

Résumé de cours M1 Microélectronique
Module : Physique des composants semi-conducteurs 2

Transistor bipolaire

Prof. Abdelhamid BENHAYA

Directeur du Laboratoire d'Electronique Avancée
Responsable Salle Blanche

Département d'Electronique
Faculté de Technologie
Université Batna 2

Domaines d'intérêt:

Technologie des semi-conducteurs
(Matériaux et dispositifs photovoltaïques)

e-mail: a.benhaya@univ-batna2.dz
benhaya_abdelhamid@yahoo.fr

Tel: +213 (0)7 73 87 37 84

BIBLIOGRAPHIE

Langue Anglaise

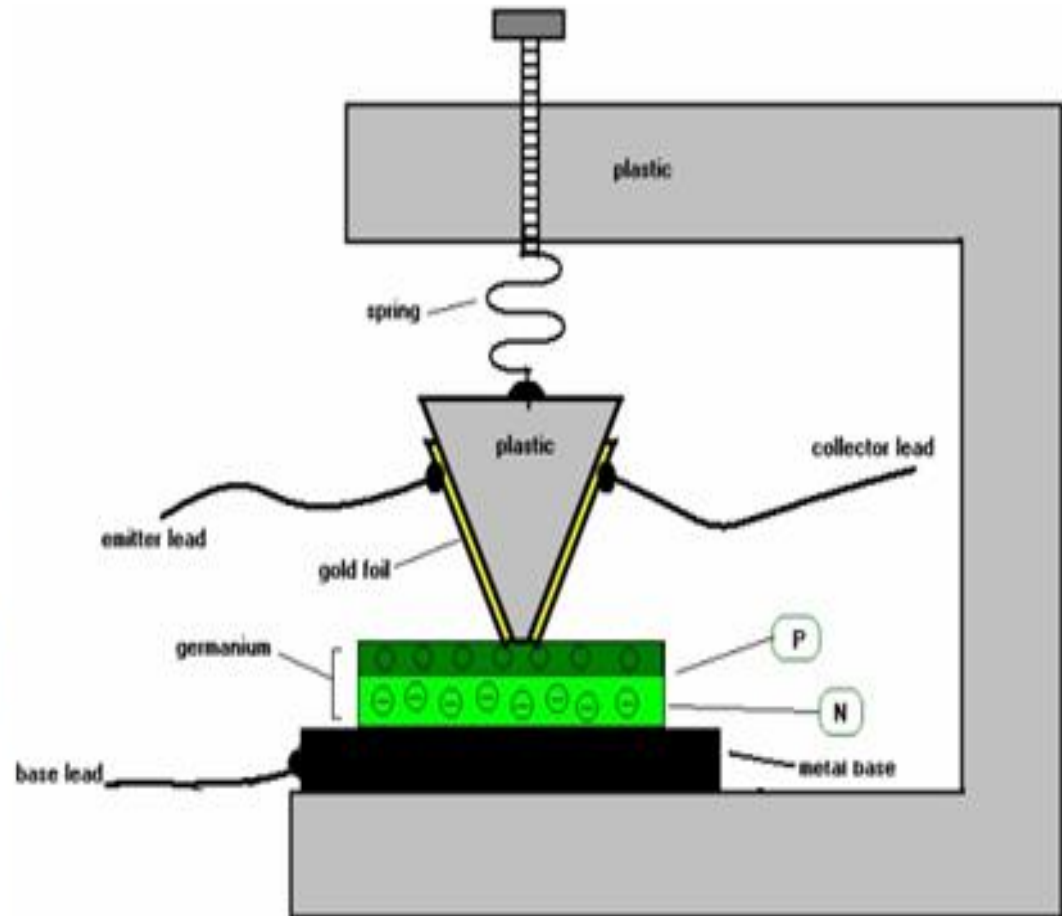
1. Marius Grundmann, The Physics of Semiconductors, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
2. S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, JOHN WILEY & SONS, 2007.
3. <http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/contents.htm>

Langue Française

1. A. Vapaille et R. Castagné, Dispositifs et circuits semi-conducteurs, Physique et technologie, Dunod, 1987.
2. CHRISTIAN ET HELENE NGÖ, Introduction à la physique des semi-conducteurs, Dunod, 1998.
3. H. MATHIEU, physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Dunod, 2001.
4. <https://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/>
5. <http://koeniguer.perso.cegetel.net/ips/ips.html>

<https://youtu.be/m59awXHk5Ko>

Transistor Bipolaire



Transistor Bipolaire

Plan

- Généralités
- Rappel de quelques notions de base sur la jonction pn
- Éléments de base
- Caractéristiques $I(V)$ et schémas équivalents
- Technologie
- Applications

Transistor Bipolaire

1^{ère} partie
Généralités

Transistor Bipolaire

Historique

- **1945**: Formation d'un groupe de travail sur les semi-conducteurs composé de John Bardeen, Walter Brattain sous la direction de William Shockley;
- Un premier prototype développé par Shockley ne fonctionna pas;
- **16/12/1947**: John Bardeen et Walter Brattain apportèrent les corrections et réussirent à tester avec succès le 1^{er} prototype;
- **23/12/1947**: Présentation du prototype aux reste des chercheurs des labo. Bell;
- **John Pierce**, un ingénieur en électricité, donna le nom de « **transistor** » à ce nouveau composant;
- **30/06/1948**: Présentation du transistor lors d'une conférence de presse à New York.



Composants discrets

Transistor bipolaire

Composants bipolaires et unipolaires

- Dans les composants bipolaires, les porteurs de charge libres sont à la fois des électrons et des trous.
- Un composant bipolaire nécessite les deux types de porteurs pour fonctionner convenablement.

Exemple: La jonction PN et le transistor bipolaire

- Au contraire, un composant unipolaire a besoin d'un seul type de porteurs libres pour fonctionner.

Exemple: Le transistor à effet de champ (TEC)

Composants discrets

Transistor bipolaire

Différents Types

-Faible puissance(1).

Dissipation: quelques dizaines à quelques centaines de mW.

-Moyenne puissance(2).

Dissipation: quelques W

-Grande puissance(3).

Dissipation $\approx 100W$

-Basse fréquence

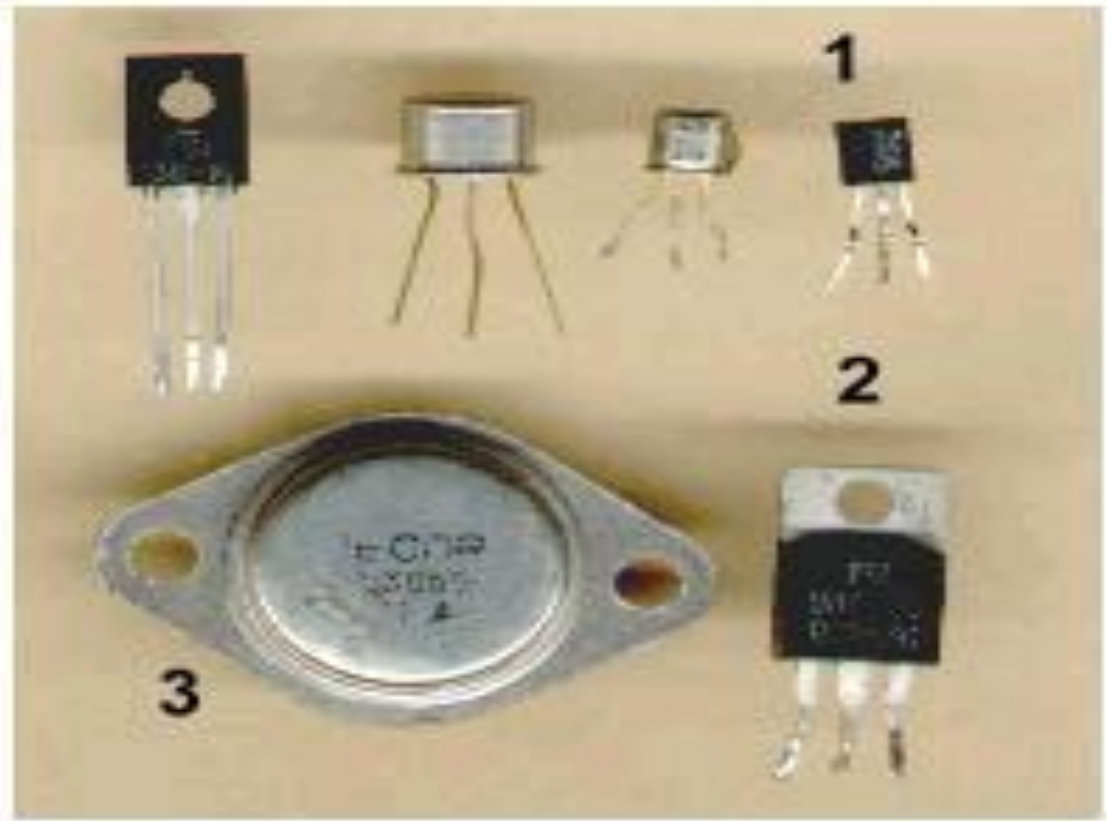
Quelques centaine kHz.

-Moyenne fréquence

Quelques dizaines de MHz

-Haute fréquence

Quelques GHz à quelques centaine de GHz



Composants discrets

Transistor bipolaire

Code de désignation des transistors.

-Le code Japonais : il **ressemble** au code américain.

Quelques **préfixes** utilisés sont : **2SB** pour les transistors **PNP** basse fréquence, **2SD** pour les transistors **NPN** basse fréquence.

-Le code européen : **chaque composant** est désigné par **deux lettres**. si la première lettre est **(A)** alors il s'agit du **germanium**, si c'est **(B)** alors il s'agit du **silicium**.

Si la **deuxième** lettre est **(C)** alors il s'agit d'un transistor basse fréquence de **faible puissance**;

si cette **deuxième lettre** est **(D)** alors il s'agit d'un transistor **basse fréquence** de **puissance**.

Transistor Bipolaire

2^{ème} partie

Rappel de quelques
notions de base sur la jonction pn

Rappel: Jonction pn

Définition :

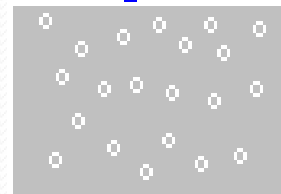
On dit qu'il y a **jonction** dans un cristal semi-conducteur lorsque ce cristal contient **un excès de donneurs** d'un **côté (région N)** et un **excès d'accepteurs** de l'autre **côté (région P)**.

On appelle **plan de jonction**, la **frontière** entre les deux régions.

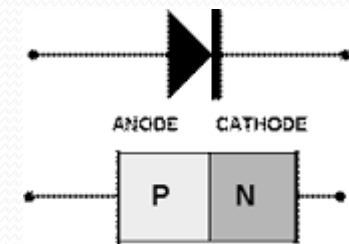
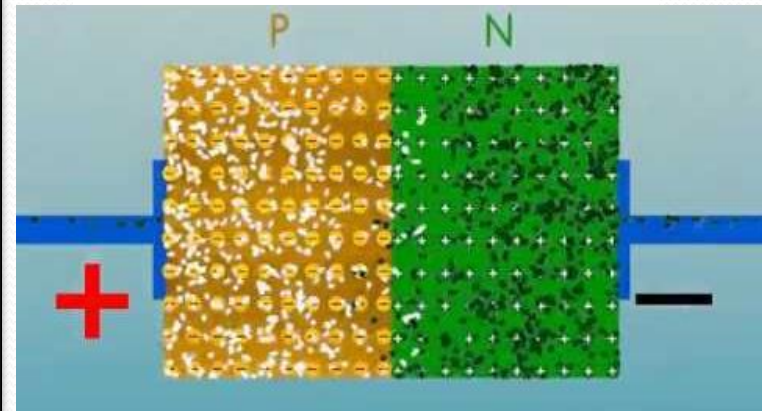
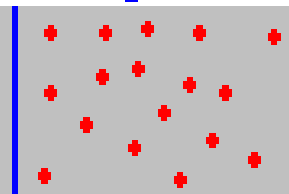
Remarque

La **réalisation d'une jonction** se fait sur **le même substrat** semi-conducteur et non pas par la juxtaposition de deux cristaux l'un de type N et l'autre de type P.

Région P



Région N

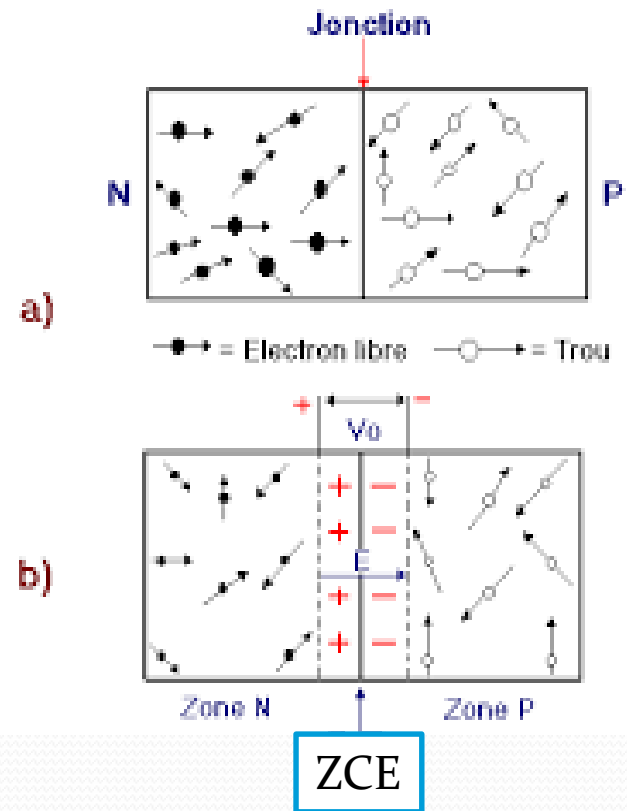


Rappel: Jonction pn

Formation de la jonction pn

La Fig. (a) montre la jonction juste après sa réalisation

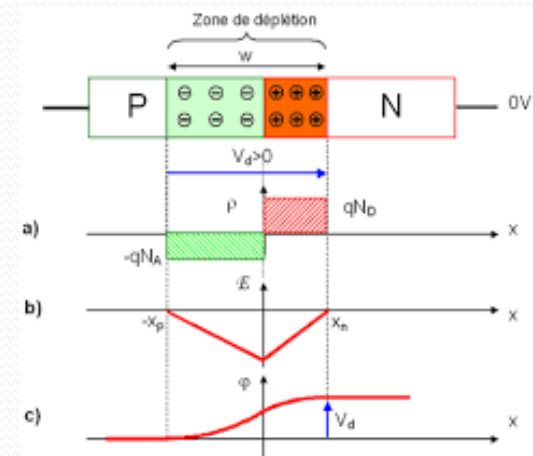
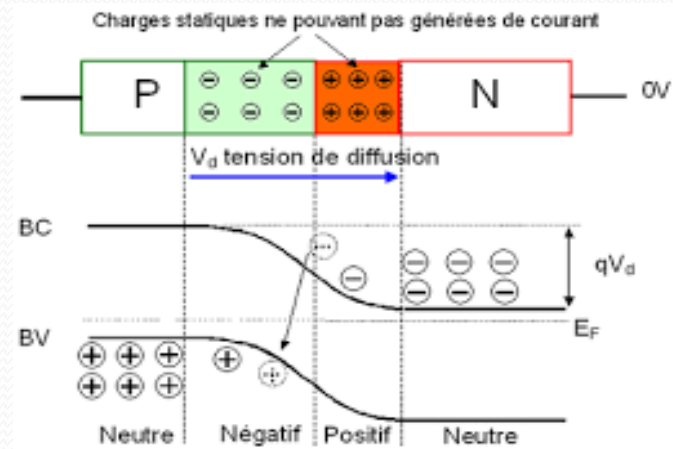
La Fig.(b) montre la jonction pn à l'équilibre thermodynamique après formation de la ZCE à cause de la diffusion des électrons de la région N vers la région P et les trous de la région P vers la région N



Rappel: Jonction pn

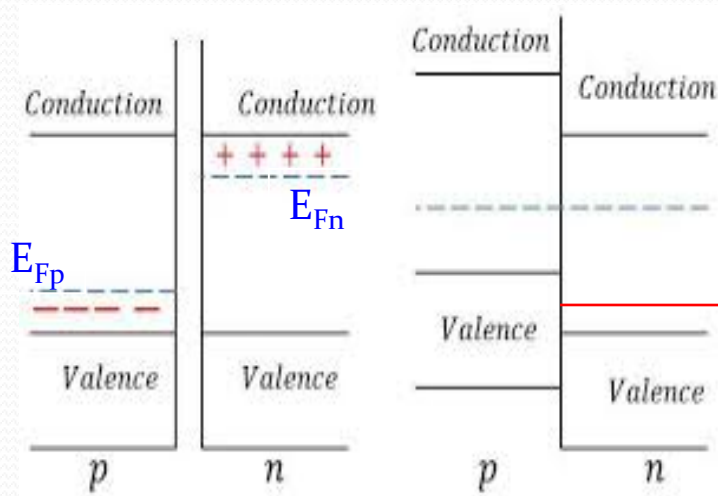
Barrière de potentiel

A cause des charges de la ZCE, les bandes se courbent, ce qui conduit à l'apparition d'un champ électrique et à la formation d'une barrière de potentiel, de hauteur V_d , entre la région N et la région P.

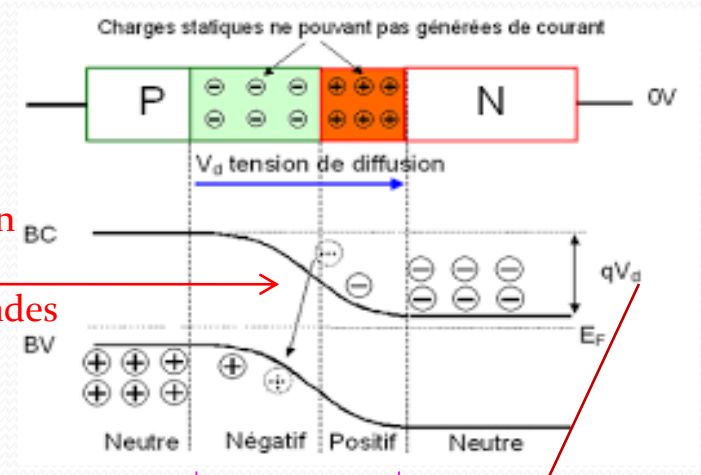


Rappel: Jonction pn

Diagramme de Bandes



E_F D'après l'équation de Poisson, il y a courbure des bandes



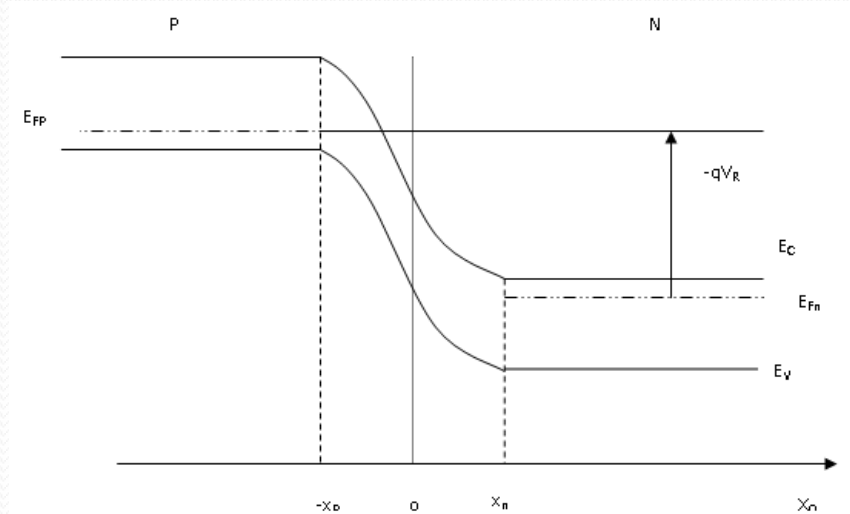
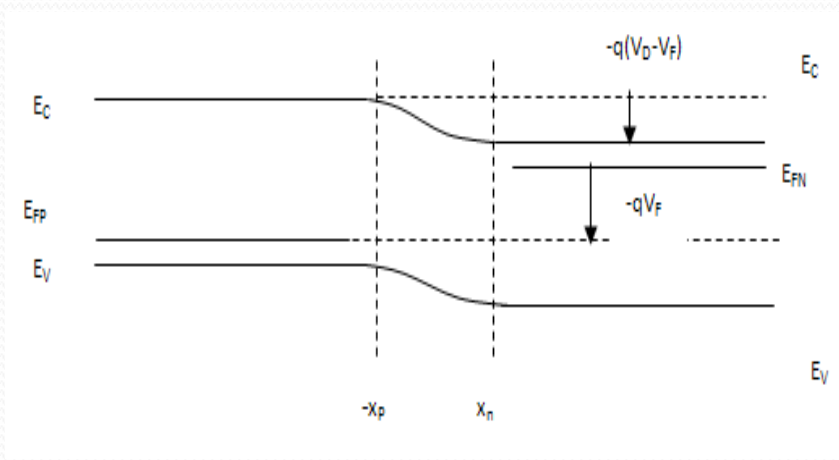
$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_s}{e} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) V_B}$$

$$V_d = \left(\frac{kT}{e} \right) \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

Rappel: Jonction pn

Effet de la polarisation directe

Effet de la polarisation inverse



$$V_F \uparrow \Rightarrow W \downarrow$$

$$|V_R| \uparrow \Rightarrow W \uparrow$$

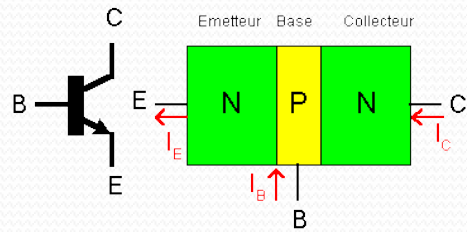
Transistor Bipolaire

3^{ème} partie
Éléments de base

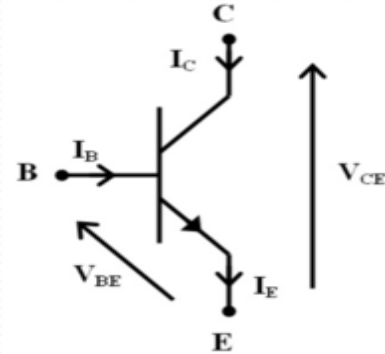
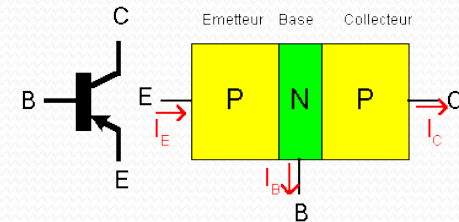
Composants discrets

Transistor bipolaire

Représentation du NPN

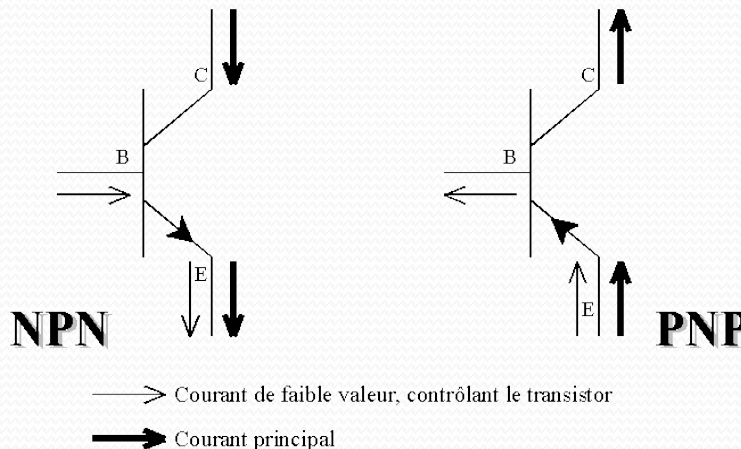


Représentation du PNP



Le **transistor bipolaire**, vu de l'extérieur, se comporte comme un tripôle

- Emetteur (E),
- Base (B) et
- Collecteur (C).



Remarque

le transistor PNP est le complément du transistor NPN, i.e. les signes des courants et des tensions du transistor PNP sont opposés à ceux du NPN

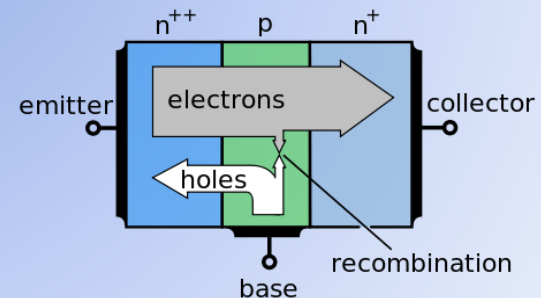
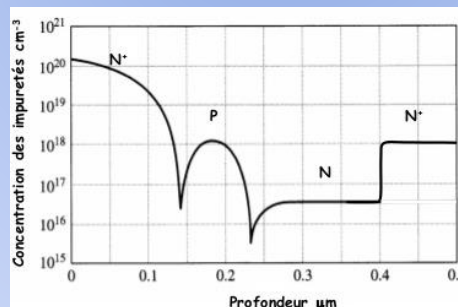
Composants discrets

Transistor bipolaire

Dopage des trois régions

Le bon fonctionnement du transistor nécessite que les trois régions soient dopées de la façon suivante :

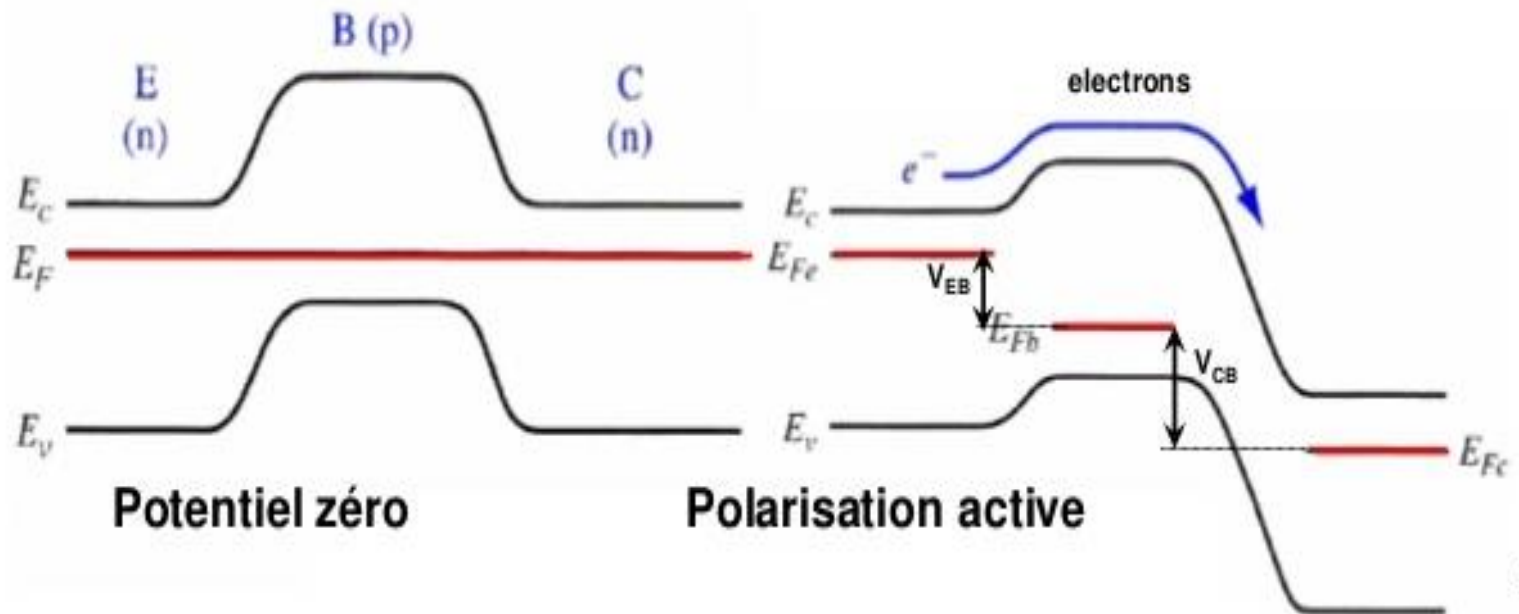
- **L'émetteur est fortement dopé**, car son rôle est d'émettre des électrons (trous) dans la base ;
- **La base est moyennement dopée** et **très mince** (de l'ordre du μm). Son rôle est de transmettre au collecteur la plupart des électrons (trous) venant de l'émetteur ;
- **Le collecteur est constitué de 2 régions**, l'une est faiblement dopée et l'autre est très dopée.



Composants discrets

Transistor bipolaire

Diagramme de bandes d'un **transistor NPN**



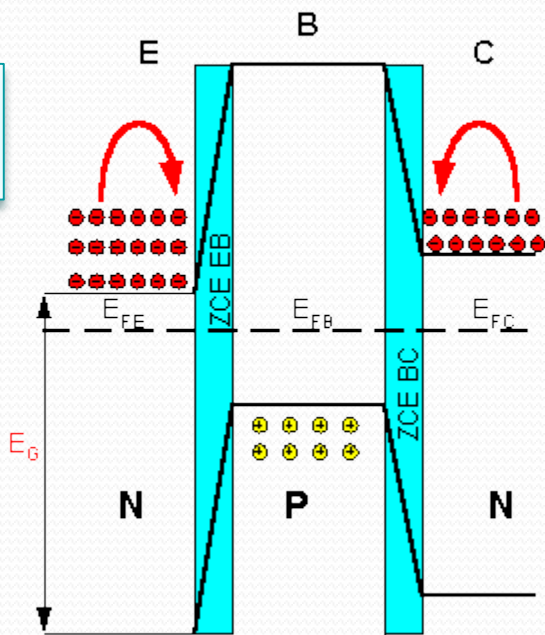
19

Composants discrets

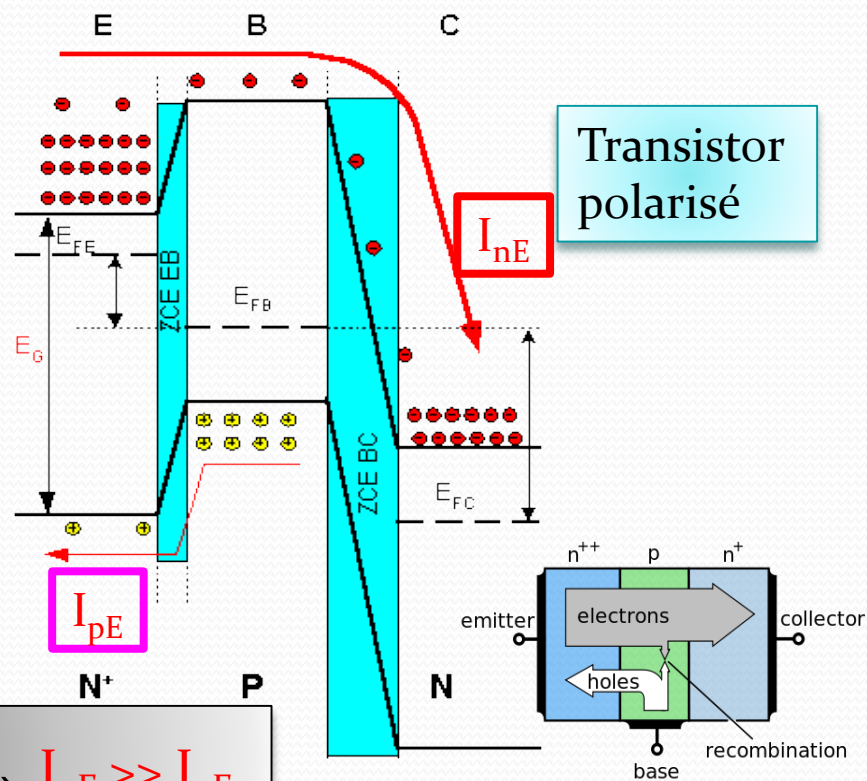
Transistor bipolaire

Effet transistor

Transistor
Non polarisé



Transistor
polarisé



Comme $N_{DE} \gg N_{AB} \Rightarrow J_{nE} \gg J_{pE}$.

Composants discrets

Transistor bipolaire

Les régimes de fonctionnement d'un transistor

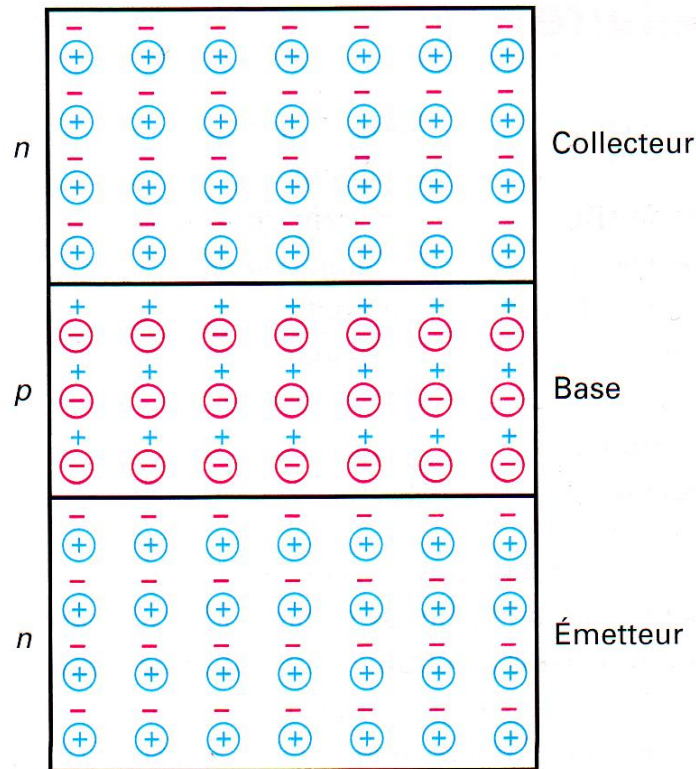
Le fonctionnement d'un transistor dépend du type de la polarisation des jonctions émetteur base (EB) et Base collecteur (BC).

Jonction EB	Jonction BC	Mode
Direct	inverse	Actif (normal)
Inverse	Direct	Actif inversé
Direct (+)	Direct	Saturation
Direct	Direct (+)	Saturation inversée
Inverse	inverse	Bloqué

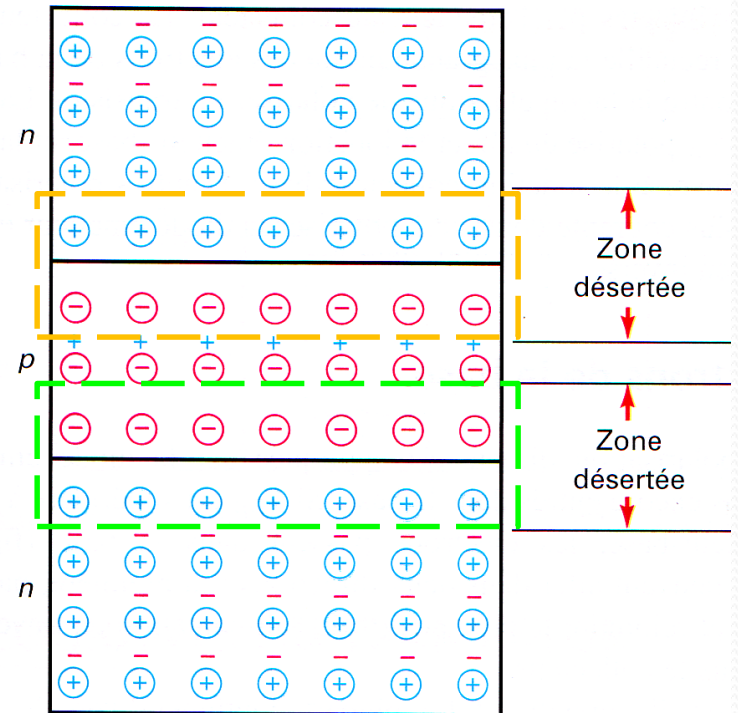
Composants discrets

Transistor bipolaire

Avant établissement des jonctions (ZCE)



Après établissement des jonctions (ZCE)



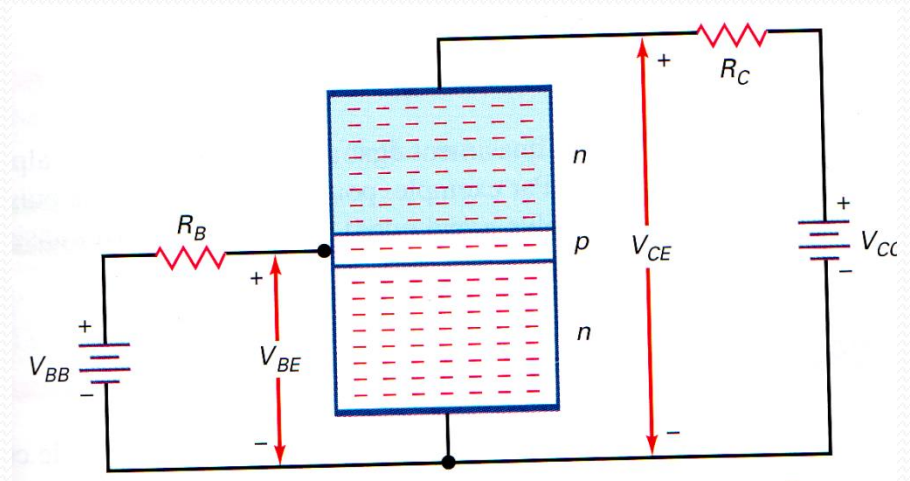
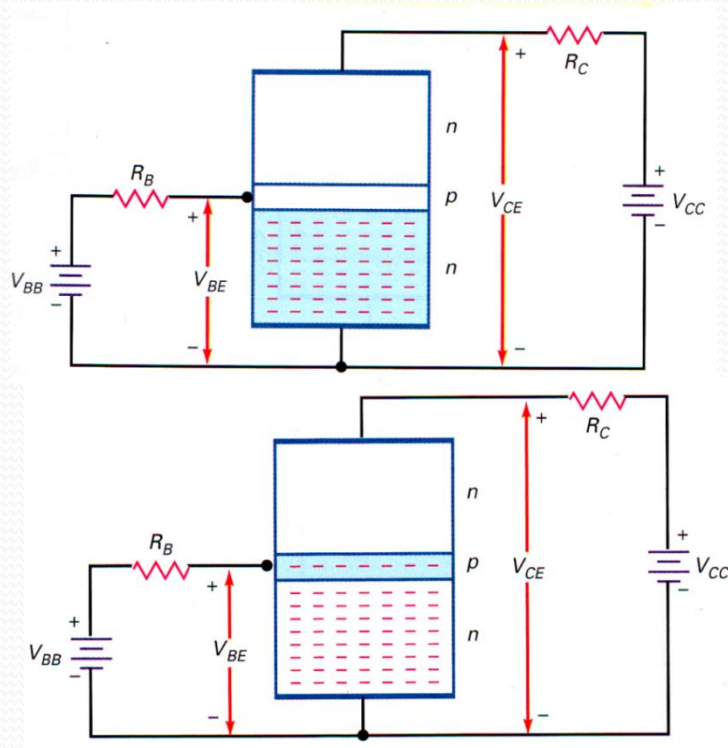
Composants discrets

Transistor bipolaire

Effet transistor

Les électrons de l'Emetteur sont injectés dans la base

Les électrons injectés dans la base mince sont catapultés dans le collecteur

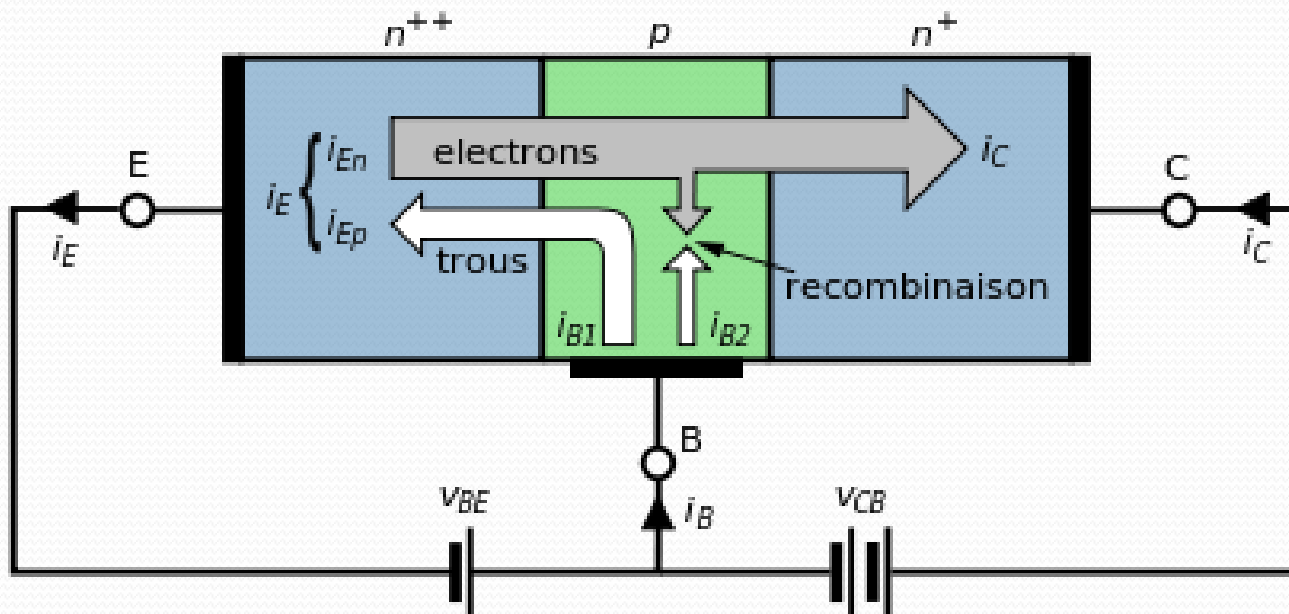


Composants discrets

Transistor bipolaire

Les courants dans un transistor bipolaire

$$I_E = I_C + I_B$$



Composants discrets

Transistor bipolaire

Relations entre les différents courants

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C = \beta \cdot I_B + I_{CE0}$$

$$I_{CE0} \ll \beta \cdot I_B$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$hFE = \beta$: amplification en courant

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

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

on montre que $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$

$$I_{CE0} = \frac{I_{CB0}}{1 - \alpha}$$

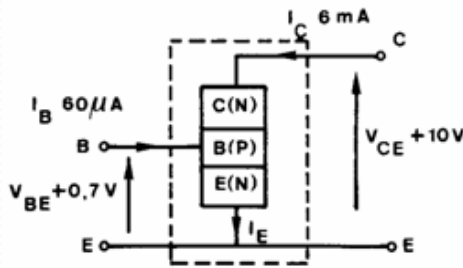
Courant de fuite C-E
Courant inverse C-B

$$0,95 \leq \alpha \leq 1$$

Composants discrets

Transistor bipolaire

Les trois montages



$$V_{CE} = V_C - V_E = 10 \text{ V}$$

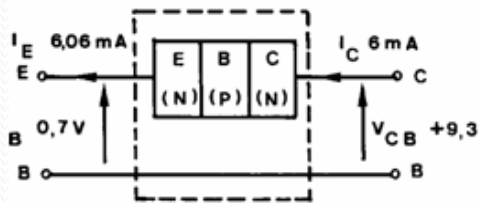
$$V_{BE} = V_B - V_E = 0,7 \text{ V}$$

$$I_E = I_C + I_B \quad I_E > I_C$$

Gain en courant :

$$b = I_C / I_B = 6 \text{ mA} / 60 \mu\text{A} = 100 \quad (\text{v.z.})$$

Emetteur commun



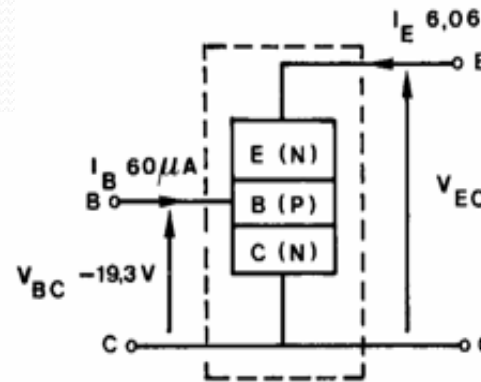
$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} = 9,3 \text{ V}$$

$$V_{EB} = -V_{BE} = -0,7 \text{ V}$$

Gain en courant :

$$a = I_C / I_E = 6 \text{ mA} / 6,06 \text{ mA} = 0,99 \quad (\text{V.3})$$

Base commune



$$V_{EC} = -V_{CE} = -10 \text{ V}$$

$$V_{BC} = -V_{CB} = -9,3 \text{ V}$$

Gain en courant :

$$I_E / I_B = 6,06 \text{ mA} / 60 \mu\text{A} = 10$$

Collecteur commun

Montage → Grandeur ↓	Base commune	Emetteur commun	Collecteur commun
Gain Tension	Elevé	Moyen	Faible
Gain en courant	Faible	Moyen	Moyen
Gain puissance	Faible	Elevé	Moyen
Impédance d'entrée	Faible	Moyen	Elevée
Impédance de sortie	Moyen	Faible	Faible

Composants discrets

Transistor bipolaire

Les paramètres essentiels d'un transistor bipolaire en régime actif direct

Le profil de concentration des électrons dans la base

$$n_B(x) = n_{B0} \exp\left(\frac{eV_{BE}}{kT}\right) \left(1 - \frac{x}{W_B}\right)$$

Le courant d'électrons traversant la base

- $J_n(0) = J_n(W_B) = eD_{nB} \frac{\partial n_B}{\partial x} = -e \frac{D_{nB}}{W_B} n_{B0} \exp\left(\frac{eV_{BE}}{kT}\right)$

Temps de transit

$$t_B = \int_0^{W_B} \frac{dx}{v(x)} = \frac{W_B^2}{2D_{nB}}$$

Avec:

$$v(x) = \frac{J_n(x)}{-en_B(x)} = \frac{D_{nB}}{W_B - x}$$

Composants discrets

Transistor bipolaire

Paramètres affectant les gains en courant

Facteur d'injection de l'émetteur (γ)

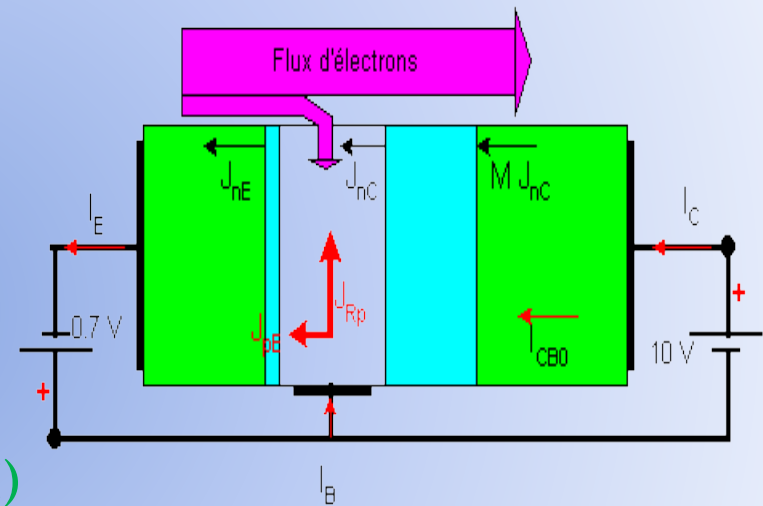
$$\gamma = \frac{J_{nE}}{J_E} = \frac{J_{nE}}{J_{nE} + J_{pE}} \quad \gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_{pE} W_B N_{AB}}{D_{nB} W_E N_{DE}}}$$

Facteur de transport dans la base (B)

$$B = \frac{J_{nC}}{J_{nE}} \quad B = 1 - \frac{t_B}{\tau_{nB}} = 1 - \frac{W_B^2}{2L_{nB}^2}$$

Facteur de multiplication du collecteur (M)

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_{BC}}{BV_{CB0}} \right)^3}$$



Composants discrets

Transistor bipolaire

Calcul des gains

Gain α

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{J_C}{J_E} = \frac{J_{nE}}{J_E} \times \frac{J_{nC}}{J_{nE}} \times \frac{J_C}{J_{nC}}$$

$$\alpha = \frac{J_{nE}}{J_E} \times \frac{J_{nC}}{J_{nE}} \times \frac{J_C}{J_{nC}}$$

$$\alpha = \underbrace{\frac{J_{nE}}{J_E}}_{\gamma} \times \underbrace{\frac{J_{nC}}{J_{nE}}}_B \times \underbrace{\frac{J_C}{J_{nC}}}_M$$

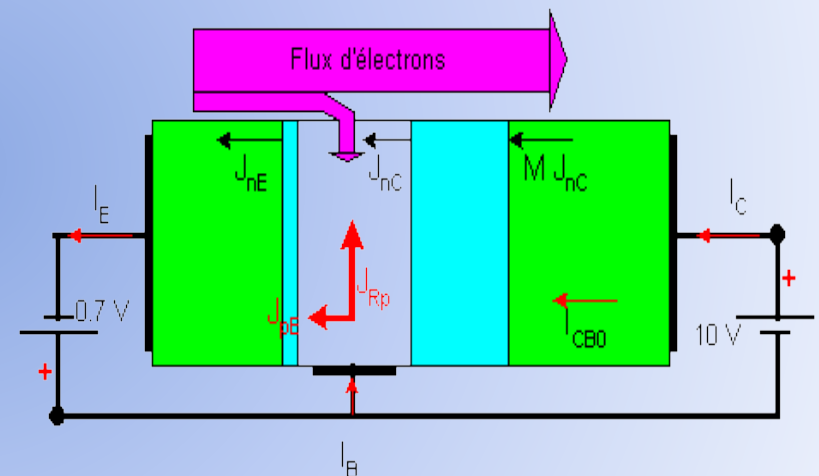
$$\alpha = \gamma \cdot B \cdot M$$

Comme $\gamma < 1$, $B < 1$ et $M > 1$,
 α est voisin mais inférieur à 1

Gain β

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C}{I_E - I_C} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{\gamma B M}{1 - \gamma B M}$$

Ordre de grandeur : Si $\alpha \approx 0.99$, alors $\beta \approx 100$.



Transistor Bipolaire

4^{ème} partie

Caractéristiques I(V) et schémas équivalents

Composants discrets

Transistor bipolaire

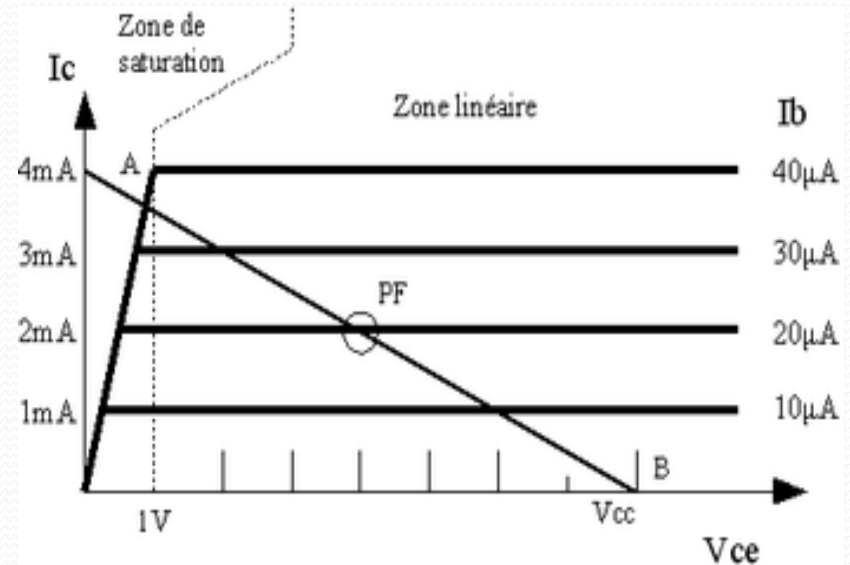
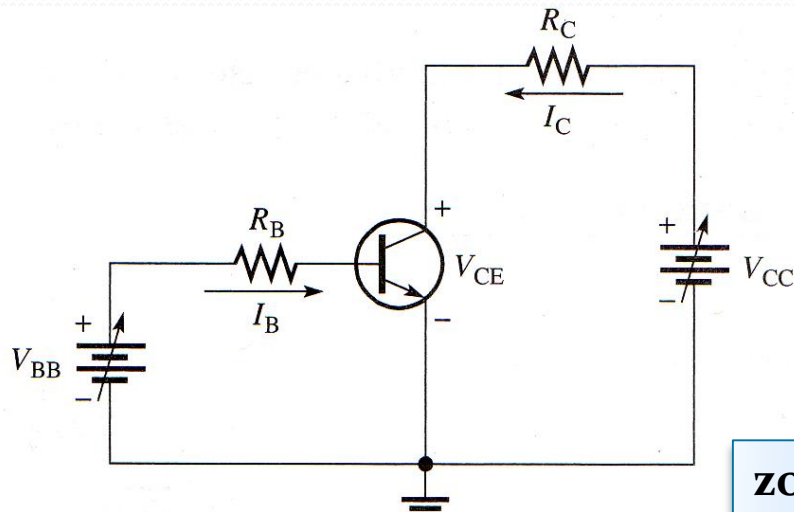
Réseaux de caractéristiques I(V)

Montage → Caractéristique de : ↓	Base commune (BC)	Emetteur commun (EC)	Collecteur commun (CC)
Entrée	$I_E(V_{EB})_{V_{CB}}$	$I_B(V_{BE})_{V_{CE}}$	$I_B(V_{BC})_{V_{EC}}$
Sortie	$I_C(V_{CB})_{I_E}$	$I_C(V_{CE})_{I_B}$	$I_E(V_{EC})_{I_B}$
Transfert en courant	$I_C(I_E)_{V_{CB}}$	$I_C(I_B)_{V_{CE}}$	$I_E(I_B)_{V_{EC}}$
Réaction en tension	$V_{EB}(V_{CB})_{I_E}$	$V_{BE}(V_{CE})_{I_B}$	$V_{BC}(V_{EC})_{I_B}$

Composants discrets

Transistor bipolaire

- Réseaux de caractéristiques $I_C(V_{CE})$



zone de saturation: pour des tensions $V_{ce} < 1\text{ V}$; dans cette zone, I_C dépend à la fois de V_{ce} et de I_B

zone linéaire : le courant collecteur est quasi indépendant de V_{ce} , il ne dépend que de I_B

Composants discrets

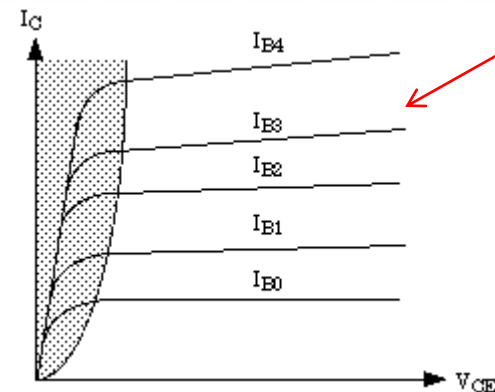
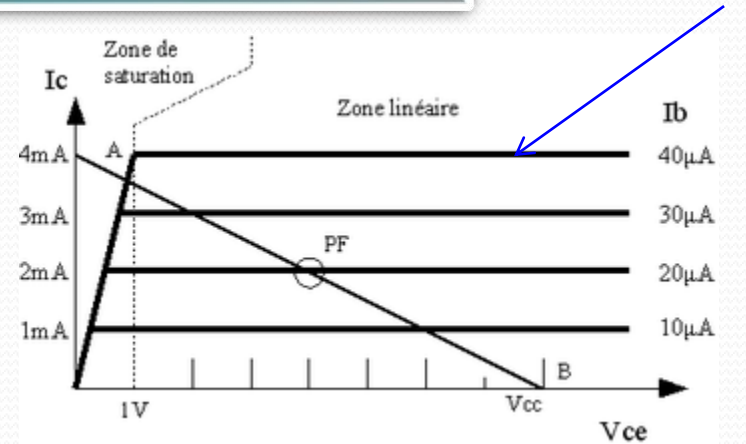
Transistor bipolaire

Effet Early

1) Description du phénomène

Pour un transistor bipolaire idéal, le courant I_C ne doit pas varier en fonction de V_{CE} (dans la zone linéaire)

En réalité, la hausse de cette tension (V_{ce}) modifie légèrement I_C . C'est ce qu'on appelle **l'effet Early**.



Composants discrets

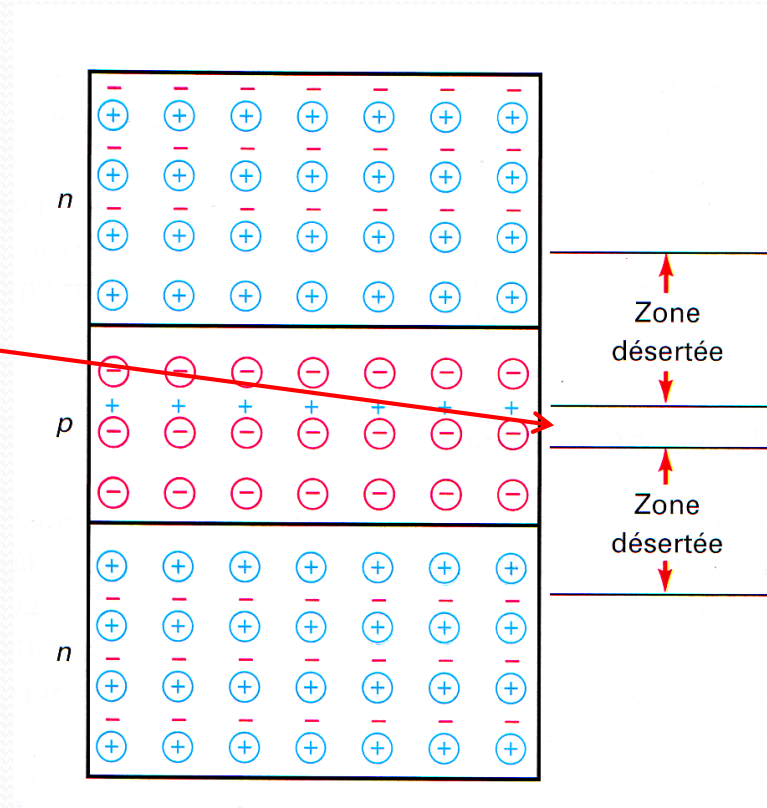
Transistor bipolaire

Effet Early

2) Explication du phénomène

L'augmentation de V_{CE} va élargir la ZCE Collecteur-Base, ce qui diminue légèrement l'épaisseur effective de la base.

Le rétrécissement de la largeur de la base implique une augmentation du nombre de porteurs transférés vers le collecteur, et donc une augmentation du courant I_C avec l'augmentation de V_{CE} .



Composants discrets

Transistor bipolaire

Modes de fonctionnement

Régime statique: Les grandeurs électriques envisagées (**courant, tension**) sont toutes **continues** (statiques) et repérées par des majuscules (V, I)

Régime dynamique : Les grandeurs électriques envisagées **dépendent du temps** et repérés par des minuscules ($v(t), i(t)$).

Régime dynamique petit signal

Un régime dynamique particulier est le *régime petit signal* (**électronique linéaire**) où les grandeurs électriques sont formées par **une valeurs statique** plus une **petite variation dynamique** autour de cette valeur :

$$V(t) = V + v(t) = V + v \sin t \text{ (dans le cas d'un régime sinusoïdal)}$$

$$I(t) = I + i(t) = I + i \sin t \text{ (dans le cas d'un régime sinusoïdal)}$$

Remarques

- Les grandeurs continues, notées en majuscules, ($V, , \dots$) définissent les point de fonctionnement statique.
- Les grandeurs dynamiques, notées en minuscules, ($v, i \dots$) définissent le fonctionnement dynamique.
- Le régime petit signal est toujours caractérisé par des amplitudes crêtes des grandeurs dynamiques beaucoup plus petites que les valeurs des grandeurs statiques ($v \ll V, i \ll I \dots$)

Composants discrets

Transistor bipolaire

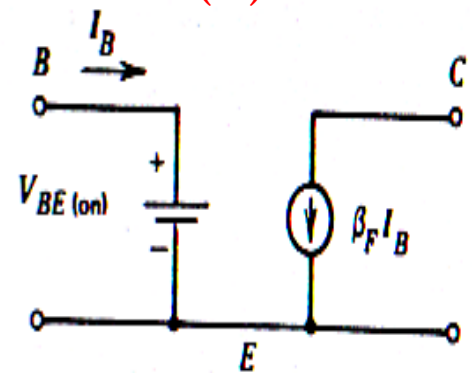
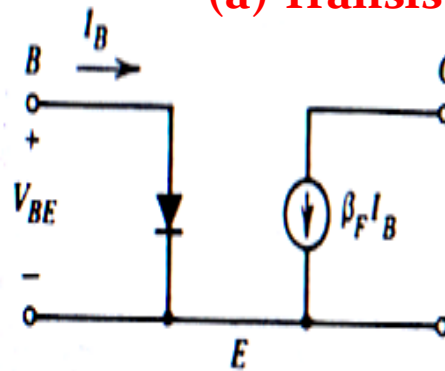
Comportement pour les grands signaux

Schéma équivalent du transistor:

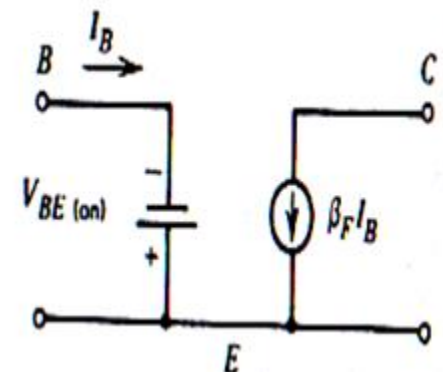
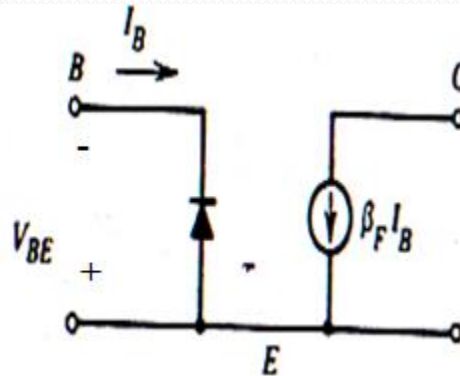
(a) npn, (b) pnp

(dans a' et b', la diode est remplacée par une batterie de f.e.m= V_{BE}).

(a) Transistor npn (a')



(b) Transistor pnp (b')

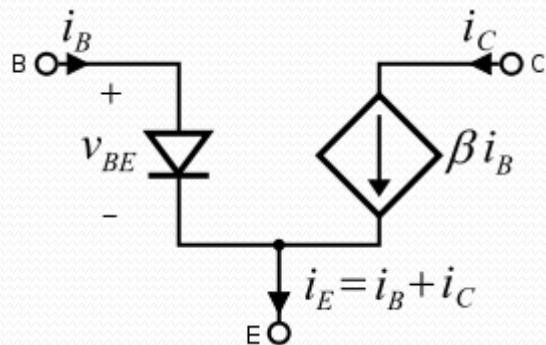


Composants discrets

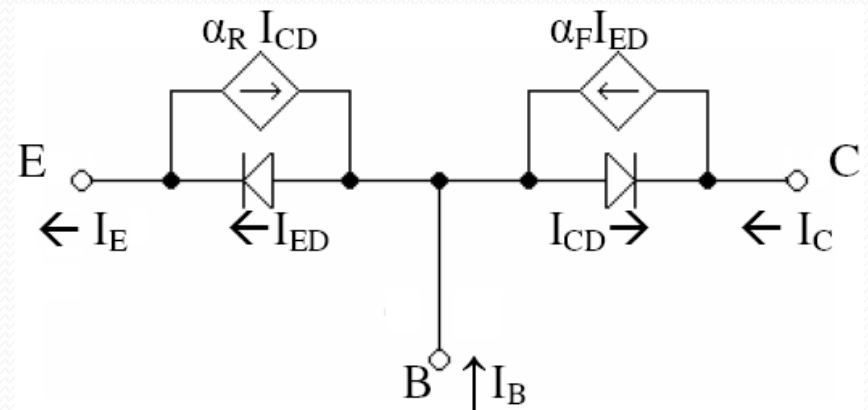
Transistor bipolaire

Modèle simple d'un transistor en fonctionnement linéaire

Modèle simple d'un transistor en fonctionnement linéaire



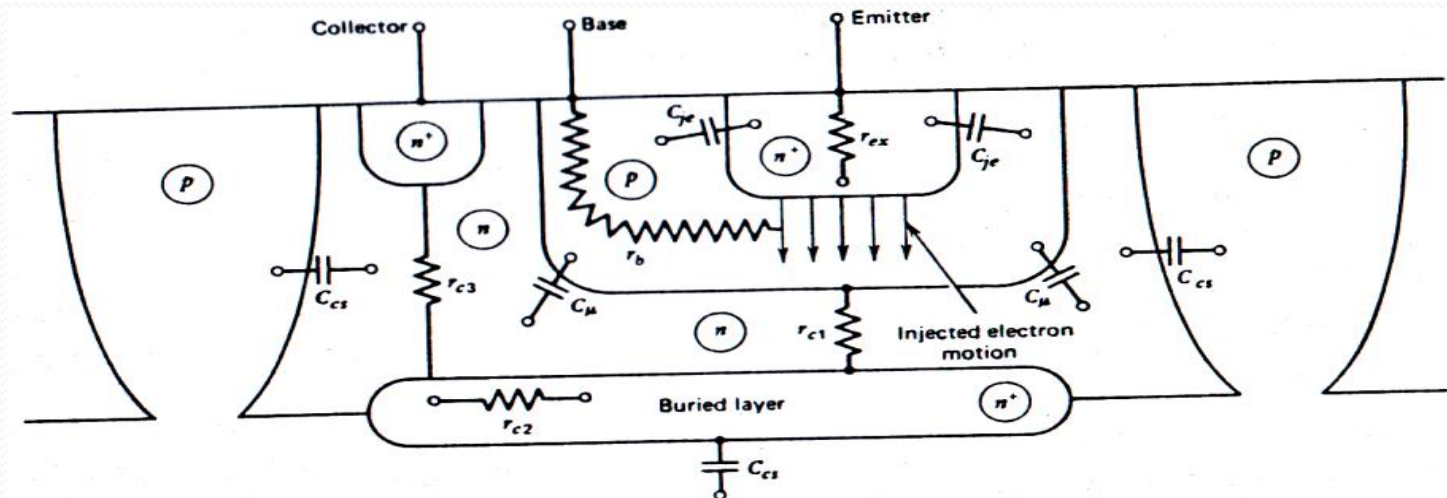
Modèle d'Ebers-Moll d'un transistor en fonctionnement linéaire



Composants discrets

Transistor bipolaire

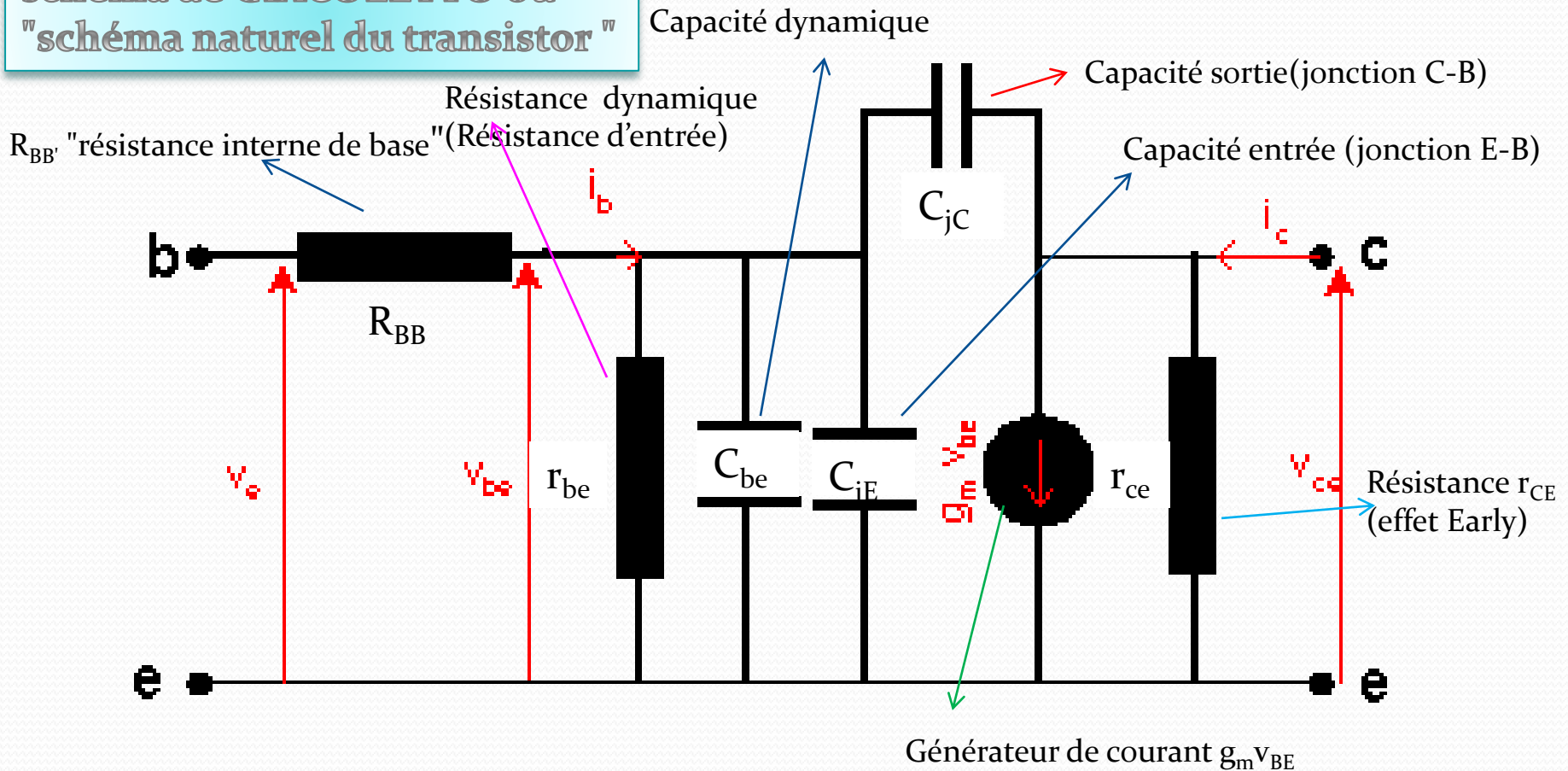
Structure du transistor bipolaire
(Comportement pour les Faibles signaux)



Composants discrets

Transistor bipolaire

schéma de GIACOLETTO ou
"schéma naturel du transistor"



Composants discrets

Transistor bipolaire

Paramètres dynamiques du transistor bipolaire

$v_e = Z_e i_b$ et si C_{jC} est négligée, on obtient:

$$Z_e = \frac{r_{be}}{1 + j\omega r_{be} (c_{be} + c_{jE})}$$

Dans le cas où on néglige l'effet EARLY ($r_{ce} = \infty$); $i_c = g_m v_{be} = g_m Z_e i_b = \beta i_b$,

On obtient:

$$\beta = g_m Z_e \quad \text{avec} \quad \beta_0 = g_m r_{be}$$

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + j\omega/\omega_\beta} \quad \text{et}$$

$$\omega_\beta = \frac{1}{r_{be} (c_{be} + c_{jE})}$$

La **pente externe** $s = i_c/v_e$ en fonction de **la pente interne** (g_m) est donnée par:

$$s = \frac{i_c}{v_e} = g_m v_{be} = g_m \frac{Z_e}{R_{BB'} + Z_e}$$

Le **facteur de mérite** du transistor qui est le produit **Gain x Bande Passante** est donné par:

$$T = 1/(R_{BB'} \cdot C_{jC})$$

Paramètres hybrides

Tant qu'il fonctionne **en régime petit signal**, le transistor bipolaire, peut être **considéré** comme **un quadripôle** qu'on **modélise par** la matrice H ou **matrice hybride** donnée par l'expression:

$$V_1 = h_{11} i_1 + h_{12} V_2$$

$$i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} V_2$$

Si **le quadripôle** est un transistor **émetteur commun**, la matrice H devient:

$$V_{be} = h_{11} i_b + h_{12} V_{ce}$$

$$i_c = h_{21} i_b + h_{22} V_{ce}$$

Composants discrets Transistor bipolaire

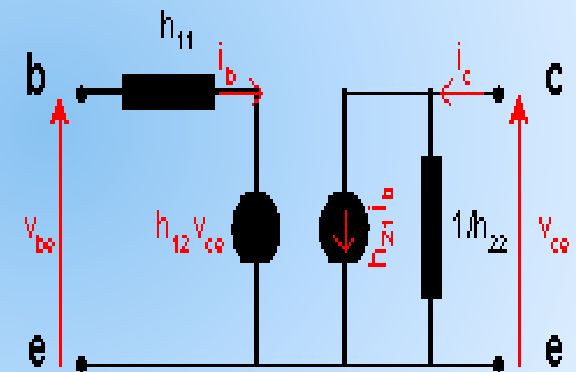
L'expression **des différents paramètres** de la matrice H et le schéma équivalent sont donnés ci-dessous:

$$h_{11} = \left(\frac{\Delta V_{be}}{\Delta I_B} \right)_{V_{ce} = \text{cste}} = \left(\frac{V_{be}}{i_b} \right)_{V_{ce} = 0} \quad (\Omega)$$

$$h_{12} = \left(\frac{\Delta V_{be}}{\Delta V_{ce}} \right)_{I_B = \text{cste}} = \left(\frac{V_{be}}{V_{ce}} \right)_{i_b = 0} \quad (\text{S U})$$

$$h_{21} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right)_{V_{ce} = \text{cste}} = \left(\frac{i_c}{i_b} \right)_{V_{ce} = 0} \quad (\text{S U})$$

$$h_{22} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{ce}} \right)_{I_B = \text{cste}} = \left(\frac{i_c}{V_{ce}} \right)_{i_b = 0} \quad (\Omega^{-1})$$



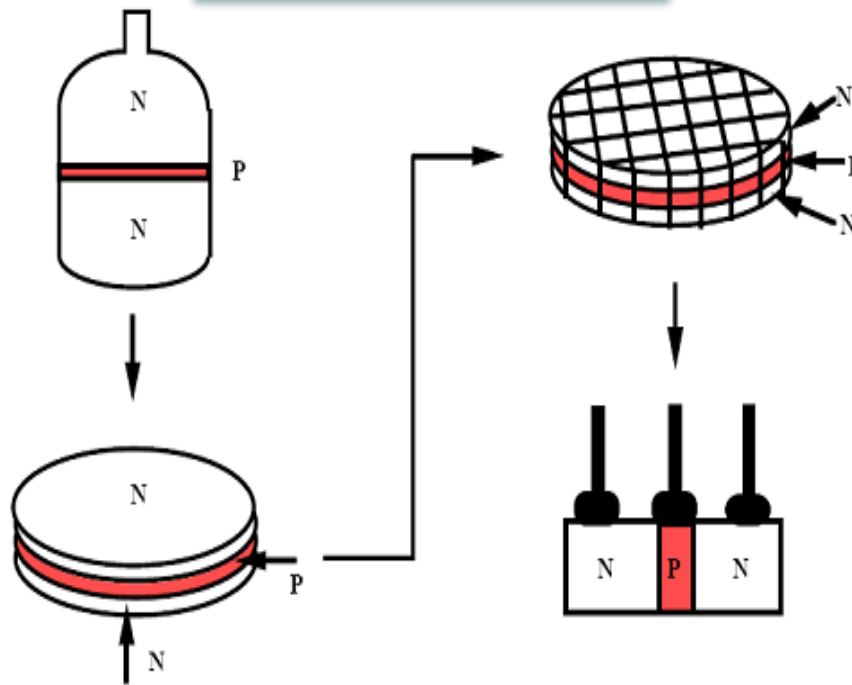
Transistor Bipolaire

5^{ème} partie
Technologie

Composants discrets

Transistor bipolaire

Technologie

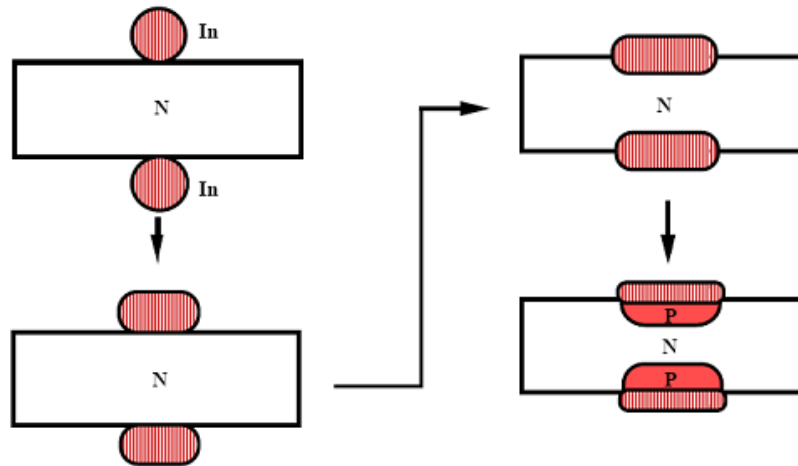


- Grown junction transistor technology of the 1950s.

Composants discrets

Transistor bipolaire

Technologie

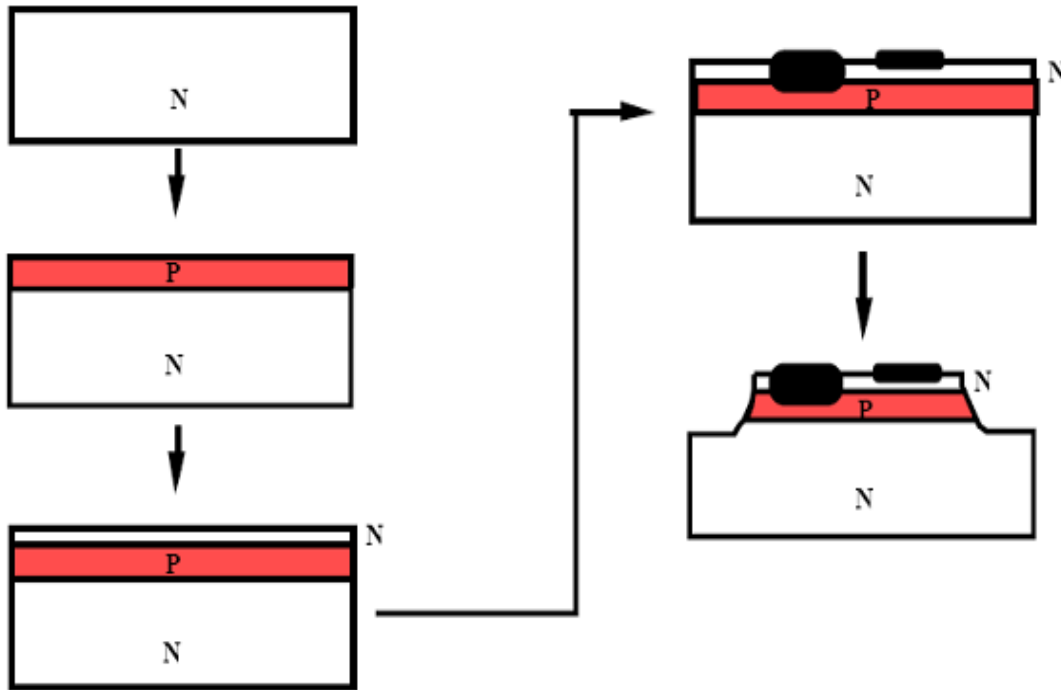


- Alloy junction technology of the 1950s.

Composants discrets

Transistor bipolaire

Technologie

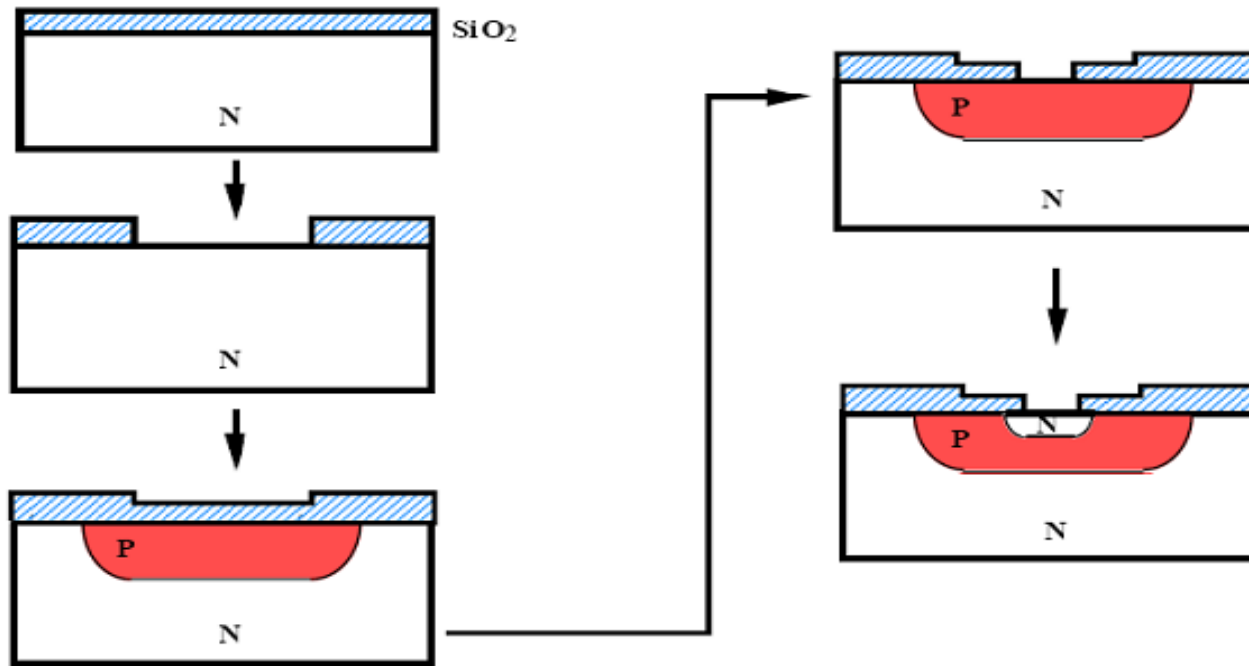


- Double diffused transistor technology of the 1950s.

Composants discrets

Transistor bipolaire

Technologie



- The planar process (Hoerni - Fairchild, late 1950s).

Composants discrets

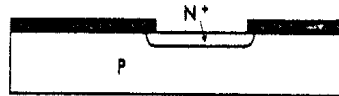
Transistor bipolaire

Etapes de réalisation

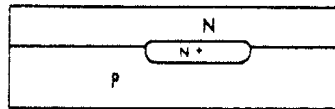
1/ Elaboration d'un substrat P



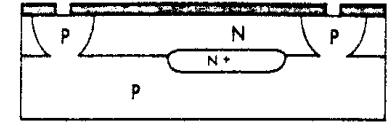
2/ Oxydation-photogravure de l'oxyde diffusion des semelles de collecteur



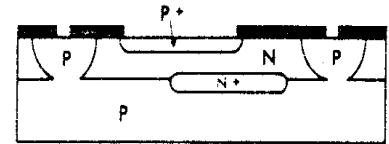
3/ Enlèvement de l'oxyde Epitaxie d'une couche N (collecteur)



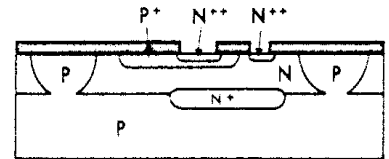
4/ Oxydation-photogravure de l'oxyde diffusion P des murs d'isolement



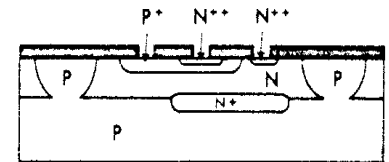
5/ Oxydation-photogravure de l'oxyde diffusion P+ de la Base et recharge des murs d'isolement



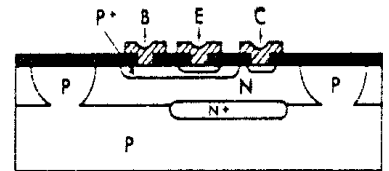
6/ Oxydation-photogravure de l'oxyde diffusion N++ de l'émetteur et du contact collecteur



7/ Ouverture contacts



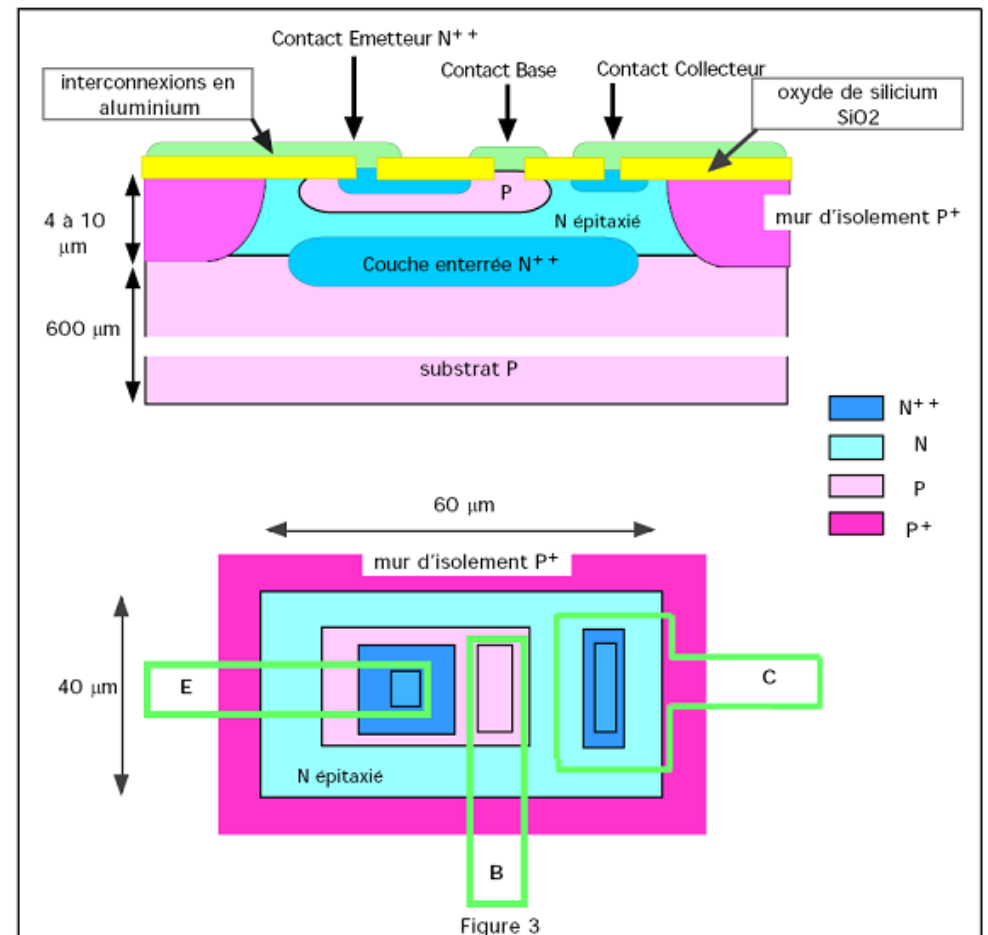
8/ Métallisation-dépouille des contacts



Composants discrets

Transistor bipolaire

Coupe et Layout d'un transistor bipolaire (npn)



Transistor Bipolaire

6^{ème} partie
Applications

Composants discrets

Transistor bipolaire

Utilisation des transistors

- En électronique analogique

Fonction amplification linéaire, en modulant le courant base autour d'une valeur, on obtient une modulation plus importante du courant collecteur.

- En électronique logique

En commutant le transistor de l'état bloqué (courant collecteur nul) à l'état saturé (courant collecteur important), on obtient des fonctions logiques.

Composants discrets

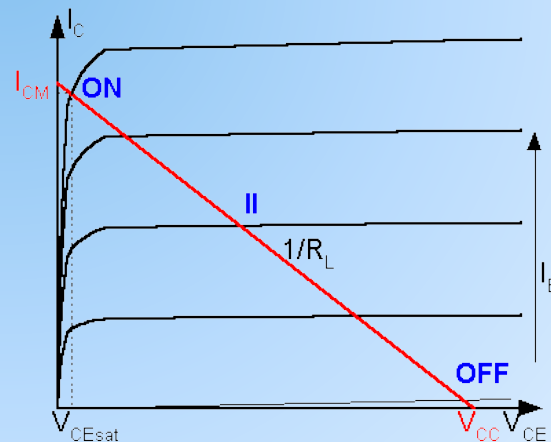
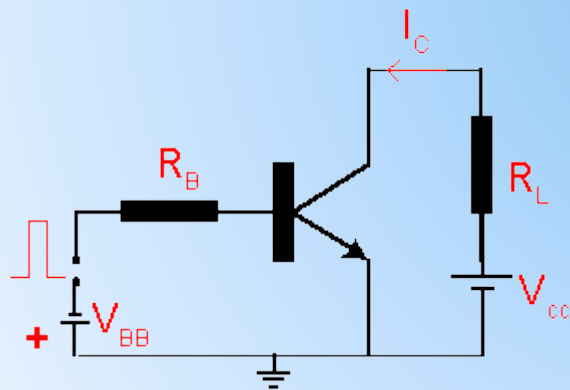
Transistor bipolaire

Montage utilisé en commutation

Pour réaliser **la commutation**, on utilise le **montage ci-dessous**.

Le transistor passe **de l'état bloqué** à **l'état saturé** en lui appliquant une impulsion positive de courant

Le circuit de sortie comprend une résistance de charge R_L telle que la valeur du rapport V_{CC}/R_L soit inférieure à la valeur du courant de collecteur maximum supportable par le transistor.



Composants discrets

Transistor bipolaire

Puissance dissipée dans le transistor

La **puissance dissipée** dans **un transistor** est donnée par l'expression:

$$P = V_{CE} \cdot I_C + V_{BE} \cdot I_B$$

Pourquoi calculer la puissance dissipée?

Nous calculons cette puissance pour **évaluer la température de la jonction** du transistor, qui **ne peut dépasser** environ **150 °C** pour un transistor à base de **silicium** (85 °C pour un transistor à base de germanium).

Evaluation de la température de la jonction

Nous utilisons l'expression suivante: $T_j = T_A + P \cdot R_{thJA}$

où **P** est la **puissance dissipée** et R_{thJA} est la **résistance thermique jonction-ambiante** est donnée par **le constructeur** selon le **boitier utilisé**.