

Electronique II

Dylan Bourgeois

MT BA4

1 Introduction

Cours d'électronique II, donné par Mme Lacour.

2 Polarisation et Jonction PN

2.1 Physique du semi-conducteur

- **Conducteurs** : $\rho < 10^{-5}[\Omega.cm]$
- **Diélectriques** : $\rho > 10^8[\Omega.cm]$
- **Semi-conducteurs** : $10^{-5} < \rho < 10^8[\Omega.cm]$ Conduction électrique par e^- et trous. En apportant de l'énergie on fait passer les e^- de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC).

Densité de charges :

$$n_i = 5,2 \cdot 10^{-15} T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad [e^-.cm^{-3}]$$

Dans un semi-conducteur intrinsèque :

$$n = p = n_i \quad np = n_i^2$$

Conductivité électrique dans un semi-conducteur : $\sigma = \mu_n n e + \mu_p p e$

Mobilité μ : $v = \mu E \quad [m.s^{-1}] = [m^2.V^{-1}.s^{-1}].[V.m^{-1}]$

Courant : $I = nqvtw = nq\mu Etw$ avec tw = surface et la densité de courant est $j = \frac{I}{tw} = ne\mu E$

Loi d'Ohm : $E = \frac{V}{l} \Rightarrow I = ne\mu \frac{tw}{l} V$ avec la conductance $G = ne\mu \frac{tw}{l}$.

La résistivité est donnée par $\rho = \frac{1}{ne\mu}$

2.2 Dopage

2.2.1 Dopage N

Inclusion d'impuretés qui donnent des e^- dans la BC.

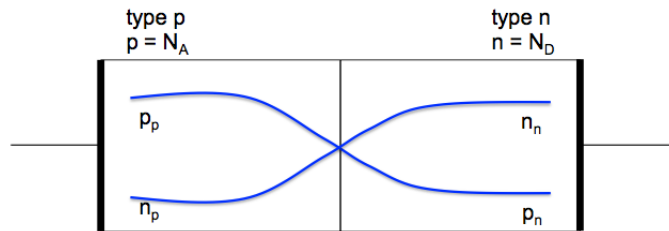
$$n = N_D \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{N_D} \quad \text{avec} \quad 10^{15} < N_D < 10^{20} \text{ cm}^{-3}$$

2.2.2 Dopage P

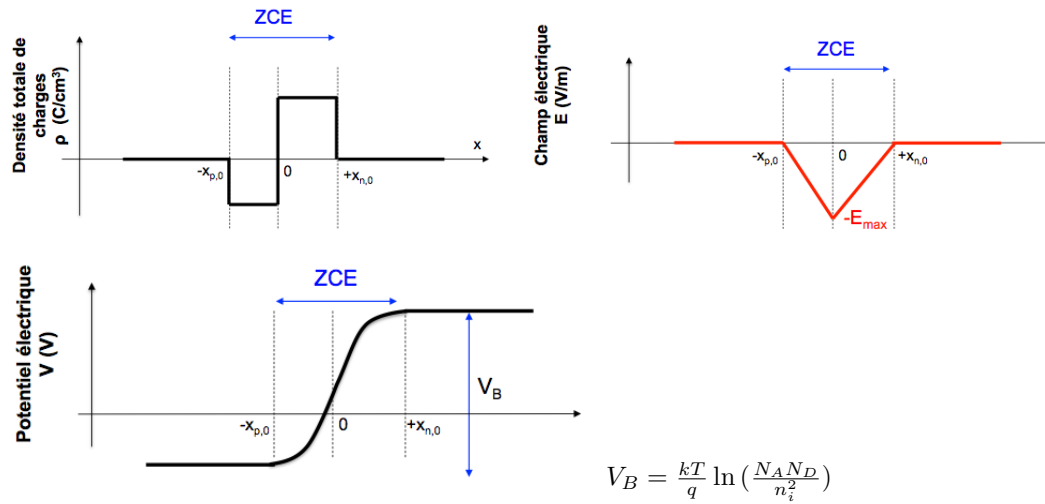
Inclusion d'impuretés qui donnent des trous dans la BC.

$$n = N_A \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{N_A}$$

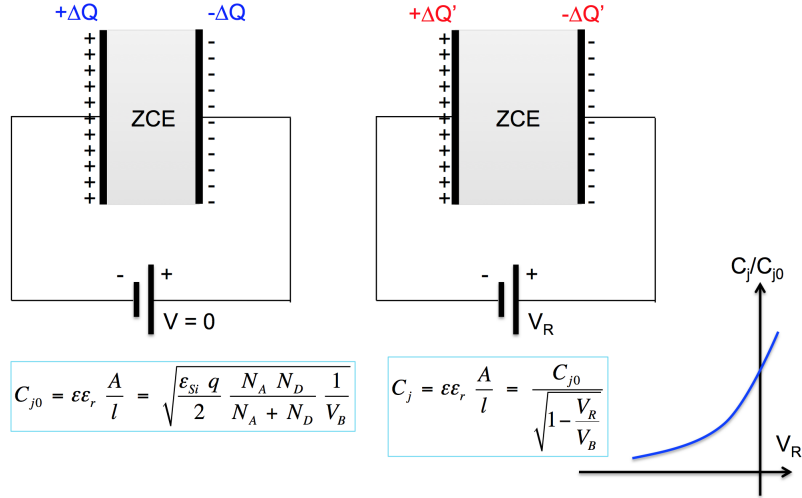
2.3 Jonctions PN



2.4 Zone de déplétion



2.5 Capacité de déplétion



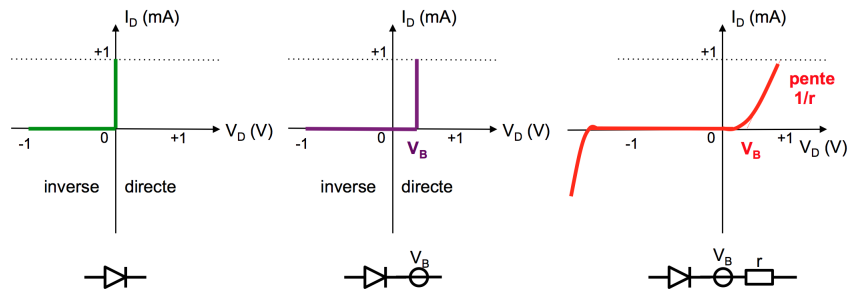
2.6 Caractéristique $I(V)$

$$I_D = I_S \exp\left(\frac{V_D}{V_T} - 1\right)$$

Caract. idéale

Caract. réelle 1

Caract. réelle 2



2.7 Courant de diode

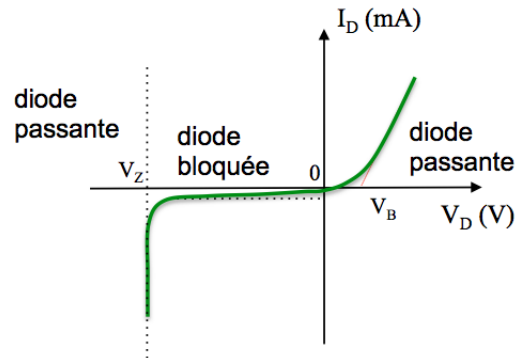
2.7.1 $V_D < 0$

$$I_D \sim -I_S = A \frac{kT}{q} \left(\mu_p \frac{n_i^2}{N_D L_p} + \mu_n \frac{n_i^2}{N_A L_n} \right)$$

2.7.2 $V_D > 0$

$$ideal : I_D = I_S \left(\exp \frac{qV_D}{kT} - 1 \right) \quad reel : I_D = I_S \left(\exp \frac{qV_D}{nkT} - 1 \right)$$

2.8 Diode Zener



2.9 A retenir

La polarisation d'une jonction PN modifie la distribution des charges à la surface:

- **Polarisation directe** : les porteurs minoritaires sont injectés dans les "zones neutres"
- **Polarisation inverse** : les porteurs minoritaires sont arrachés dans les "zones neutres"

Caractéristique $I(V)$ de la diode PN :

$$I_D \approx I_s \exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right)$$

Paramètres essentiels : $V_B, -I_s, r_d$

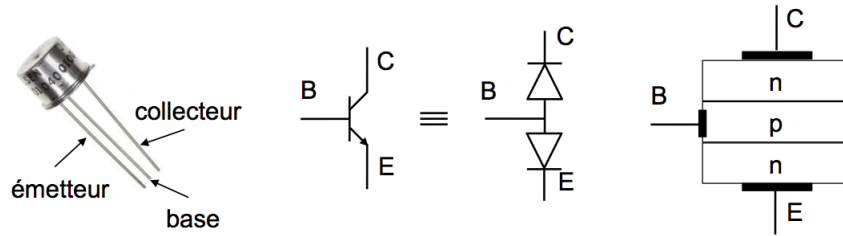
3 Le transistor bipolaire

3.1 Structure du transistor

3.1.1 Le transistor

Polarité indiquée par la flèche (= direction du courant I_E) Comporte trois électrodes :

- **Base** : électrode de commande.
- **Collecteur** : Relié au \oplus de l'alimentation.
- **Emetteur** : draine les courants de base et de collecteur.



3.1.2 Transistor NPN

régime	jonction BE	jonction CB
bloqué	Inverse $V_{BE} < 0$	Inverse $V_{CB} > 0$
normal	Direct $V_{BE} > 0$	Inverse $V_{CB} > 0$
saturé	Direct $V_{BE} > 0$	direct $V_{CB} < 0$

- **Etats de fonctionnement :**
- **Fonctionnement normal :** La "diode" BE est polarisée en mode direct, donc $V_{BE} > 0$. Les courants de diffusion sont des porteurs majoritaires : Trous de $B \rightarrow E$, e^- de $E \rightarrow B$. La "diode" BC est polarisée en mode inverse, donc $V_{BC} < 0$. Les courants de diffusion sont des porteurs minoritaires : e^- de $B \rightarrow C$. Au final, une large portion d' e^- se déplacent de $E \rightarrow C$, et un faible courant de trous se déplacent de $B \rightarrow E$.

3.1.3 Les courants I_B, I_E, I_C

Courant de collecteur (**NB** : ne dépend que de V_{BE}) :

$$I_C = I_S \exp\left(\frac{V_{BE}}{U_T} - 1\right)$$

Courant de base (avec β le gain en courant, $50 < \beta < 200$) :

$$I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

Courant d'émetteur :

$$I_E = \left(\frac{1}{\beta} + 1\right) I_S \exp\left(\frac{V_{BE}}{U_T} - 1\right)$$

3.1.4 Autres modes de fonctionnement

- **Bloqué :**

Les deux jonctions BE et BC sont en mode inverse Aucun courant ne circule Le collecteur est isolé de l'émetteur (circuit ouvert) ($V_{CE} \rightarrow V_{CC}$)

$$i_B = i_C = i_E = 0$$

- **Saturé :**

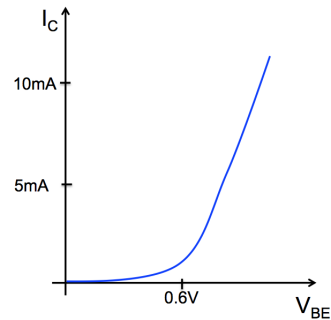
Les deux jonctions BE et BC sont en mode direct : $V_{BE} \sim 0.7V$ et $V_{BC} \sim 0.7V$. Diminution de $V_{CE} \rightarrow V_{CE,sat} \sim 0.2 - 0.3V$ Augmentation du courant de base i_B jusqu'à $i_{B,sat} > \frac{i_{C,sat}}{\beta}$.

3.1.5 A retenir

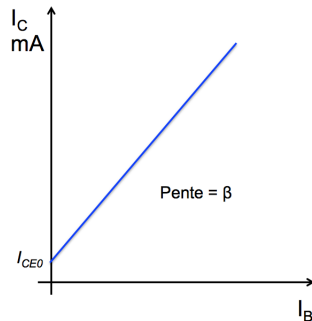
En mode normal, les courants sont proportionnels entre-eux et au facteur $\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$. De plus V_{BE} contrôle I_C (effet transistor). Ce dernier est indépendant de V_{BC} (isolation), mais est contrôlé via I_B .

3.2 Caractéristiques I(V)

3.2.1 $I_C = f(V_{BE})$



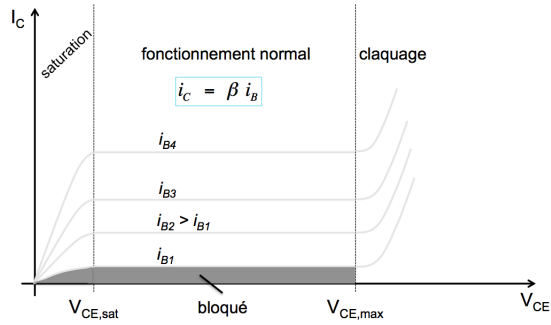
3.2.2 $I_C = f(I_B)$



Générateur de courant commandé par un courant. I_{CE0} est le courant de fuite.

$5 < \beta < 80$: transistors de puissance $100 < \beta < 500$: transistors de signal

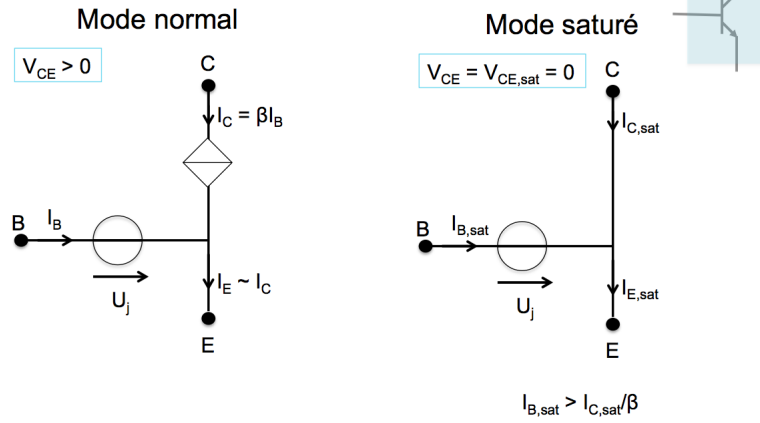
3.2.3 $I_C = f(V_{CE})$



3.2.4 Modèle grands signaux

- **Blocage** $V_{BE} < U_j$, $I_C = 0A$
- **Normal**
 - $V_{BE} = U_j$, $V_{BC} < U_j$ donc $V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} > 0$
 - $I_C = \beta I_B$
 - $I_E = (1 + \beta) I_B \sim I_C$
- **Saturation**
 - $V_{BE} = V_{BC} = U_j$ donc $V_{CE} = V_{CE,sat} \sim 0V$
 - $I_B = I_{B,sat} > \frac{I_{C,sat}}{\beta}$

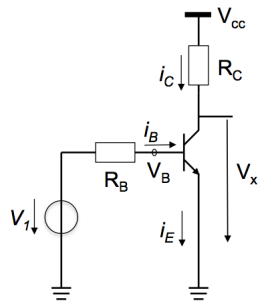
3.2.5 Schémas équivalents



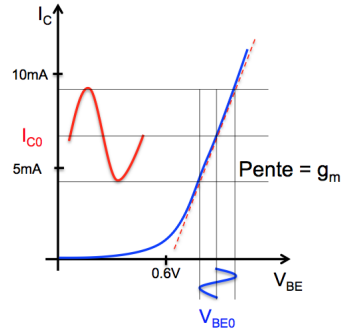
3.2.6 Montage inverseur

$$V_X = V_{CC} - R_C i_C$$

- $V_1 \leq U_j$: Le transistor est bloqué et $V_X = V_{CC}$
- $V_1 > U_j$: Le transistor est passant et $V_X = V_{CC} - \beta R_C i_B$
- Si le transistor est saturé : $V_X = V_{CE,sat} \approx 0V$



3.2.7 Transconductance



$$I_C = I_S(\exp(\frac{V_{BE}}{U_T}) - 1)$$

$$g_m = \frac{dI_C}{dV_{BE}}$$

3.3 Modèle petits signaux ($v \leq 10mV$)

3.3.1 Notations

Composantes statiques et dynamiques :

- $v_{BE}(t) = V_{BE,0} + v_{BE}(t)$
- $i_B(t) = I_{B,0} + i_B(t)$
- $v_{CE}(t) = V_{CE,0} + v_{CE}(t)$
- $i_C(t) = I_{C,0} + i_C(t)$

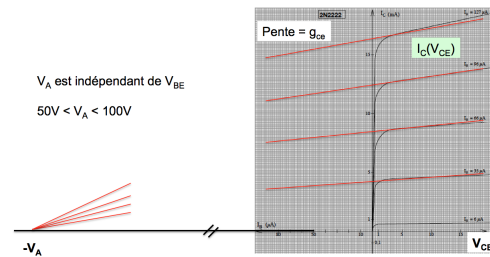
3.3.2 Transconductance

$$g_m = \frac{i_c}{v_{BE}} = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} \big|_{V_{BE,0}, I_{C,0}} \Rightarrow g_m = \frac{I_{C,0}}{U_T}$$

3.3.3 Résistance d'entrée (r_π)

$$i_B = g_{be} v_{BE} \Rightarrow g_{be} = \frac{g_m}{\beta} = \frac{I_{C,0}}{\beta U_T} \quad \text{NB: } g_m \gg g_{be}$$

3.3.4 Tension d'Early (V_A)



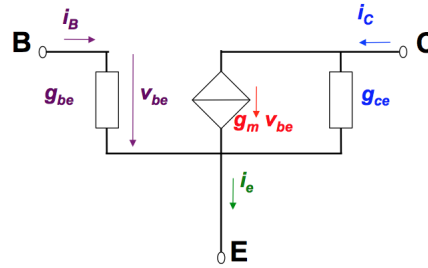
3.3.5 Résistance de sortie (r_0)

$$i_c = g_{ce} v_{CE} \Rightarrow \frac{i_c}{v_{CE}} = \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} \big|_{V_{BE,0}, I_{C,0}} \Rightarrow g_{ce} = \frac{I_{C,0}}{V_A} \quad \text{NB: } g_m \gg g_{be} \gg g_{ce}$$

3.3.6 A retenir

- NPN

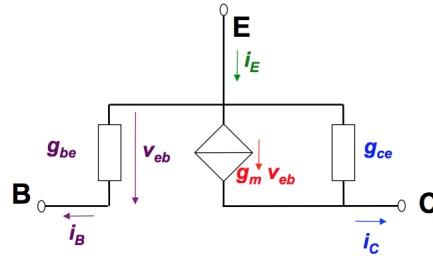
Transistor NPN



$$g_m = \frac{I_{C0}}{V_T} ; g_{be} = \frac{I_{C0}}{\beta V_T} ; g_{ce} = \frac{I_{C0}}{V_A}$$

- PNP

Transistor PNP

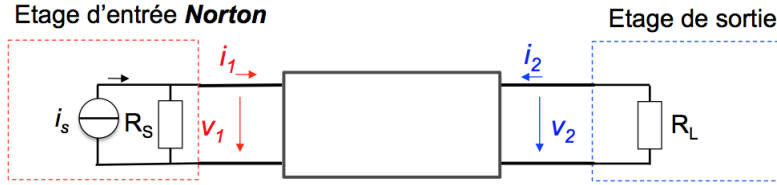
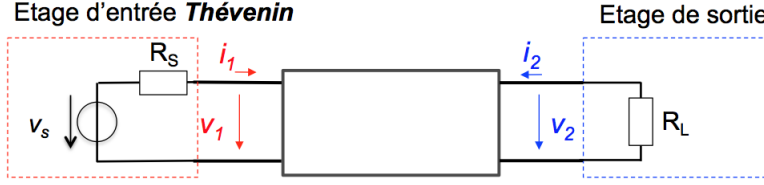


$$g_m = \frac{I_{C0}}{V_T} ; g_{be} = \frac{I_{C0}}{\beta V_T} ; g_{ce} = \frac{I_{C0}}{V_A}$$

4 Modèle petits signaux

4.1 Quadripôle

Le transistor peut-être vu comme un quadripôle si l'un des terminaux est mis en commun entre l'entrée et la sortie.



4.1.1 Résistance d'entrée

$$R_{in} = \frac{v_1}{i_1} \Big|_{R_L}$$

4.1.2 Impédance de sortie

$$R_{out} = \frac{v_2}{i_2} \Big|_{v_s=0}$$

4.1.3 Fonction de transfert

Gains en tension :

- Gain en tension à vide : $A_{v,0} = \frac{v_2}{v_1} \Big|_{R_L \rightarrow \infty}$
- Gain en tension avec une charge R_L : $A_v = \frac{v_2}{v_1} \Big|_{R_L} = A_{v,0} \frac{R_L}{R_L + R_{out}}$

Gains en courant :

- Gain en courant en court-circuit : $A_{i,0} = \frac{i_2}{i_1} \Big|_{R_L=0}$
- Gain en courant avec une charge R_L : $A_i = \frac{i_2}{i_1} \Big|_{R_L} = A_{i,0} \frac{R_{out}}{R_L + R_{out}}$

Gains transconductance :

- $G_{m,0}$ vide : $G_{m,0} = \frac{i_2}{v_1} \Big|_{R_L=0}$
- G_m avec une charge R_L : $G_m = \frac{i_2}{v_1} \Big|_{R_L} = G_{m,0} \frac{R_{out}}{R_L + R_{out}}$

Gains transrésistance :

- $R_{m,0}$ à vide : $R_{m,0} = \frac{v_2}{i_1} \Big|_{R_L=0}$
- R_m avec une charge R_L : $R_m = \frac{v_2}{i_1} \Big|_{R_L} = R_{m,0} \frac{R_L}{R_L + R_{out}}$

4.1.4 A retenir

- A vide : $A_{v,0} = -G_{m,0}R_{out}$
- Avec une charge R_L : $A_v = -G_m R_L$

4.2 Applications au transistor bipolaire

4.2.1 Emetteur commun

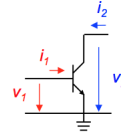
- Résistance d'entrée $R_{in} = \frac{1}{g_{be}}$
- Résistance de sortie $R_{out} = \frac{1}{g_{ce}}$
- Transconductance $G_{m0} = g_m$ $G_m = \frac{g_m}{1 + g_{ce}R_L}$
- Gain en tension

à vide

 $A_{v,0} = -\frac{g_m}{g_{ce}}$

en charge

 $A_v = -\frac{g_m R_L}{1 + g_{ce}R_L}$



4.2.2 Base commune

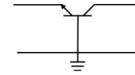
- Résistance d'entrée $R_{in} \approx (\frac{1}{g_m} + \frac{g_{ce}}{g_m} R_L) // \frac{1}{g_{be}}$
- Résistance de sortie $R_{out} \approx \frac{\beta}{g_{ce}}$
- Transconductance $G_{m0} = g_m$ $G_m = -\frac{g_m}{1 + g_{ce}R_L}$
- Gain en tension

à vide

 $A_{v,0} = \frac{g_m}{g_{ce}}$

en charge

 $A_v = \frac{g_m R_L}{1 + g_{ce}R_L}$



4.2.3 Collecteur commun

- Résistance d'entrée $R_{in} = \frac{1}{g_{be}} + \frac{1 + \beta}{g_{ce} + Y_L} \approx \frac{1}{g_{be}} + \beta R_L$
- Résistance de sortie $R_{out} = \frac{1 + g_{be} R_s}{g_m + g_{ce} (1 + g_{be} R_s)} \approx \frac{1}{g_m} + \frac{R_s}{\beta}$
- Transconductance $G_{m0} \approx -g_m$ $G_m = -\frac{g_m}{1 + g_m R_L}$
à vide en charge
- Gain en tension $A_{v0} \approx 1$ $A_v = \frac{g_m R_L}{1 + g_m R_L}$

4.2.4 Comparaison

performances	Emetteur commun	Base commune	Collecteur commun
Gain en tension	Élevé ($\sim -g_m R_L$)	Élevé ($\sim g_m R_L$)	≈ 1
Résistance d'entrée	Moyenne ($\leq 10k\Omega$)	Faible ($\leq 100\Omega$)	Élevée ($\leq 200k\Omega$)
Résistance de sortie	Élevée ($1/g_{ce}$)	Élevée (β/g_{ce})	Très faible

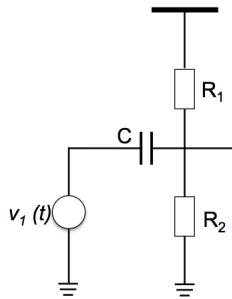
5 Polarisation

5.1 Rappel Condensateurs

$Z(j\omega) = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$ Alors :

- $f \rightarrow 0$ (i.e DC) : condensateur \sim circuit ouvert.
- $f \rightarrow \infty$ (i.e petits signaux) : condensateur \sim court-circuit.

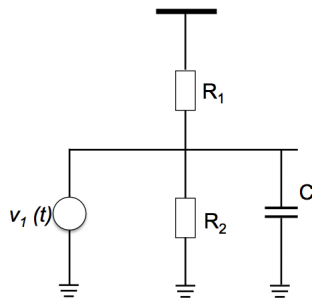
5.1.1 Condensateurs de couplage



Le pont de résistance est utilisé pour polariser le circuit à droite
C n'affecte pas l'état du pont de R

En petits signaux, C = court-circuit et permet de coupler $v_1(t)$ avec la polarisation

5.1.2 Condensateurs de détournement



En petits signaux, C = court-circuit et détourne le petit signal qui prend toujours le chemin de moindre impédance

Alors R_2 sert pour la polarisation mais pas pour le schéma équivalent petits signaux.

5.2 Objectif

Fixer le point de fonctionnement P (aussi appelé **point de Polarisation**) du transistor de façon indépendante de la dispersion caractéristique des transistors, en assurant sa stabilité, notamment vis-à-vis de la température, et en limitant le nombre de sources d'alimentation. C'est autour de ce point que prendront place les variations à amplifier.

5.2.1 Variations et imperfections

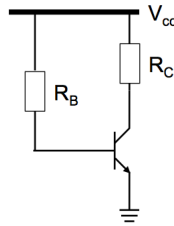
- Variation de température :

- $I_C = cst \Rightarrow V_{BE}$ varie de $-2mV/K$
- $V_{BE} = cst \Rightarrow I_C$ augmente de $8\%/K$
- β augmente de $0.8 - 1.5\%/K$

- Dispersion des paramètres du transistor (tolérances) :

- $I_S : \pm 50\%$
- $\beta : \pm 100\%$

5.2.2 Polarisation par base



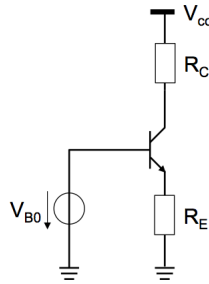
Courant de base: I_{B0}

$$I_{B0} = \frac{V_{CC} - V_{BE0}}{R_B} = \frac{V_{CC} - U_j}{R_B} \Rightarrow \text{stable}$$

Courant de collecteur: I_{C0}

$$I_{C0} = \beta I_{B0} = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE0}}{R_B}$$

5.2.3 Polarisation par l'émetteur



➤ Fixer le potentiel d'émetteur à une valeur stable

$$V_{E0} = V_{B0} - V_{BE0}$$

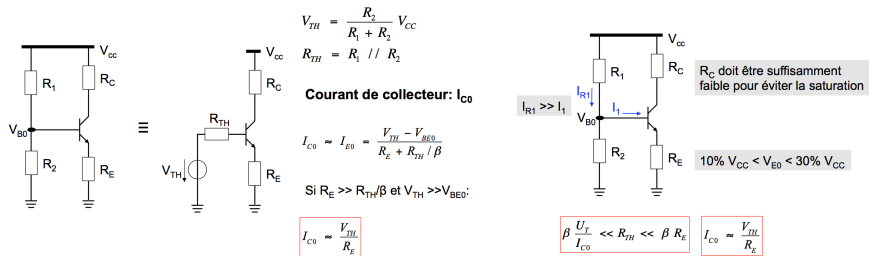
Courant de collecteur: I_{C0}

$$I_{C0} \approx I_{E0} = \frac{V_{B0} - V_{BE0}}{R_E} \quad \text{indépendent de } \beta$$

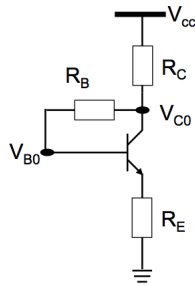
$$\frac{\partial I_{C0}}{\partial T} = -\frac{1}{R_E} \frac{\partial V_{BE0}}{\partial T} = \frac{2mV/^\circ C}{R_E}$$

$$\frac{\Delta I_{C0} / I_{C0}}{\Delta T} = \frac{2mV/^\circ C}{R_E I_{C0}} = \frac{2mV/^\circ C}{V_{B0} - V_{BE0}}$$

5.2.4 Polarisation par contrôle du courant d'émetteur



5.2.5 Polarisation par contre-réaction collecteur-base



Courant de collecteur: I_{C0}

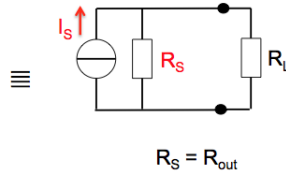
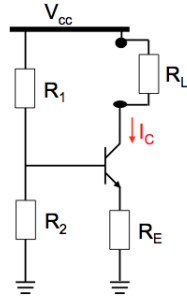
$$I_{C0} = \frac{V_{CC} - V_{BE0}}{R_C + R_B / \beta + R_E(1 + \beta) / \beta}$$

Indépendance de I_{C0} si

- $V_{CC} \gg V_{BE0}$
- $R_C \gg R_B / \beta$

6 Sources de courant

6.1 Montage de Base



En mode normal, I_C est quasi-indépendant de V_{CE} . On notera aussi que R_{source} est très élevée. On a :

$$I_C = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{TH}}{\beta}} = I_{source}$$

$$V_{CE} > 0 \Rightarrow R_L < \frac{V_{CC}}{I_L} - V_E$$

$$R_{out} = \frac{1}{g_{ce}} \left(1 + \frac{\beta R_E}{R_E + R_{TH} + \frac{1}{g_{BE}}} \right) + \left(R_{TH} + \frac{1}{g_{be}} \right) // R_E$$

NB : Si $R_E = 0 \Rightarrow R_{out} = \frac{1}{g_{ce}}$

6.2 Miroir de courant