

1^{PREMIERE PARTIE : ETUDE D'UN MIROIR DE COURANT}

On considère le schéma de la figure 1 qui utilise trois transistors intégrés PNP identiques, à la même température $T = 25\text{ °C}$ et tels que :

Gain en courant	Résistance r_{ce} de T_1 et T_3	Résistance r_{ce2} de T_2
$\beta_p = 50$	$r_{ce} = r_{ce1} = r_{ce3} = \text{infinie}$	$r_{ce2} = 200\text{k}\Omega$

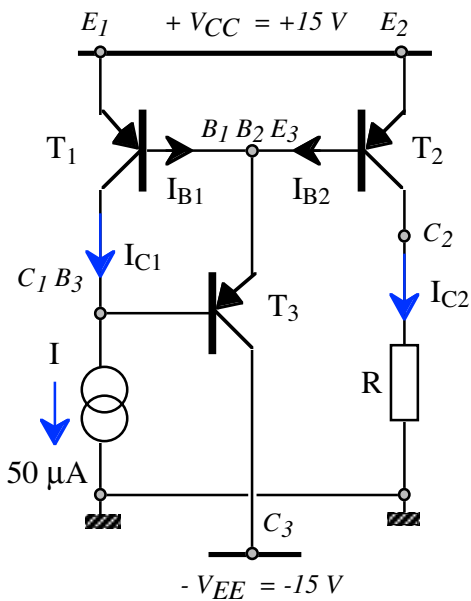


Figure 1

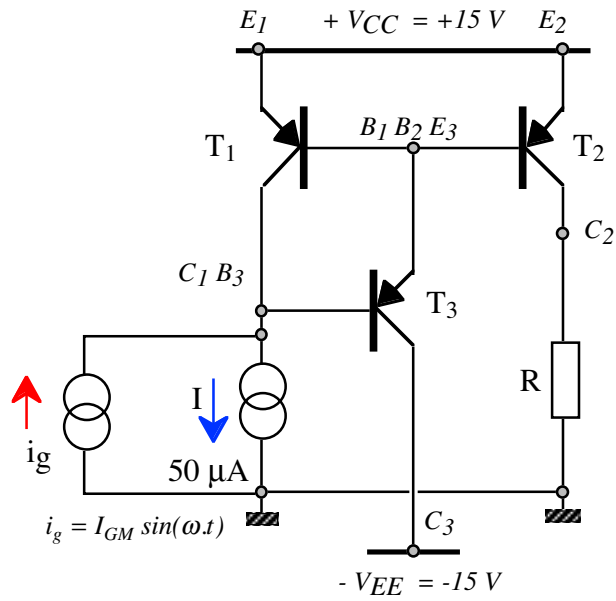


Figure 2

La figure 1 représente le schéma d'un miroir de courant amélioré dont l'entrée reçoit un générateur de courant continu I de $50\mu\text{A}$. La sortie est chargée par une résistance R . L'analyse du montage montre que les transistors T_1 et T_2 ont la même tension continue V_{BE} . Par conséquent, les courants de repos de collecteur I_{C1} de T_1 et I_{C2} de T_2 sont rigoureusement égaux.

1. Pour montrer que ce montage est un miroir de courant performant, déterminer, sans approximations, la relation liant les courants continus I_{C2} et I en fonction du gain en courant β_p des transistors. Faire l'application numérique.

On excite maintenant le montage par un générateur de courant sinusoïdal $i_g = I_{GM} \sin(\omega.t)$, d'amplitude faible et de fréquence moyenne. Comme le montre la figure 2, le courant i_g va provoquer des variations autour du courant de repos I .

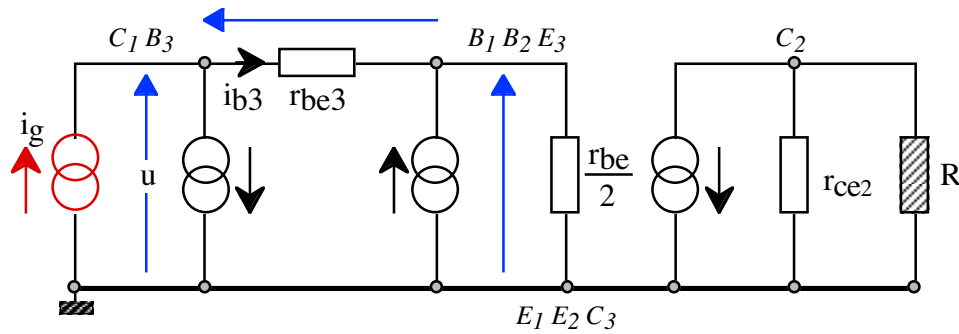


Figure 3

Le schéma équivalent incomplet du montage de la figure 2, aux variations et aux fréquences moyennes est donné en figure 3.

2. On a choisi de représenter T_1 et T_2 par le schéma en « $g_m \cdot v_{be}$ » et T_3 par le schéma en « $\beta_p \cdot i_{b3}$ ». Remarque : dans ce schéma, le générateur de courant continu I a disparu. En effet, sa variation étant nulle, il se comporte alors comme un circuit ouvert.
Compléter le schéma de la figure 3 en indiquant les noms manquants, des potentiels et des générateurs de courant dépendants.
3. Montrer que la relation liant la résistance r_{be3} de T_3 à la résistance $r_{be} = r_{be1} = r_{be2}$ de T_1 et T_2 est telle que : $r_{be3} \approx \frac{\beta_p}{2} r_{be}$.
4. Exprimer la tension v_{be} commune à T_1 et T_2 en fonction du courant i_{b3} et montrer que la tension v_{be3} du transistor T_3 est égale à la tension v_{be} commune à T_1 et T_2 .
5. Calculer l'expression, en fonction de g_m et de β_p , de la résistance d'entrée aux variations R_{em} du miroir de courant, vu par le générateur de courant sinusoïdal i_g entre C_1 et la masse.
6. Donner la forme approchée de la résistance d'entrée R_{em} en fonction de la transconductance g_m de T_1 et T_2 . Faire l'application numérique.
7. Compte tenu de l'expression approchée de la résistance R_{em} , déterminer en fonction du générateur de courant i_g , l'expression du générateur de courant dépendant ($g_m \cdot v_{be}$) de T_2 . Ce résultat était-il prévisible ?
8. Déterminer, en utilisant la méthode de l'ohmmètre, l'expression de la résistance de sortie R_s du miroir vu par la résistance R entre C_2 et la masse. Faire l'application numérique.

DEUXIEME PARTIE : AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL A CHARGE ACTIVE

On considère maintenant en figure 4, un montage différentiel asymétrique à charge active. La charge active est réalisée par le miroir de courant précédent, placée dans les collecteurs C_4 et C_5 des transistors NPN identiques T_4 et T_5 .

A la température T de 25°C , les transistors T_4 et T_5 ont le même gain en courant $\beta_n = 100$ et une résistance r_{ce} infinie.

- L'amplificateur différentiel est polarisé par une source de courant continue I_0 possédant aux variations, une résistance interne R_i infinie.
- L'entrée de l'amplificateur différentiel est excitée par une tension différence sinusoïdale $v_e = v_{e1} - v_{e2}$, d'amplitude faible, de façon à assurer la linéarité du montage.

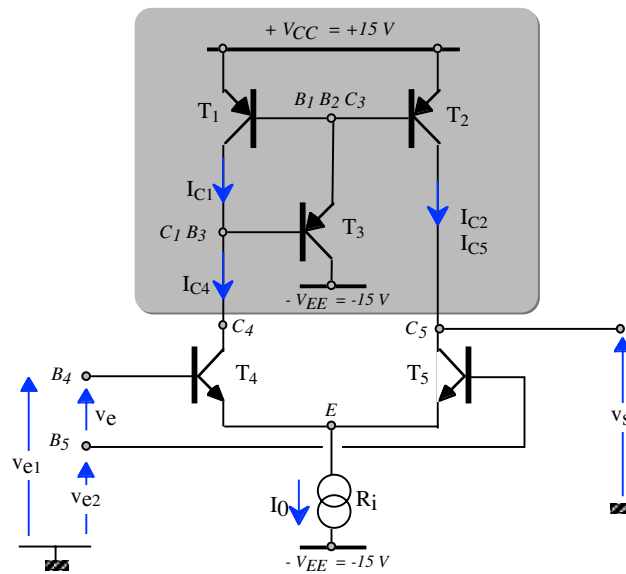


Figure 4

9. On se place en régime de repos où les bases B_4 et B_5 sont réunies à la masse. Montrer que le miroir de courant assure des courants continus identiques pour les deux transistors T_4 et T_5 . Calculer la valeur du générateur I_0 pour avoir $I_{C4} = I_{C5} = 50 \mu\text{A}$.

On donne en figure 5, le schéma équivalent incomplet aux petites variations du montage.

On remarquera que le générateur dépendant ($\beta_n \cdot i_{b4}$) joue le rôle du générateur i_g de la figure 3.

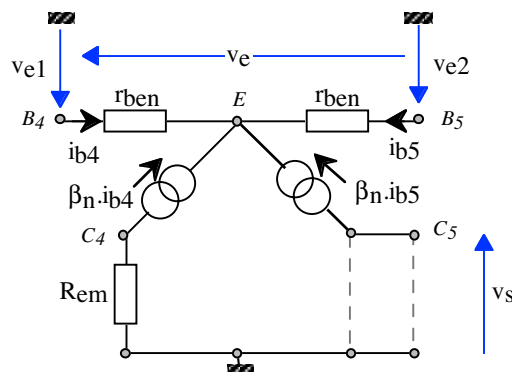


Figure 5

10. Pourquoi a-t-on placé la résistance R_{em} de la question 5 entre C_4 et la masse ?
11. Pour compléter le schéma de la figure 5, montrer qu'il faut placer entre C_5 et la masse, un **générateur de courant dépendant et imparfait**. Que représente-il ?
Chercher la relation simple liant ce générateur avec le générateur de courant dépendant ($\beta_n \cdot i_{b4}$). Dans quel sens faut-il l'orienter ?
12. Déterminer l'expression du gain en tension $A = \frac{v_s}{v_e}$ du montage différentiel. Faire l'A.N.
13. Déterminer l'expression de la résistance d'entrée différentielle R_{ed} du montage. Faire l'A.N.

CORRECTION : AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL A CHARGE ACTIVE

Q1 :

$$I = I_{C1} + I_{B3} \quad \text{avec : } I_{B3} = \frac{I_{E3}}{\beta_p + 1} \quad I_{E3} = I_{B1} + I_{B2} = \frac{I_{C1} + I_{C2}}{\beta_p}$$

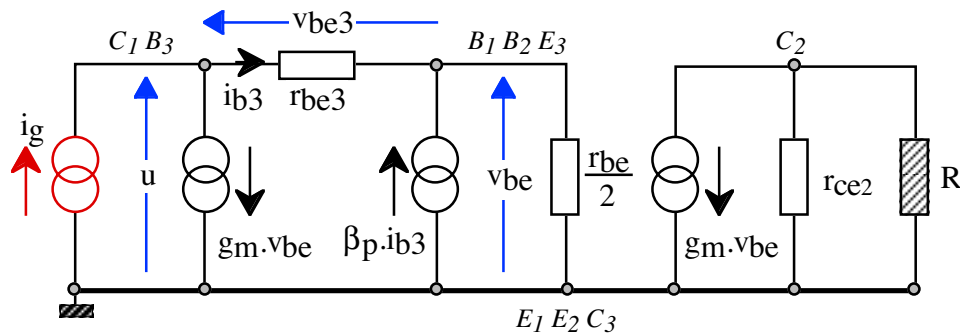
Sur le schéma on remarque que : $V_{BE1} = V_{BE2}$ et de plus, les transistors T_1 et T_2 sont identiques (même I_{SBC}) . Sachant que : $I_C = I_{SBC} \exp(\frac{|V_{BE}|}{U_T})$, les courants I_{C1} et I_{C2} sont égaux.

On obtient finalement :

$$I_{C2} = I \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta_p(\beta_p + 1)}}$$

AN : $I_{C2} \approx 0,999 I$ soit $I_{C2} = I$

Q2 :



Q3 : Relation entre r_{be3} et r_{be} :

$$r_{be3} = \beta_p \frac{U_T}{I_{C3}} \quad r_{be} = \beta_p \frac{U_T}{I_{C2}} \quad \text{donc : } \frac{r_{be3}}{r_{be}} = \frac{I_{C2}}{I_{C3}} \approx \frac{I}{I_{C3}}$$

$$\text{Or : } I_{C3} = \frac{2I}{\beta_p}$$

$$r_{be3} \approx \frac{\beta_p}{2} r_{be}$$

Q4 :

$$v_{be} = \frac{r_{be}}{2} (\beta_p + 1) i_{b3} \quad v_{be3} = r_{be3} i_{b3}$$

$$\frac{v_{be}}{v_{be3}} = \frac{r_{be}}{2} \frac{(\beta_p + 1)}{r_{b3}}$$

Compte tenu de Q2 : $r_{be3} \approx \frac{\beta_p}{2} r_{be}$ il vient : $v_{be} = v_{be3}$.

Q5 : Calcul de la résistance d'entrée R_{em} du miroir : $R_{em} = \frac{u}{i_g}$

$$i_g = g_m \cdot v_{be} + i_{b3} \quad v_{be} = \frac{u}{2} \quad i_{b3} = \frac{u}{2r_{be3}} \quad i_g = \frac{u}{2} \left(g_m + \frac{1}{r_{be3}} \right)$$

$$\text{Or : } r_{be3} = \frac{\beta_p}{2} r_{be} = \frac{\beta_p}{2} \frac{\beta_p}{g_m}$$

On en déduit :

$$R_{em} = \frac{2}{g_m \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta_p^2} \right)}$$

$$\text{Q6 : } R_{em} \approx \frac{1}{g_m} \quad g_m = 2\text{mS} \quad R_{em} = 1\text{k}\Omega$$

Q7 : Expression du générateur de courant dépendant de T_2 :

$$g_m \cdot v_{be} = g_m \frac{u}{2} \quad \text{avec : } u = R_{em} \cdot i_g \quad g_m \cdot v_{be} = g_m \frac{R_{em}}{2} i_g \quad \text{et } R_{em} \approx \frac{2}{g_m}$$

$$\text{Finalement : } g_m \cdot v_{be} = i_g$$

Ce résultat est prévisible car la fonction miroir de courant se manifeste à la fois en continu et aux variations.

Q8 : Expression de la résistance de sortie R_s du miroir vu par la résistance R entre C_2 et la masse.

On applique la méthode de l'ohmmètre :

- Annuler le générateur i_g
- Enlever R et mettre à sa place un générateur u qui délivre un courant i .
- Alors $R_s = u/i$.

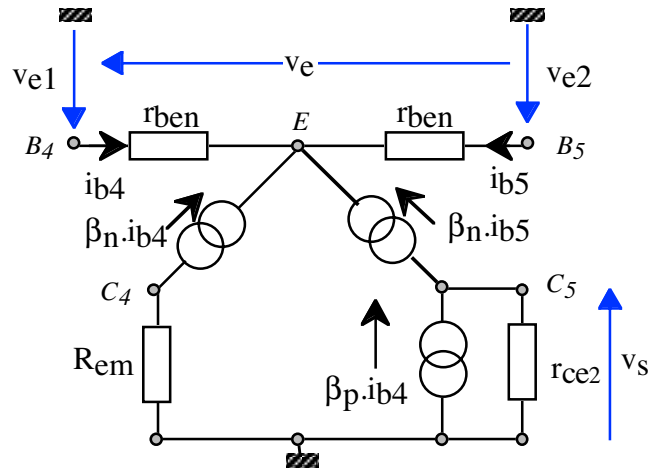
$$\text{L'annulation de } i_g \text{ entraîne alors : } u = R_{em} \cdot i_g = 0 \rightarrow v_{be3} = v_{be} = u/2 = 0 \rightarrow g_m \cdot v_{be} = 0.$$

La résistance de sortie R_s est égale à $r_{ce2} = 200 \text{ k}\Omega$.

Q9 : Au repos, B_4 et B_5 sont à la masse. $I_0 = I_{C4} + I_{C5} = 100 \mu\text{A}$.

Q10 : Le générateur ($\beta_n \cdot i_{b4}$) joue le rôle du courant ($-i_g$) précédent. R_{em} représente donc la résistance d'entrée du miroir de courant.

Q11 :



Q12 : Expression du gain en tension.

$$v_s = r_{ce2}(\beta_n i_{b4} - \beta_n i_{b5}) \quad v_e = r_{ben}(i_{b4} - i_{b5})$$

$$A = \frac{v_s}{v_e} = \frac{\beta_n r_{ce2}}{r_{ben}}$$

$$r_{ben} = 50 \text{ k}\Omega$$

$$A = 400.$$

Q13 : Expression de la résistance d'entrée différentielle R_{ed} du montage.

$$R_{ed} = 2.r_{ben} = 100 \text{ k}\Omega.$$