

VII. L'AMPLIFICATION AVEC LES CIRCUITS À TRANSISTORS : L'ANALYSE EN PETITS SIGNAUX

A. SÉPARATION POLARISATION / PETITS SIGNAUX

Elle s'obtient en intercalant des condensateurs sur le chemin des petits signaux. Leurs capacités sont choisies pour que leurs impédances soient négligeables dans le domaine des fréquences des petits signaux. Le choix de la borne commune se fait en plaçant judicieusement ces condensateurs.

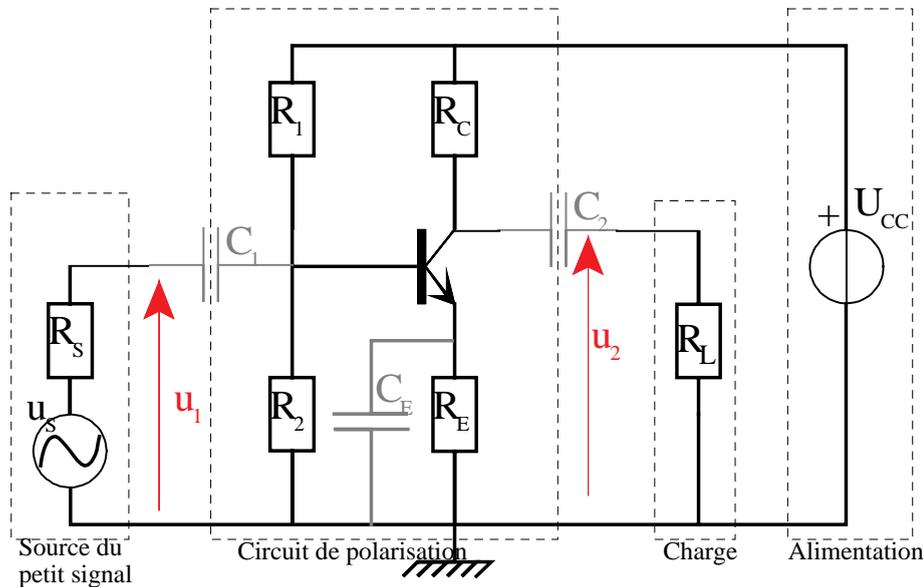


Figure 1 : exemple de circuit séparant la polarisation des petits signaux.
La capacité CE fait de ce montage un montage à émetteur commun

Un montage amplificateur en classe A consomme de l'énergie au repos, ici : $P_a = (I_C + I_P)U_{CC}$. Son rendement maximum est de 25 %.

B. LE TRANSISTOR BIPOLAIRE EN PETITS SIGNAUX :

1. Schéma équivalent

Une fois fixé le point de repos I_B , I_C , U_{BE} , U_{CE} , le **principe de superposition** nous permet d'étudier à part les petites variations de courant et de tension i_b , i_c , u_{be} , u_{ce} au voisinage de ce point (Rappel : $i_c = I_C + i_c$).

Si $i_c \ll I_C$, le transistor est linéaire pour les petits signaux. Il est possible de remplacer le transistor par un schéma équivalent ne comportant que des éléments linéaires. En première approximation :

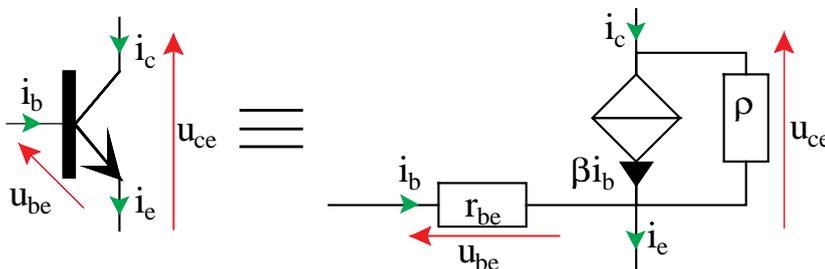


Figure 2 : schéma équivalent petits signaux du transistor bipolaire

avec $r_{be} = r_{\pi}$, la résistance dynamique de la diode BE passante au repos.

Remarque : les structures planes des transistors modernes présentent des contacts de base éloignés de la zone active. La résistance d'accès est alors notée $r_{bb'}$, en série sur r_{be} .

2. Paramètres hybrides (montage émetteur commun)

Variables d'entrée : i_B, u_{BE} Variables de sortie : i_C, u_{CE} .

Nous partons d'un système (hybride) qui les mélange :

$$\begin{cases} u_{BE} = f(i_B, u_{CE}) \\ i_C = f(i_B, u_{CE}) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} du_{BE} = \left(\frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B}\right) di_B + \left(\frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}}\right) du_{CE} \\ di_C = (\dots) di_B + (\dots) du_{CE} \end{cases} \Rightarrow \dots$$

a. Nous identifions les différentielles aux petits signaux : $i_b \sim di_B$

b. Chaque dérivée partielle est identifiée à un élément de matrice :

$$\begin{pmatrix} u_{be} \\ i_c \end{pmatrix} = [h] \begin{pmatrix} i_b \\ u_{ce} \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} u_{be} = h_{11} i_b + h_{12} u_{ce} \\ i_c = h_{21} i_b + h_{22} u_{ce} \end{cases}$$

[h] est appelée matrice hybride du transistor, avec :

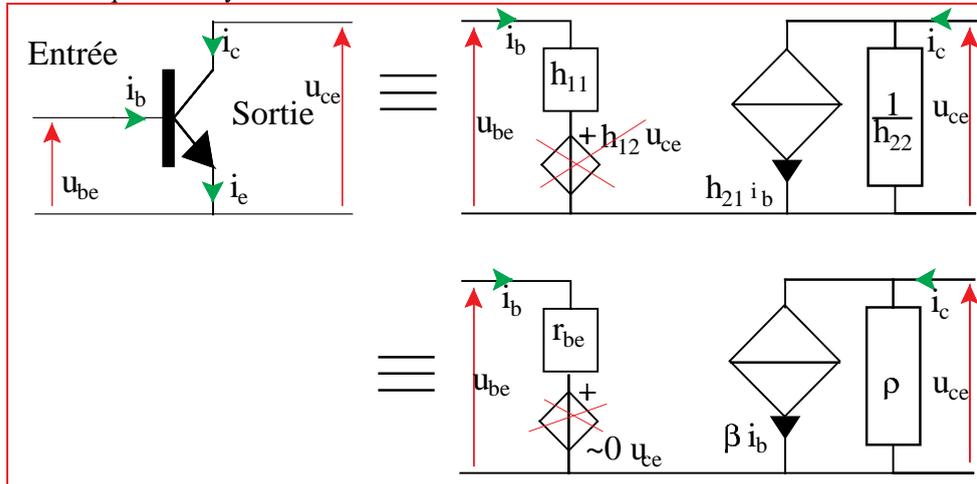
$$h_{11} = \left(\frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B}\right) = \frac{U_T}{I_B} = r_{be} \quad \text{résistance dynamique de la diode B-E } (\sim 1 \text{ k}\Omega)$$

$$h_{12} = \left(\frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}}\right) \sim 10^{-4} \sim 0 \quad \text{presque toujours négligé}$$

$$h_{21} = \left(\frac{\partial i_C}{\partial i_B}\right) \sim \beta \quad \text{gain en courant du transistor } (10 \text{ à } 250)$$

$$h_{22} = \left(\frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}}\right) = \frac{1}{\rho} \quad \text{conductance d'Early } (\sim 10^{-7} \Omega^{-1})$$

Chaque élément de cette matrice correspond à un élément linéaire qui a sa place dans le schéma équivalent hybride :



Le plus souvent, l'effet Early est négligé : $\rho = \infty \Leftrightarrow h_{22} = 0$.

Chaque jonction se comporte comme une petite capacité, ce qui a des effets à haute fréquence. Ceci est pris en compte en ajoutant des capacités aux points stratégiques du modèle : entre B et E, entre B et C, entre C et E.

3. Tracé d'un schéma équivalent petits signaux

- Remplacer chaque transistor par son schéma équivalent
- Remplacer chaque source idéale de tension par un court-circuit.
- Vérifier que chaque noeud est toujours lié aux mêmes composants.

VIII. FONCTIONS ÉLÉMENTAIRES À TRANSISTORS BIPOLAIRES

A. LES AMPLIFICATEURS DE CLASSE A

1. Propriétés générales

- a. Ces amplificateurs fonctionnent autour d'un point de repos où le transistor est passant, donc ils consomment de l'énergie au repos.
- b. Le point de repos est optimal à mi-chemin du blocage ($I_C=0$) et de la saturation ($U_{CE}\sim 0$), ce qui permet la plus grande **dynamique de sortie**.
- c. Le rendement $\eta = P_u/P_a$ est au maximum de 25 %.

2. Paramètres caractéristiques des circuits équivalents

Grandeur	Emetteur commun	E. com. avec R_E	Collecteur Commun	Base Commune
A_i	$h_{21} \sim \beta$ grande	h_{21} grande	$-(h_{21}+1)$ grande	$-h_{21}/(h_{21}+1) \sim -1$ inexistante
Z_1	$h_{11} = r_{be}$ petite	$h_{11} + (h_{21}+1)R_E$ grande	$h_{11} + (h_{21}+1)R_E$ grande	$h_{11}/(h_{21}+1) \sim 1/g_m$ très petite
A_u	$-h_{21}R_C/(h_{11}+R_S)$ grande	$-h_{21}R_C/(R_S+Z_1)$ grande	$(h_{21}+1)R_C/(R_S+Z_1)$ ~ 1 inexistante	$-A_i R_C/(R_S+Z_1) \sim R_C/R_S$ grande
Z_2	∞	∞	$(h_{11}+R_S)/(h_{21}+1)$ petite	∞
Z'_2	R_C	R_C	$R_E // Z_2$	R_C

Equations approchées d'étages amplificateurs en classe A

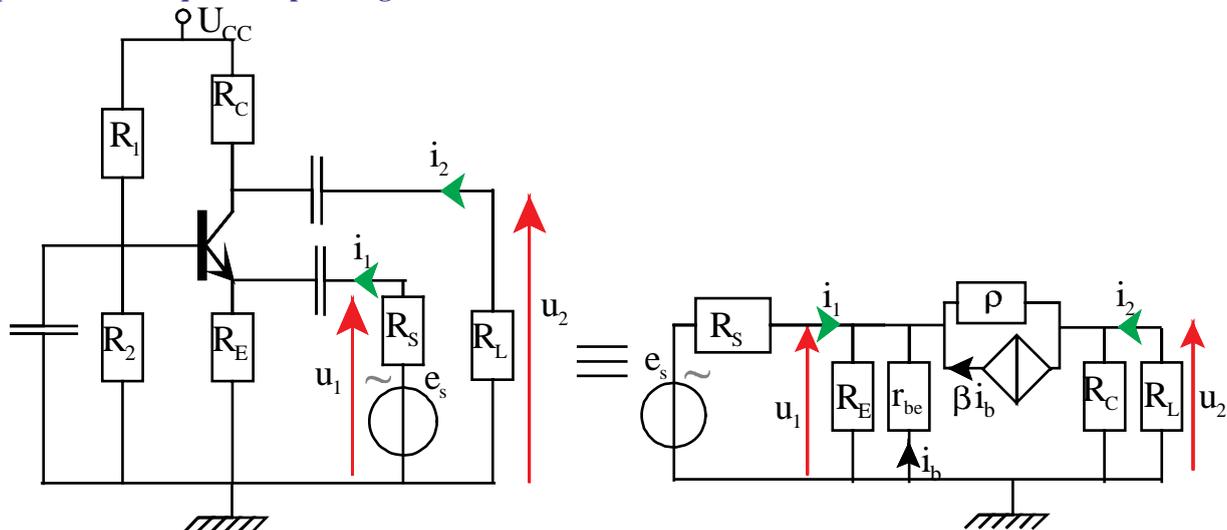
Pour identifier les paramètres, reportez-vous à la figure 1 précédente.

$g_m = \beta/r_{be}$ est la transconductance du transistor, telle que $i_c = g_m u_{be}$.

Z_1 et Z_2 sont vues en deçà des résistances de polarisation.

Z'_2 est l'impédance de sortie vue au delà des résistances de polarisation.

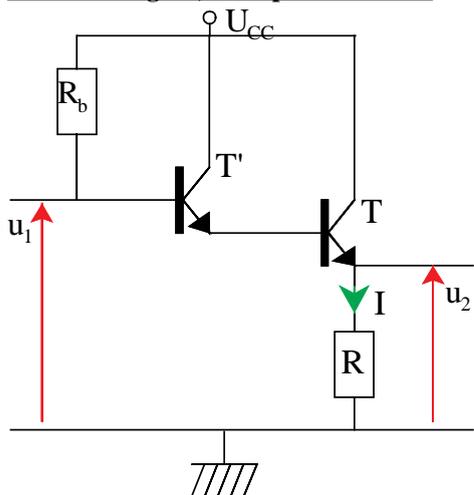
3. Exemple de schéma équivalent petits signaux



Transformation du schéma base commune pour les petits signaux.

B. AUTRES MONTAGES AMPLIFICATEURS

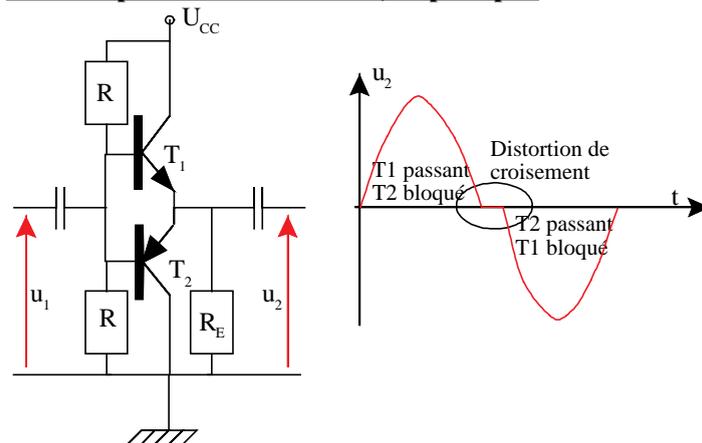
1. Le Darlington, ou super-transistor



L'amplification totale en courant est le produit des 2β :

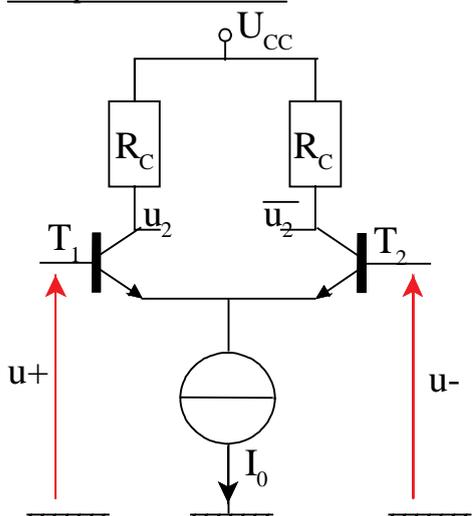
$$i = (\beta+1)(\beta'+1)i_B$$

2. Les amplificateurs de classe B, ou push-pull



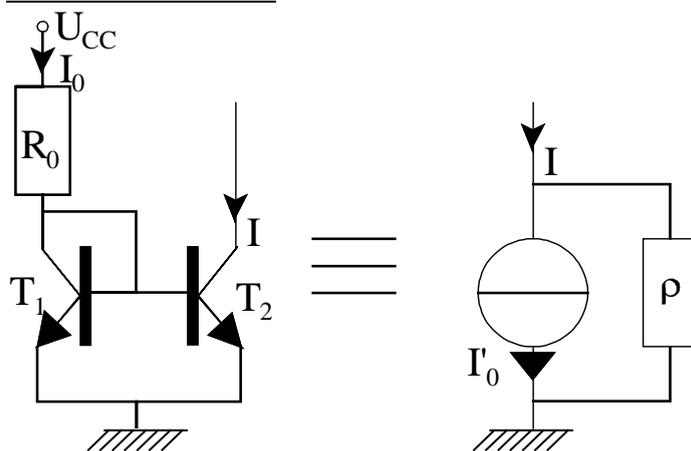
Le point de repos est à $I_C = 0$, donc ce type d'ampli consomme peu au repos. Le débloquage des diodes B-E produit une distortion au passage par 0, compensable. Le rendement atteint **78 %**. Chaque transistor est passant seul, suivant le signe du signal, d'où le nom de **push-pull**.

3. La paire différentielle



Amplifie la différence de potentiel ($u^+ - u^-$). Il faut 2 transistors identiques.

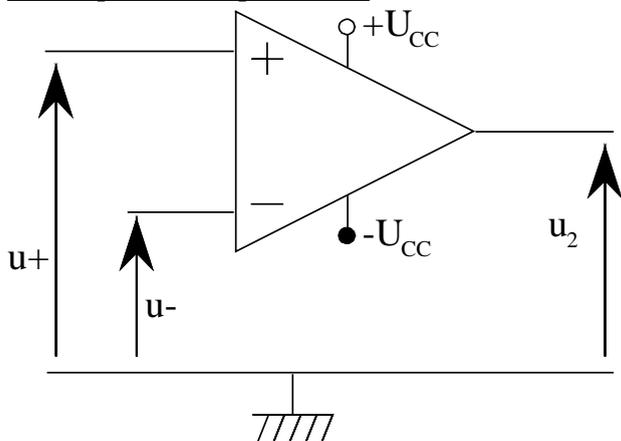
4. Le miroir de courant



Sert de source de courant quasi-idéale.

$$I = I_0 \beta / (\beta + 2).$$

5. L'amplificateur opérationnel



Ce circuit sera étudié plus loin dans le cours. L'une des structures les plus simples d'AO comporte 14 transistors bipolaires. **L'entrée est une paire différentielle** alimentée par un miroir. La sortie est un push-pull.