

## Les amplificateurs différentiels

### 8.1 Définition

L'amplificateur différentiel est un circuit qui permet d'amplifier une différence de tension  $v_1 - v_2$ .

Si le principe des amplificateurs différentiels est connu depuis longtemps, ils ne sont utilisés de manière courante que depuis l'apparition de l'électronique intégrée qui permet de fabriquer facilement des transistors identiques

### 8.2 Principe

Un amplificateur différentiel, *figure 8.1*, comporte deux entrées et une ou deux sorties. Son symbole est un triangle à deux entrées et une sortie, une entrée dit inverseuse  $v_1$  car présence d'un signe moins et l'autre dit non inverseuse  $v_2$  car présence d'un signe plus.

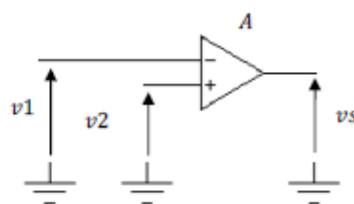


Figure 8.1

L'amplificateur différentiel comme n'importe quel amplificateur, présente une impédance d'entrée  $Z_e$  et une impédance de sortie  $Z_s$ , figure 8.2.

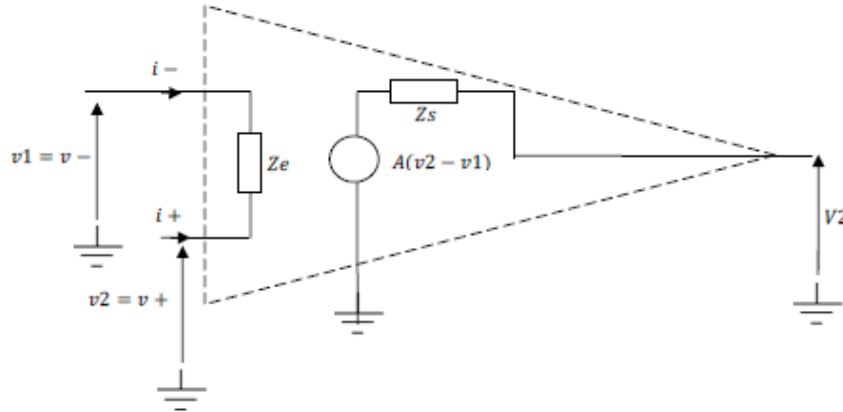


Figure 8.2

Un amplificateur différentiel idéal (parfait) présente une impédance d'entrée infinie et une impédance de sortie nulle, dans ce cas il est appelé ampli opérationnel.

Si  $A$  est le gain en tension de l'amplificateur différentiel idéal, on a à la sortie :

$$v_s = A(v_2 - v_1) \quad (8.1)$$

D'où dans les calculs, on prend les courants qui entrent dans l'amplificateur opérationnel nuls,

$$i_- = i_+ = 0.$$

Et les tensions

$$v_- \cong v_+ \quad (8.2)$$

### 8.3 Exemple d'amplificateurs différentiels parfait ou ampli opérationnel

#### 8.3.1 Le montage inverseur

A la figure 8.3 présente le montage inverseur, on veut calculer son gain en tension  $A_v = \frac{v_s}{V_e}$

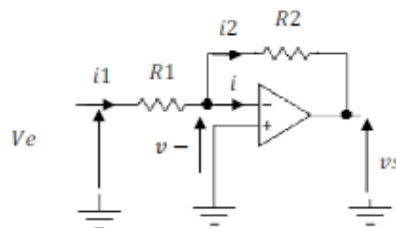


Figure 8.3

A l'entrée, on a

$$V_e = R1 i1 + v_- \quad (8.3)$$

Des équations (8.2) on a  $v_- = v_+$  or  $v_+ = 0$  car le plus de l'amplificateur est à la masse

Donc dans ce cas  $v_- = v_+ = 0$

L'équation (8.3) devient :

$$V_e = R1 i1 \quad (8.4)$$

A la sortie, on a

$$V_s = -R2 i2 + v_-$$

Or  $v_- = 0$  donc

$$V_s = -R2 i2 \quad (8.5)$$

Pourquoi le signe moins dans  $-R2 i2$  car dans la figure 8.3,  $i2$  a le même sens que  $V_s$   
 Dans cette même figure 8.3, on a

$$i1 = i2 + i$$

Or le courant  $i = i_-$  et d'après l'équation (8.3) on a  $i_- = i_+ = 0 \Rightarrow i = 0$

D'où  $i1 = i2$  et  $V_s = -R2 i1$

$$Av = \frac{V_s}{V_e} = \frac{-R2 i1}{R1 i1} = -\frac{R2}{R1} \quad (8.6)$$

Il y'a présence d'un signe moins dans le gain  $Av$ , on dit que c'est un amplificateur inverseur.

### 8.3.2 Le montage non inverseur

Ce montage est présenté à la figure 8.4.

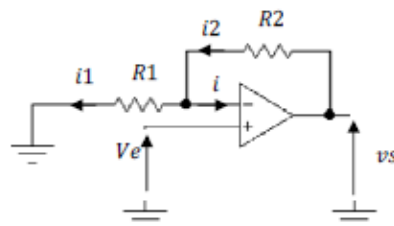


Figure 8.4

Le gain en tension  $Av = \frac{V_s}{V_e}$ .

Comme le cas précédant on a  $i1 = i2$  car  $i = 0$

On a 
$$V_s = R_2 i_2 + R_1 i_1 = (R_1 + R_2) i_2 \quad (8.7)$$
  
 On voit dans la figure 8.4 que  $V_e$  est appliquée à l'entrée non inverseuse(+) donc  $V_e = v_+$

On voit aussi que la résistance  $R_1$  est branchée entre l'entrée inverseuse (-) et la masse donc la tension aux bornes de  $R_1$  est  $R_1 i_1 = v_-$

Or d'après l'équation (8.2)  $v_- \cong v_+ \implies R_1 i_1 \cong V_e \quad (8.8)$

D'où 
$$A_v = \frac{V_s}{V_e} = \frac{(R_1+R_2)i_2}{R_1 i_1} = \frac{R_1+R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (8.9)$$

$A_v$  est positif et très supérieur à un car  $R_2 \gg R_1$ . C'est pour ça que le montage de la figure 8.4 est appelé amplificateur non inverseur.

### 8.3.3 Le montage suiveur de tension

Ce montage est présenté à la figure 8.5

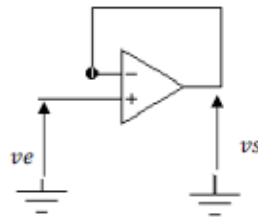


Figure 8.5

On constate directement que :

$V_e = v_+$  et  $V_s = v_-$  or  $v_+ = v_- \implies V_s = V_e \quad (8.10)$

On dit que la sortie  $V_s$  suit  $V_e$  et le montage est appelé suiveur de tension.

## 8.4 Modes de l'amplification

La tension de sortie d'un amplificateur différentiel réel est également fonction de la somme des tensions d'entrée et de ce fait l'équation (8.1) se transforme en :

$$v_s = A_d (v_2 - v_1) + \frac{1}{2} A_c (v_2 + v_1) \quad (8.11)$$

$A_d$  est appelé gain différentiel.

$A_c$  est appelé gain de mode commun.

## 8.5 Amplificateur différentiel à transistors bipolaires

Le modèle réel d'un amplificateur différentiel à transistors bipolaires peut être représenté par la figure 8.6.

Les transistors utilisés fonctionnent dans le régime des signaux faibles et en basses fréquences.

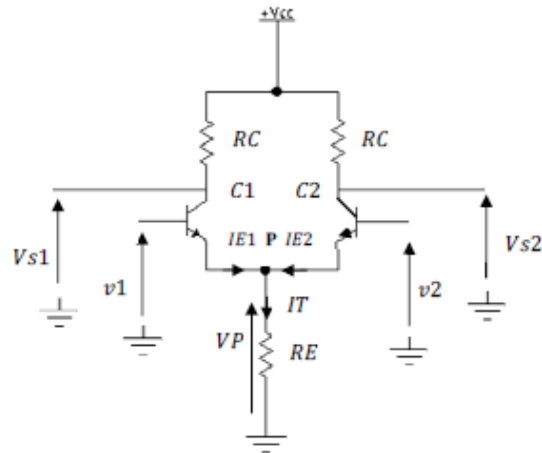


Figure 8.6

### 8.5.1 Etude statique

Les tensions aux bases des transistors en continu sont choisies égales  $\frac{V_{CC}}{2}$  donc La tension au point P,

$$V_P = \frac{V_{CC}}{2} - 0.7 \text{ Volt} \quad (8.12)$$

$$\Rightarrow I_T = V_P / R_E \quad (8.13)$$

Le courant  $I_T$  est appelé courant de trainé.

Les transistors étant identiques et sont polarisés par les mêmes valeurs des résistances  $R_C$  et avec la même résistance d'émetteur  $R_E$ , alors :

$$I_{E1} = I_{E2} = I_T / 2 \quad (8.14)$$

Soit  $V_{C1}$  la tension au collecteur  $C1$  de  $T1$  et  $V_{C2}$  la tension au collecteur  $C2$  de  $T2$ , donc

$$V_{CC} = R_C I_{C1} + V_{C1}$$

ET

$$V_{CC} = R_C I_{C2} + V_{C2}$$

$$\text{Or } IC1 = IC2 \quad \Rightarrow \quad VC1 = VC2 \quad (8.15)$$

Donc la tension continu entre les collecteurs des transistors  $C1$  et  $C2$  est égale  $VC1 - VC2$  est nulle.

### 8.5.2 Etude dynamique

On fait le schéma équivalent en alternatif de la figure 8.6, pour simplifier on suppose que  $h_{22}^{-1} = \infty$ , donc on l'enlève du schéma équivalent de chaque transistor dans la figure 8.7. Puisque les transistors sont identiques donc  $\beta_1 = \beta_2 = \beta$  et  $h_{11T1} = h_{11T2} = h_{11}$

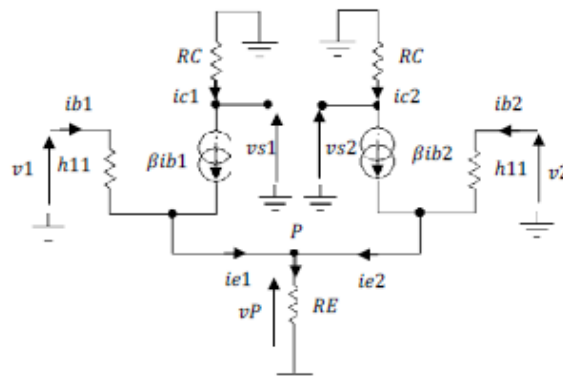


Figure 8.7

### 8.5.3 Calcul de gain différentiel et de gain en mode commun

On Calcul la tension  $vs1$

$$vs1 = -RC \beta ib1 \quad (1)$$

$$vP = RE(ie1 + ie2) = RE((\beta + 1)ib1 + (\beta + 1)ib2) = RE(\beta + 1)(ib1 + ib2)$$

$$v1 = h_{11} ib1 + vP$$

$$v2 = h_{11} ib2 + vP$$

$$\Rightarrow v1 - v2 = h_{11}(ib1 - ib2)$$

$$\Rightarrow (ib1 - ib2) = \frac{v1 - v2}{h_{11}} \quad (2)$$

$$v1 + v2 = h_{11}(ib1 + ib2) + 2vP = h_{11}(ib1 + ib2) + 2RE(\beta + 1)(ib1 + ib2) =$$

$$(h_{11} + 2RE(\beta + 1))(ib1 + ib2) \Rightarrow (ib1 + ib2) = \frac{v1 + v2}{h_{11} + 2RE(\beta + 1)} \quad (3)$$

$$(2)+(3) \Rightarrow ib1 = \frac{1}{2} \frac{v1-v2}{h11} + \frac{1}{2} \frac{v1+v2}{h11+2RE(\beta+1)} \quad (4)$$

$$(1) + (4) \Rightarrow vs1 = -RC \beta ib1 =$$

$$vs1 = -RC \beta \left( \frac{1}{2} \frac{v1-v2}{h11} + \frac{1}{2} \frac{v1+v2}{h11+2RE(\beta+1)} \right) =$$

$$vs1 = -\frac{1}{2} \frac{RC \beta}{h11} (v1 - v2) - \frac{1}{2} \frac{RC \beta}{h11+2RE(\beta+1)} (v1 + v2) \quad (8.16)$$

De la même manière on obtient :

$$vs2 = -\frac{1}{2} \frac{RC \beta}{h11} (v2 - v1) - \frac{1}{2} \frac{RC \beta}{h11+2RE(\beta+1)} (v1 + v2) \quad ((8.17)$$

En identifiant (8.17) avec (8.11), on obtient

$$\text{Le gain différentiel} \quad Ad = -\frac{1}{2} \frac{RC \beta}{h11} \quad (8.17)$$

$$\text{Et le gain de mode commun} \quad Ac = -\frac{1}{2} \frac{RC \beta}{h11+2RE(\beta+1)} \quad (8.18)$$

#### 8.5.4 Calcul de la tension de sortie différentielle (entre les deux collecteurs $vs2 - vs1$ )

Des équations (8.17) et (8.16), on trouve

$$vs2 - vs1 = -\frac{RC \beta}{h11} (v2 - v1) \quad (8.19)$$

Donc la sortie entre les deux collecteurs nous permet d'avoir une amplification purement différentielle. Cette connexion entre les deux collecteurs est très utilisée dans les amplificateurs de puissance pour sonorisation et dans les amplificateurs d'instrumentations et dans toute liaison à entrée/sortie flottante (sans la masse).

#### 8.5.5 Amplificateur à gain en mode commun nul

Un amplificateur différentiel est meilleur si  $Ac = 0$ , donc pour cela il faut que  $RE$  soit infinie dans l'équation (8.18) car  $h11$  et  $\beta$  sont des caractéristiques du transistors et on ne peut pas les modifier.

Une solution pour avoir  $Ac = 0$  est de remplacer la résistance  $RE$  par un générateur de courant, *figure 8.9a*. Pour réaliser ce générateur de courant on utilise un transistor dont le courant émetteur est stabilisé par 2 diodes, *figure 8.9b*.

La résistance  $RB$  sert pour polariser le transistor à travers  $VCC$ .

Dans la *figure 8.10* on peut calculer facilement  $IT = IC \cong IE$  donc

$$1.2 = VBE + RE2 IT$$

$$\text{Or en fonctionnement normal } VBE = 0.6\text{Volt} \Rightarrow IT = \frac{0.6}{RE2}$$

Puisque la résistance  $RE2$  a une valeur finie donc  $IT$  peut être considéré comme un générateur de courant constant. Dans ce cas le gain en mode commun est nul.

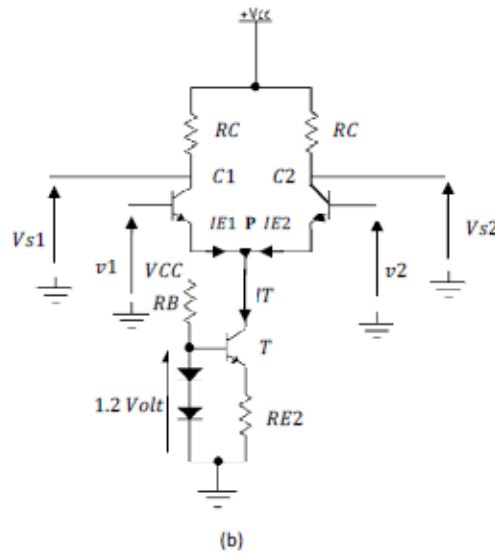
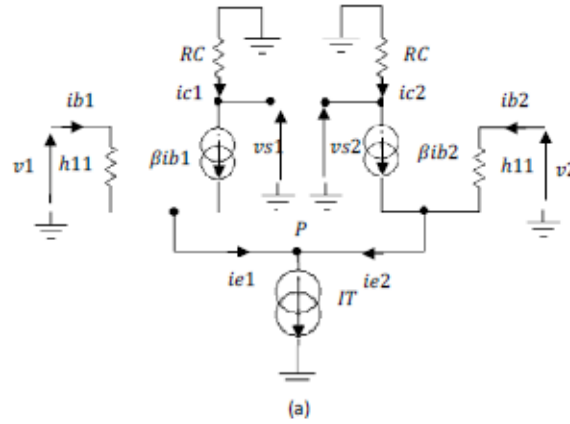


Figure 8.9

### 8.5.6 Exercice d'application

Soit la figure 8.9, on donne  $h_{22T1} = h_{22T2} = 0$ ,  $re'T1=re'T2=re'$ ,  $\beta_{ccT1} = \beta_{ccT2} = \beta_{cc}$ ,  $R1 = R3$ ,  $RB1 = RB4$ ,  $RB2 = RB3$ ,  $RE1 = RE2$  et le gain dans l'AOP est  $-A1$ .  $C1$  condensateur de couplage,  $C2, C3, C4$  condensateurs de découplage. En fait l'OP de gain  $-A1$  est un étage différentiel suivi d'un transistor d'attaque.



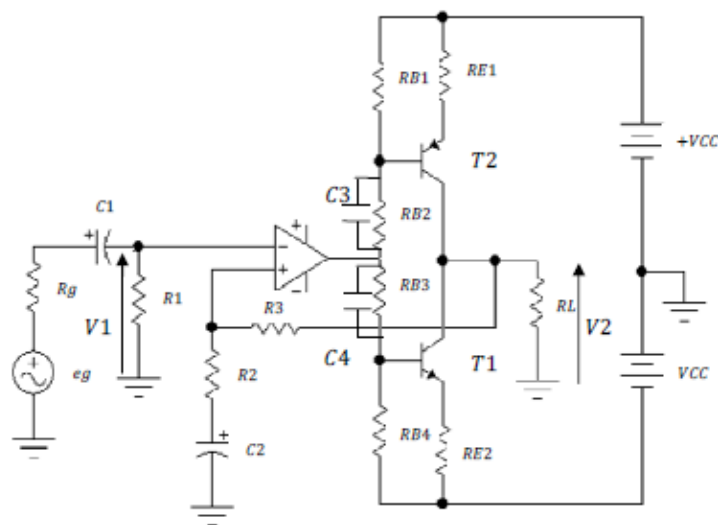


Figure 8.9

- 1) Quels sont les types d'amplificateurs utilisés ?
- 2) Quelle est le type de réaction utilisé ?
- 3) Calculer  $A = V_s/V_e$
- 4) Calculer la résistance d'entrée et la résistance de sortie de tout le montage.
- 5) Calculer la puissance de sortie  $P_s$ .

Sol :

- 1) Les 2 transistors  $T1$  et  $T2$  constituent l'étage de puissance d'un amplificateur classe B à émetteur commun.  
L'amplificateur opérationnel A.O est monté en amplificateur différentiel.
- 2) C'est une réaction série parallèle.
- 3) Pour calculer  $V2/V1$  on doit faire le schéma équivalent en alternatif.  
Donc tous les condensateurs se comportent comme des courts-circuits à la fréquence de travail et les 2 tensions  $VCC$  seront à la masse. Puisque les 2 transistors sont montés en amplificateur classe B donc un seul transistor conduit et l'autre est bloqué dans chaque alternance du signal d'entrée  $eg$ .  
On choisi  $T1$  conduit et  $T2$  bloqué d'où le schéma de la figure 8.10a. En remplaçant le transistor par son schéma équivalent en alternatif, on obtient le schéma de la figure 9.10b.  
Les résistances  $RB2$  et  $RB3$  sont court-circuitées en alternatif par les condensateurs  $C3$  et  $C4$  respectivement. Le transistor  $T2$  étant bloqué donc aucun courant alternatif ne circule dans la résistance  $RE2$  donc on les supprime du schéma en alternatif.  
On pose  $rb = RB1//RB4$

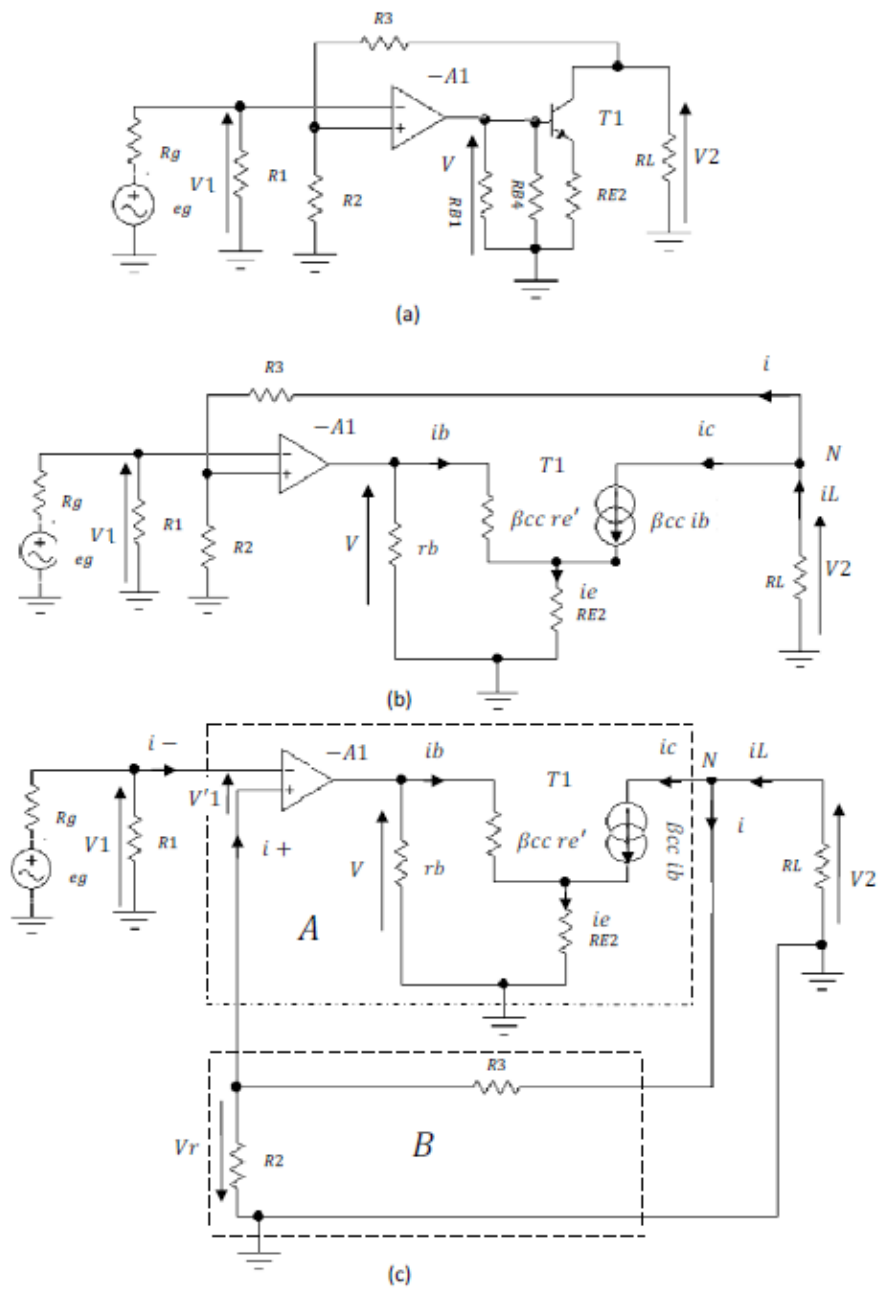


Figure 9.10

Pour bien montrer la réaction on arrange le schéma de la *figure 9.10b*, on obtient celui de la *figure 9.10c*. Donc c'est bien une réaction série parallèle ou réaction de tension.

On pose

$$A_V = \frac{V_2}{V_1} = A' = \frac{A}{1-AB}$$

- Calcul de  $B = \frac{V_r}{V_2}$

Puisque  $i_- = i_+ = 0$ , en appliquant le diviseur de tension sur  $R_2$ , on a donc :

$$\begin{aligned} -V_r &= \frac{R_2}{R_2 + R_3} V_2 \\ \Rightarrow B &= \frac{V_r}{V_2} = -\frac{R_2}{R_2 + R_3} \end{aligned}$$

- Calcul de  $A = \frac{V_2}{V_1}$

Le gain  $A$  est le produit entre le gain de l'amplificateur opérationnel ( $-A_1$ ) et le gain de l'amplificateur de puissance classe B  $A_2$ , car :

$$A = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V}{V_1} \frac{V_2}{V} = -A_1 A_2$$

$-A_1 = \frac{V}{V_1}$  est donné dans l'énoncé mais on doit calculer  $A_2 = \frac{V_2}{V}$

Les transistors  $T_1$  et  $T_2$  sont montés en amplificateurs de puissance à émetteur commun:

$$\begin{aligned} i_c &= \beta_{cc} i_b \\ i_e &= (\beta_{cc} + 1) i_b \end{aligned}$$

A l'entrée du transistor  $T_1$  on a :

$$\begin{aligned} V &= \beta_{cc} r_{e'} i_b + R_E i_e = \beta_{cc} r_{e'} i_b + R_E (\beta_{cc} + 1) i_b \\ &= (\beta_{cc} r_{e'} + R_E (\beta_{cc} + 1)) i_b \end{aligned}$$

A la sortie du transistor  $T_1$  on a :

$$V_2 = -R_L i_L$$

Au nœud  $N$  on a ;  $i_L = i_c + i \Rightarrow i_c = i_L - i$ , le courant  $i_L \gg i$  car un étage de puissance classe B délivre un fort courant à la charge  $R_L$ , d'où ;

$$i_c \cong i_L$$

Donc

$$V_2 = -R_L i_c = -R_L \beta_{cc} i_b \Rightarrow A_2 = \frac{V_2}{V} = \frac{-R_L \beta_{cc} i_b}{(\beta_{cc} r_{e'} + R_E (\beta_{cc} + 1)) i_b}$$

$$= \frac{-RL \beta_{cc}}{\beta_{cc} r_{e'} + RE(\beta_{cc} + 1)} = -\frac{RL}{r_{e'} + RE \frac{\beta_{cc} + 1}{\beta_{cc}}} \cong -\frac{RL}{r_{e'} + RE}$$

$$\Rightarrow \text{Le gain } A = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V}{V_1} \frac{V_2}{V} = (-A_1) A_2 = A_1 \frac{RL}{r_{e'} + RE}$$

Le gain total est donc

$$\begin{aligned} A_v = A' &= \frac{V_2}{V_1} = \frac{A}{1 - AB} = \frac{A_1 \frac{RL}{r_{e'} + RE}}{1 - \left( A_1 \frac{RL}{r_{e'} + RE} \right) \left( -\frac{R_2}{R_2 + R_3} \right)} \\ &= \frac{A_1 RL}{r_{e'} + RE + A_1 RL \frac{R_2}{R_2 + R_3}} = \frac{A_1 RL}{A_1 RL \frac{R_2}{R_2 + R_3} + (r_{e'} + RE)} \\ &= \frac{1}{\frac{R_2}{R_2 + R_3} + \frac{r_{e'} + RE}{A_1 RL}} \end{aligned}$$

4) Calcul de la résistance d'entrée

Puisque on a une réaction série de tension  $R'e = Re(1 - AB)$

La résistance d'entrée  $Re$  est la résistance à l'entrée de l'A.O donc est  $Re = R_1$

$$\begin{aligned} R'e &= R_1(1 - AB) = R_1 \left( 1 - \left( A_1 \frac{RL}{r_{e'} + RE} \right) \left( -\frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) \right) \\ &= R_1 \left( 1 + A_1 \frac{RL}{r_{e'} + RE} \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) \end{aligned}$$

5) Calcul de la résistance de sortie

De même puisque on a une réaction série de tension on a  $R's = \frac{R_s}{1 - AB}$

La résistance de sortie  $R_s$  est la résistance de sortie de l'étage de puissance, donc de l'amplificateur de puissance classe B.

Pour cela, on utilise le même principe que celui 2.2.3 en appliquant le théorème de Thevenin. On enlève la charge  $RL$ , on annule le générateur de tension  $eg$  et on applique à la place de  $RL$  un générateur de tension qui délivre la même tension  $V_s$ .

Puisque le générateur de courant  $\beta_{cc} i_b$  présente une résistance interne  $\rho = h_{22}^{-1} = \infty$ , donc ;

$R_s = \infty$  et par suite  $R's = \infty$

### Exercice

- 1) Expliquer le rôle de chaque partie dans le schéma suivant.
- 2) Calculer les courants dans chaque nœud et les tensions en chaque point.
- 3) Calculer la puissance de sortie et en déduire le rendement.

