CH VI: Les amplificateurs- les amplificateurs différentiels

P. Rochette

Référence ELE 1370

1 - INTERET DE L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL

1.1 - Amplificateur de tension à courant continu

a) présentation

Un amplificateur de tension à courant continu n'a pas de fréquence de coupure basse : la bande passante s'étend du continu jusqu'à la fréquence de coupure haute.

En basse fréquence, le gain en tension A_V de l'amplificateur est constant et égal à A_{V0}.

L'amplificateur permet l'amplification de tensions continues ou lentement variables. Les liaisons entre les différents étages d'amplification sont donc nécessairement des liaisons non capacitives.

b) problème posé par l'amplification de tensions continues ou lentement variables

L'amplificateur est prévu de manière à ce que la tension de sortie v_s soit nulle lorsque la tension d'entrée v_e est nulle. En fait, cette condition n'est jamais parfaitement satisfaite et la tension de sortie v_s dérive toujours, plus ou moins lentement, en fonction du temps. En effet, à cause des liaisons non capacitives entre les différents étages d'amplification, toute variation des potentiels de repos d'un transistor est communiquée au suivant et se trouve finalement amplifiée à la sortie.

Les variations des potentiels de repos des transistors sont dues aux trois causes suivantes :
- la variation des tensions des sources continues d'alimentation,
- la variation des températures de jonction des transistors,
- le vieillissement des transistors qui entraîne une modification de leurs caractéristiques.

Si une dérive d_0 apparaît sur l'entrée de l'amplificateur, elle se retrouve amplifiée à la sortie :

$$v_S = A_v v_e + A_{v0} d_0$$

La dérive d_0 variant très lentement, il est très difficile d'éliminer la composante de dérive $A_{v0}\, d_0$, sans modifier la composante utile $A_V\, v_e$, si la tension d'entrée v_e est continue ou lentement variable.

C'est le premier étage qui contribue pour la plus grande part à la dérive de la tension de sortie v_S. En effet, si une dérive apparaît sur l'entrée d'un étage, elle a d'autant plus d'impact à la sortie de l'amplificateur que l'étage concerné est éloigné de la sortie.

1.2 - Amplificateur différentiel

Un amplificateur différentiel est un amplificateur de tension à courant continu, à deux entrées, qui amplifie la différence des deux tensions d'entrée.

Il a une structure symétrique qui permet de minimiser la dérive de sa tension de sortie. C'est le seul amplificateur de tension à courant continu utilisé actuellement.

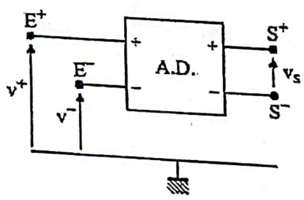
Les amplificateurs différentiels intégrés appartiennent à la famille des circuits intégrés linéaires.

2 - AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL

2.1 - Amplificateur différentiel symétrique

Un amplificateur différentiel est dit symétrique s'il possède deux entrées et deux sorties.

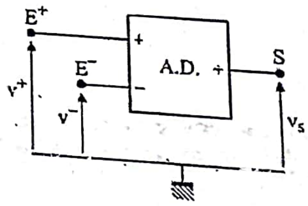
L'amplificateur différentiel symétrique est un amplificateur différentiel de très bonne qualité, mais il a une tension de sortie non référencée à la masse.



2.2 - Amplificateur différentiel asymétrique

Un amplificateur différentiel est dit asymétrique s'il possède deux entrées et une seule sortie.

L'amplificateur différentiel asymétrique a une tension de sortie référencée à la masse, mais il est un amplificateur différentiel de moins bonne qualité que l'amplificateur différentiel symétrique.



2.3 - Sources de tension continue d'alimentation

La tension de sortie v_s peut être positive ou négative (dans le cas le plus général). L'amplificateur différentiel est donc polarisé par une source de tension continue positive $+ V_{CC}$ et une source de tension continue négative $- V_{EE}$ (on n'a pas forcément $V_{EE} = V_{CC}$).

2.4 - Entrées

a) entrée non-inverseuse

L'entrée non-inverseuse est l'entrée repérée avec un "+".

Le gain en tension A^+, relatif à l'entrée non-inverseuse, est positif.

$$A^+ = \left[\frac{v_s}{v^+}\right]_{v^- = 0}$$

b) entrée inverseuse

L'entrée inverseuse est l'entrée repérée avec un "–".

Le gain en tension A^-, relatif à l'entrée inverseuse, est négatif.

$$A^- = \left[\frac{v_s}{v^-}\right]_{v^+ = 0} \qquad A^- \# -A^+$$

2.5 - Tensions d'entrée

a) tension d'entrée de mode différentiel

La tension d'entrée de mode différentiel e_d est la différence des tensions d'entrée v^+ et v^-, c'est à dire le signal utile.

$$e_d = v^+ - v^-$$

b) tension d'entrée de mode commun

La tension d'entrée de mode commun e_{mc} est la moyenne des tensions d'entrée v^+ et v^-, c'est à dire le signal à rejeter.

$$e_{mc} = \frac{v^+ + v^-}{2}$$

c) tensions d'entrée

Les tensions d'entrée v^+ et v^- peuvent s'exprimer à partir de la tension d'entrée de mode différentiel e_d et de la tension d'entrée de mode commun e_{mc}.

$$v^+ = e_{mc} + \frac{e_d}{2} \qquad v^- = e_{mc} - \frac{e_d}{2}$$

23/11/

2.6 - Tension de sortie

La tension de sortie v_s dépend à la fois de la tension d'entrée de mode différentiel e_d et de la tension d'entrée de mode commun e_{mc}.

$$v_s = A^+ v^+ + A^- v^- = A^+ (e_{mc} + \frac{e_d}{2}) + A^- (e_{mc} - \frac{e_d}{2})$$

$$v_s = \frac{A^+ - A^-}{2} e_d + (A^+ + A^-) e_{mc} = A_d e_d + A_{mc} e_{mc}$$

Un amplificateur différentiel est de bonne qualité si $|A_d| \gg |A_{mc}|$, c'est à dire si la tension d'entrée de mode différentiel e_d (signal utile) est beaucoup plus amplifiée que la tension d'entrée de mode commun e_{mc} (signal à rejeter).

2.7 - Gains en tension

a) gain en tension de mode différentiel

Le gain en tension de mode différentiel A_d est le gain en tension relatif à la tension d'entrée de mode différentiel e_d.

$$A_d = \left[\frac{v_s}{e_d}\right]_{e_{mc} = 0}$$

b) gain en tension de mode commun

Le gain en tension de mode commun A_{mc} est le gain en tension relatif à la tensio d'entrée de mode commun e_{mc}.

$$A_{mc} = \left[\frac{v_s}{e_{mc}}\right]_{e_d = 0}$$

c) gain en tension

Le gain en tension A_V d'un amplificateur différentiel est le gain en tension de mod différentiel A_d (l'amplificateur différentiel est supposé de bonne qualité, c'est à dire t que $|A_d| \gg |A_{mc}|$).

2.8 - Taux de réjection de mode commun

Le taux de réjection de mode commun TRMC est la valeur absolue du rapport d gain en tension de mode différentiel A_d sur le gain en tension de mode commun A_{mc}.

$$TRMC = \left|\frac{A_d}{A_{mc}}\right|$$

Un amplificateur différentiel est de bonne qualité si TRMC » 1.

Le taux de réjection de mode commun TRMC est généralement exprimé en dB.

$$TRMC_{dB} = 20 \log TRMC = 20 \log \left|\frac{A_d}{A_{mc}}\right|$$

2.9 - Résistances d'entrée

a) résistance d'entrée de mode différentiel

La résistance d'entrée de mode différentiel R_{ed} est la résistance vue par la tensio d'entrée de mode différentiel e_d.

b) résistance d'entrée de mode commun

La résistance d'entrée de mode commun R_{emc} est la résistance vue par la tensio d'entrée de mode commun e_{mc}.

2.10 - Résistance de sortie

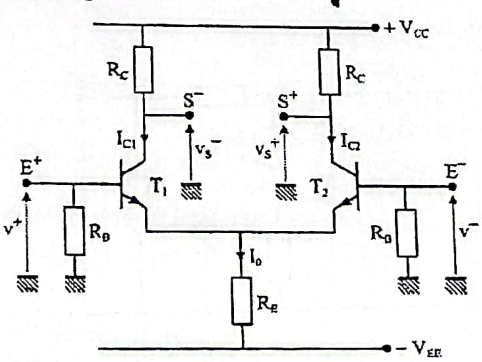
La résistance de sortie R_S est la résistance vue par la résistance de charge R_u.

2.11 - Remarque

L'amplificateur différentiel est souvent utilisé en amplificateur classiqu (amplification d'une seule tension d'entrée) : la tension d'entrée est appliquée sur l'un des deux entrées et l'autre entrée est mise à la masse.

3 - AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL ELEMENTAIRE

3.1 - Schéma du montage



Le montage est symétrique : les deux transistors bipolaires T_1 et T_2 sont identiques et les résistances de même indice sont identiques.

Pour avoir deux transistors bipolaires identiques, il faut utiliser une paire différentielle ou un réseau de transistors bipolaires. Les deux transistors bipolaires, contenus dans un même boitier et réalisés sur un même cristal de silicium, sont parfaitement appairés et leurs températures de jonction sont identiques.

$$\begin{cases} I_{C1} = I_{C2} = I_C \\ \beta_1 = \beta_2 = \beta \\ \theta_{j1} = \theta_{j2} = \theta_j \end{cases}$$

$$I_0 = I_{E1} + I_{E2} \# I_{C1} + I_{C2} = 2I_C$$

3.2 - Réduction de la dérive de la tension de sortie avec le montage symétrique

Valeur de repos de la tension de sortie :

$V_s = V_s^+ - V_s^- = 0$

Influence de la variation des tensions des sources continues d'alimentation :

$+V_{CC}$ varie $\rightarrow$ $\Delta V_s^- = \Delta V_s^+$ $\rightarrow$ $\Delta V_s = \Delta V_s^+ - \Delta V_s^- = 0$

$-V_{EE}$ varie $\rightarrow$ $\Delta V_s^- = \Delta V_s^+$ $\rightarrow$ $\Delta V_s = \Delta V_s^+ - \Delta V_s^- = 0$

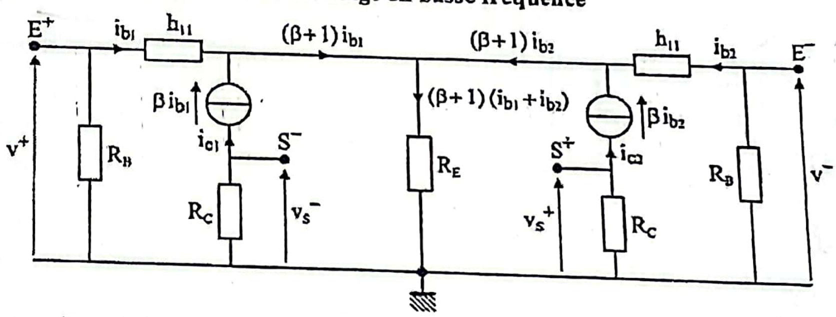
Influence de la variation des températures de jonction des transistors bipolaires :

θ_j varie $\rightarrow$ $\Delta\theta_{j1} = \Delta\theta_{j2}$ $\rightarrow$ $\Delta I_{C1} = \Delta I_{C2}$ $\rightarrow$ $\Delta V_s^- = \Delta V_s^+$

$\rightarrow$ $\Delta V_s = \Delta V_s^+ - \Delta V_s^- = 0$

En fait, la symétrie du montage n'est jamais parfaite : la dérive de la tension de sortie n'est pas nulle, mais elle est très faible.

3.3 - Schéma équivalent du montage en basse fréquence



$$\begin{cases} I_{C1} = I_{C2} = I_C \\ \beta_1 = \beta_2 = \beta \end{cases} \rightarrow \boxed{I_{B1} = I_{B2} = I_B} \rightarrow h_{11_1} = h_{11_2} = h_{11}$$

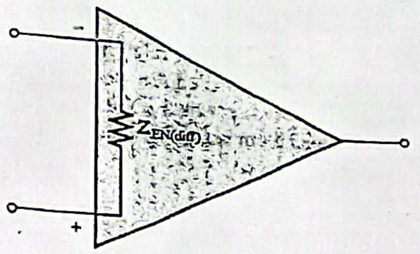
Remarque : le montage vérifie toujours la relation $(\beta + 1)\,R_E \gg h_{11}$.

B —> A

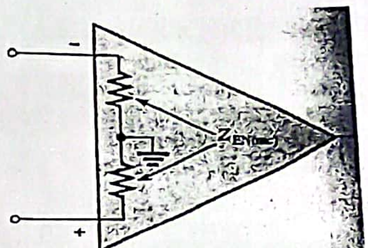
V = A − B

différence de potentiel

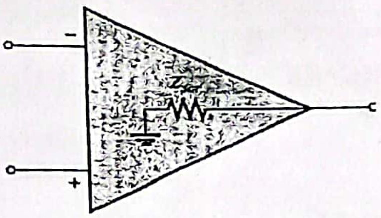
23/11/2



a) Impédance d'entrée différentielle



b) Impédance d'entrée en mode commun



Impédance de sortie d'un ampli-op.

3.4 - Montage symétrique

a) tension de sortie

$$v_s = v_s^+ - v_s^- = -R_c i_{c2} + R_c i_{c1} = -R_c(\beta i_{b2}) + R_c(\beta i_{b1}) = \beta R_c(i_{b1} - i_{b2})$$

$$v^+ - v^- = h_{11} i_{b1} - h_{11} i_{b2} = h_{11}(i_{b1} - i_{b2}) \rightarrow i_{b1} - i_{b2} = \frac{v^+ - v^-}{h_{11}}$$

$$v_s = \beta R_c(i_{b1} - i_{b2}) = \beta R_c \frac{v^+ - v^-}{h_{11}} = \frac{\beta R_c}{h_{11}}(v^+ - v^-)$$

b) gain en tension de mode différentiel et gain en tension de mode commun

$$v_s = \frac{\beta R_c}{h_{11}}(v^+ - v^-) = \frac{\beta R_c}{h_{11}} e_d = A_d e_d + A_{mc} e_{mc}$$

$$A_d = \frac{\beta R_c}{h_{11}} \text{ et } A_{mc} = 0$$

c) taux de réjection de mode commun

$$TRMC = \left| \frac{A_d}{A_{mc}} \right| = \infty$$

En fait, la symétrie du montage n'est jamais parfaite : le taux de réjection de mode commun n'est pas infini, mais il est très grand.

d) résistance d'entrée de mode différentiel

$$e_{mc} = 0 \rightarrow v^- = -v^+ \rightarrow i_{b2} = -i_{b1}$$

$$R_{ed} = (2R_B) \| (2h_{11}) = 2(R_B \| h_{11})$$

mode commun

mode différentielle

n'existe pas dans le montage symétrique

n'est pas parfaite

* $A_d \gg A_{mc}$

→ différentielle

contient le dérivé

$\frac{A_d}{A_{mc}}$ = taux de réjection

23/11/20

$1 R_1$

$\frac{R_1}{2}$

c) résistance d'entrée de mode commun

$$e_d = 0 \rightarrow v^- = v^+ \rightarrow i_{b2} = i_{b1}$$

$$R_{emc} = \frac{R_B}{2} \| \frac{h_{11} + 2(\beta+1)R_E}{2} \# \frac{R_B}{2} \| \beta R_E$$

f) résistance de sortie

$$R_s = 2R_C$$

3.5 - Montage asymétrique (*)

ne sont pas de m̂ référence → la tension doit être de m̂ référence

$V_s = f(v^-, v^+)$

a) tension de sortie

$$v_s = v_s^+ = -R_C i_{c2} = -R_C(\beta i_{b2}) = -\beta R_C i_{b2}$$

$V_s = V_s^+$

$$\begin{cases} v^+ - v^- = h_{11}i_{b1} - h_{11}i_{b2} = h_{11}(i_{b1} - i_{b2}) \\ v^+ = h_{11}i_{b1} + R_E(\beta+1)(i_{b1} + i_{b2}) \end{cases}$$

$v^+ - v^- = f(i_{b2})$

$$\begin{cases} i_{b1} = i_{b2} + \frac{v^+ - v^-}{h_{11}} \\ [h_{11} + (\beta+1)R_E]i_{b1} + (\beta+1)R_E i_{b2} = v^+ \end{cases}$$

$$[h_{11} + (\beta+1)R_E](i_{b2} + \frac{v^+ - v^-}{h_{11}}) + (\beta+1)R_E i_{b2} = v^+$$

$$[h_{11} + 2(\beta+1)R_E]i_{b2} = [1 - \frac{h_{11} + (\beta+1)R_E}{h_{11}}]v^+ + \frac{h_{11} + (\beta+1)R_E}{h_{11}} v^-$$

$$[h_{11} + 2(\beta+1)R_E]i_{b2} = \frac{-(\beta+1)R_E v^+ + [h_{11} + (\beta+1)R_E]v^-}{h_{11}}$$

$$i_{b2} = \frac{-(\beta+1)R_E v^+ + [h_{11} + (\beta+1)R_E]v^-}{h_{11}[h_{11} + 2(\beta+1)R_E]}$$

$$v_s = -\beta R_C i_{b2} = -\beta R_C \frac{-(\beta+1)R_E v^+ + [h_{11} + (\beta+1)R_E]v^-}{h_{11}[h_{11} + 2(\beta+1)R_E]}$$

$$v_s = \beta R_C \frac{(\beta+1)R_E v^+ - [h_{11} + (\beta+1)R_E]v^-}{h_{11}[h_{11} + 2(\beta+1)R_E]}$$

$$v_s \# \beta R_C \frac{v^+ - v^-}{2h_{11}} = \frac{\beta R_C}{2h_{11}}(v^+ - v^-)$$

b) gain en tension de mode différentiel et gain en tension de mode commun

$$v_s = \beta R_C \frac{(\beta+1)R_E v^+ - [h_{11} + (\beta+1)R_E]v^-}{h_{11}[h_{11} + 2(\beta+1)R_E]}$$

23/11/20

$R_1 \| R_1 = \frac{R_1}{2}$

e) résistance d'entrée de mode commun

$e_d = 0 \rightarrow v^- = v^+ \rightarrow i_{b2} = i_{b1}$

$$R_{emc} = \frac{R_B}{2} \| \frac{h_{11} + 2(\beta+1)R_E}{2} \# \frac{R_B}{2} \| \beta R_E$$

f) résistance de sortie

$R_s = 2R_C$

ne sont pas de m̂ référence → la tension doit être de m̂ référence

3.5 - Montage asymétrique (*) $V_s = f(v^-, v^+)$

a) tension de sortie

$V_s = V_s^+$

$$v_s = v_s^+ = -R_C i_{c2} = -R_C(\beta i_{b2}) = -\beta R_C i_{b2}$$

$v^+ - v^- = f(i_{b2})$

$$\begin{cases} v^+ - v^- = h_{11} i_{b1} - h_{11} i_{b2} = h_{11}(i_{b1} - i_{b2}) \\ v^+ = h_{11} i_{b1} + R_E(\beta+1)(i_{b1} + i_{b2}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{b1} = i_{b2} + \frac{v^+ - v^-}{h_{11}} \\ [h_{11} + (\beta+1)R_E] i_{b1} + (\beta+1)R_E i_{b2} = v^+ \end{cases}$$

$$[h_{11} + (\beta+1)R_E](i_{b2} + \frac{v^{-} - v}{h_{11}}) + (\beta+1)R_E i_{b2} = v^+$$

$$[h_{11} + 2(\beta+1)R_E] i_{b2} = [1 - \frac{h_{11} + (\beta+1)R_E}{h_{11}}] v^+ + \frac{h_{11} + (\beta+1)R_E}{h_{11}} v^-$$

$$[h_{11} + 2(\beta+1)R_E] i_{b2} = \frac{-(\beta+1)R_E v^+ + [h_{11} + (\beta+1)R_E] v^-}{h_{11}}$$

$$i_{b2} = \frac{-(\beta+1)R_E v^+ + [h_{11} + (\beta+1)R_E] v^-}{h_{11}[h_{11} + 2(\beta+1)R_E]}$$

$$v_s = -\beta R_C i_{b2} = -\beta R_C \frac{-(\beta+1)R_E v^+ + [h_{11} + (\beta+1)R_E] v^-}{h_{11}[h_{11} + 2(\beta+1)R_E]}$$

$$v_s = \beta R_C \frac{(\beta+1)R_E v^+ - [h_{11} + (\beta+1)R_E] v^-}{h_{11}[h_{11} + 2(\beta+1)R_E]}$$

$$v_s \# \beta R_C \frac{v^+ - v^-}{2h_{11}} = \frac{\beta R_C}{2h_{11}}(v^+ - v^-)$$

b) gain en tension de mode différentiel et gain en tension de mode commun

$$v_s = \beta R_C \frac{(\beta+1)R_E v^+ - [h_{11} + (\beta+1)R_E] v^-}{h_{11}[h_{11} + 2(\beta+1)R_E]}$$

différence entre
mc et asym

remplacée

$$v_s = \beta R_C \frac{(\beta+1)R_E\left(e_{mc} + \frac{e_d}{2}\right) - [h_{11} + (\beta+1)R_E]\left(e_{mc} - \frac{e_d}{2}\right)}{h_{11}[h_{11} + 2(\beta+1)R_E]}$$

$$v_s = \beta R_C \frac{[h_{11} + 2(\beta+1)R_E]\frac{e_d}{2} - h_{11}e_{mc}}{h_{11}[h_{11} + 2(\beta+1)R_E]} = \frac{\beta R_C}{2h_{11}} e_d - \frac{\beta R_C}{h_{11} + 2(\beta+1)R_E} e_{mc}$$

$$v_s \cong \frac{\beta R_C}{2h_{11}} e_d - \frac{R_C}{2R_E} e_{mc} = A_d e_d + A_{mc} e_{mc}$$

$$A_d = \frac{\beta R_C}{2h_{11}} \text{ et } A_{mc} = -\frac{R_C}{2R_E}$$

v^+

v^-

c) taux de réjection de mode commun

$$TRMC = \left|\frac{A_d}{A_{mc}}\right| = \left|\frac{\frac{\beta R_C}{2h_{11}}}{-\frac{R_C}{2R_E}}\right| = \frac{\beta R_E}{h_{11}}$$

tangente à l'abscisse si on augmente R_E → le pt de fct perd

tension de sortie

d) résistance d'entrée de mode différentiel

$$e_{mc} = 0 \rightarrow v^- = -v^+ \rightarrow i_{b2} = -i_{b1}$$

$$R_{ed} = (2R_B) \| (2h_{11}) = 2(R_B \| h_{11})$$

v^+ v^-

f) résistance de sortie

$$R_s = R_C$$

g) autre tension de sortie possible

$$v_s^- = -R_C i_{c1} = -R_C(\beta i_{b1}) = -\beta R_C i_{b1}$$

$$i_{b1} = i_{b2} + \frac{v^+ - v^-}{h_{11}} = \frac{-(\beta+1)R_E v^+ + [h_{11} + (\beta+1)R_E]v^-}{h_{11}[h_{11} + 2(\beta+1)R_E]} + \frac{v^+ - v^-}{h_{11}}$$

$$i_{b1} = \frac{-(\beta+1)R_E v^+ + [h_{11} + (\beta+1)R_E]v^- + [h_{11} + 2(\beta+1)R_E](v^+ - v^-)}{h_{11}[h_{11} + 2(\beta+1)R_E]}$$

$$i_{b1} = \frac{[h_{11} + (\beta+1)R_E]v^+ - (\beta+1)R_E v^-}{h_{11}[h_{11} + 2(\beta+1)R_E]}$$

$$v_s^- = -\beta R_C i_{b1} = -\beta R_C \frac{[h_{11}+(\beta+1)R_E]v^+ - (\beta+1)R_E v^-}{h_{11}[h_{11}+2(\beta+1)R_E]}$$

$$v_s^- \# -\beta R_C \frac{v^+ - v^-}{2h_{11}} = -\frac{\beta R_C}{2h_{11}}(v^+ - v^-) = -v_s^+$$

I) détermination approchée des deux tensions de sortie possibles

Pour déterminer de manière approchée les deux tensions de sortie possibles, il faut utiliser le résultat du montage symétrique et le fait que les deux tensions de sortie sont quasi-opposées.

$$\begin{cases} v_s^+ - v_s^- = \dfrac{\beta R_C}{h_{11}}(v^+ - v^-) \\ v_s^- \# -v_s^+ \end{cases} \rightarrow \begin{cases} v_s^+ \# \dfrac{\beta R_C}{2h_{11}}(v^+ - v^-) \\ v_s^- \# -\dfrac{\beta R_C}{2h_{11}}(v^+ - v^-) \end{cases}$$

...sistor est actif

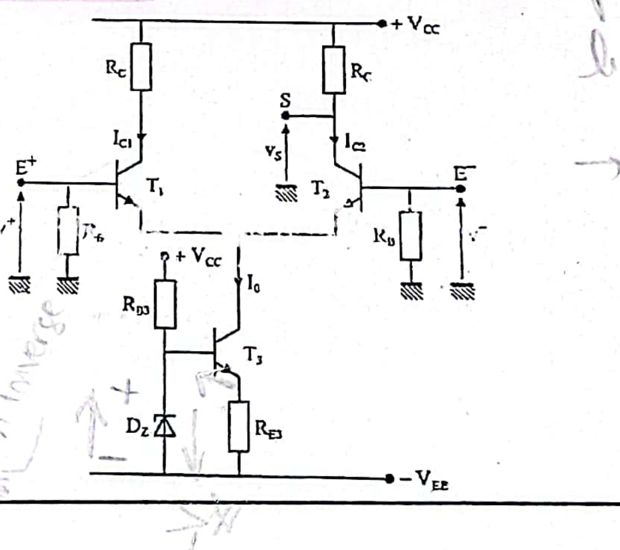
3.6 - Augmentation du taux de réjection de mode commun du montage asymétrique

a) principe

Pour obtenir un grand taux de réjection de mode commun, il faudrait une grande résistance d'émetteur R_E et par conséquent une grande source de tension continue négative $-V_{EE}$ pour ne pas modifier le courant I_0.

La résistance d'émetteur R_E est donc remplacée par une source de courant continu I_0 dont la résistance de sortie R_0 est très grande.

b) amplificateur différentiel discret



...ur le courant tout en augmentant V_E

On augmente R_E

Dans polarisation inverse

pour composer le pt de fct → polarisation on augmente l'energie (je ne peut pas)

1

$$v_s^- = -\beta R_C i_{b1} = -\beta R_C \frac{[h_{11}+(\beta+1)R_E]v^+ - (\beta+1)R_E v^-}{h_{11}[h_{11}+2(\beta+1)R_E]}$$

$$v_s^- \# -\beta R_C \frac{v^+ - v^-}{2h_{11}} = -\frac{\beta R_C}{2h_{11}}(v^+ - v^-) = -v_s^+$$

II) détermination approchée des deux tensions de sortie possibles

Pour déterminer de manière approchée les deux tensions de sortie possibles, il faut utiliser le résultat du montage symétrique et le fait que les deux tensions de sortie sont quasi-opposées.

$$\begin{cases} v_s^+ - v_s^- = \dfrac{\beta R_C}{h_{11}}(v^+ - v^-) \\ v_s^- \# -v_s^+ \end{cases} \rightarrow \begin{cases} v_s^+ \# \dfrac{\beta R_C}{2h_{11}}(v^+ - v^-) \\ v_s^- \# -\dfrac{\beta R_C}{2h_{11}}(v^+ - v^-) \end{cases}$$

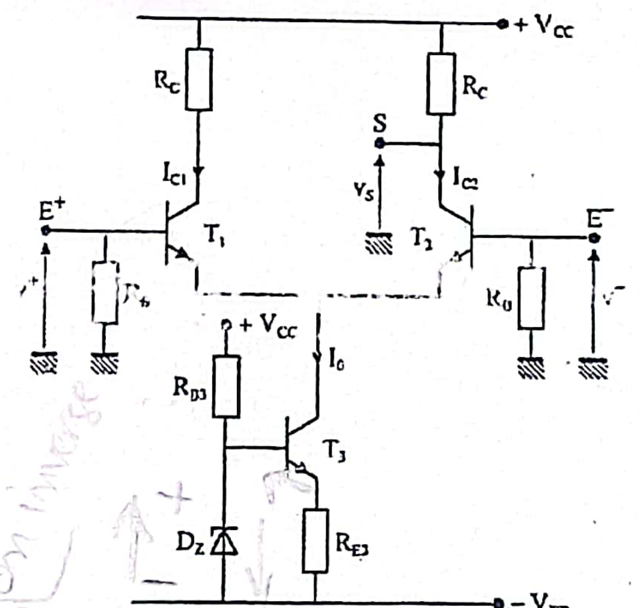
3.6 - Augmentation du taux de réjection de mode commun du montage asymétrique

a) principe

Pour obtenir un grand taux de réjection de mode commun, il faudrait une grande résistance d'émetteur R_E et par conséquent une grande source de tension continue négative $-V_{EE}$ pour ne pas modifier le courant I_0.

La résistance d'émetteur R_E est donc remplacée par une source de courant continu I_0 dont la résistance de sortie R_0 est très grande.

b) amplificateur différentiel discret



pour composer le pt de fct → polarisation on augmente (gêne pe