

## ETUDE DE LA STABILITE EN TEMPERATURE D'UN MIROIR DE COURANT A TRANSISTORS BIPOLAIRES NPN IDENTIQUES <sup>1</sup>

Le montage de la figure 1 est un miroir de courant amélioré qui est très exploité dans les circuits intégrés analogiques. On l'utilise pour réaliser un générateur de courant continu performant peu sensible à la température et possédant une grande résistance interne.

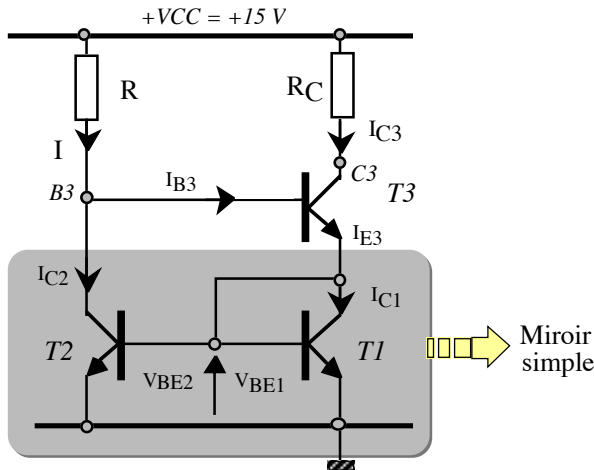


Figure 1

Ce montage utilise trois transistors NPN intégrés identiques dont l'évolution du gain en courant  $\beta$  en fonction du courant de collecteur  $I_C$  et de la température  $T$  est donnée en figure 2.

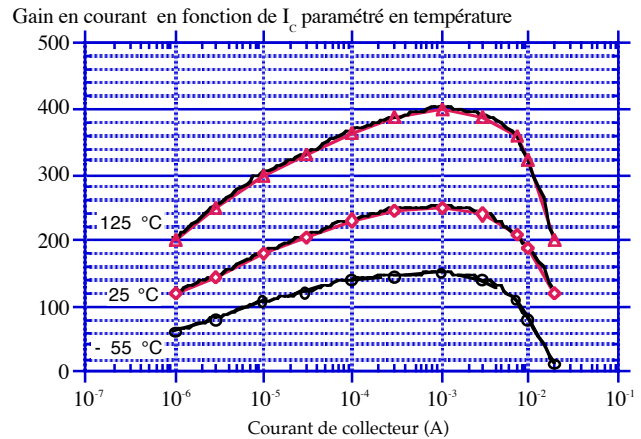


Figure 2

On se propose d'étudier la polarisation du transistor  $T_3$  à 25 °C. On rappelle que le courant de collecteur  $I_C$  d'un transistor NPN est tel que :  $I_C = I_{SBC} \exp\left(\frac{V_{BE}}{U_T}\right)$  (1)

Où  $I_{SBC}$  représente le courant inverse de saturation de la jonction collecteur-base bloquée. Ce courant est identique pour l'ensemble des transistors intégrés.

### 1° PARTIE : ETUDE DU MIROIR DE COURANT SIMPLE ( $T_1$ $T_2$ )

On étudie dans un premier temps, le miroir de courant de base constitué seulement des transistors  $T_1$  et  $T_2$  (partie encadrée de la figure 1). Ce miroir de courant reçoit un courant de référence  $I_{E3}$  et il recopie  $I_{C2}$ .

- 1) Rechercher avec l'équation (1), la relation simple qui lie les courants de collecteur  $I_{C2}$  et  $I_{C1}$ .
- 2) En déduire la relation entre les courants  $I_{C2}$  et  $I_{E3}$  compte-tenu du gain en courant  $\beta$  de  $T_1$  et  $T_2$ . Sachant que le courant  $I_{C2}$  recopie  $I_{E3}$ , déterminer l'expression de l'erreur relative de

$$\text{recopie : } E_{r1} = \frac{I_{C2} - I_{E3}}{I_{E3}}$$

## 2° PARTIE : MIROIR DE COURANT AMELIORE (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> et T<sub>3</sub>)

On considère maintenant le montage complet où I représente le courant de référence alors que I<sub>C3</sub> est maintenant le courant recopié.

- 1) Rechercher en fonction du gain en courant  $\beta$  des transistors, la relation qui relie le courant I et le courant recopié I<sub>C3</sub>. Déterminer l'expression de la nouvelle erreur relative de copie E<sub>r2</sub> et comparer à celle du miroir simple.
- 2) On désire choisir le point de repos du transistor T<sub>3</sub> au milieu de sa droite de charge avec I<sub>C3</sub> égal à 1 mA à 25°C. Calculer la valeur des résistances R<sub>C</sub> et R. Faire les applications numériques pour les erreurs de copie précédemment définies. Conclusion.

## 3° PARTIE : ETUDE DE LA STABILITE DU MONTAGE COMPLET

On se propose d'étudier la stabilité du courant de collecteur du transistor T<sub>3</sub> en fonction de la température qui évolue de 25 à 125°C.

- 1) Déterminer la relation :  $I_{C3} = f(V_{BE}, \beta, V_{CC}, R)$  qui met en évidence le rôle de la température sur la tension V<sub>BE</sub> et le gain en courant  $\beta$ .
- 2) Rechercher l'expression du coefficient de stabilité :  $S_V = \left[ \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} \right]_{\beta \text{ constant}}$ . Quelle est sa valeur approchée ?
- 3) Rechercher l'expression du coefficient de stabilité :  $S_\beta = \left[ \frac{\partial I_C}{\partial \beta} \right]_{V_{BE} \text{ constant}}$ . Quelle est sa valeur approchée ?
- 4) Le montage est soumis à une température qui évolue de 25 à 125°C. Calculer la valeur de l'accroissement  $\Delta I_{C3}$  du courant de collecteur I<sub>C3</sub> de T<sub>3</sub> sachant que :

$$\Delta I_{C3} = S_V \cdot \Delta V_{BE} + S_\beta \cdot \Delta \beta$$

V <sub>CC</sub>	I <sub>C3</sub> à 25°C	V <sub>BE</sub> à 25 °C	$\Delta V_{BE}/\Delta T$
15V	1mA	0,6 V	-2,5 mV°C <sup>-1</sup>

Quel est le paramètre principal responsable de l'accroissement du courant I<sub>C3</sub> ?

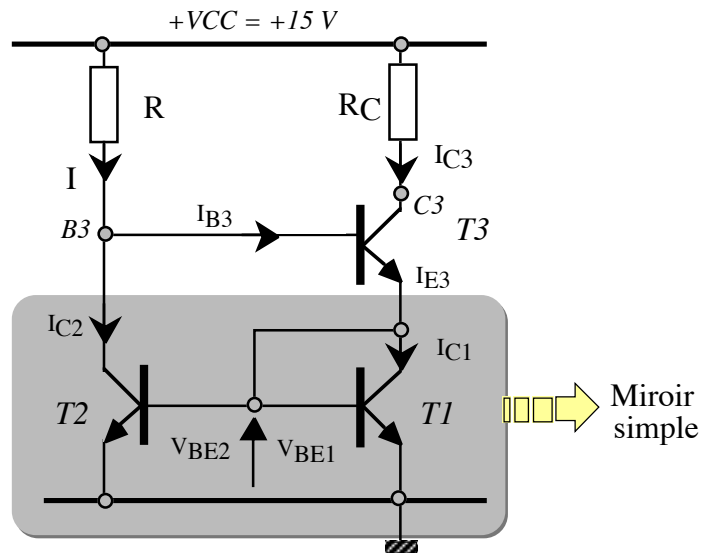
#### 4° PARTIE : MODIFICATION DE LA TENSION D'ALIMENTATION

A la température de 25°C, avec les résistances R et R<sub>C</sub> précédentes, la tension d'alimentation est maintenant égale à 30 V.

- 1) Le point de repos de T<sub>3</sub> est-il toujours sensiblement centré sur la nouvelle droite de charge ?
- 2) Que peut-on dire de la variation  $\Delta I_{C3}$  du courant I<sub>C3</sub> lorsque la température évolue comme précédemment de 25 à 125°C ?

## CORRECTION

### 1° PARTIE : ETUDE DU MIROIR DE COURANT SIMPLE (T<sub>1</sub> T<sub>2</sub>)



1. Les tensions  $V_{BE}$  de  $T_1$  et  $T_2$  sont égales. La relation (1) indique alors que les courants  $I_{C1}$  et  $I_{C2}$  sont égaux. Il en est de même des courants de base  $I_{B1}$  et  $I_{B2}$ , car les transistors ont le même gain en courant  $\beta$ .

2. Exprimons le courant  $I_{E3}$  :  $I_{E3} = I_{C2} + 2I_{B2}$  avec :  $I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta}$

$$I_{C2} = \frac{I_{E3}}{1 + \frac{2}{\beta}}$$

Avec un gain en courant  $\beta$  grand, on obtient :  $I_{C2} \approx I_{E3}$  expliquant la notion de miroir de courant.

Erreur relative de recopie du courant :  $E_{r1} = \frac{I_{C2} - I_{E3}}{I_{E3}} = -\frac{2}{\beta + 2}$

### 2° PARTIE : MIROIR DE COURANT AMELIORE (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> et T<sub>3</sub>)

1. Equation au nœud  $B_3$  :  $I = I_{C2} + I_{B3}$  avec :  $I_{C2} = \frac{I_{E3}}{1 + \frac{2}{\beta}}$  et  $I_{B3} = \frac{I_{C3}}{\beta}$

Exprimons le courant de base de  $T_3$  :  $I_{E3} = I_{C3} \frac{\beta + 1}{\beta}$

Il vient alors :

$$I = \frac{\beta^2 + 2\beta + 2}{\beta^2 + 2\beta} I_{C3}$$

Erreur relative de recopie :

$$E_{r2} = \frac{-2}{\beta^2 + 2\beta + 2}$$

On remarquera que :  $E_{r2} \ll E_{r1}$

2. Pour un point de fonctionnement centré, on doit avoir :  $V_{CE3} = \frac{V_{CC} - V_{BE1}}{2} = 7.2V$

On en déduit pour  $I_{C3} = 1 \text{ mA}$  :  $R_C = 7.2 \text{ k}\Omega$  et  $R = (V_{CC} - 2V_{BE})/I$  soit  $13.8 \text{ k}\Omega$ .

A  $25^\circ\text{C}$  pour  $I_{C3} = 1\text{mA}$ , le gain en courant  $\beta$  des transistors est de 250 (figure 2). On obtient alors :  $E_{r1} = -7.9 \cdot 10^{-3}$  et  $E_{r2} = -3.2 \cdot 10^{-5}$ .

Dans les deux montages, l'erreur relative de recopie est suffisamment faible pour justifier la notion de « miroir de courant ».

### 3° PARTIE : ETUDE DE LA STABILITE EN TEMPERATURE DU MONTAGE COMPLET

1) Exprimons le courant  $I$  :  $I = \frac{V_{CC} - 2V_{BE}}{R}$  avec :  $I = \frac{\beta^2 + 2\beta + 2}{\beta^2 + 2\beta} I_{C3}$

Il vient alors :

$$I_{C3} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R} \cdot \frac{\beta^2 + 2\beta + 2}{\beta^2 + 2\beta}$$

2) Calcul du coefficient de stabilité vis-à-vis des variations de  $V_{BE}$ .

$$S_V = \left[ \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} \right]_{\beta \text{ cte}} = -\frac{2}{R} \left( \frac{\beta^2 + 2\beta + 2}{\beta^2 + 2\beta} \right) \text{ valeur approchée : } S_V = -\frac{2}{R}$$

3) Calcul du coefficient de stabilité vis-à-vis des variations de  $\beta$ .

$$S_\beta = \left[ \frac{\partial I_C}{\partial \beta} \right]_{V_{BE} \text{ cte}} = \frac{2(V_{CC} - V_{BE})}{R} \frac{2\beta + 2}{(\beta^2 + 2\beta)^2} \text{ valeur approchée : } S_\beta = -\frac{4(V_{CC} - V_{BE})}{\beta^3 R}$$

4) Le montage est soumis à une température qui évolue de  $25$  à  $125^\circ\text{C}$  soit  $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ .

- $\Delta V_{BE} = -0.25 \text{ V}$
- $\Delta \beta = 250 - 400 = -150$

On en déduit :  $\Delta I_{C3} = 36.25 \mu\text{A}$  montrant que le montage assure un courant  $I_{C3}$  relativement stable en température. Seul le terme  $(S_v \cdot \Delta V_{BE})$  est pris en compte.

#### 4° PARTIE : MODIFICATION DE LA TENSION D'ALIMENTATION A 25°C

- 1) La tension d'alimentation qui est doublée entraîne pratiquement le doublement du courant :  $I = \frac{V_{CC} - 2V_{BE}}{R}$ .

Dans ces conditions la fonction miroir de courant double aussi le courant  $I_{C3}$ . Aussi, le point de repos de  $T_3$  est toujours sensiblement centré sur la nouvelle droite de charge.

- 2) Lorsque la température évolue comme précédemment de 25 à 125°C, la variation  $\Delta I_{C3}$  du courant  $I_{C3}$  est identique à la précédente en effet les coefficients  $S_v$  et  $S_b$  ne varient pas.