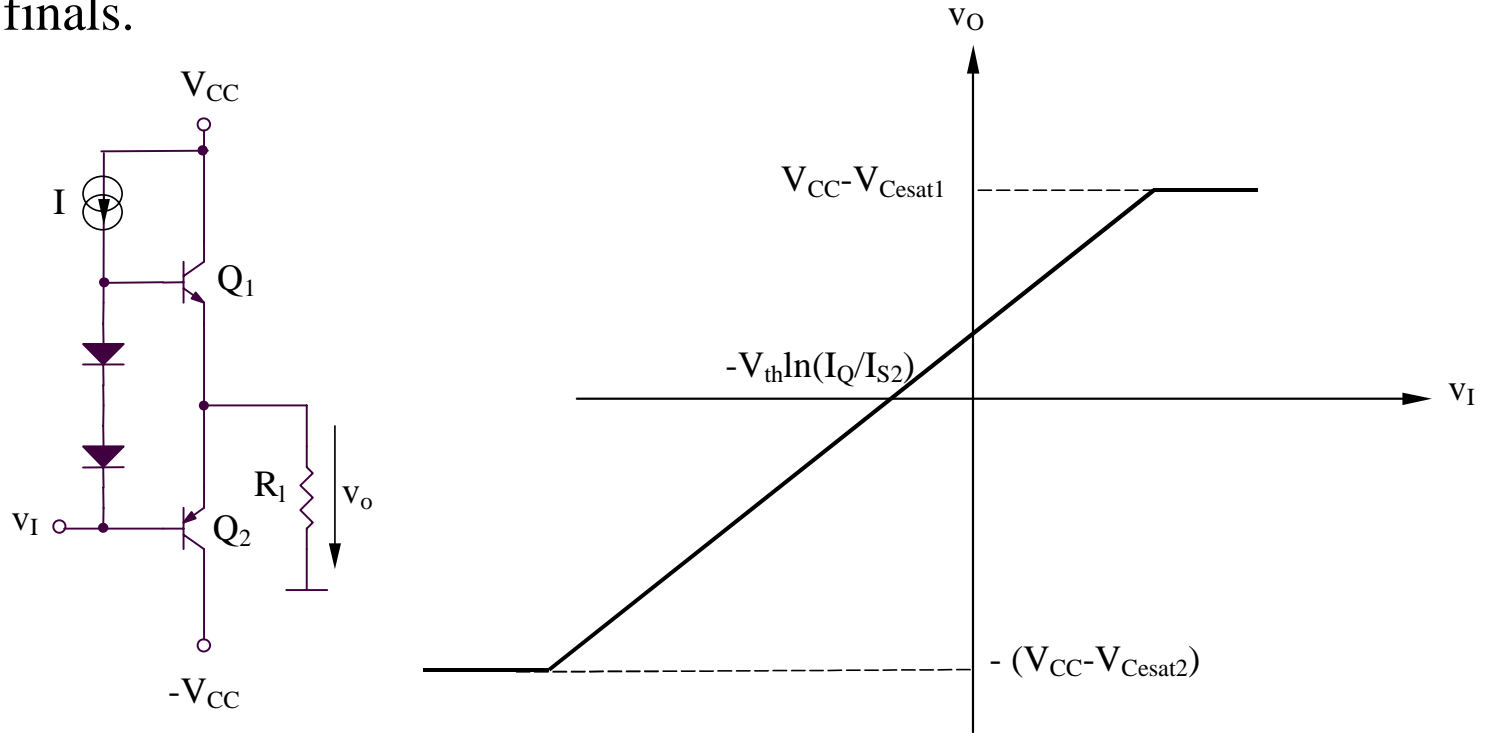
3.5. Etage amplificateur de sortie en classe AB



- Pour obtenir une bonne linéarité de la caractéristique de transfert globale on doit:
- apparier les deux transistors fonctionnant en push-pull
 - choisir judicieusement la tension de polarisation en repos
 - corriger automatiquement la tension de polarisation V_{BE} en fonction de variations de la température pour prévenir l'emballement thermique

Circuit pour éviter l'emballement thermique (1)

La tension de polarisation de l'étage final doit être une tension de jonction qui varie en fonction de la température, comme la tension des jonctions BE des transistors finals.



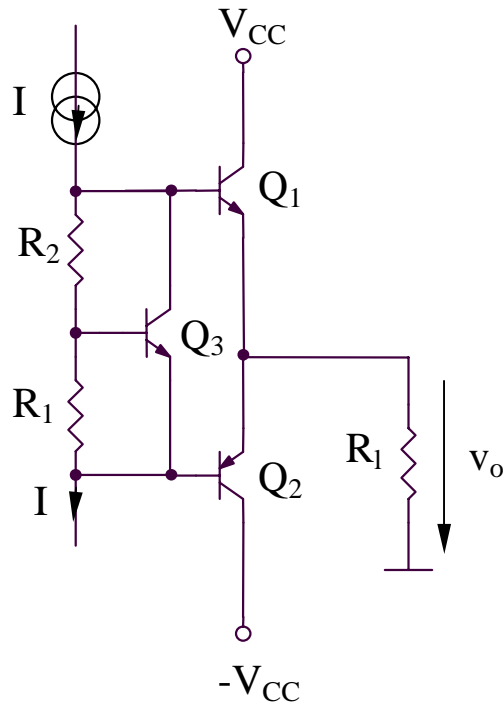
Pour que le système de polarisation soit efficace, il faut que les diodes de polarisation soient à la même température que les transistors du push-pull.

En repos:

$$v_o = 0 \Rightarrow I_{QC1} = I_{QC2} = I_Q$$

$$V_{BE1} + V_{EB2} = 2V_D \Rightarrow V_{th} \ln\left(\frac{I_Q}{I_{S1}} \frac{I_Q}{I_{S2}}\right) = 2V_{th} \ln\left(\frac{I}{I_{SD}}\right) \Rightarrow I_Q = I \frac{\sqrt{I_{S1} I_{S2}}}{I_{SD}}$$

Circuit pour éviter l'emballement thermique (2)

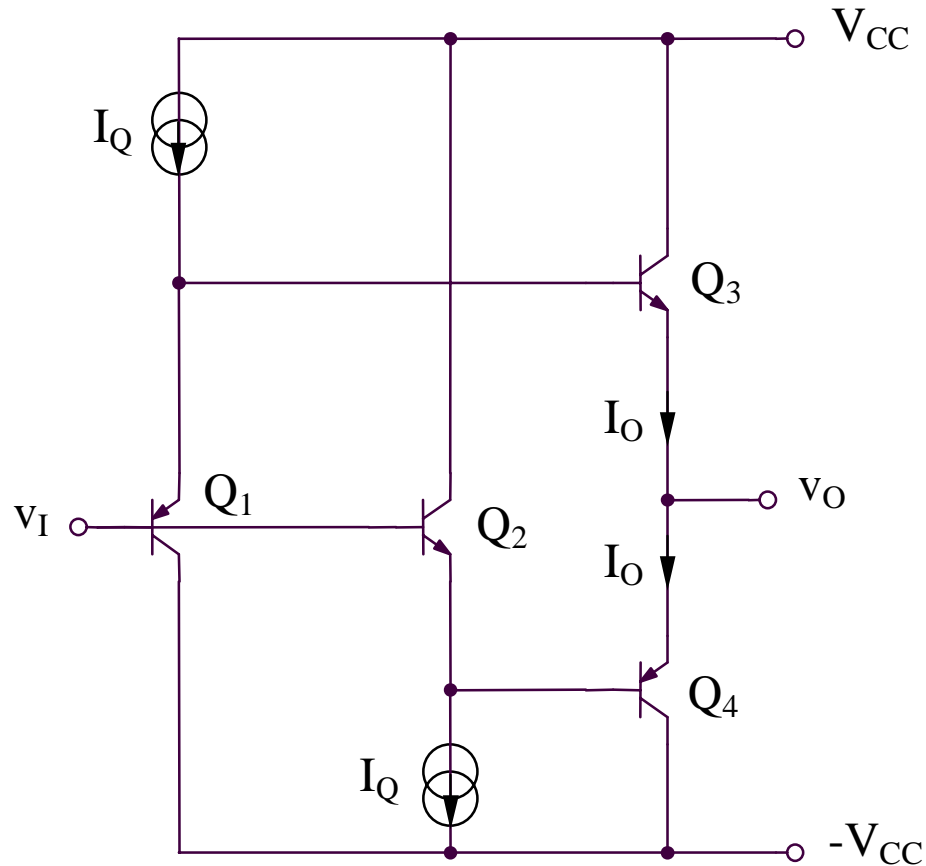


$$\left. \begin{aligned} v_{BE1} + v_{EB2} &= v_{CE3} \\ v_{CE3} &= \frac{v_{BE3}}{R_1} (R_1 + R_2) \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{th} \left(\ln \frac{I_Q}{I_{S1}} + \ln \frac{I_Q}{I_{S2}} \right) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{th} \ln \frac{I}{I_{S3}}$$

$$\Rightarrow I_Q = \sqrt{I_{S1} I_{S2} \left(\frac{I}{I_{S3}} \right)^{1 + \frac{R_2}{R_1}}}$$

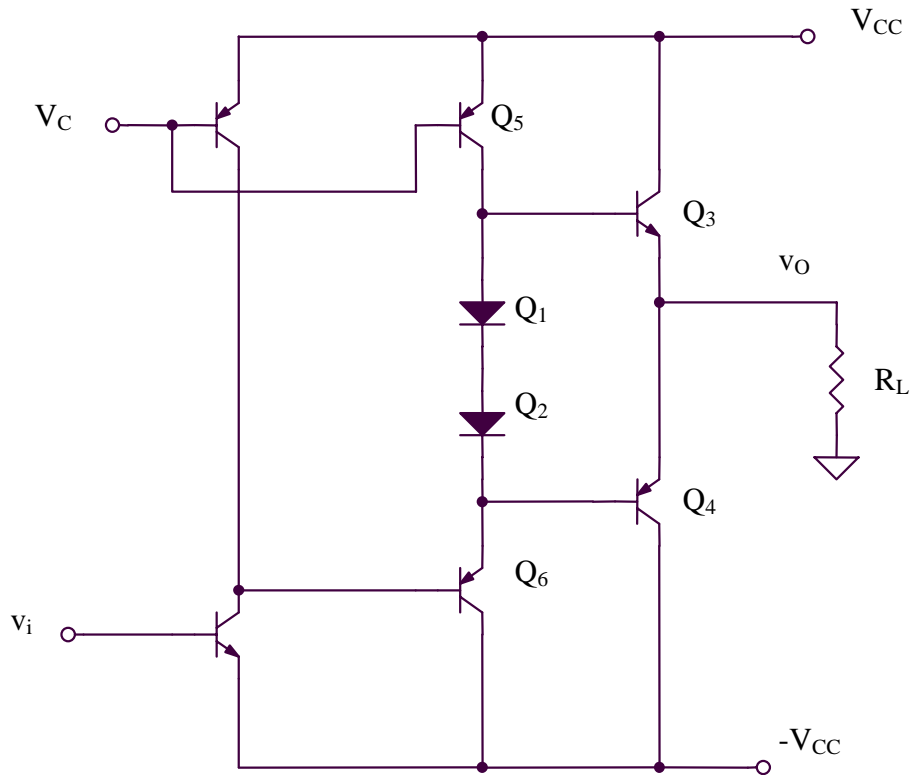
Circuit pour éviter l'emballement thermique (3)



$$|V_{BE1}| + V_{BE2} = V_{BE3} + |V_{BE4}|$$

$$2V_{th} \ln \frac{I_Q}{I_S} = 2V_{th} \ln \frac{I_O}{I_S} \Rightarrow I_O = I_Q$$

Circuit pour éviter l'emballement thermique (4)



$$V_{BE1} + V_{BE2} = V_{BE3} + V_{EB4}$$

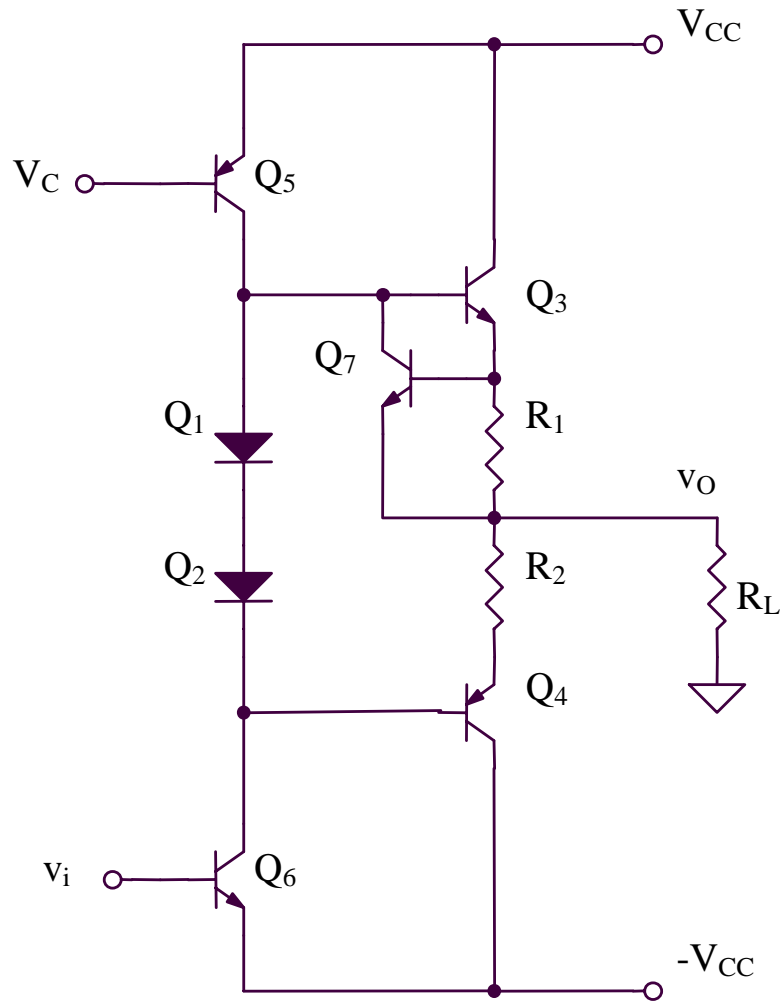
$$V_{th} \ln \frac{I_{C1}}{I_{S1}} + V_{th} \ln \frac{I_{C2}}{I_{S2}} = V_{th} \ln \frac{I_{C3}}{I_{S3}} + V_{th} \ln \frac{I_{C4}}{I_{S4}}$$

$$\Rightarrow I_{C3} = I_{C4} = I_{C1} \sqrt{\frac{I_{S3} I_{S4}}{I_{S1} I_{S2}}}$$

$$V_{O_{max}}^+ = V_{CC} - V_{EC5_{sat}} - V_{BE3}$$

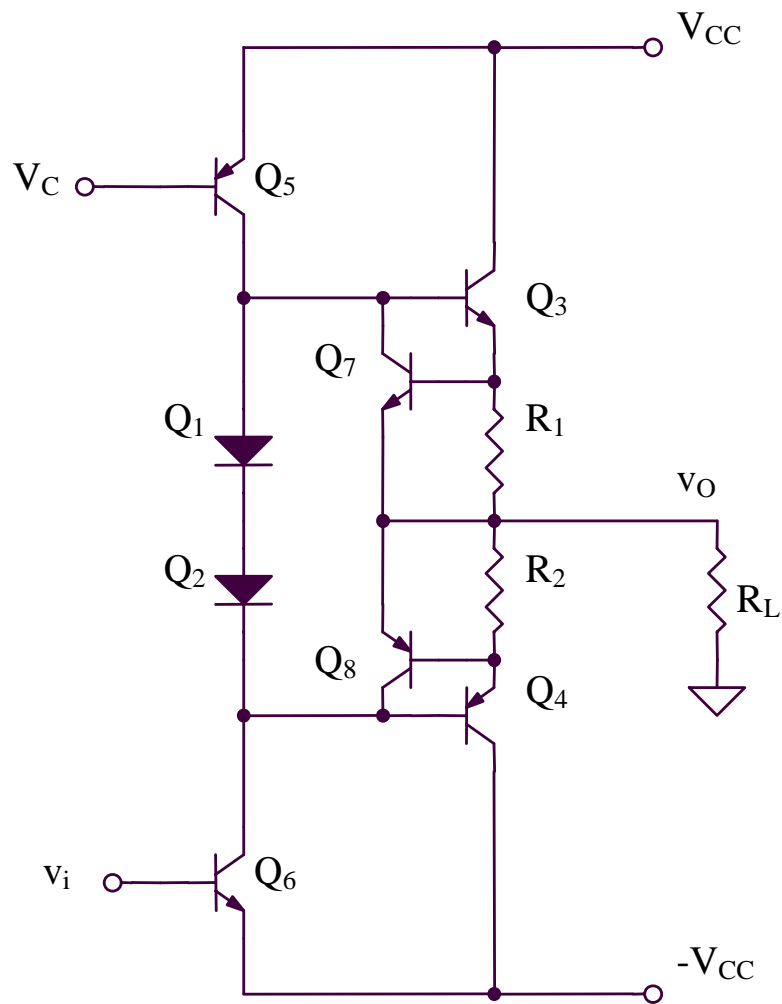
$$V_{O_{max}}^- = -V_{CC} + V_{EC6_{sat}} - V_{BE4}$$

Circuit avec la protection de surcharge (1)



$$I_{Omax}^+ = \frac{V_{BE7}}{R_1}$$

Circuit avec la protection de surcharge (2)



$$I_{Omax}^+ = \frac{V_{BE7}}{R_1}$$

$$I_{Omax}^- = \frac{V_{EB8}}{R_2}$$