

# Bipolaire: Sources de courant Amplificateurs en Circuits Intégrés

Electronique II

Adil Koukab

---

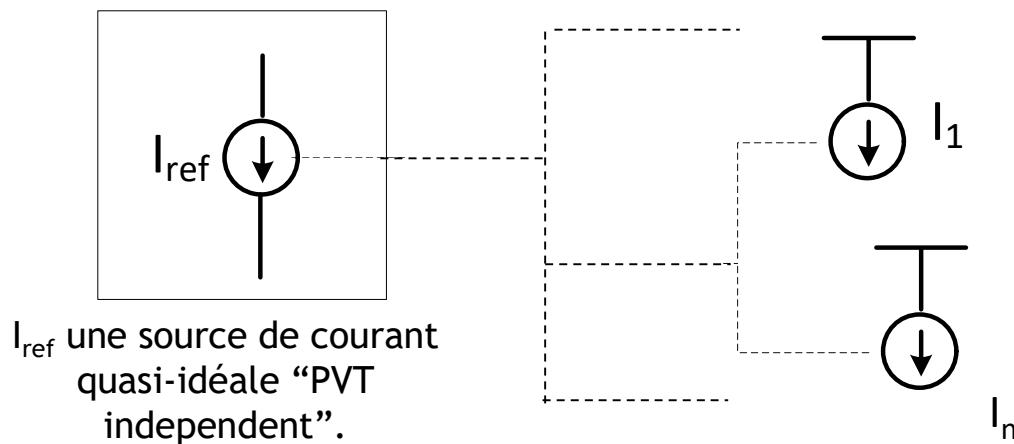
# Table des matières

---

- Circuits à composants discrets vs intégrés
- Source de courant intégrées
  - Miroir de courant
  - Miroir de courant à sorties multiples
- Emetteur commun à charge active (étage de gain)
- Collecteur commun à charge active (étage de sortie)

# Circuits à composants discrets vs Circuits Intégrés (CI)

- Quelques Caractéristiques des CIs (par rapport aux circuits discrets):
  - Transistors **miniaturisés** / Résistances et Capacités **gourmandes en surface** → Architectures utilisant exclusivement des transistors plus attractives.
  - Intégration **monolithique** → Excellent appariement des composants (transistors, résistances, capacités).
  - L'excellent appariement & quasi-absence de gradient de température entre composants physiquement proches dans les CIs favorisent l'utilisation des miroirs de courant comme circuit de polarisation ou comme charge active.



# Miroir de courant (seulement en intégré)

- La forme la plus simple pour générer et copier un courant  $I_{réf}$  est:
- $T_1$  monté en diode (base collecteur connectée) + R + Vcc

- ( $T_1$ , R, Vcc) fixe le courant  $I_{réf}$  à

$$I_{réf} = \frac{V_{cc} - V_{BE}}{R} \approx \frac{V_{cc} - U_j}{R}$$

➤  $B$  très grand,  $I_B \ll I_c \rightarrow$

➤  $T_1$  en mode normale

(car  $V_{BE} = V_{CE} \approx U_j \neq 0$ ) →

$$I_{c1} \approx I_{réf} \approx \frac{V_{cc} - U_j}{R} \quad (1)$$

$$V_{BE} = U_T \ln \left( \frac{I_{c1}}{I_{s1}} \right) \quad (2)$$

➤  $T_2$  miroir de  $T_1 \rightarrow$  même  $V_{BE}$

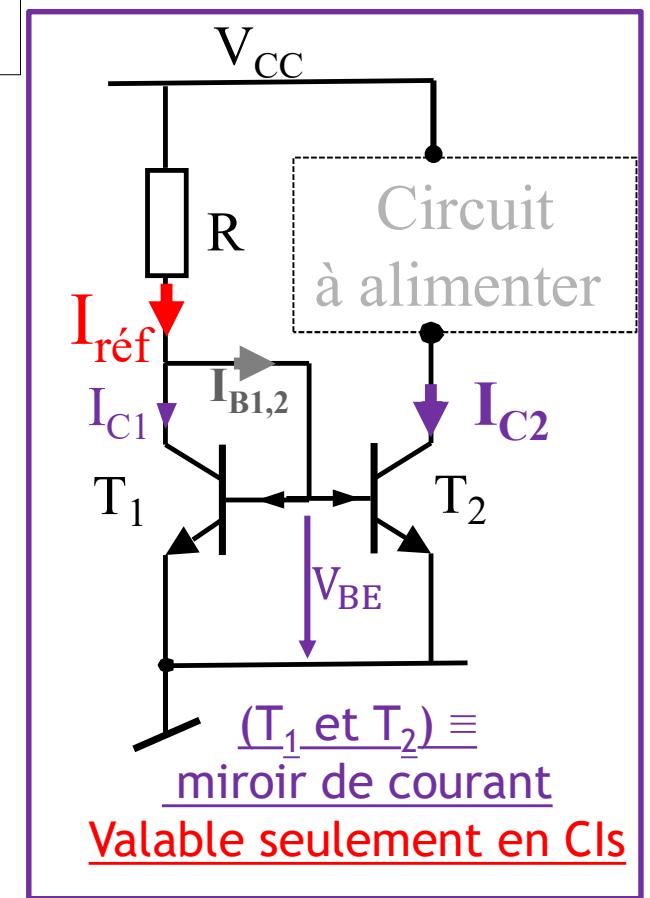
Si  $T_2$  est aussi en mode normal →

$$V_{BE} = U_T \ln \left( \frac{I_{c2}}{I_{s2}} \right) \quad (3)$$

$$(2), (3) \rightarrow I_{c2} = \frac{\tilde{I}_{s2}}{\tilde{I}_{s1}} I_{c1} \stackrel{(3)}{\approx} \frac{I_{s2}}{I_{s1}} \frac{V_{cc} - U_j}{R}$$

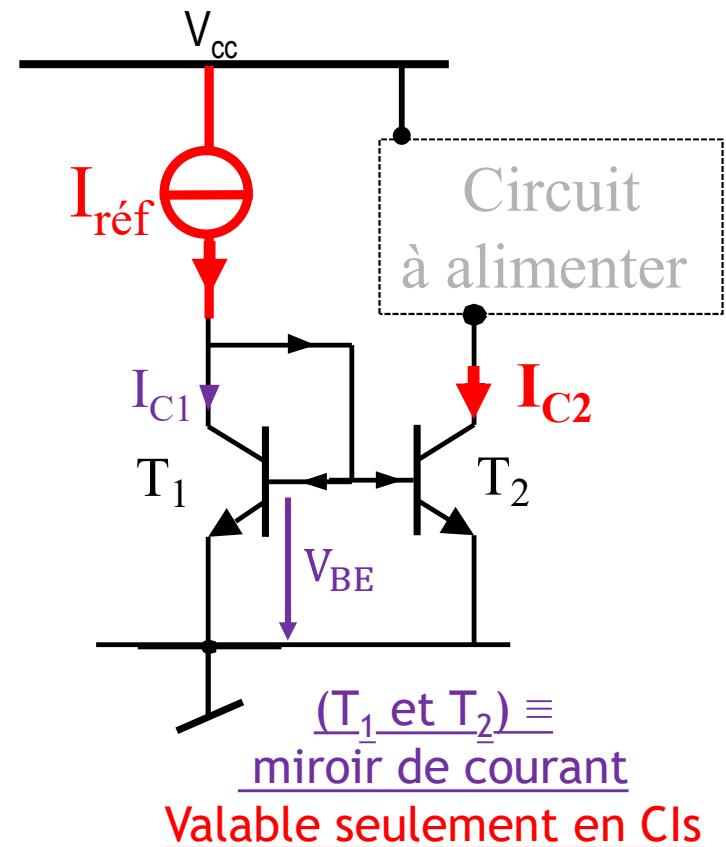
➤  $T_1$  et  $T_2$  parfaitement appariés (possible seulement en Cls)  $\rightarrow I_{s1} = I_{s2} \rightarrow$

$$I_{c2} \approx I_{réf} \approx \frac{V_{cc} - U_j}{R}$$



# Implémentation plus sophistiquée

- R peut être remplacée par une source de courant quasi-idiéale “PVT independent”.
  - *Là aussi sous les mêmes conditions ( $\beta$  grand,  $T_1$  et  $T_2$  sont parfaitement appariés et  $T_2$  en mode normale)  $T_1$  copie son courant à  $T_2$ .*
- $I_{\text{réf}} \approx I_{c1} \approx I_{c2}$
- En plus puisque  $I_{\text{réf}}$  est aussi “PVT independent”  $\rightarrow I_{c2}$  est aussi “PVT independent”.



# Erreurs dues à $I_B$ et à l'effet Early

- Erreur  $\varepsilon_B$  due à  $I_B$  ( $I_{C1} \neq I_{réf}$ )

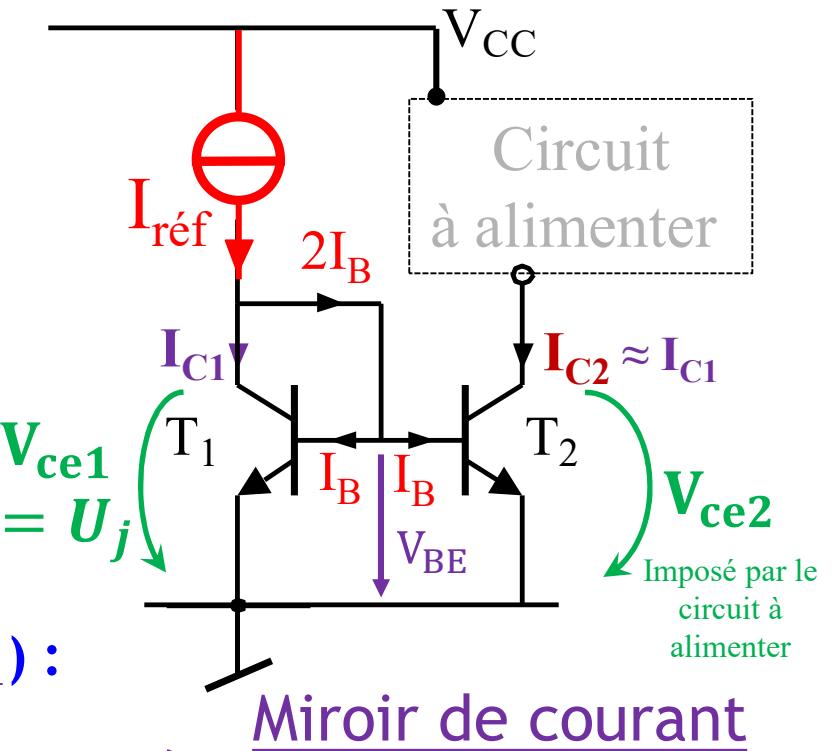
$$I_{réf} = I_{C1} + 2I_B \quad \text{avec } I_B = I_{c1,2}/\beta$$

$$I_{réf} = I_{c1,2} \left( 1 + \frac{2}{\beta} \right)$$

- Erreur  $\varepsilon_E$  due à l'effet Early ( $V_{ce2} \neq V_{ce1}$ ) :

$$I_{C2} = I_{C1} + \Delta I_C = I_{C1} + g_{ce2}(V_{ce2} - V_{ce1})$$

$$I_{C2} = I_{C1} + \overbrace{g_{ce}(V_{ce2} - U_j)}^{\varepsilon_E}$$



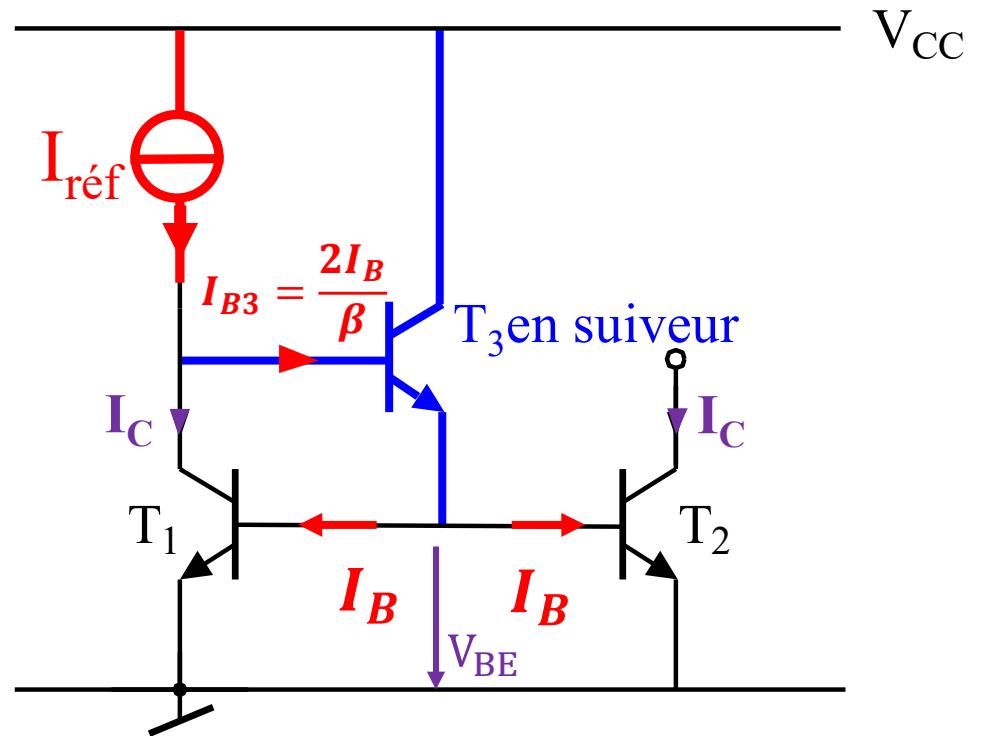
# Miroir avec atténuation du courant de base

- Les 2  $I_B$  sont fournis par l'émetteur de  $T_3$ , il sont donc  $\beta$  fois plus grands  $I_{B3}$ .

$$I_{\text{réf}} = I_C + I_{B3}$$

$$I_{B3} = 2I_B/\beta = 2I_C/\beta^2$$

$$I_{\text{réf}} = I_C \left( 1 + \frac{\frac{\varepsilon}{2}}{\beta^2} \right)$$



# Miroir de courant à sorties multiples

- Source de courants multiples, réalisées à partir d'un seul courant de référence

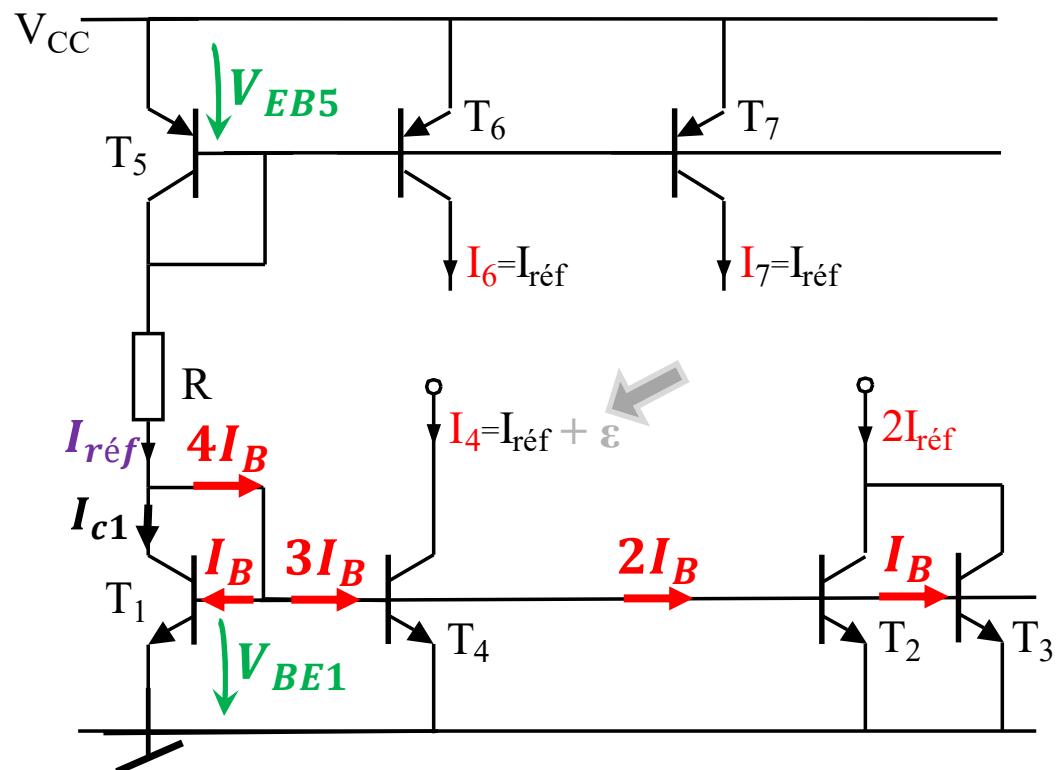
$$I_{\text{réf}} = \frac{V_{cc} - V_{EB5} - V_{BE1}}{R}$$

$$\approx \frac{V_{cc} - 2U_j}{R}$$

- Rq: l'erreur due aux  $I_B$  augmente avec le nombre de sorties

$$I_{\text{réf}} = I_{c1} + 4I_B = I_4 + 4I_B$$

$$\approx I_4 \left( 1 + \frac{4}{\beta} \right)$$



· Quiz 1:

a- Déterminer  $I_{\text{copy}1}$  et  $I_{\text{copy}2}$ . ( $A_E$  dit transistor élémentaire ou unitaire)

b- Calculer les erreurs dues aux courants de base avec et sans atténuation (Fig. 1 et 2)

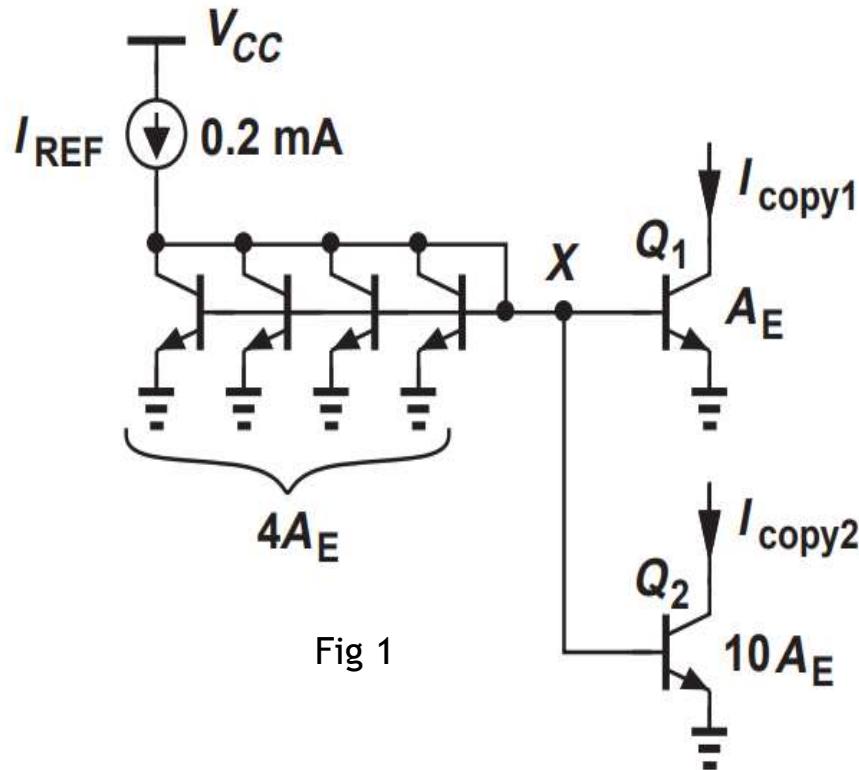


Fig 1

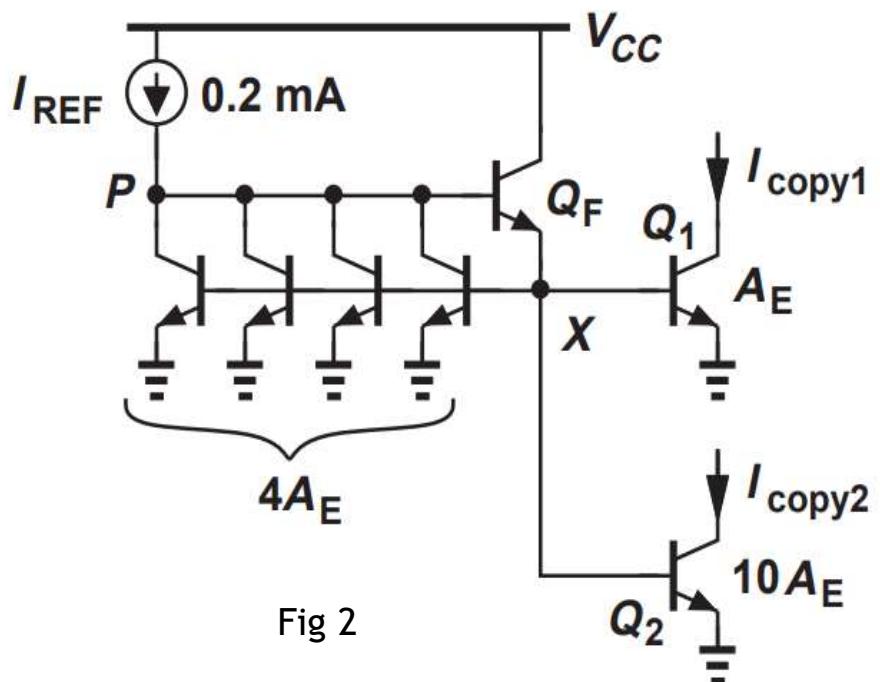
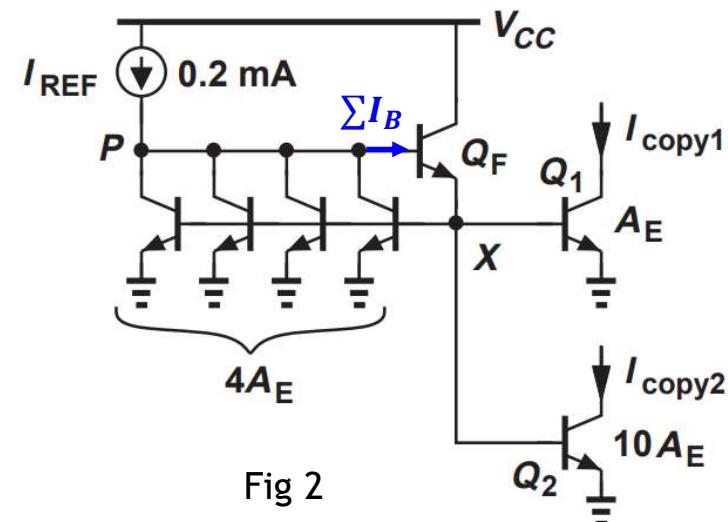
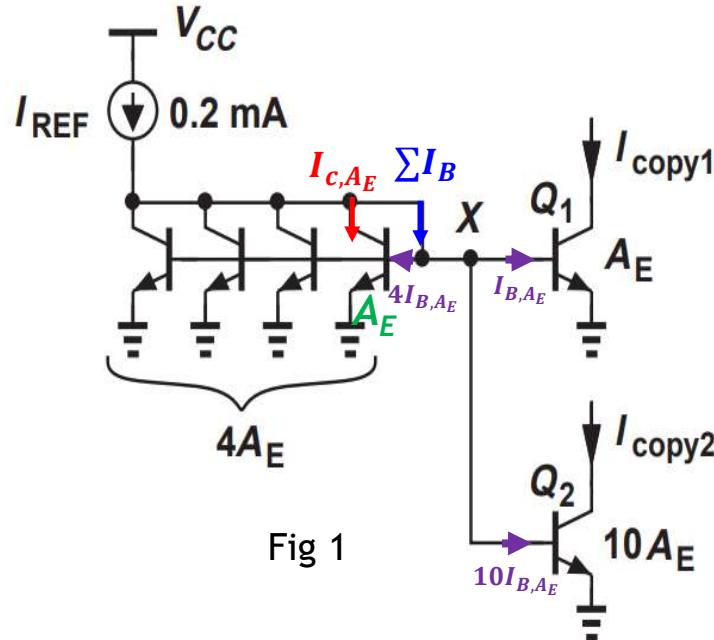


Fig 2

· Quiz 1:

a- Déterminer  $I_{\text{copy}1}$  et  $I_{\text{copy}2}$ . ( $A_E$  dit transistor élémentaire ou unitaire)

b- Calculer les erreurs dues aux courants de base avec et sans atténuation (Fig. 1 et 2)



a- Si on néglige  $\sum I_B$  on a:

$$I_{c,A_E} = \frac{I_{REF}}{4} = 50 \mu A$$

$A_{E1}$  et  $A_E$  sont parfaitement appariée et forment un miroir de courant

$$\rightarrow I_{\text{copy}1} = I_{c,A_E} = 50 \mu A$$

$$\rightarrow I_{\text{copy}2} = 10 I_{c,A_E} = 500 \mu A$$

b1- Si on tient compte de  $\sum I_B$  on a:

$$\sum I_B = 15 I_{B,A_E} = 15 \frac{I_{c,A_E}}{\beta}; I_{c,A_E} = \frac{I_{REF} - \sum I_B}{4} = \frac{I_{REF} - 15 \frac{I_{c,A_E}}{\beta}}{4}$$

$$\rightarrow I_{c,A_E} = \frac{I_{REF}}{4 + \frac{15}{\beta}}$$

$$\rightarrow I_{\text{copy}1} = I_{c,A_E} = \frac{I_{REF}}{4 + \frac{15}{\beta}}$$

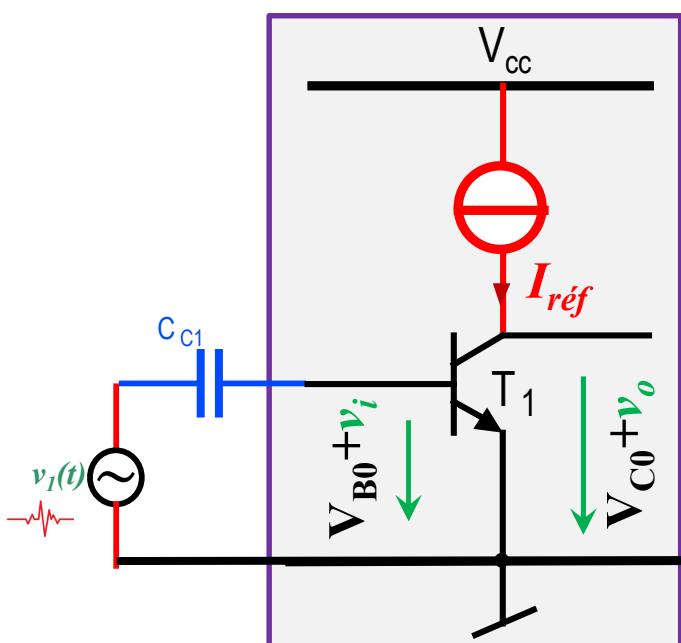
$$\rightarrow I_{\text{copy}2} = 10 I_{c,A_E} = 10 \frac{I_{REF}}{4 + \frac{15}{\beta}}$$

b21- Idem mais avec atténuation (grâce à  $Q_F$ ) on a:

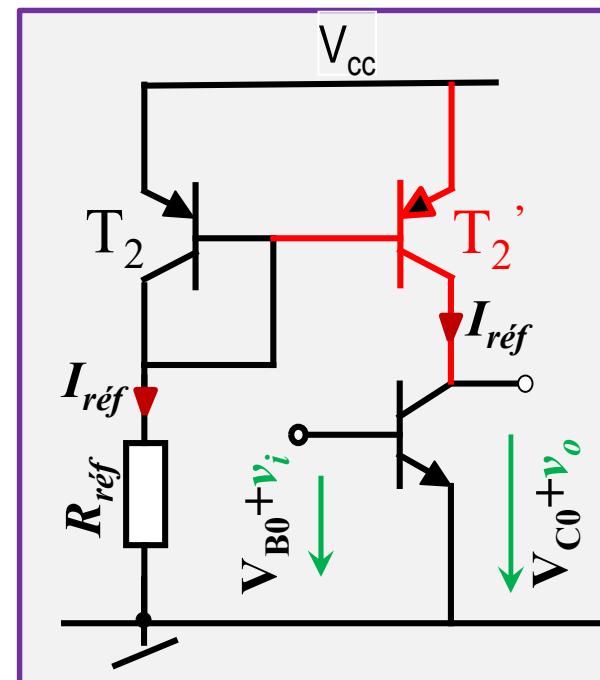
$$\rightarrow \sum I_B = \frac{15 I_{B,A_E}}{\beta} \rightarrow I_{\text{copy}1} = I_{c,A_E} = \frac{I_{REF}}{4 + \frac{15}{\beta^2}} = \frac{I_{\text{copy}2}}{10}$$

# Emetteur commun à charge active (CI)

- En circuits discrets le gain de l'EC ( $-g_m R_c$ ) est limité par le choix de  $R_c$  et  $g_m$ .
  - L'augmentation de  $R_c$  ou  $g_m$  limite la dynamique de sortie.
  - Compromis entre Gain et Dynamique de sortie ⚡
- En circuits intégrés, on s'affranchit de ce compromis par l'utilisation d'une charge active, c.à.d. d'une source de courant de résistance interne  $r_o \sim 1/g_{ce}$  très élevée.



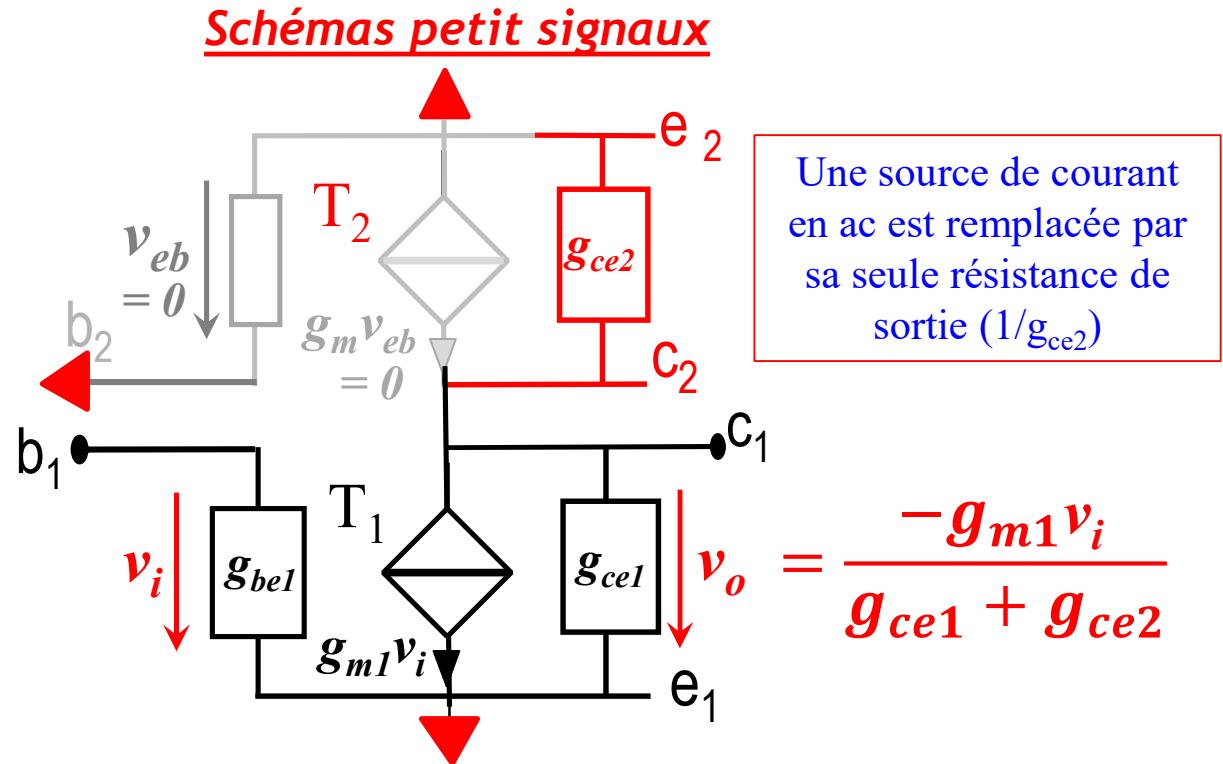
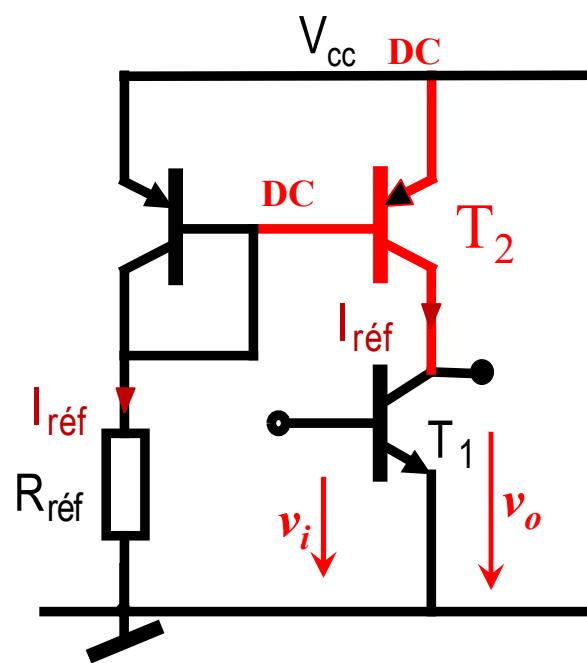
Implémentation



- La Source de courant fixe le pt de fonctionnement ( $I_{C0}$ ,  $V_{B0} = U_T \ln^{I_{C0}}/I_s \approx U_j$ ).
- Un circuit de polarisation est nécessaire pour fixé  $V_{C0}$

# Gain de l'EC à charge active (Cl<sub>s</sub>):

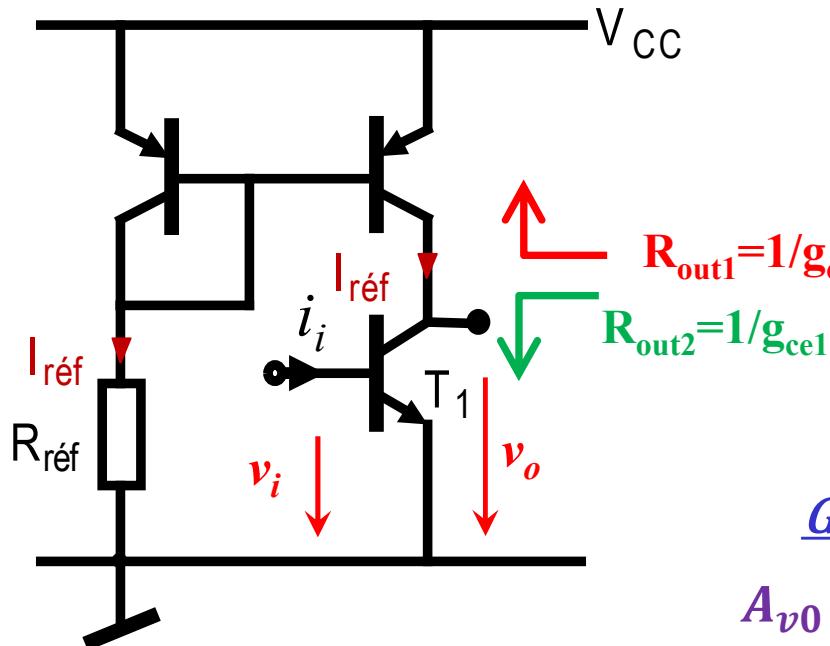
“OTA, Operational transconductance amplifier”



Gain en tension à vide (très élevé)

$$A_{v0} = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{R_L \rightarrow \infty} = -g_{m1} R_{out} = -\frac{g_{m1}}{g_{ce1} + g_{ce2}}$$

# Modèle ac de l'EC à charge active (Cl<sub>s</sub>)



Résistance d'entrée (plutôt Grande)

$$R_{in} = \left. \frac{v_i}{i_1} \right|_{R_L} = \frac{1}{g_{be1}}$$

Résistance de sortie (très grande)

$$R_{out} = \left. \frac{v_o}{i_0} \right|_{v_i=0} = \frac{1}{g_{ce1}} // \frac{1}{g_{ce2}} = \frac{1}{g_{ce1}+g_{ce2}}$$

Gain en tension à vide (très élevé)

$$A_{v0} = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{R_L \rightarrow \infty} = -g_{m1} R_{out} = -\frac{g_{m1}}{g_{ce1}+g_{ce2}}$$

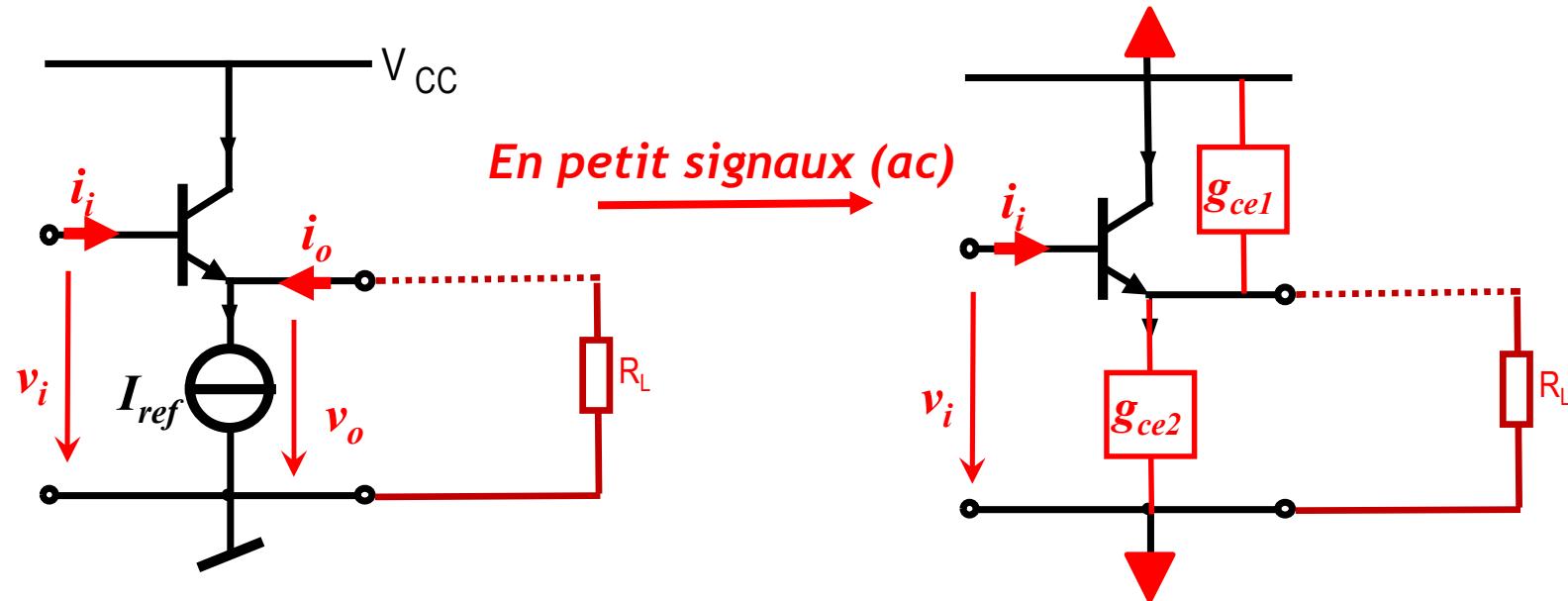


Gain en tension avec la charge (affaibli par  $R_L$ )

$$A_{v0} = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{R_L} = -g_{m1} R_{out} // R_L = -g_{m1} \left( \frac{1}{g_{ce1}+g_{ce2}} // R_L \right)$$

EC~OTA, ne peut pas piloter des charges résistives faibles. Besoin d'un étage de sortie. 🎛

# Collecteur commun (ou Emetteur Suiveur) ( $R_{in}$ )



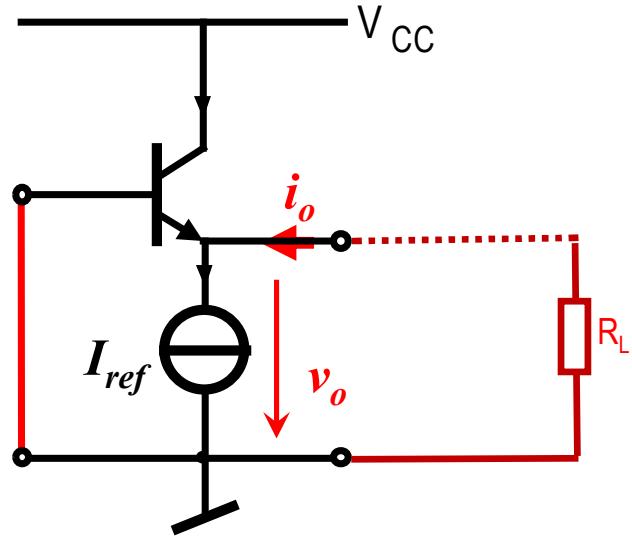
Résistance d'entrée

*Rq: si on tient compte des  $g_{ce}$ , l'émetteur voit  $R^* = g_{ce1}^{-1} // g_{ce2}^{-1} // R_L \approx R_L$*

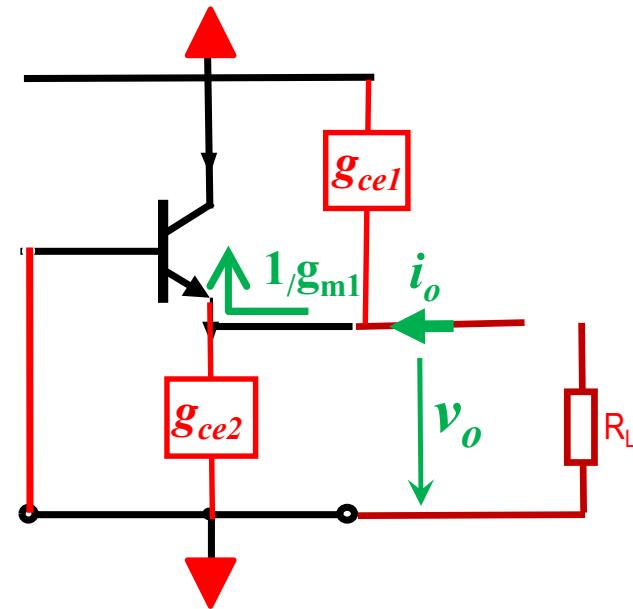
$$R_{in} = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{R_L} \approx \frac{1}{g_{be1}} + \beta R^* \approx \frac{1}{g_{be1}} + \beta R_L \quad (\text{très Grande})$$



# Collecteur commun (ou Emetteur Suiveur) ( $R_{out}$ )



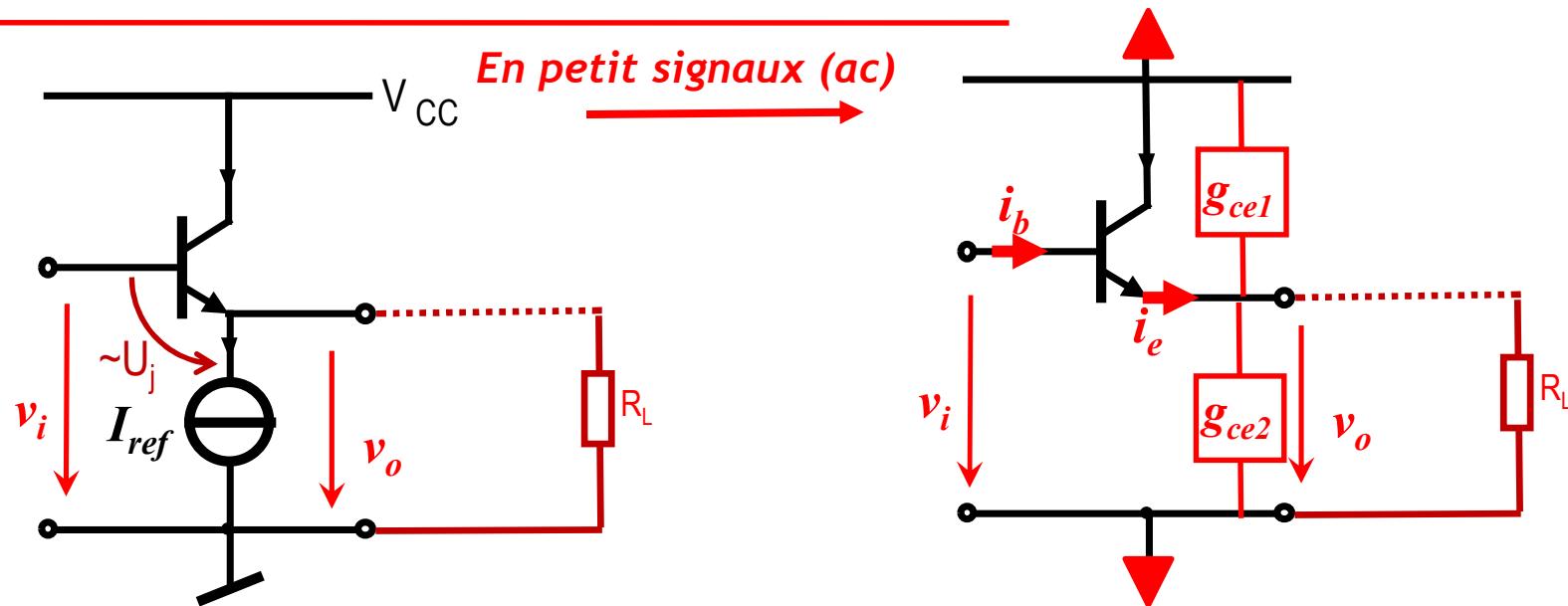
Résistance de sortie



*En petit signaux (ac)*

$$R_{out} = \left. \frac{v_o}{i_0} \right|_{v_i=0} = \left( \frac{1}{g_{m1}} \right) // \frac{1}{g_{ce1}} // \frac{1}{g_{ce2}} \approx \frac{1}{g_{m1}} \quad (\text{faible}) \quad \text{😊} \text{😊}$$

# Collecteur commun (ou Emetteur Suiveur) ( $A_v$ )



Gain en tension avec la charge (suiveur)

$$A_{v0} = \frac{v_o}{v_i} \Big|_{R_L} = \frac{i_e \left( R_L / \frac{1}{g_{ce1}} / \frac{1}{g_{ce2}} \right)}{i_b \left( \frac{1}{g_{be1}} + \beta \left( R_L / \frac{1}{g_{ce1}} / \frac{1}{g_{ce2}} \right) \right)} \approx \frac{\beta R_L}{\left( \frac{1}{g_{be1}} + \beta R_L \right)} \approx \frac{g_{m1} R_L}{1 + g_{m1} R_L} \approx 1$$

(si  $R_L \gg \frac{1}{g_{m1}}$ )

- La résistance d'entrée grande et la résistance de sortie faible font du CC un très bon étage tampon (buffer) entre un EC et sa charge. 🎉
- Consommation statique élevée à cause de la source de courant. 🎉