

Chapitre 5

L'amplificateur opérationnel.

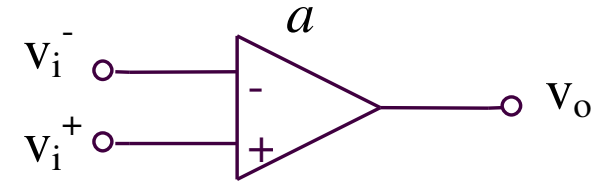
Applications

5.1. Introduction

5.1. Introduction

C'est un amplificateur à:

- gain en tension élevée (idéal ∞)
- haute impédance d'entrée (idéal ∞)
- basse impédance de sortie (idéal 0)
- entrées différentielles et sortie unique



$$v_O = a(v_i^+ - v_i^-)$$

Parametres

- le gain en tension
- le tension de décalage d'entrée (tension continue est appliqué entre les entrées pour obtenir une tension de sortie nulle)
- le courant de décalage d'entrée (différence entre les courants continus des deux entrées nécessaires pour annuler la tension de sortie)

Ordre de grandeur

$$a_{v0} > 10^5$$

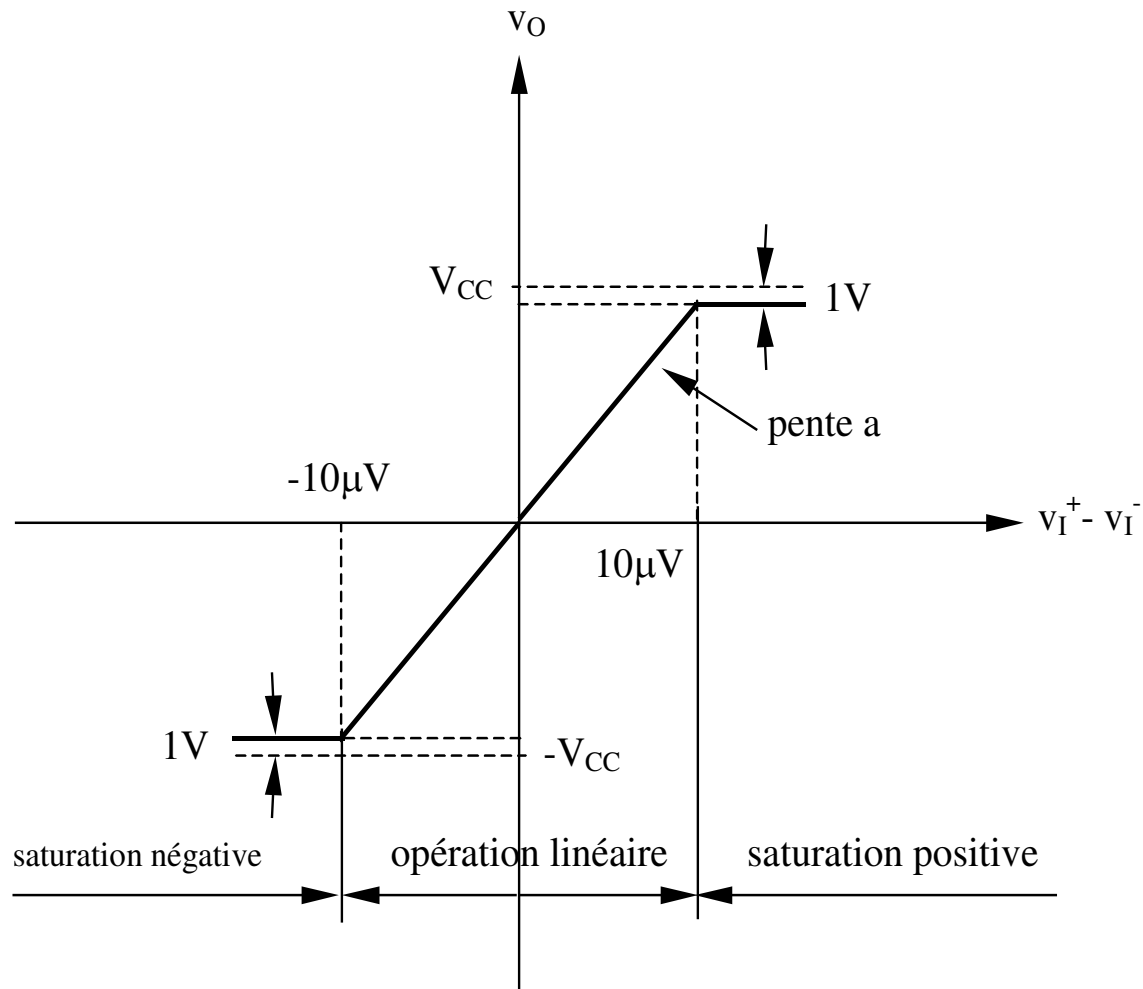
$$v_{IO} = 2\text{mV}$$

$$I_{IO} = 5\text{nA}$$

Parametres

Ordre de grandeur

- le courant de polarisation d'entrée (la valeur moyenne des courants continus des deux entrées nécessaires pour annuler la tension de sortie) $I_I = 80 \text{ nA}$
- l'impédance d'entrée $R_i = 2 \text{ M}\Omega$
- plage de tension d'entrée en mode commun $V_{CC} - 2 \text{ V}$
- l'excursion de tension de sortie $V_{CC} - (2 \dots 3 V_{BE}) - V_{CEsat}$
- le taux de réjection du mode commun (gain en tension différentielle/gain en tension mode commun) $\text{CMRR} = 80 \text{ dB}$
- l'impédance de sortie $R_O = 50 \Omega$
- la largeur de bande à gain unité (fréquence pour laquelle le gain en tension sans contre-réaction = 1) $f_T = 1 \text{ MHz}$
- slew-rate (pente maximale de la réponse transitoire de la tension de sortie pour un signal carré d'amplitude élevée appliqué à l'entrée) $\text{SR} = 0.5 \text{ V}/\mu\text{s}$



Dans la région linéaire, $v_O = a(v_I^+ - v_I^-)$

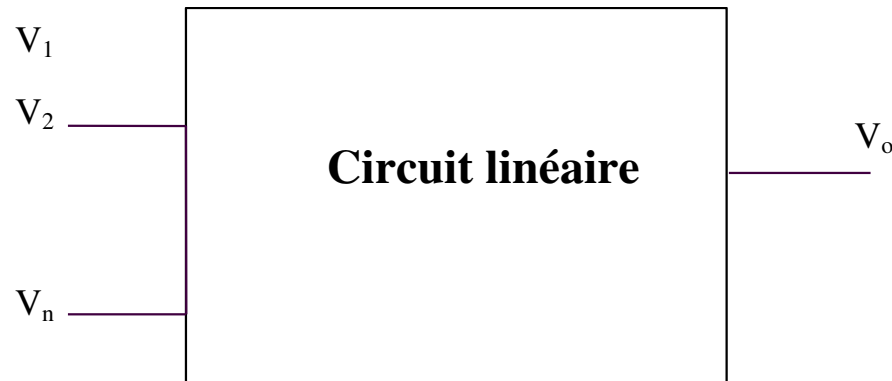
Dans la saturation négative, $v_O \cong -(V_{CC} - 1V)$

Dans la saturation positive, $v_O \cong V_{CC} - 1V$

5.2. Equations des montages fondamentaux

5.2. Equations des montages fondamentaux

Théorème de superposition



$$V_o = V_o \Big|_{\substack{V_1 \neq 0 \\ V_2 = V_3 = \dots V_n = 0}} + V_o \Big|_{\substack{V_2 \neq 0 \\ V_1 = V_3 = \dots V_n = 0}} + \dots + V_o \Big|_{\substack{V_n \neq 0 \\ V_1 = V_2 = \dots V_{n-1} = 0}}$$

5.2. Equations des montages fondamentaux

5.2.1. Méthode de raisonnement sur l'amplificateur opérationnel idéal

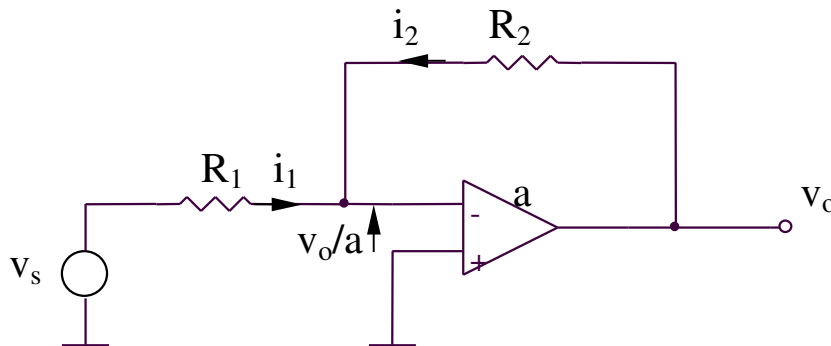
Un amplificateur opérationnel idéal est caractérisé en bucle ouvert par:

- gain en tension infini
- impédance d'entrée infini
- impédance de sortie nulle

En conséquence:

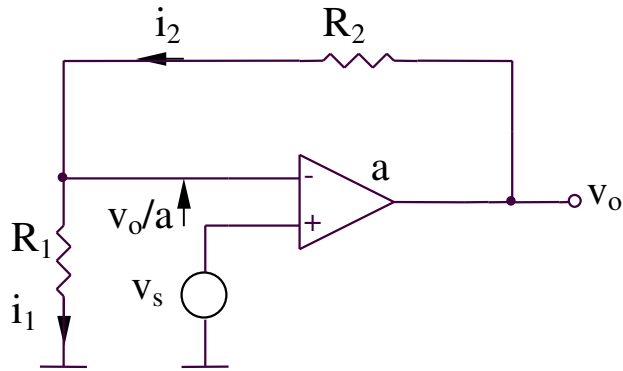
- il n'y a aucune différence de potentiel entre les deux entrées du circuit
- aucun courant ne circule vers les deux entrées

5.2.2. Montage inverseur



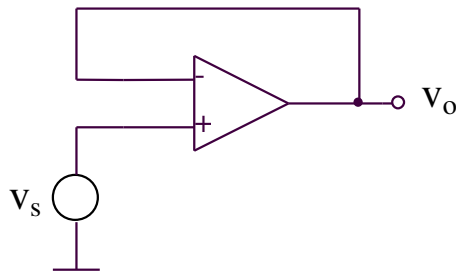
$$A = -\frac{v_O}{v_S} = -\frac{R_2}{R_1}$$

5.2.3. Montage non-inverseur



$$A = \frac{v_O}{v_S} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

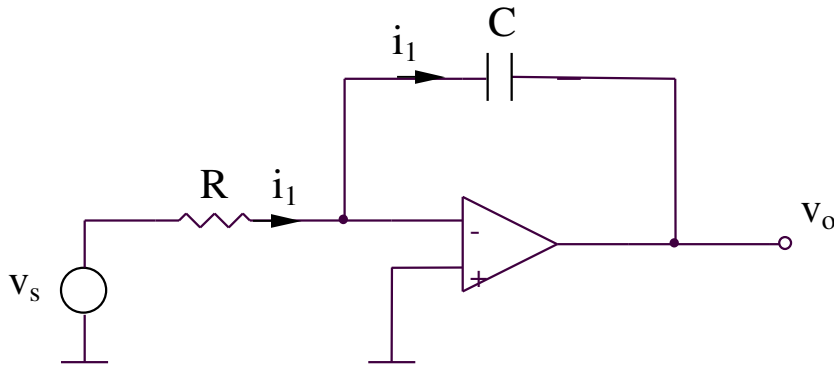
5.2.4. Montage répéteur



Si l'amplificateur opérationnel est idéal, la tension de sortie est identique avec la tension d'entrée:

$$v_O = v_S$$

5.2.5. Montages intégrateur et différentiateur

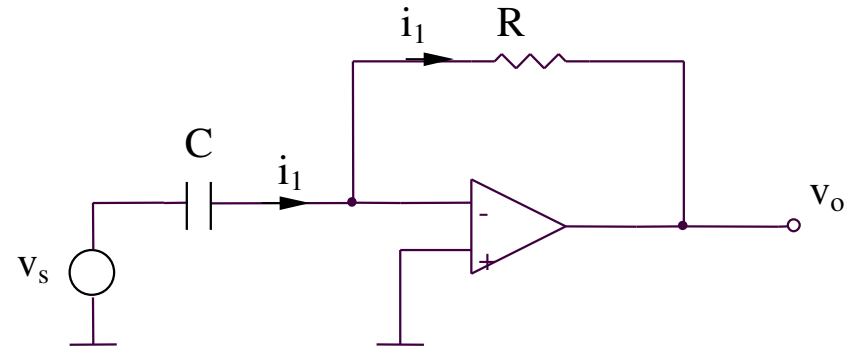


Intégrateur

$$i_1 = \frac{v_s(t)}{R}$$

$$v_o = -\frac{1}{C} \int i_1(t) dt + v_o(0)$$

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int v_s(t) dt + v_o(0)$$

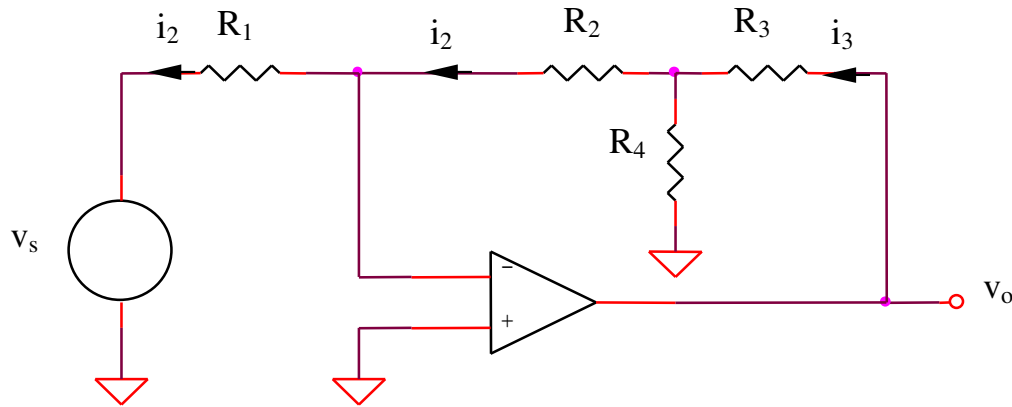


Différentiateur

$$i_1 = C \frac{dv_s}{dt}$$

$$v_o = -Ri_1 = -RC \frac{dv_s}{dt}$$

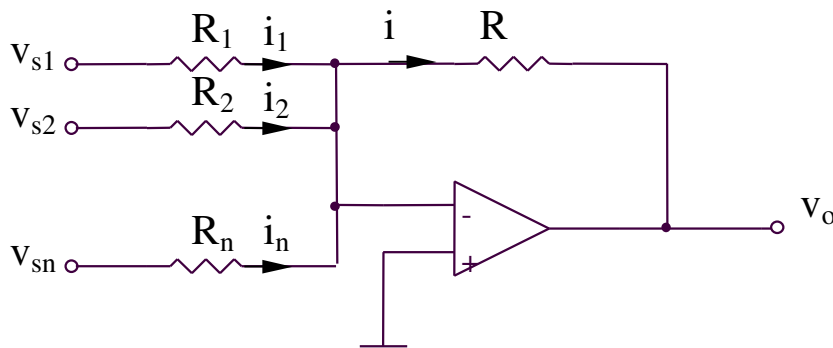
5.2.6. Montage inverseur avec le grand gain



$$A = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{i_3} \frac{i_3}{i_2} \frac{i_2}{v_s}$$

$$A = -\frac{R_2 R_3 + R_2 R_4 + R_3 R_4}{R_1 R_4}$$

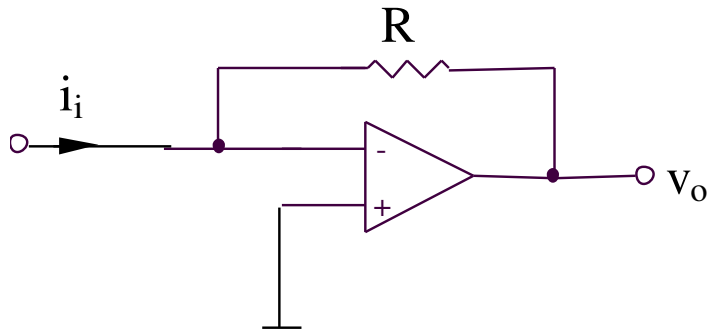
5.2.7. Montages somateur inverseur



$$i = \sum_{i=1}^n i_i = \sum_{i=1}^n \frac{v_{si}}{R_i}$$

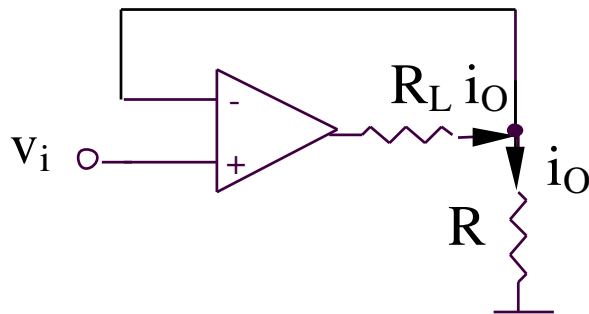
$$v_o = -Ri = -R \sum_{i=1}^n \frac{v_{si}}{R_i}$$

5.2.8. Convertisseur courant-tension



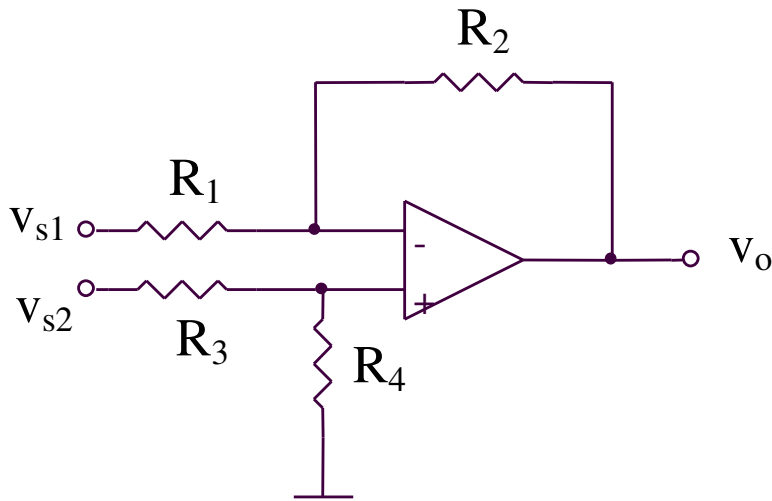
$$v_o = -Ri_i$$

5.2.9. Convertisseur tension-courant



$$i_o = v_i / R$$

5.2.10. Montages différentiels (1)



$$v_o = v_{s1} \left(-\frac{R_2}{R_1} \right) + v_{s2} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Pour obtenir:

$$v_o = A(v_{s2} - v_{s1})$$

il est nécessaire d'imposer la condition:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

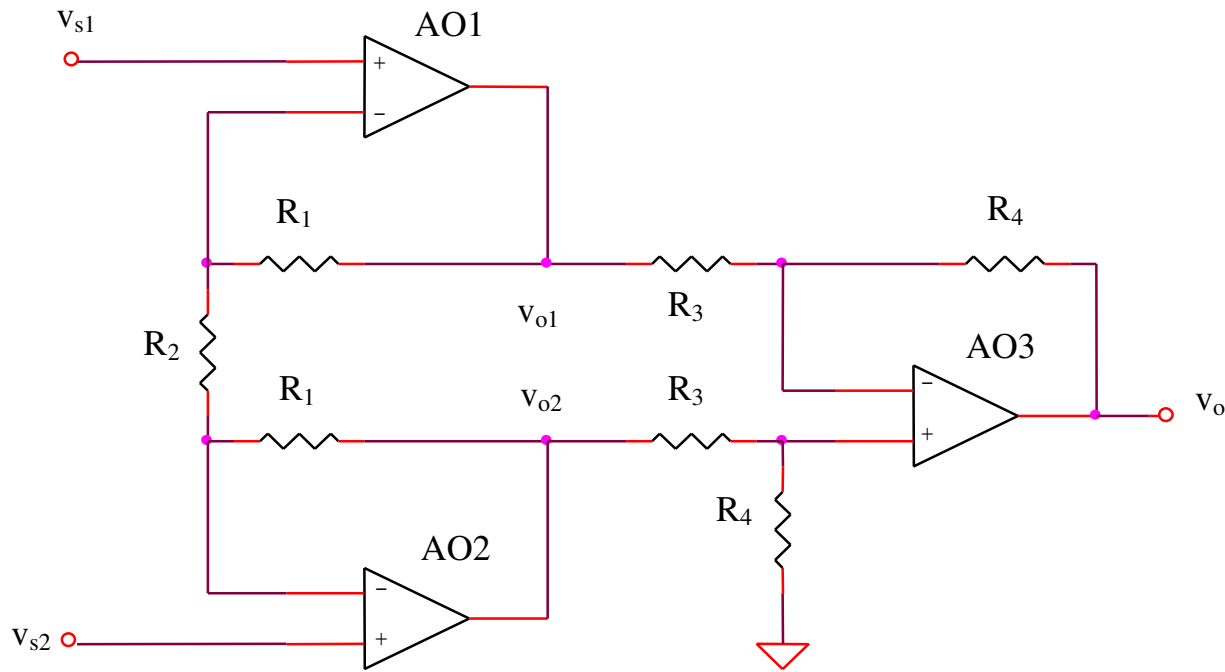
équivalent avec:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$

en résultant:

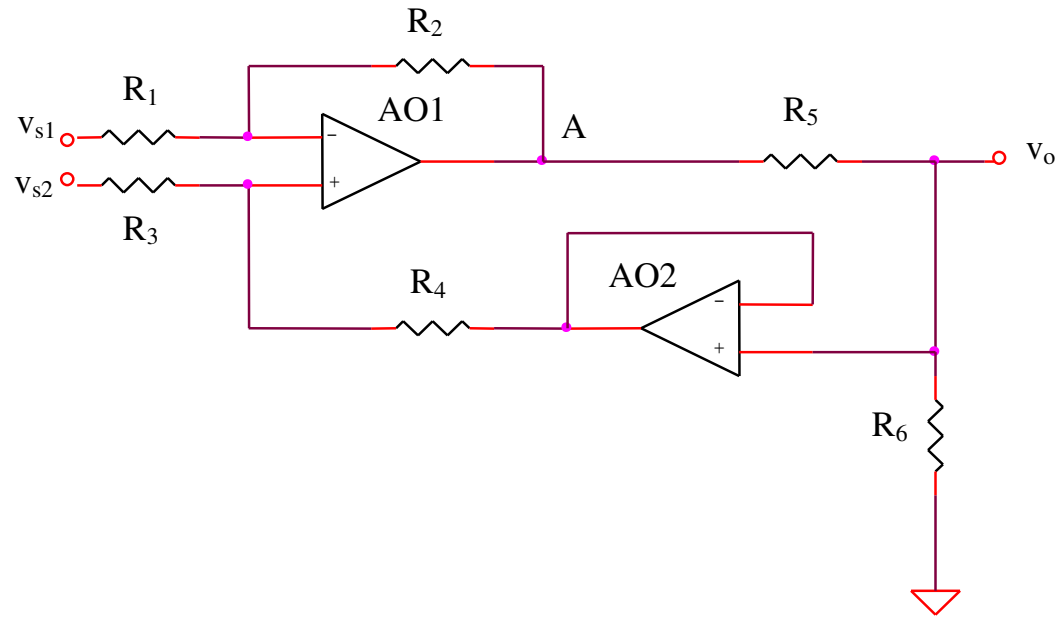
$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_{s2} - v_{s1})$$

5.2.11. Montages différentiels (2)



$$\left. \begin{aligned}
 v_{o1} &= v_{s1} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - v_{s2} \frac{R_1}{R_2} \\
 v_{o2} &= v_{s2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - v_{s1} \frac{R_1}{R_2} \\
 v_o &= \frac{R_4}{R_3} (v_{o2} - v_{o1})
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow A = \frac{v_o}{v_{s2} - v_{s1}} = \left(1 + 2 \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{R_4}{R_3}$$

5.2.12. Montages différentiels (3)



$$v_A = v_{s1} \left(-\frac{R_2}{R_1} \right) + \frac{v_{s2} R_4 + v_o R_3}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

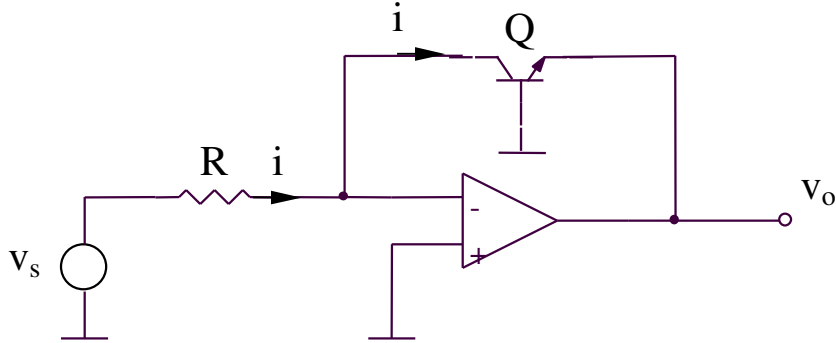
$$v_o = v_A \frac{R_6}{R_5 + R_6}$$

$$\Rightarrow v_o \left[\left(1 + \frac{R_5}{R_6} \right) - \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_4}{R_3}} \right] = v_{s2} \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_3}{R_4}} - v_{s1} \frac{R_2}{R_1}$$

$$v_o = A(v_{s2} - v_{s1})$$

$$\Rightarrow R_1 R_4 = R_2 R_3 \Rightarrow A = \frac{v_o}{v_{s2} - v_{s1}} = \frac{R_6 R_2}{R_5 R_1}$$

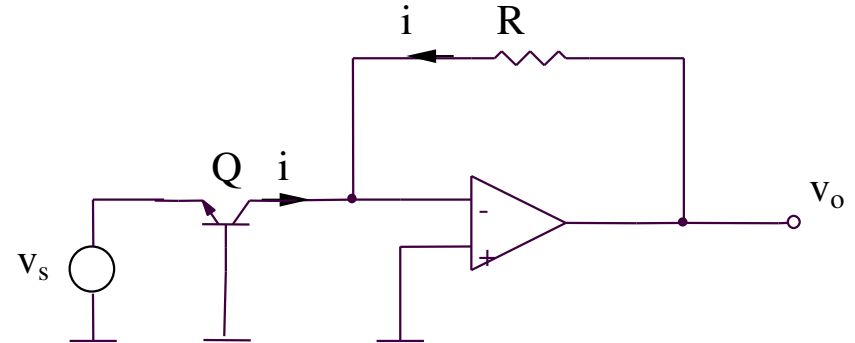
5.2.13. Convertisseur logarithmique et anti-logarithmique



Convertisseur logarithmique

$$v_o = -v_{BE} = -V_{th} \ln\left(\frac{i}{I_S}\right)$$

$$v_o = -V_{th} \ln\left(\frac{v_s}{RI_S}\right)$$



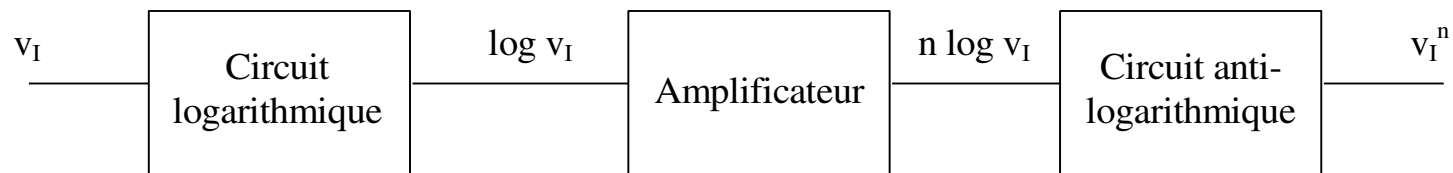
Convertisseur anti-logarithmique

$$v_o = iR$$

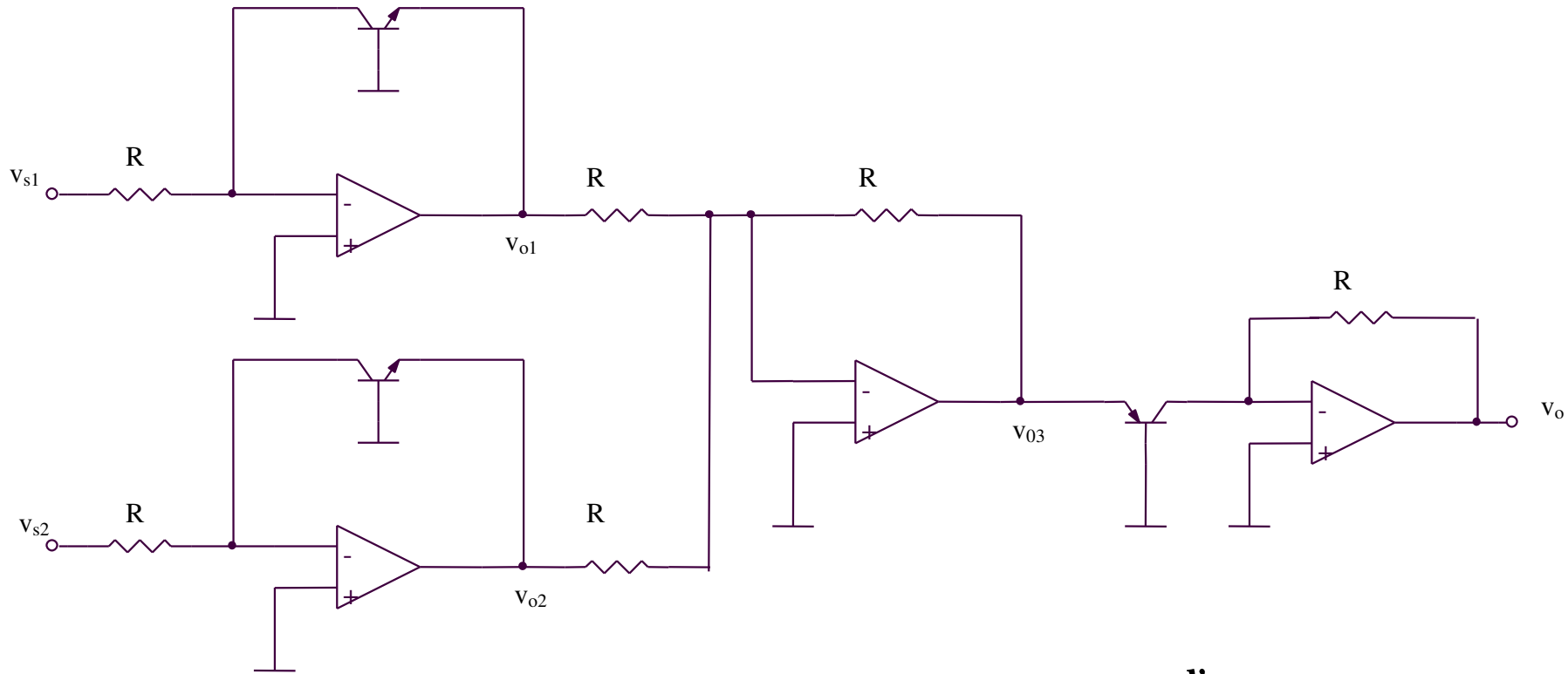
$$i = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_{th}}} = I_S e^{-\frac{v_s}{V_{th}}}$$

5.2.14. Circuit pour la fonction $Y = X^n$

$$X^n = e^{n \ln x}$$



5.2.15. Circuit de multiplication



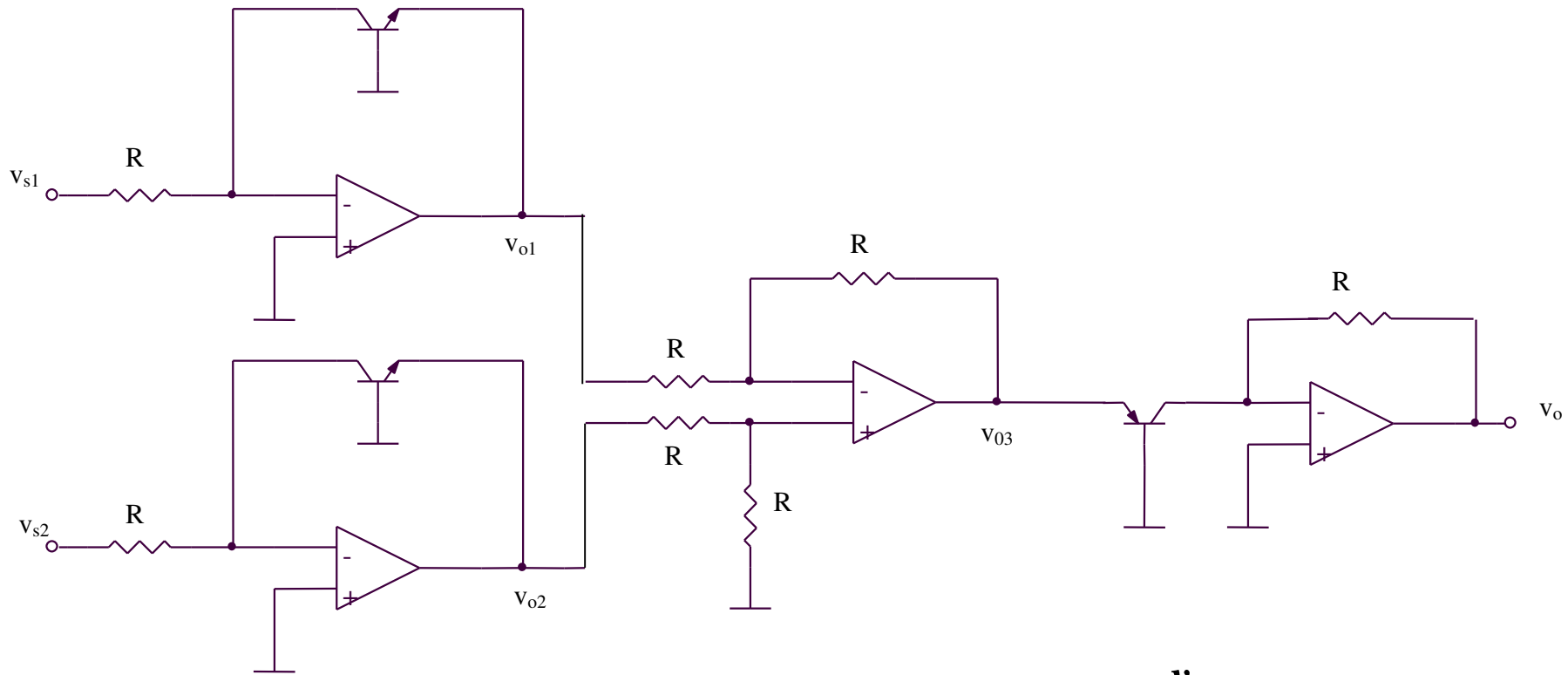
$$v_{o1} = -V_{th} \ln \frac{v_{s1}}{RI_S}$$

$$v_{o2} = -V_{th} \ln \frac{v_{s2}}{RI_S}$$

$$v_{o3} = \left(-\frac{R}{R}\right)v_{o1} + \left(-\frac{R}{R}\right)v_{o2} = -(v_{o1} + v_{o2}) = V_{th} \ln \frac{v_{s1}v_{s2}}{R^2 I_S^2}$$

$$v_o = -RI_S e^{\frac{v_{o3}}{V_{th}}} = -\frac{v_{s1}v_{s2}}{RI_S}$$

5.2.16. Diviseur



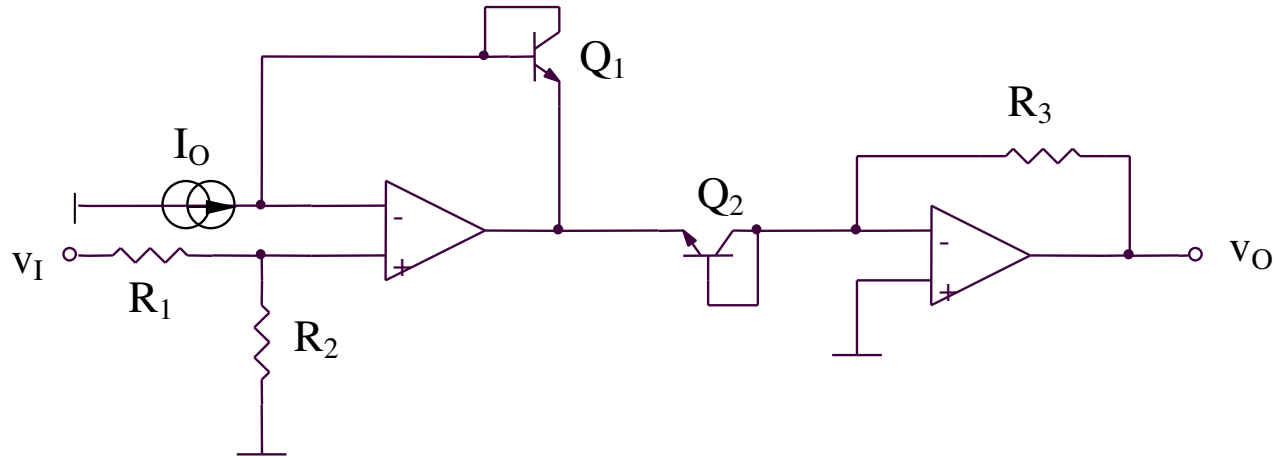
$$v_{o1} = -V_{th} \ln \frac{v_{s1}}{RI_S}$$

$$v_{o2} = -V_{th} \ln \frac{v_{s2}}{RI_S}$$

$$v_{o3} = v_{o2} - v_{o1} = V_{th} \ln \frac{v_{s1}}{v_{s2}}$$

$$v_o = -RI_S e^{v_{o3}/V_{th}} = -RI_S \frac{v_{s1}}{v_{s2}}$$

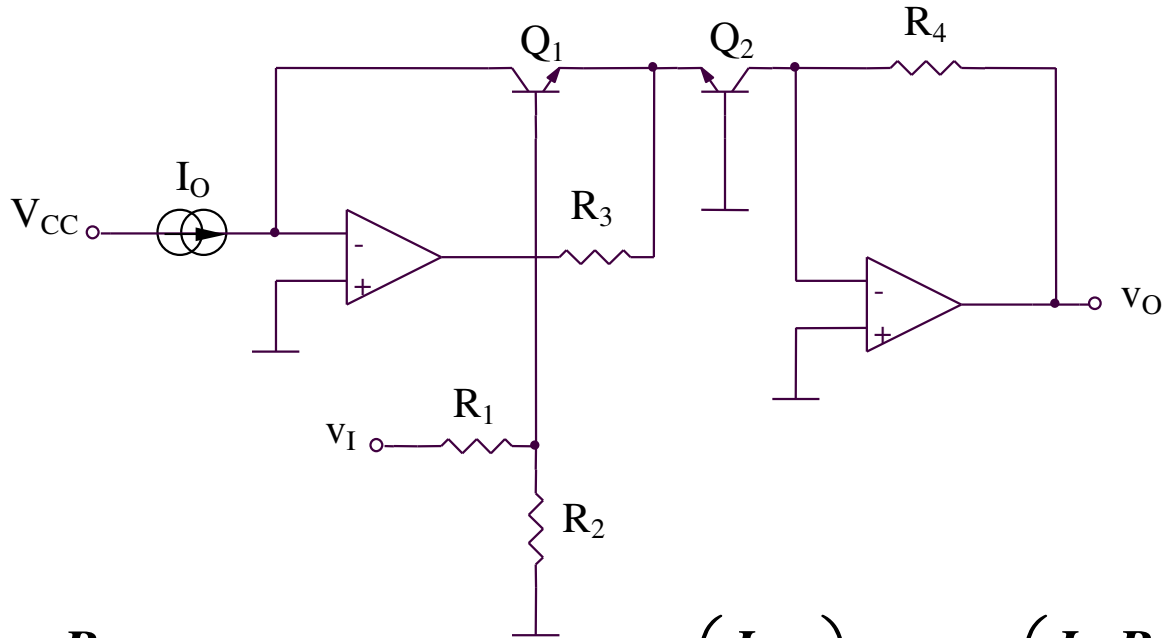
5.2.17. Circuit e^x (1)



$$v_I \frac{R_2}{R_1 + R_2} = v_{BE1} - v_{BE2} = V_{th} \ln \left(\frac{I_{C1}}{I_{C2}} \right) = V_{th} \ln \left(\frac{I_O R_3}{v_O} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_O = I_O R_3 e^{-\frac{v_I}{V_{th}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}}$$

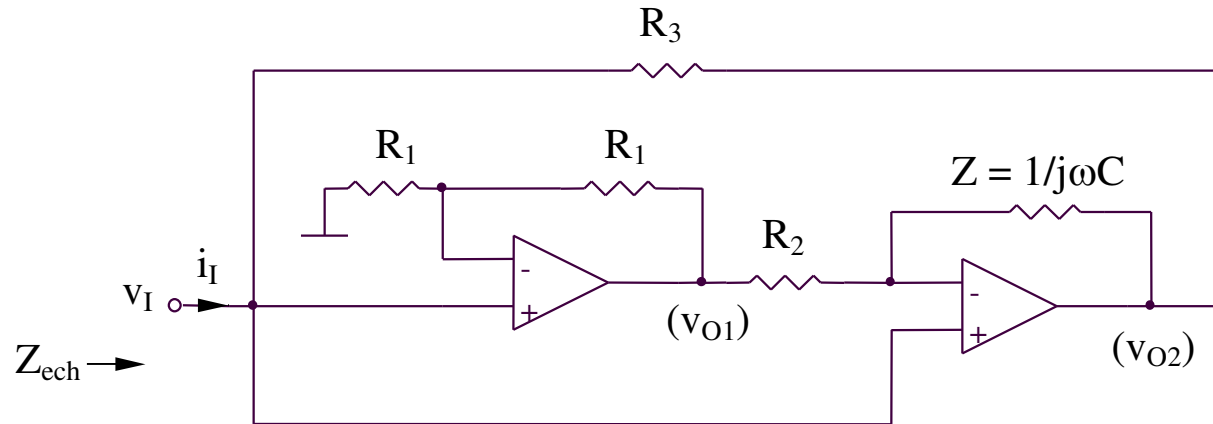
5.2.18. Circuit e^x (2)



$$v_I \frac{R_2}{R_1 + R_2} = v_{BE1} - v_{BE2} = V_{th} \ln \left(\frac{I_{C1}}{I_{C2}} \right) = V_{th} \ln \left(\frac{I_O R_4}{v_O} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_O = I_O R_4 e^{-\frac{v_I R_2}{V_{th} R_1 + R_2}}$$

5.2.19. Simulateur d'inductance

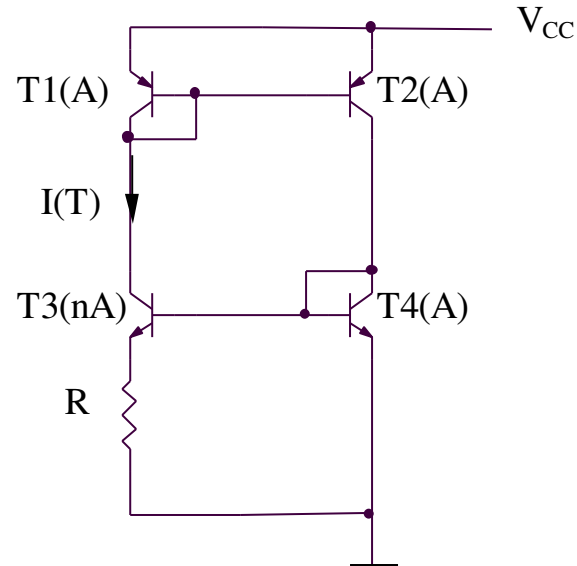


$$\left. \begin{aligned} v_{O2} &= v_I \left(1 + \frac{Z}{R_2} \right) + v_{O1} \left(-\frac{Z}{R_2} \right) \\ v_{O1} &= 2v_I \end{aligned} \right\} \Rightarrow v_{O2} = v_I \left(1 - \frac{Z}{R_2} \right) \left. \begin{aligned} & \\ i_I &= \frac{v_I - v_{O2}}{R_3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow i_I = v_I \frac{Z}{R_2 R_3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Z_{ech} = \frac{v_I}{i_I} = \frac{R_2 R_3}{Z} = j\omega(R_2 R_3 C) = j\omega L_{ech}$$

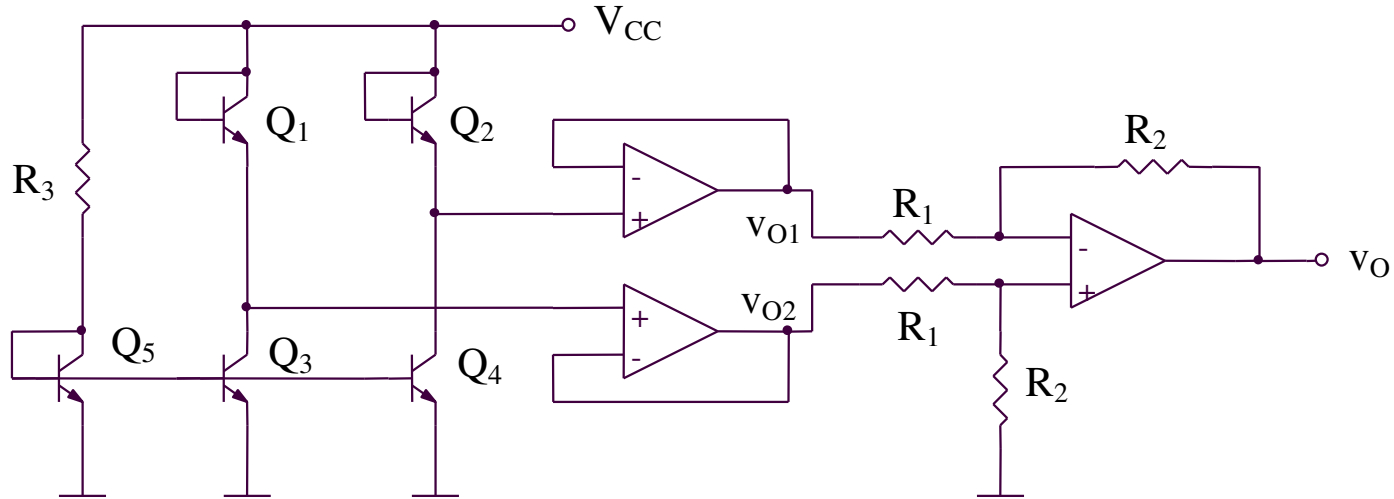
$$L_{ech} = R_2 R_3 C$$

5.2.20. Sondes de température



$$I(T) = \frac{V_{BE4} - V_{BE3}}{R} = \frac{V_{th}}{R} \ln \left(\frac{I_{C4} I_{S3}}{I_{C3} I_{S4}} \right) = \frac{V_{th}}{R} \ln n$$

5.2.20. Sondes de température

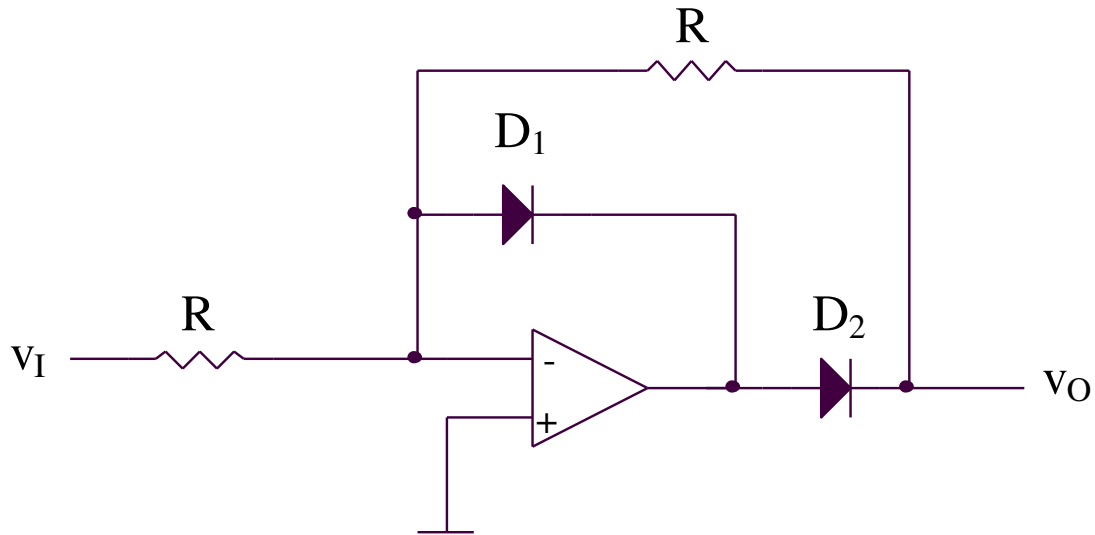


$$v_O = \frac{R_2}{R_1} (v_{O2} - v_{O1}) = \frac{R_2}{R_1} (v_{BE2} - v_{BE1}) = \frac{R_2}{R_1} V_{th} \ln \left(\frac{I_{C2} I_{S1}}{I_{C1} I_{S2}} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_O = \frac{R_2}{R_1} V_{th} \ln \left(\frac{I_{C4} I_{S1}}{I_{C3} I_{S2}} \right) = \frac{R_2}{R_1} V_{th} \ln \left(\frac{I_{S4} I_{S1}}{I_{S3} I_{S2}} \right) = \frac{R_2}{R_1} V_{th} \ln \left(\frac{A_4 A_1}{A_3 A_2} \right) = MT$$

$$M = \frac{R_2 k}{R_1 q} \ln \left(\frac{A_4 A_1}{A_3 A_2} \right)$$

5.2.21. Redresseur demi-alternance

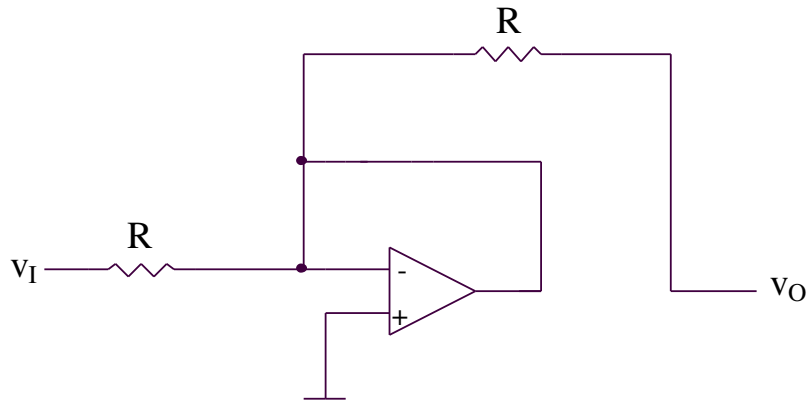


$v_I > 0 \Rightarrow v_{O1} < 0 \Rightarrow D_1$ ouvert, D_2 bloqué

$v_I < 0 \Rightarrow v_{O1} > 0 \Rightarrow D_2$ ouvert, D_1 bloqué

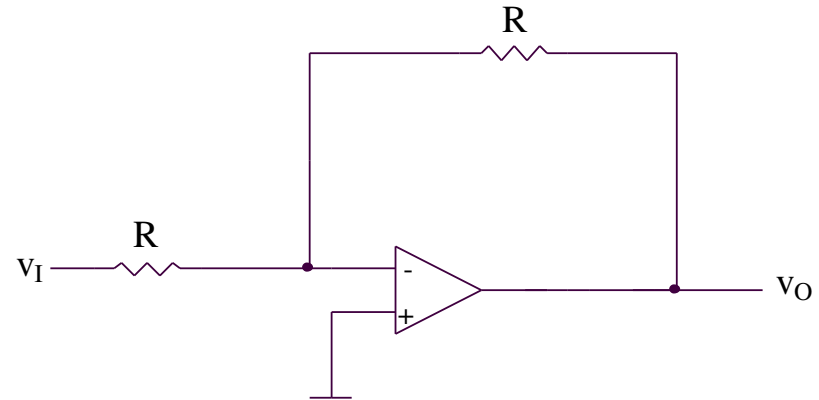
5.2.21. Redresseur demi-alternance

$$v_I > 0$$



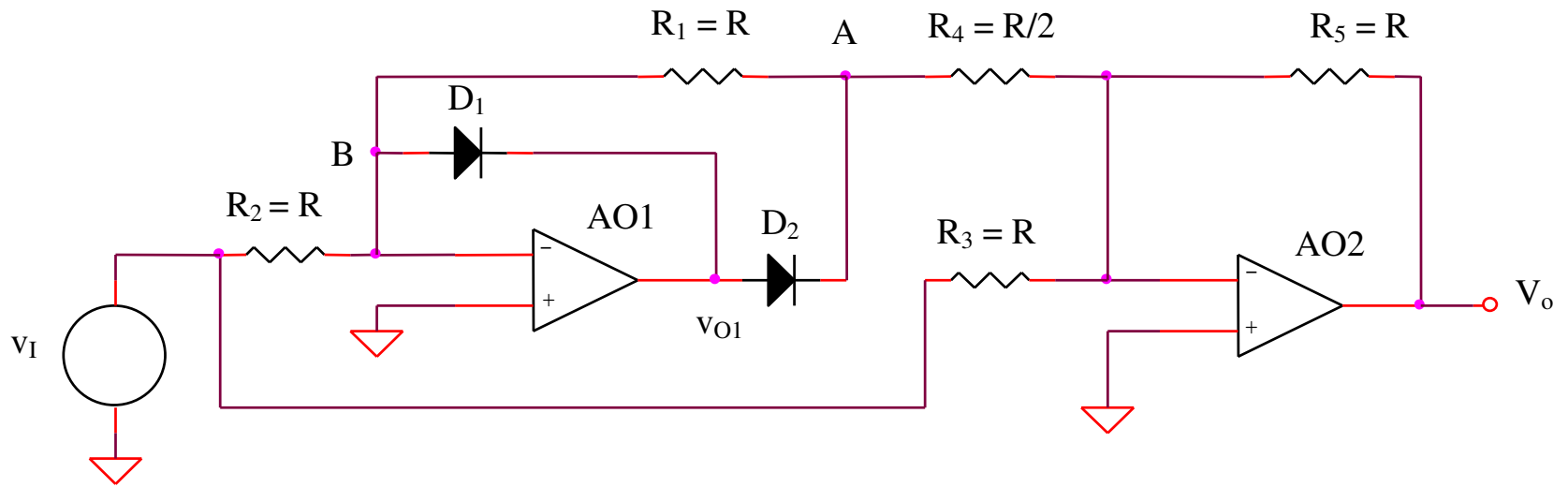
$$v_O = 0$$

$$v_I > 0$$



$$v_O = -\frac{R}{R}v_I = -v_I$$

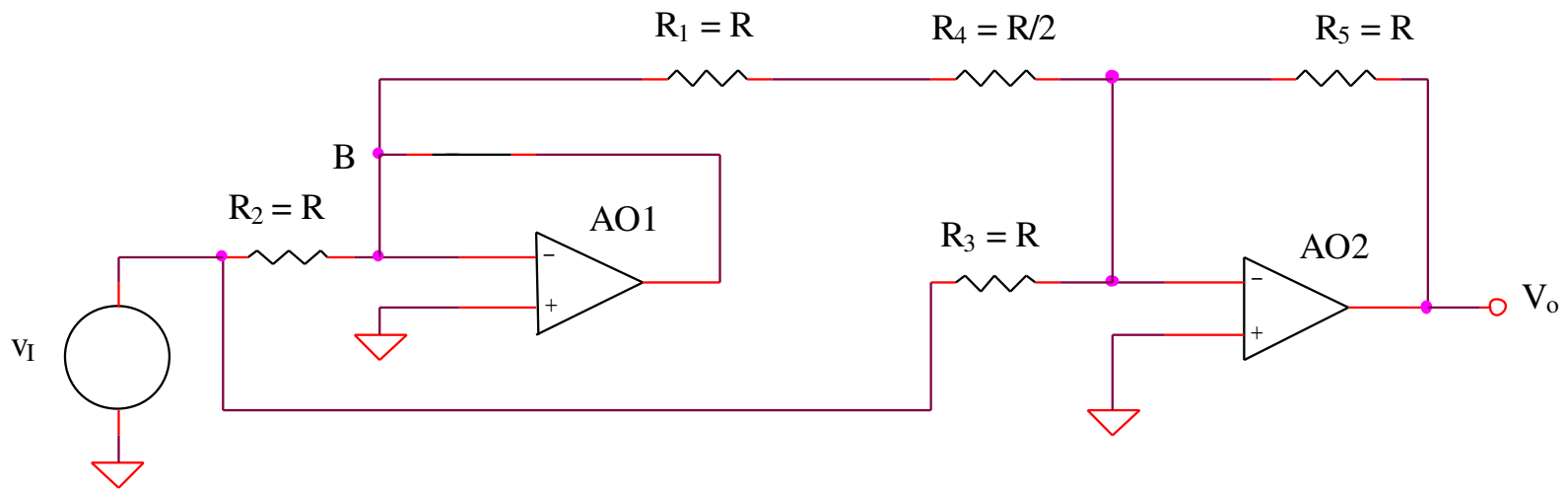
5.2.22. Redresseur double alternance (1)



$v_I > 0 \Rightarrow v_{O1} < 0 \Rightarrow D_1 \text{ ouvert}, D_2 \text{ bloqué}$

$v_I < 0 \Rightarrow v_{O1} > 0 \Rightarrow D_2 \text{ ouvert}, D_1 \text{ bloqué}$

5.2.22. Redresseur double alternance (1)

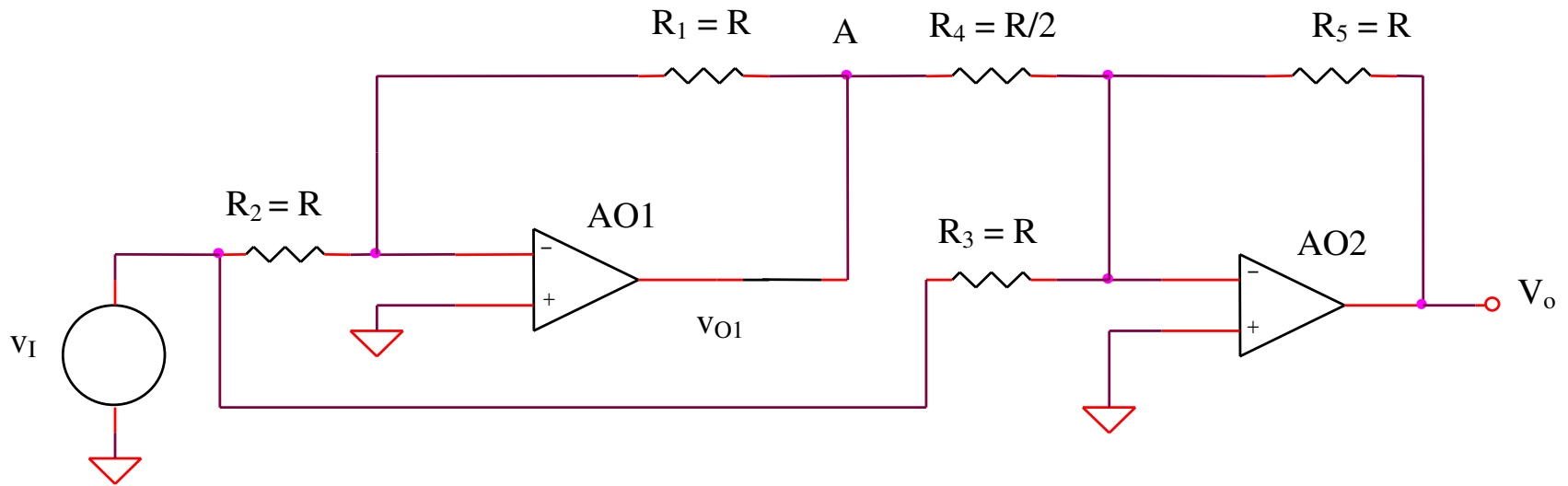


$$v_I > 0$$

$$V_B = 0$$

$$v_O = -\frac{R_5}{R_3} v_I = -v_I$$

5.2.22. Redresseur double alternance (1)



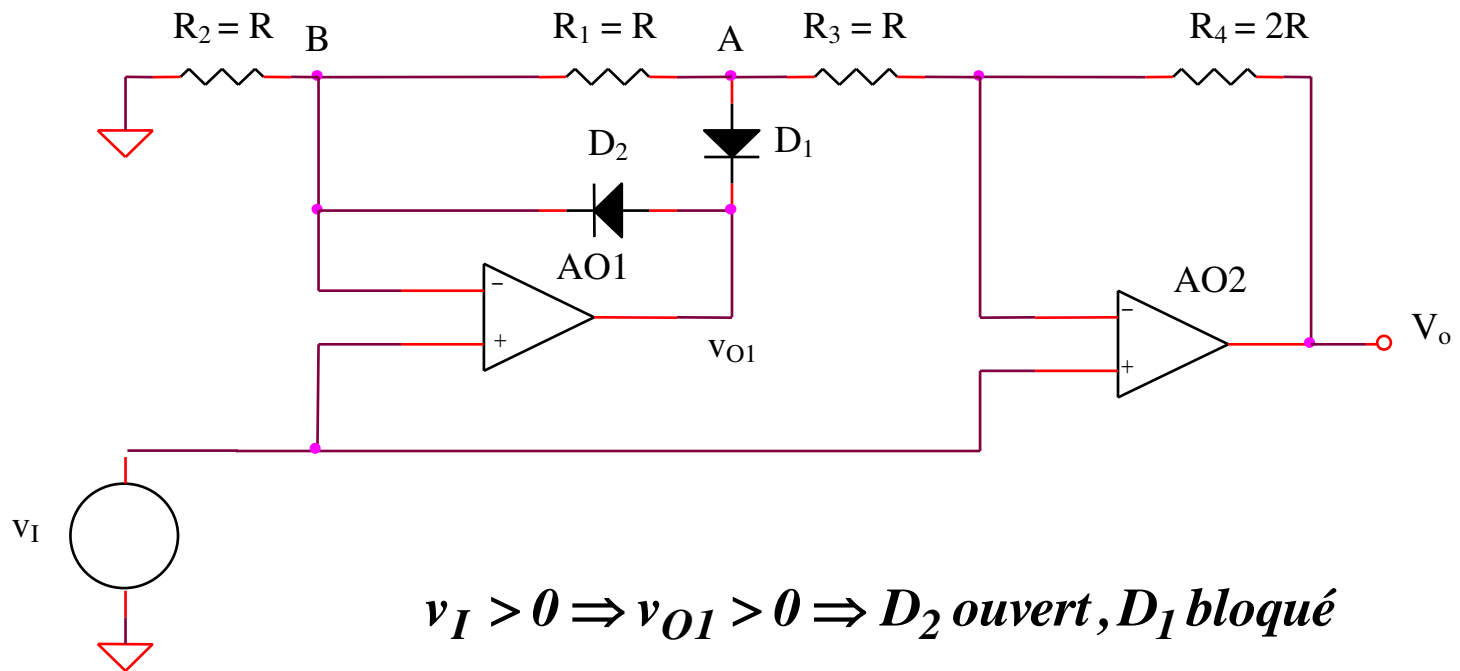
$$v_I < 0$$

$$V_A = -\frac{R_1}{R_2} v_I$$

$$v_O = -\frac{R_5}{R_4} V_A - \frac{R_5}{R_3} v_I = v_I$$

Conclusion: $v_O = -|v_I|$

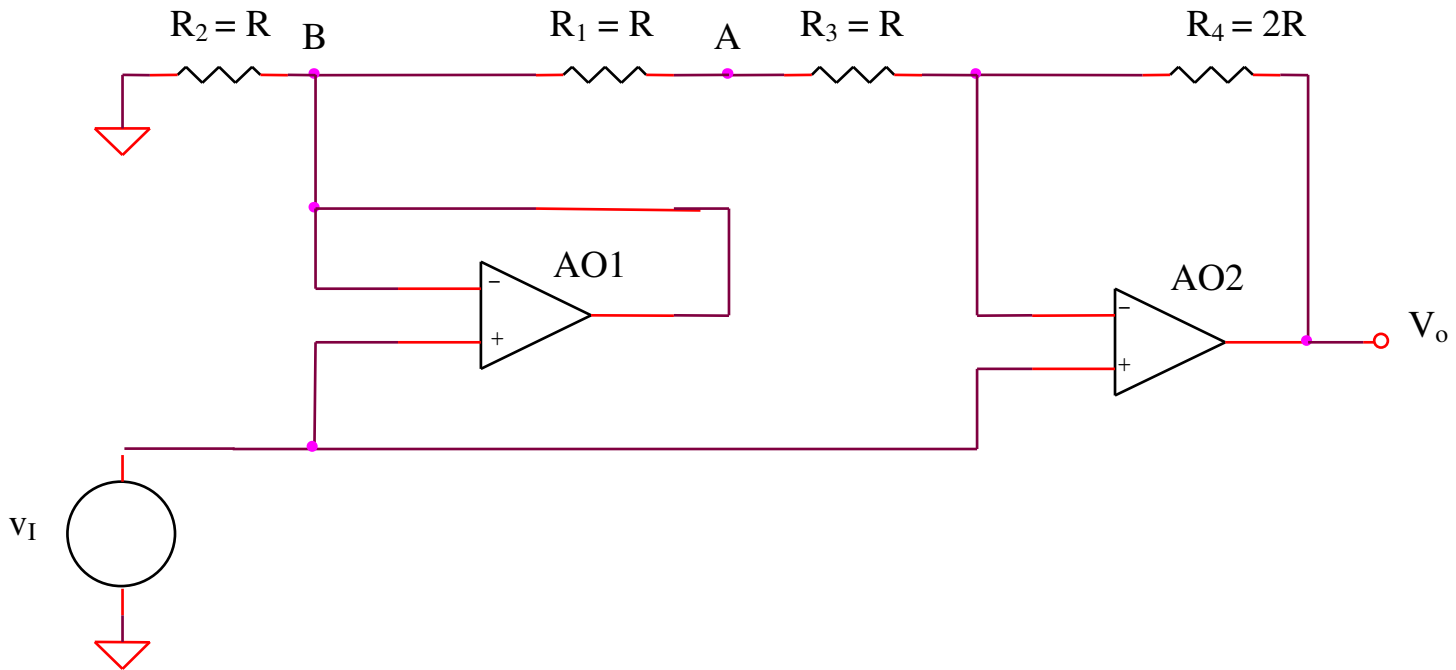
5.2.23. Redresseur double alternance (2)



$v_I > 0 \Rightarrow v_{O1} > 0 \Rightarrow D_2$ ouvert, D_1 bloqué

$v_I < 0 \Rightarrow v_{O1} < 0 \Rightarrow D_1$ ouvert, D_2 bloqué

5.2.23. Redresseur double alternance (2)

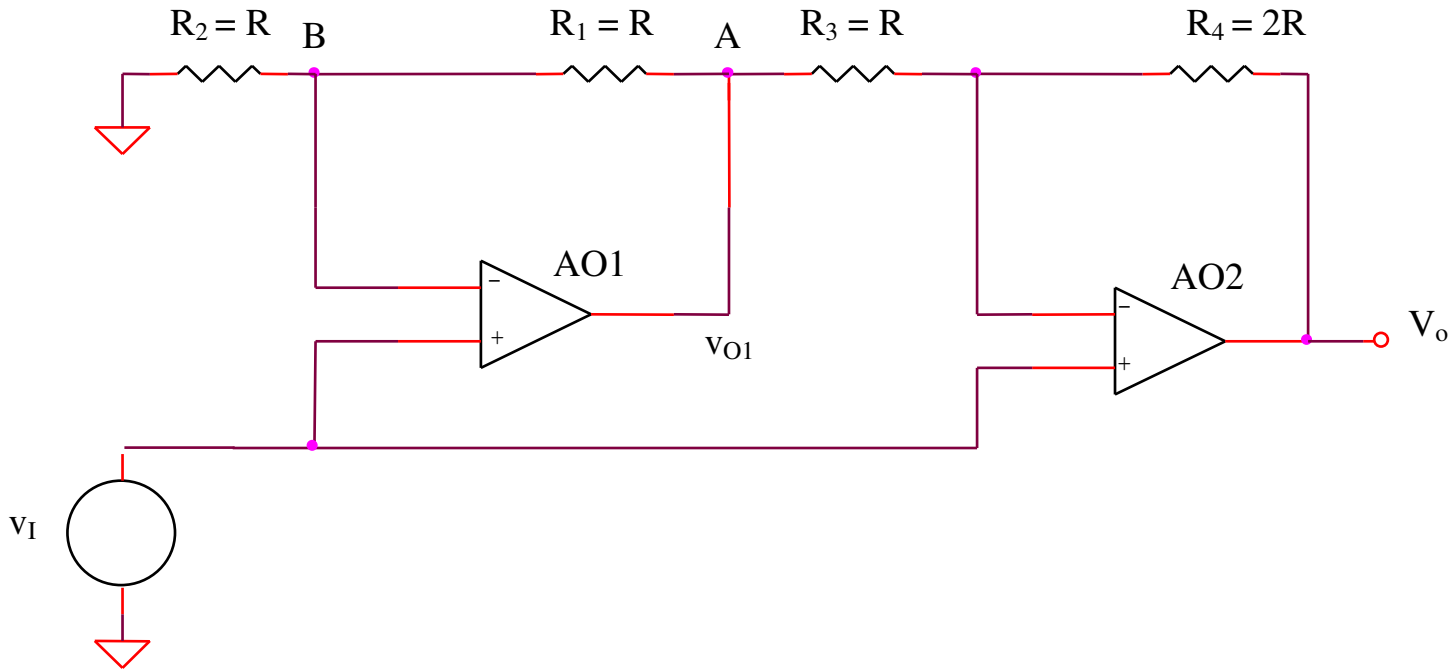


$$v_I > 0$$

$$V_B = v_I$$

$$v_O = \left(1 + \frac{R_4}{R_1 + R_3} \right) v_I - \frac{R_4}{R_1 + R_3} V_B = v_I$$

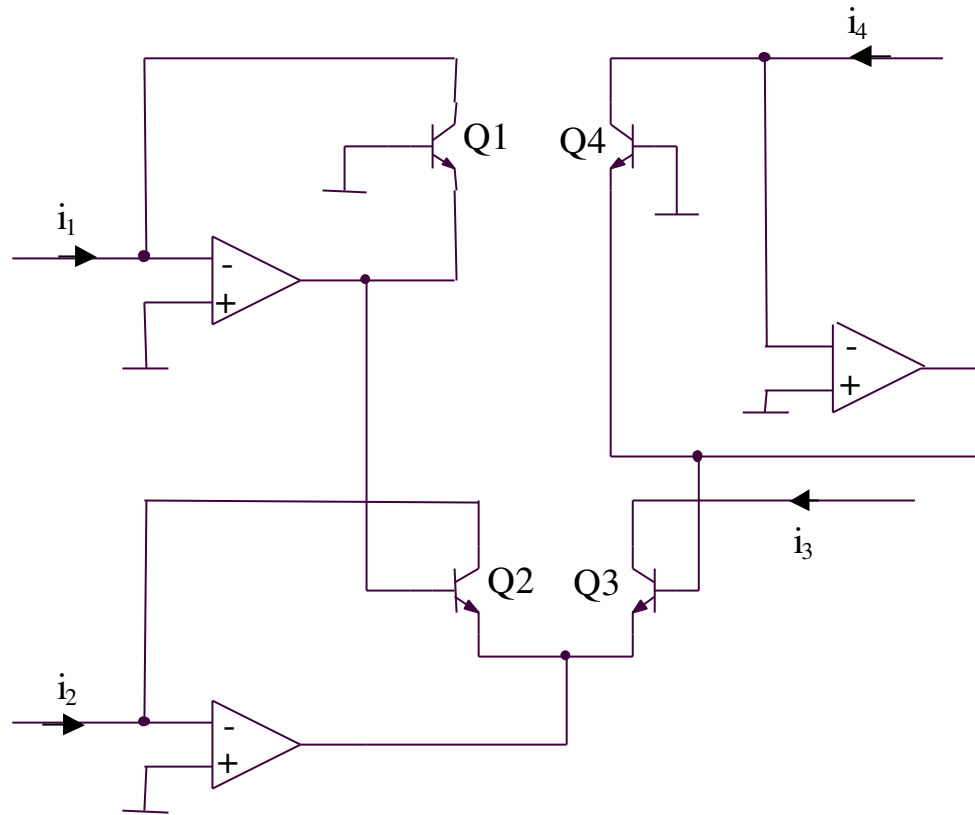
5.2.23. Redresseur double alternance (2)



$$v_I < 0 \quad V_A = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)v_I = 2v_I \quad v_O = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)v_I - \frac{R_4}{R_3}V_A = -v_I$$

Conclusion: $v_O = |v_I|$

5.2.24. Circuit multifonctionnel

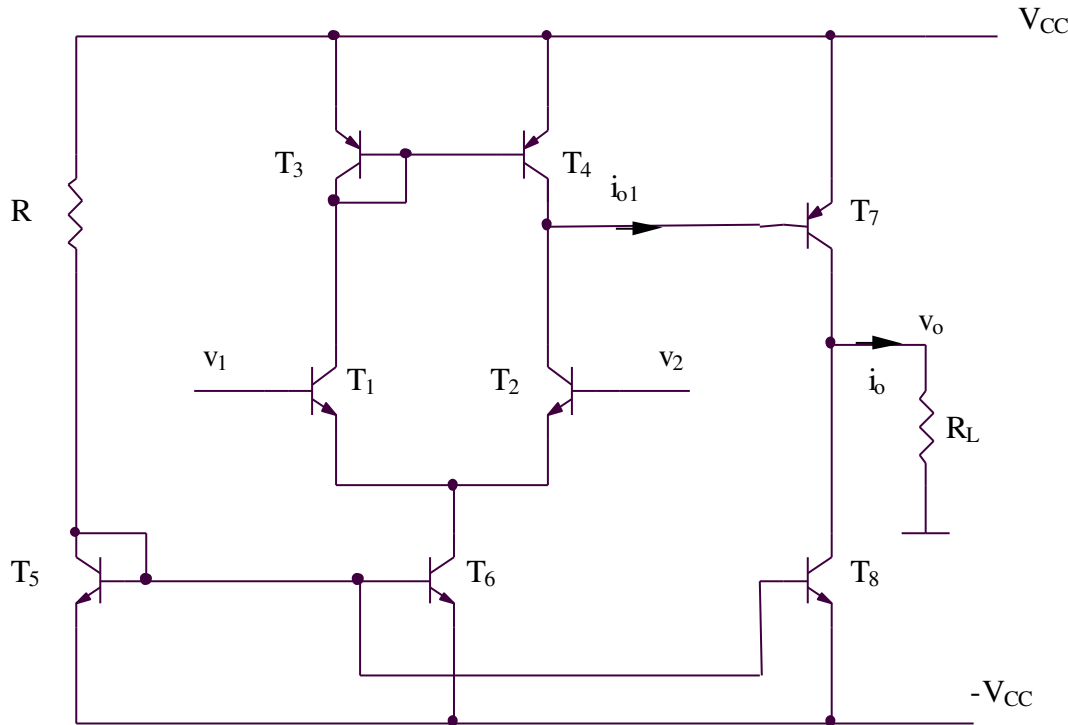


$$V_{BE1} + V_{BE2} = V_{BE3} + V_{BE4}$$

$$V_{th} \ln \frac{i_1}{I_S} + V_{th} \ln \frac{i_2}{I_S} = V_{th} \ln \frac{i_3}{I_S} + V_{th} \ln \frac{i_4}{I_S} \Rightarrow i_1 i_2 = i_3 i_4$$

5.3. Etude des amplificateurs opérationnels

5.3.1. Etude d'un amplificateur opérationnel bipolaire (1)



Etude en régime statique

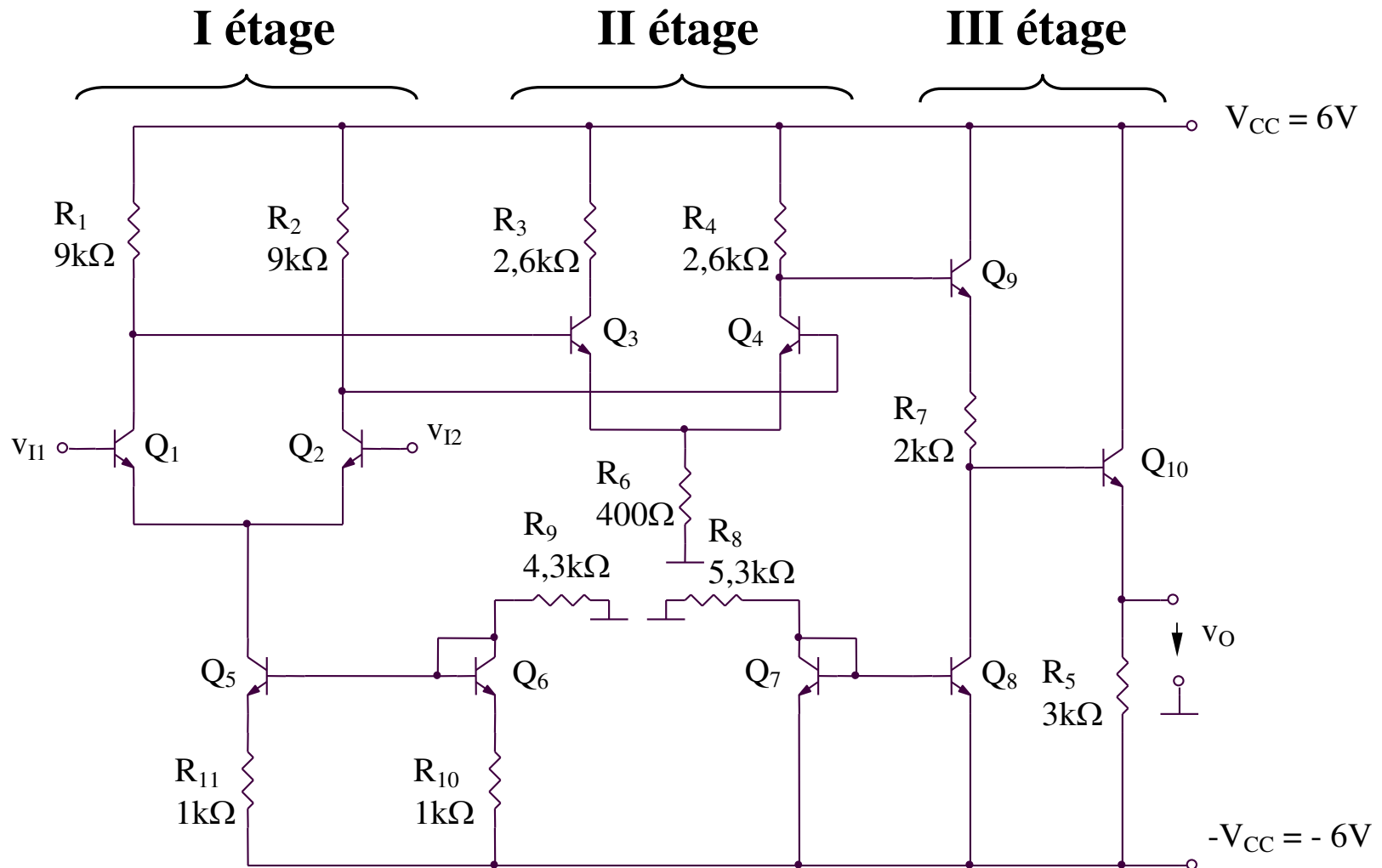
$$I_{C5,6,7,8} = \frac{2V_{CC} - V_{BE}}{R}$$

$$I_{C1,2,3,4} = \frac{I_{C5}}{2}$$

Etude en régime dynamique

$$A_{dd} = \frac{v_o}{v_1 - v_2} = \frac{i_o R_L}{v_1 - v_2} = \frac{\beta_7 i_{o1} R_L}{v_1 - v_2} \left. \vphantom{A_{dd}} \right\} \Rightarrow A_{dd} = g_{m1} \beta_7 R_L$$

5.3.2. Etude d'un amplificateur opérationnel bipolaire (2)



Etude en régime statique

$$I_{C6} = \frac{V_{CC} - V_{BE6}}{R_9 + R_{10}} = 1mA$$

$$I_{C5} = I_{C6} \frac{R_{10}}{R_{11}} = 1mA$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{I_{C5}}{2} = 0,5mA$$

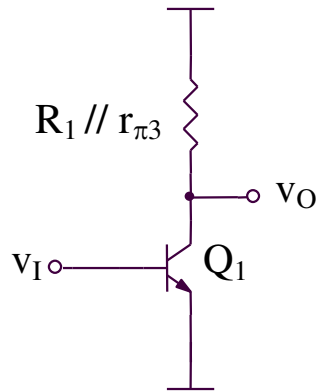
$$I_{C3} = I_{C4} = \frac{V_{CC} - R_2 I_{C2} - V_{BE3}}{2R_6} = 2mA$$

$$I_{C7} = I_{C8} = I_{C9} = \frac{V_{CC} - V_{BE7}}{R_8} = 1mA$$

$$I_{C10} = \frac{2V_{CC} - I_{C4}R_4 - I_{C9}R_7 - V_{BE9} - V_{BE10}}{R_5} \cong 1mA$$

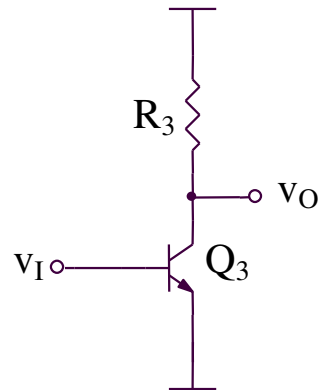
Etude en régime dynamique

Gain du premier étage



$$A_{dd I} = -g_{m1}(R_1 // r_{\pi 3} // r_{o1})$$

Gain du second étage

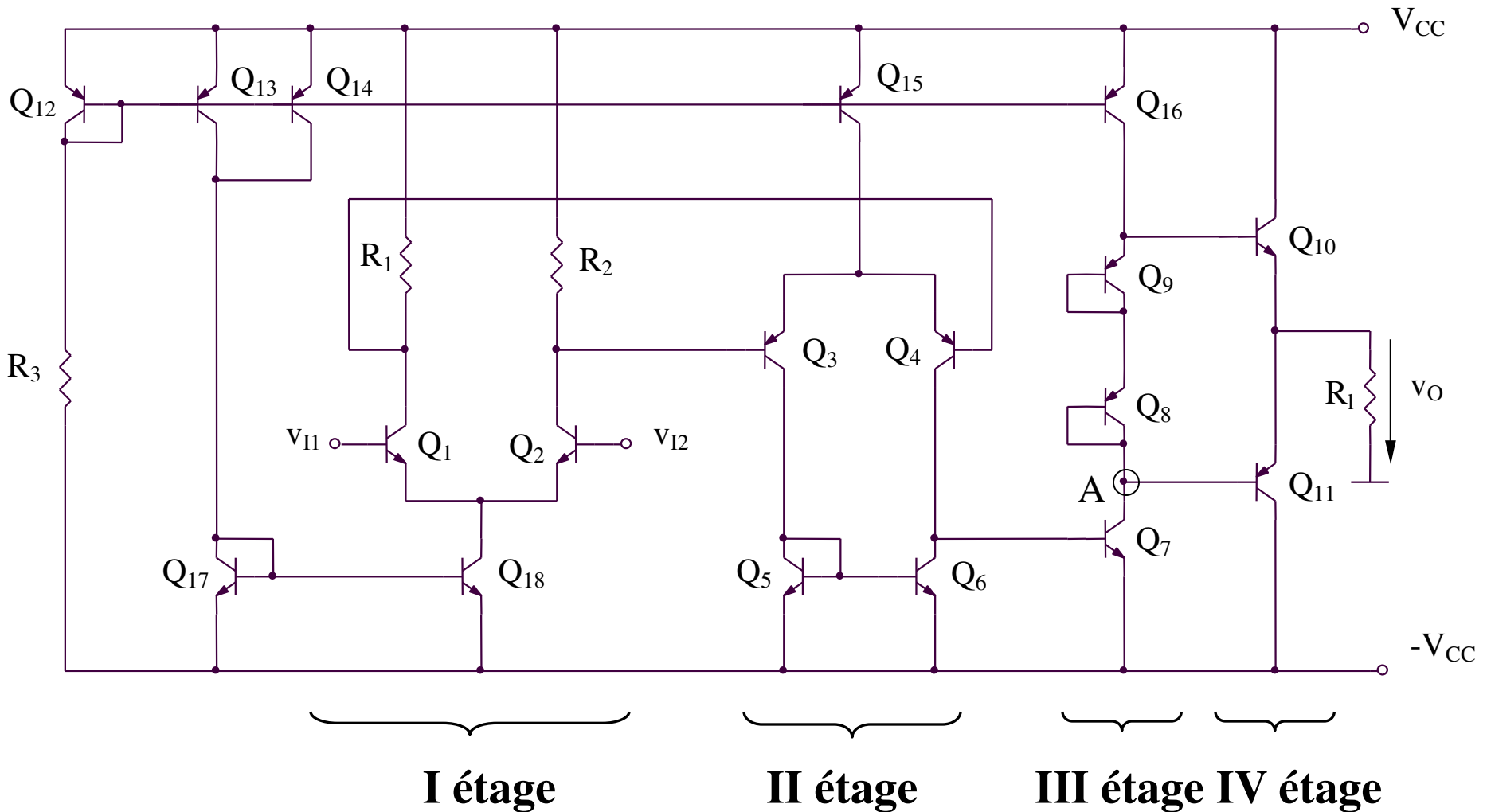


$$A_{dd II} \cong -g_{m3}(R_3 // r_{o3}) \frac{1}{2}$$

Gain du troisième étage

$$A_{dd III} \cong 1$$

5.3.3. Etude d'un amplificateur opérationnel bipolaire (3)



Etude en régime statique

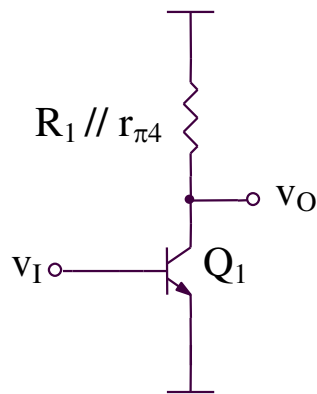
$$I_{C12} = \frac{2V_{CC} - V_{BE}}{R_3} = I_{C13} = I_{C14} = I_{C15} = I_{C16} = I_{C9} = I_{C8} = I_{C7} = I$$

$$I_{C17} = I_{C18} = 2I \quad I_{C3} = I_{C4} = I_{C5} = I_{C6} = I/2 \quad I_{C1} = I_{C2} = I$$

$$|V_{BE8}| + |V_{BE9}| = V_{BE10} + V_{BE11} \Rightarrow 2V_{th} \ln \frac{I}{I_S} = 2V_{th} \ln \frac{I_{C10}}{I_S} \Rightarrow I_{C10} = I_{C11} = I$$

Etude en régime dynamique

Gain du premier étage

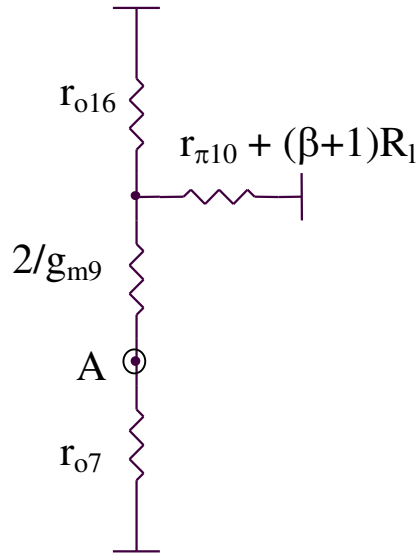


$$A_{ddI} = -g_{m1} (R_1 // r_{\pi 4} // r_{o1})$$

Gain du second étage

$$A_{dd II} = g_{m3} (r_{o6} // r_{o4} // r_{\pi7})$$

Gain du troisième étage



$$A_{dd III} = -g_{m7} (r_{o7} // r_{o16} // \beta R_l)$$

Gain du IV-ème étage

$$A_{IV} = \frac{\beta R_l}{r_{\pi10} + \beta R_l} \cong 1$$

Résistance d'entrée en mode différentiel

$$R_{id} = 2r_{\pi 1}$$

Domain maximal pour la tension d'entrée en mode commun

$$V_{IC}^{\min} = V_{BE1} + V_{CE18sat}$$

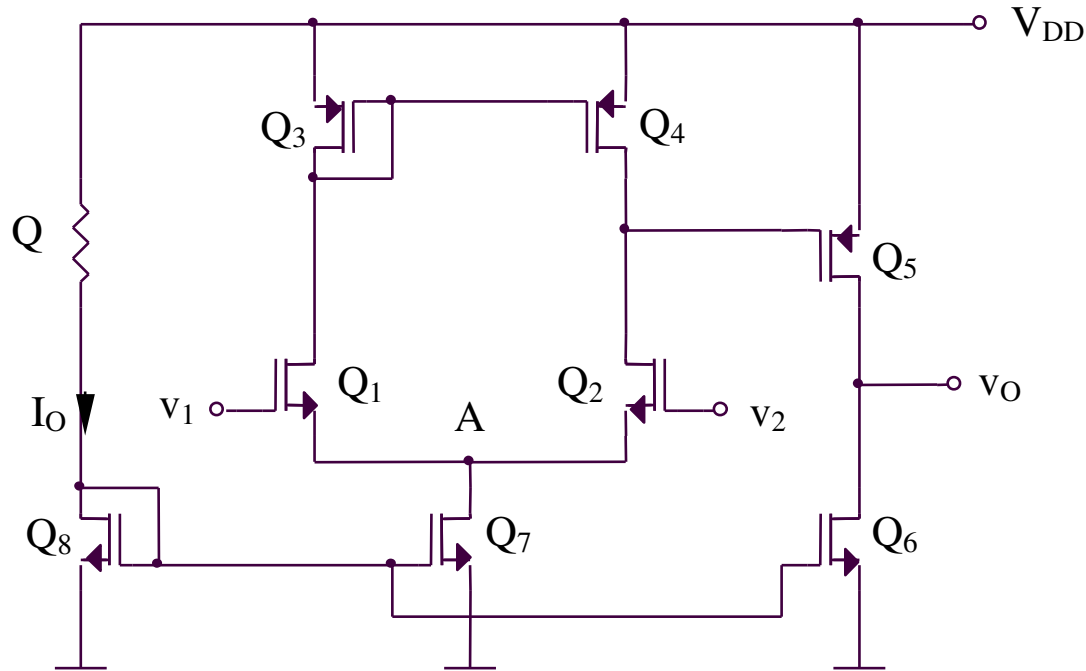
$$V_{IC}^{\max} = V_{CC} - R_1 I_{C1} - V_{CE1sat} + V_{BE1}$$

Domain maximal pour la tension de sortie

$$V_O^{\max} = \min(V_{CC} - /V_{CE16sat} / - V_{BE10}; I_{C16} \beta R_l)$$

$$V_O^{\min} = -V_{CC} + V_{CE7sat} + /V_{BE11} /$$

5.3.4. Etude d'un amplificateur opérationnel MOS (1)



Etude en régime statique

$$\left. \begin{aligned} RI_O + V_{GS8} &= V_{DD} \\ I_O &= \frac{K}{2} (V_{GS8} - V_T)^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_{DD} = V_{GS8} + \frac{RK}{2} (V_{GS8} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GS8} \quad (V_{GS8} > V_T)$$

$$\Rightarrow I_O = \frac{K}{2} (V_{GS8} - V_T)^2$$

$$I_{D5} = I_{D6} = I_{D7} = I_{D8} = I_0$$

$$I_{D1} = I_{D2} = I_{D3} = I_{D4} = I_{D7} / 2 = I_0 / 2$$

Etude en régime dynamique

Gain du circuit

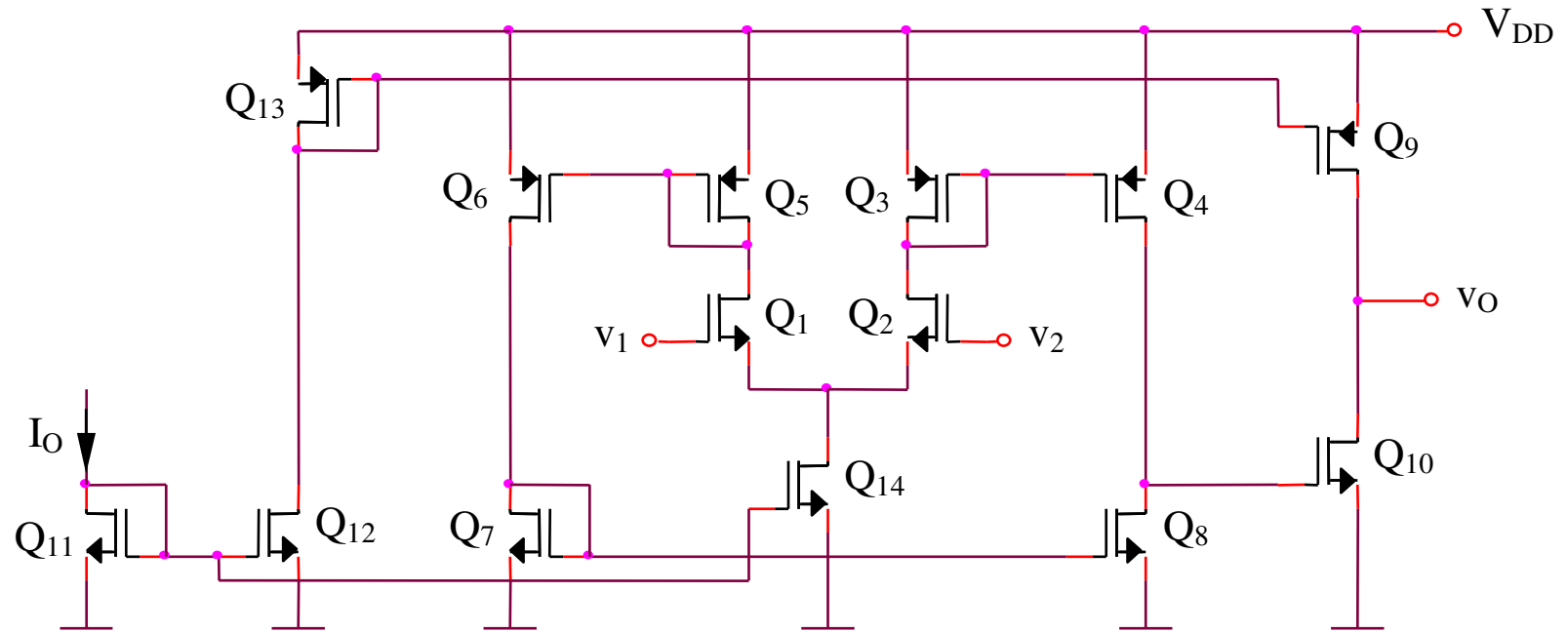
$$A_{dd} = g_{m1}(r_{ds2} // r_{ds4})g_{m5}(r_{ds5} // r_{ds6})$$

Domain maximal pour la tension d'entrée en mode commun

$$V_{IC}^{\max} = V_{DD} - V_{SG5} - V_{DS2sat} + V_{GS2} = V_{DD} - V_{SG5} + V_T = V_{DD} - \sqrt{\frac{2I_0}{K}}$$

$$V_{IC}^{\min} = V_{DS7sat} + V_{GS1} = V_{GS7} + V_{GS1} - V_T = V_T + (\sqrt{2} + 1)\sqrt{\frac{I_0}{K}}$$

5.3.5. Etude d'un amplificateur opérationnel MOS (2)



Etude en régime statique

$$I_{D1} = \dots = I_{D8} = \frac{I_O}{2}$$

$$I_{D9} = \dots = I_{D14} = I_O$$

Etude en régime dynamique

Gain du circuit

$$A_{dd} = g_{m1}(r_{ds4} // r_{ds8})g_{m10}(r_{ds10} // r_{ds9}) = \frac{1}{4}g_{m1}g_{m10}r_{ds4}r_{ds10}$$

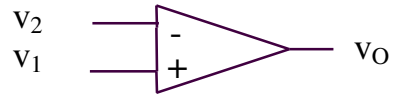
Domain maximal pour le tension d'entrée en mode commun

$$V_{IC}^{\max} = V_{DD} - V_{SG3} - V_{DS2sat} + V_{GS2} = V_{DD} - \sqrt{\frac{I_O}{K}}$$

$$V_{IC}^{\min} = V_{GS2} + V_{DS14sat} = (\sqrt{2} + 1)\sqrt{\frac{I_O}{K}} + V_T$$

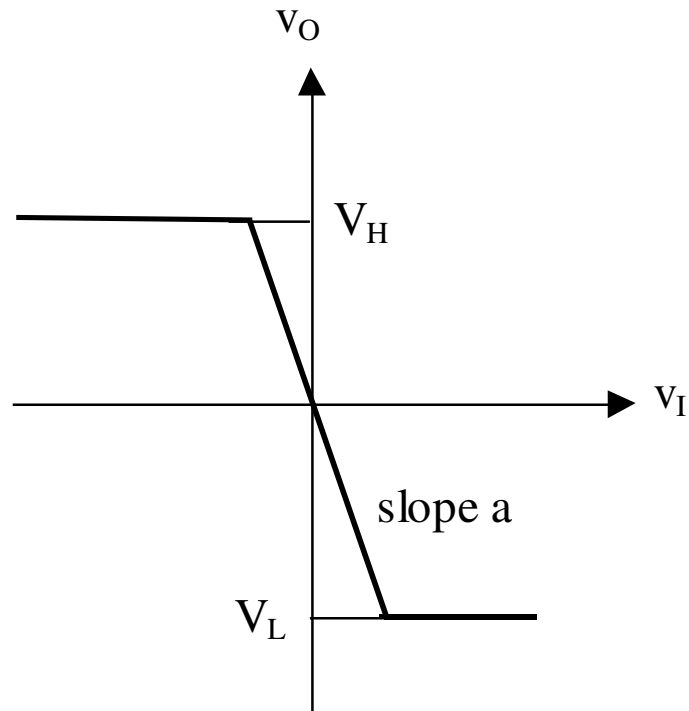
5.4. Compérateurs

5.4.1. Comparateur simple

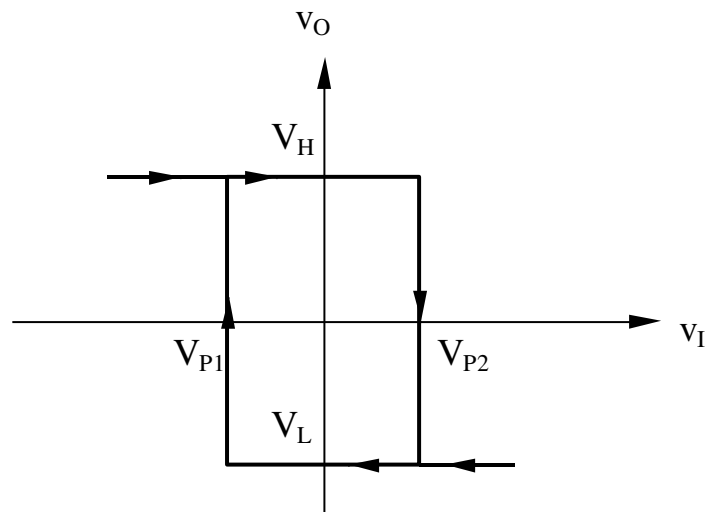
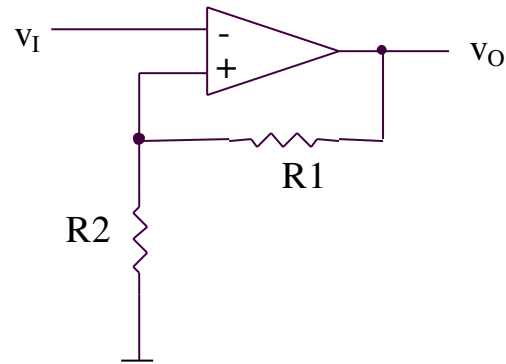


$$v_1 > v_2 \Rightarrow v_O = V_H$$

$$v_1 < v_2 \Rightarrow v_O = V_L$$



5.4.2. Comparateur avec des histerezis



$$V_{P1} = V_H \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_{P2} = V_L \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$