- **Physique Appliquée et Ingénierie Physique**

ELCTRONIQUE ANALOGIQUE

Pr. Ahmed ROUKHE

PLAN DU COURS

Chapitre 0

- **semi-conducteur,**
- **diode,**
- **transistors bipolaire,**
- **transistors à effet de champ, MOSFET**

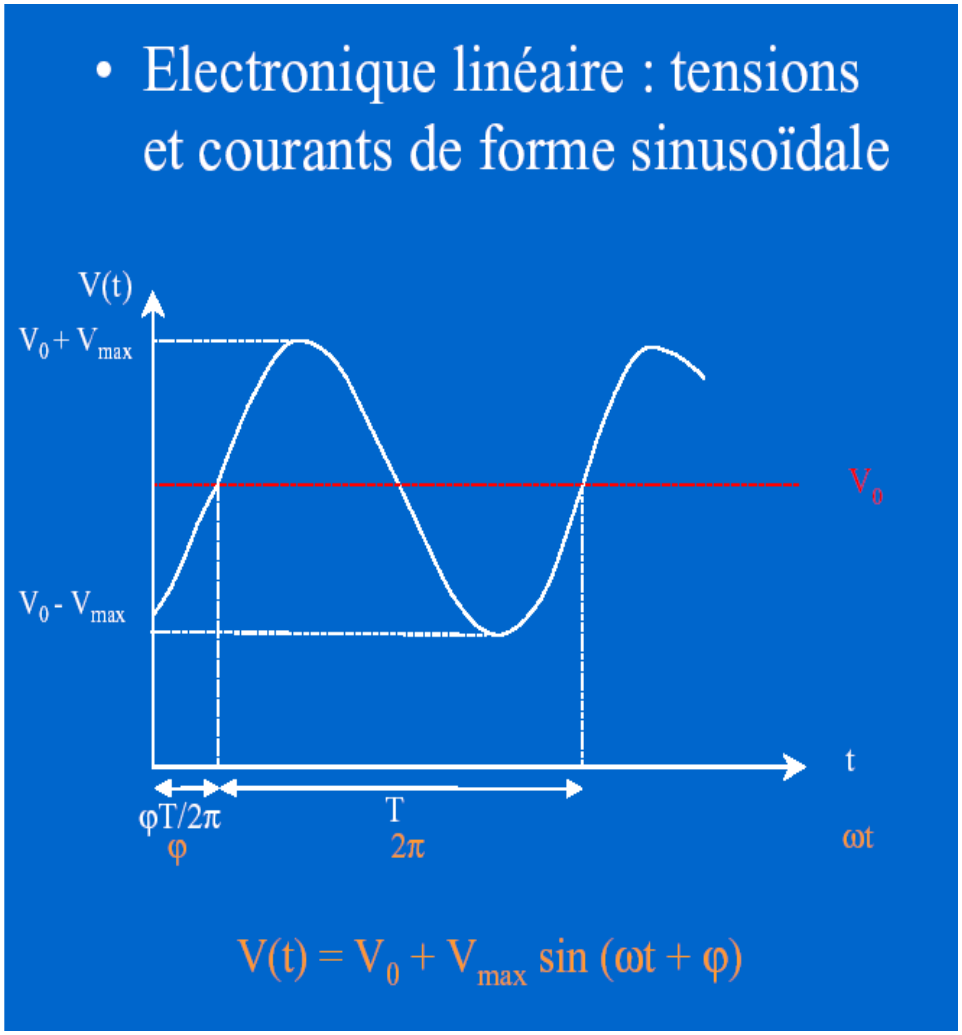
Chapitre 1

- **Codage:** Codage binaire, hexadecimal, code BCD, code Gray, codage binaire signé, codage nombre reel (virgule flottante), codage ASCII
- **algèbre de Boole:** simplification des fonctions logiques, tableaux de Karnaugh
- **logique combinatoire:** Multiplexeur, démultiplexeur, décodeur, comparateur, additionneur
- **logique séquentielle:** Bascules RS, D, JK, compteurs asynchrones, synchrones, registres

et synthèse d'un système séquentiel : les machines à états

- **composants à réseaux logiques programmable:** Réseaux ET/OU : somme de produits et produits de sommes, mémoire, PLD, macro cellule, FPGA
- **étude d'un microcontrôleur**

Introduction : notations



V(t) : tension instantanée composée d 'un terme continu V0 et d 'un terme alternatif pur v(t)

Dont Vmax est l 'amplitude crête

Veff = Vmax/√2 la valeur efficace

- ωt + φ : angle en radians
- ω : pulsation en rad/s = 2 π f
- f : fréquence en Hz = 1/T
- T : période en secondes
- φ : phase à l 'origine en radians
- **Notations en grandeur complexe**
  - $\underline{\mathbf{V}} = (V ; \varphi)$
  - $\underline{\mathbf{V}}$: grandeur complexe
  - V ou |V| : module (valeur eff)
  - φ : argument

$V = V (\cos \varphi + j \sin \varphi)$

a : partie réelle

b : partie imaginaire

$a = V \cos \varphi$; $b = V \sin \varphi$

$V = \sqrt{(a^2 + b^2)}$; $\varphi = \text{atan}(b/a)$

Chap 1. Les diodes

I. Principe de la diode

Définition : Elément bipolaire obtenu en créant une jonction entre deux types de matériaux semi-conducteurs (type P et N)

1. Semi-conducteurs

atome de silicium (Si) : 4 électrons sur son orbite de valence (couche périphérique)

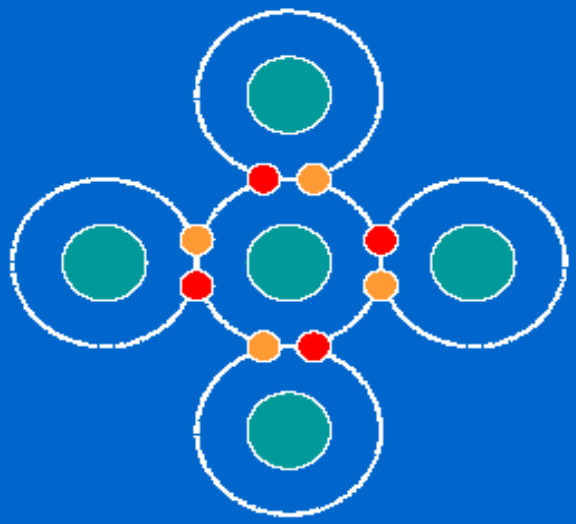


Electron Noyau

Remarque : quand un électron quitte son orbite, il laisse un **trou** (charge positive)

I.1. Semi-conducteurs

- Cristal : électrons mis en commun entre différents atomes ➠ 8 électrons = stabilité



Electron provenant d 'un atome voisin

- Electron libre : créé par l 'augmentation de température ➠ flux possible de charges négatives (électrons) et positives (trous)en sens inverse
- A température ambiante, le silicium n 'est ni isolant, ni conducteur ➠ **semi-conducteur**

I.2. Dopage

- Semi-conducteur **intrinsèque** : cristal de silicium pur
- Dopage : ajout d ’atomes d ’impuretés pour augmenter le nombre de charges à semi-conducteur **extrinsèque**
  - **a. Type N**
    - ajout d ’atomes à 5 électrons sur la couche périphérique à

      électrons porteurs majoritaires

      - Arsenic (As), Antimoine (Sb), Phosphore (P)
  - **b. Type P**
    - ajout d ’atomes à 3 électrons sur la couche périphérique à

      trous porteurs majoritaires

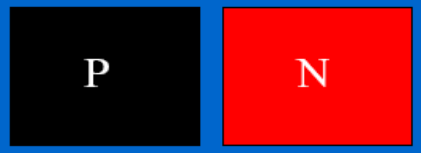
      - Aluminium (Al), Bore (B), Gallium (Ga)

I.3. Jonction PN - Diode

a. Diode non polarisée

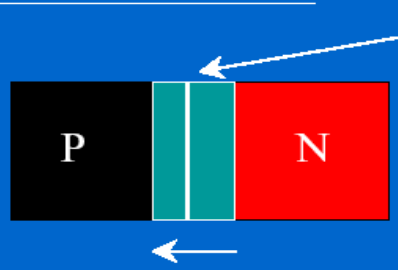
aucune tension externe

avant contact des deux zones



jonction : zone de rencontre des régions P et N

au contact des deux zones : zone de **déplétion**

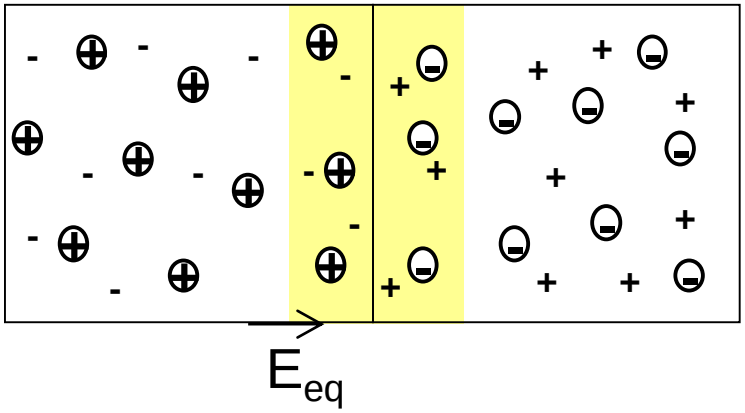


Barrière de potentiel (0,7 V pour Si à 25 °C)

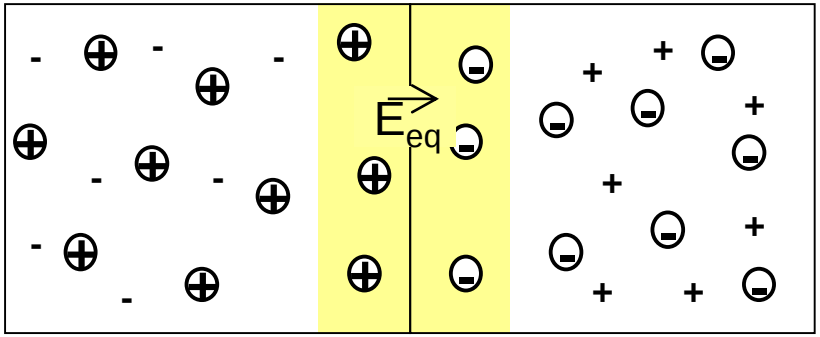
1- à l'équilibre = pas de champ appliqué

⊕ ⊖ : charges fixes (dopants ionisés)

\+ - : charges mobiles (trous, électrons)



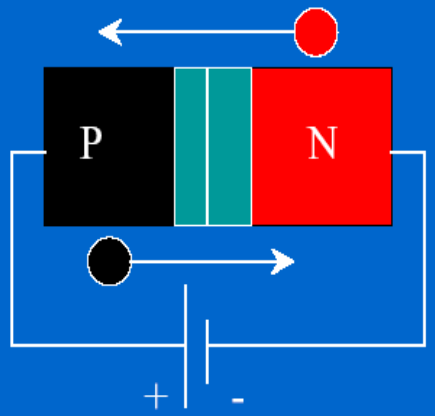
2- hors équilibre = avec tension appliquée



Zone de déplétion : plus de porteurs (majoritaires) libres !

I.3. Jonction PN - Diode

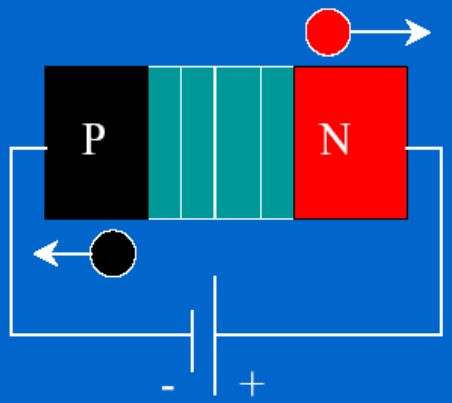
b. Polarisation directe



mouvements opposés d 'électrons et de trous

Cette polarisation peut produire un **grand courant direct**

c. Polarisation inverse



La couche d 'appauvrissement s 'élargit quand la polarisation inverse augmente

Faible courant inverse : courant de saturation I_S dû aux porteurs minoritaires

Limite : **tension de claquage** (supérieure à 50 V) pour laquelle phénomène d 'avalanche et **destruction**

Le claquage par effet d'AVALANCHE.

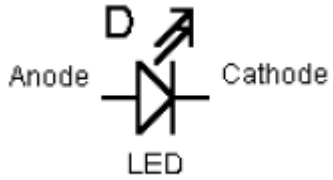
Les charges électriques qui traversent la jonction (courant de fuite) reçoivent une énergie proportionnelle à la tension appliquée. Lorsque cette énergie atteint une valeur critique, il se produit une ionisation par chocs qui peut devenir cumulative ; c'est le phénomène d'avalanche.

Les diodes LED

Descriptions

Les D.E.L (**D**iode **E**lectro **L**uminescente) ou en Anglais : L.E.D (Light **E**mitting **D**iode) éclairent lorsqu' elles sont parcourues par un courant de l'anode vers la cathode.

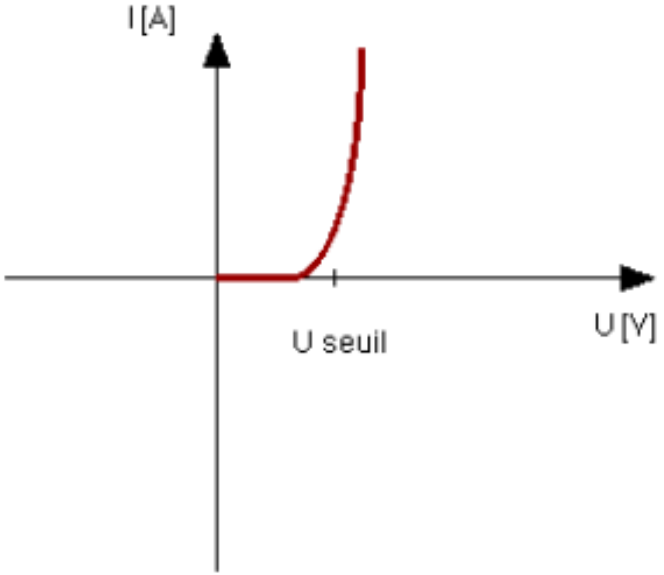
Symboles



Unités ; Formules

La tension de seuil dépend de la couleur et donc de la composition chimique du dopage.

Couleurs	Tension de seuil OU **Vf**	If (mA)	Longueur d'onde
Rouge	1,6 V à 2 V	6à20	650 à 660 nm
Jaune	1,8 V à 2 V	6à20	565 à 570 nm
Vert	1,8 V à 2 V	6à20	585 à 590 nm
Bleu	2,7 V à 3,2 V	6à20	470 nm
blanc	3,5 v à 3,8 v	30	

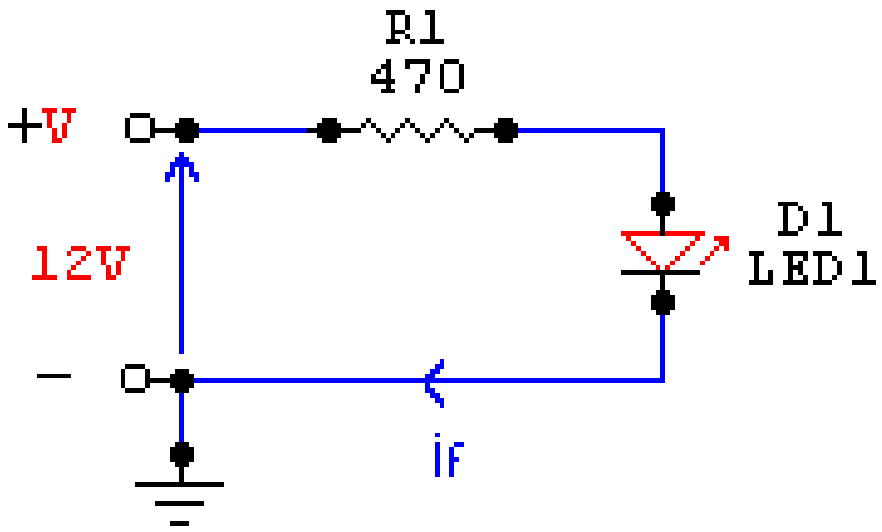


Par exemple calcul de la résistance pour une LED rouge

R1 = (V-Vf) / If, donc R 1= (12 - 1,8) / 0,02 = 510 Ohms, bien souvent ont utilise une résistance de 470 ohms

ILED = (12 - 1,8) / 470 = 0,21 mA

Dans la documentation vous aurez aussi la tension inverse max Vr (reverse voltage) le courant max en pointe pour un temps très court IFSM (surge current)



Valeurs
LED standard



Les LEDS rondes de diamètre 3 mm ou 5 mm comportent un plat sur la base pour repérer la **cathode** (ou lorsqu' elles sont neuves la patte la plus courte).La consommation moyenne est d'environ 20 mA.

Les LEDS miniatures

LED de diamétre1,9 au pas de 2,54 mm pour implantation directe sur un circuit ayant une consommation de 20 mA .



Les LEDS faible consommation

Elles consomment de 2 mA à 6 mA.

Les LEDS avec résistance interne

Avec ces LEDs vous n'avez pas besoin d'utiliser de résistance extérieur, elles peuvent fonctionner directement sur un tension de 5V ou 12V.

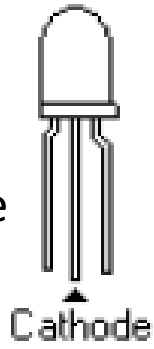
Les LEDS clignotantes

Ces LEDs ont un circuit électronique permettant le clignotement avec une fréquence de 1 à 2,5 Hz/seconde .La plage d'alimentation est de 3,5V à 5V et pour une utilisation avec des tensions supérieures il faut ajouter une résistance.



Les LEDS bicolores , tricolores ou multicolores

Il existe des LEDs bicolores à 2 ou 3 pattes, avec 2 pattes la couleur est différente suivant le sens du courant (rouge ou vert), et avec 3 pattes la cathode est la patte commune au centre ; la première patte est l'anode rouge et la 3éme l'anode verte ; si les deux anodes sont alimentées cela donne une troisième couleur orange.



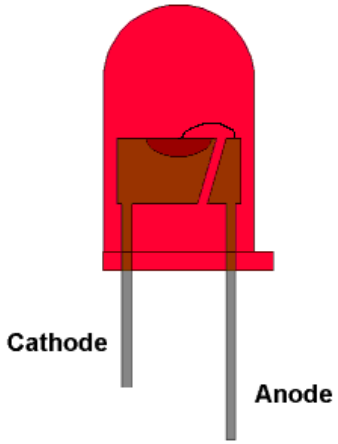
Les LEDS de formes spéciales

Les LEDs peuvent prendre toutes les formes, rectangulaire, triangulaire, carré, ronde (différents diamètres jusqu' 20 mm).

Des LEDs groupées par 7, 10 alignées verticalement forment ce que l'on appelle un **Bargraphe.**

Variantes

Les LEDs infrarouges ou diodes d'émissions s'utilisent beaucoup pour le télécommandes IR de télévisions et chaînes hi-fi.



Utilisations L' avantage d' utiliser des LEDs est qu' elles ne se détruisent pas , elles sont moins chère que des voyants , elles consomment moins d' énergie . Mais l'inconvénient et qu'elles ne peuvent fonctionner qu'avec une faible tension

Le transistor bipolaire

II - Le transistor bipolaire polarisé

Si I_E est le courant d'émetteur (courant d'électrons majoritaires de l'émetteur vers la base et courant de trous majoritaires de la base vers l'émetteur) alors une partie de ce courant va être perdu dans la base (c'est le courant de recombinaison). Ce courant de recombinaison est donc:

$$I_R = aI_E$$

Courant que l'on notera dans la suite I_B.

Le courant de collecteur IC est alors donné par :

$I_C = I_E - I_B + b = I_E - aI_E + b = I_E (1-a) + b$

Si $I_E = 0$ alors: $I_B = 0$ et $I_C = b$

Cette valeur b correspond au courant d'électrons minoritaires de la base vers le collecteur et au courant de trous minoritaires du collecteur vers la base.

Donc $b = I_{C0}$ et :

$$I_C = I_{C0} + I_E(1-a)$$
$$= I_{C0} + \alpha I_E$$

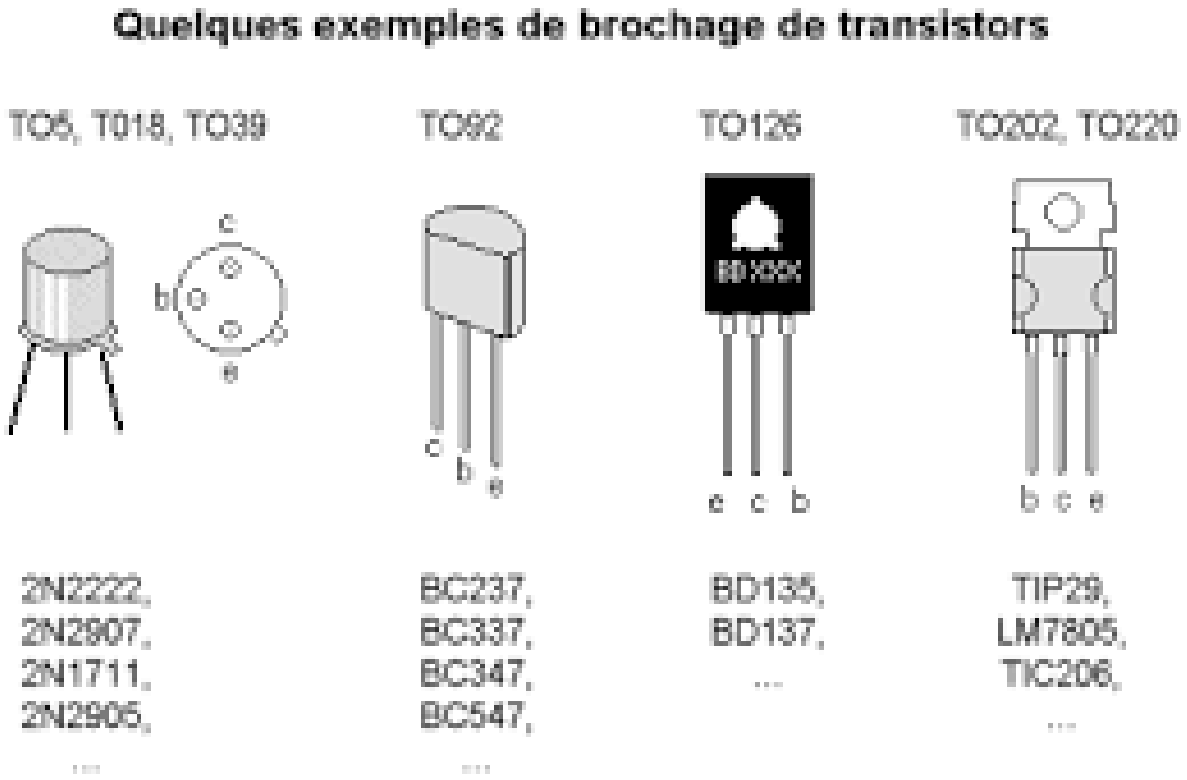
si l'on pose $\alpha = 1 - a$

II Le transistor bipolaire à jonction

Le transistor bipolaire à jonction (ou BJT, pour “Bipolar Junction Transistor”) est un composant électronique actif, c’est-à-dire un composant qui est capable de transformer un signal électrique et d’en amplifier sa puissance.

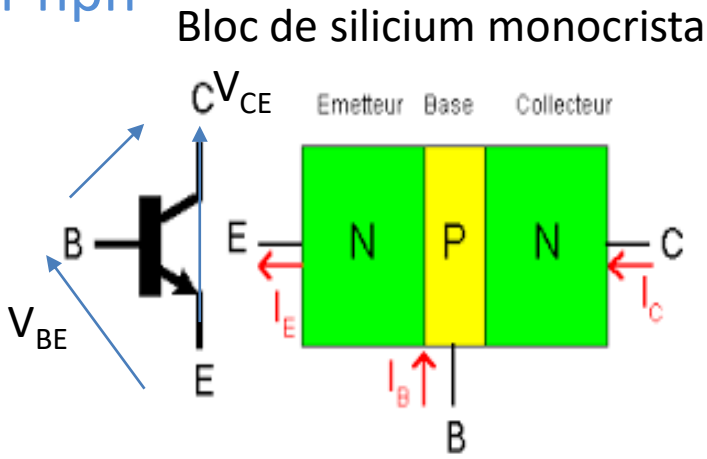
La puissance électrique injectée est d’élivrée par les sources d’alimentation. Le BJT est constitué d’un monocristal semi-conducteur comportant trois Régions contigües (Trois couche de semi-conducteurs; l’émetteur E, la base B et le collecteur C) dopées NPN ou PNP, comme l’illustrent les figs. 2.2 et 2.3. Un BJT comporte ainsi deux jonctions PN (BE et BC), dont le couplage est favorisé par la faible largeur de la base.

figure. 2.1



a. Transistor npn

figure. 2.2



2 jonction PN:

-BE : diode émetteur

-- CB diode collecteur

-I_E,I_B,I_C positifs

-$I_E=I_B+I_C$

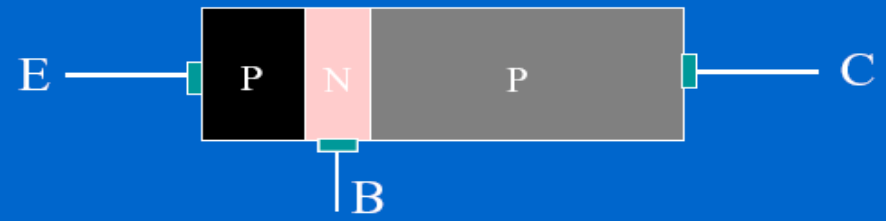
-$V_{CE}=V_{BE}+V_{CB}$

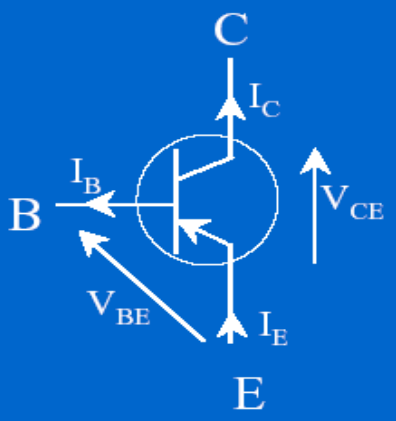
-V_{CE},V_{BE} négatifs

-Porteurs majoritaires: électrons

I.1. Description et symboles

b. transistor pnp





I_B, I_C, I_E positifs

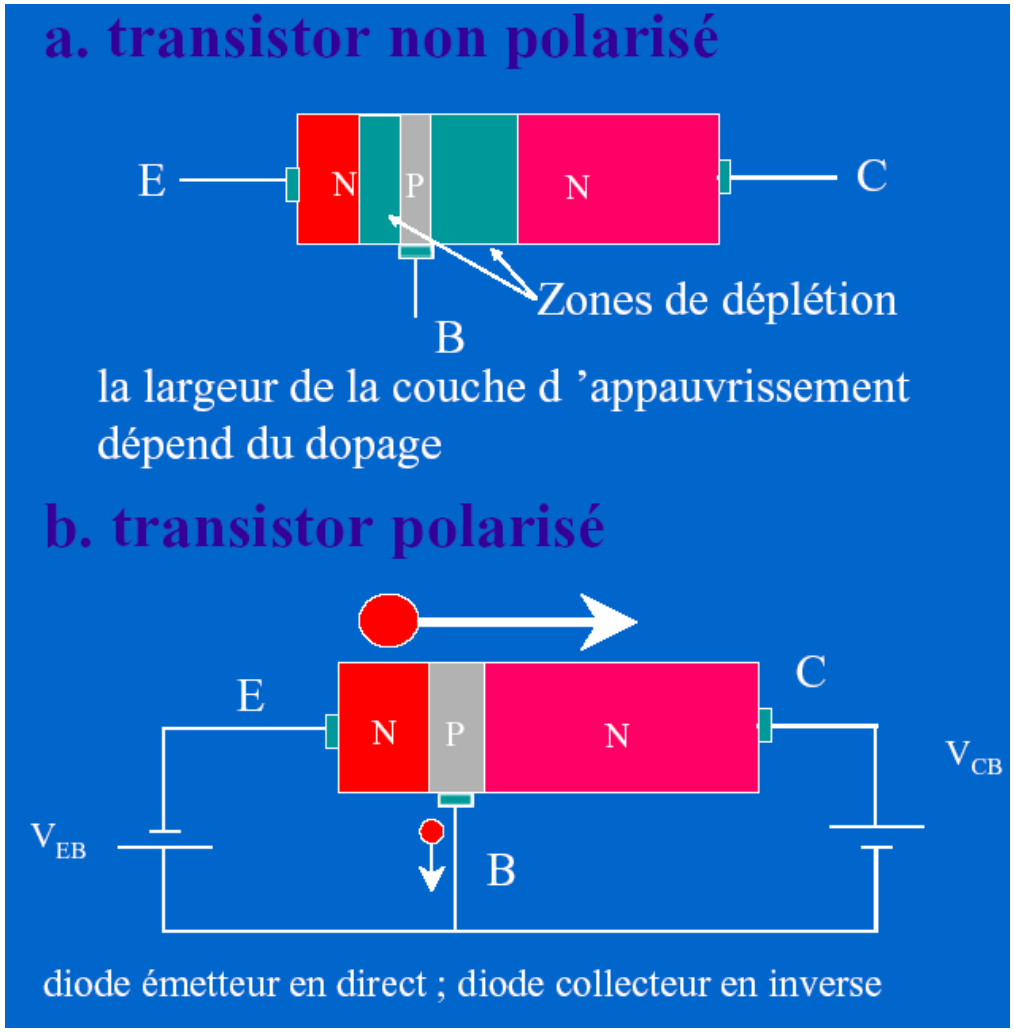
$I_E = I_B + I_C$

V_{BE} et V_{CE} négatifs

$V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$

- pnp = complément du npn
- études similaires
- porteurs majoritaires : trous

I.2. Fonctionnement

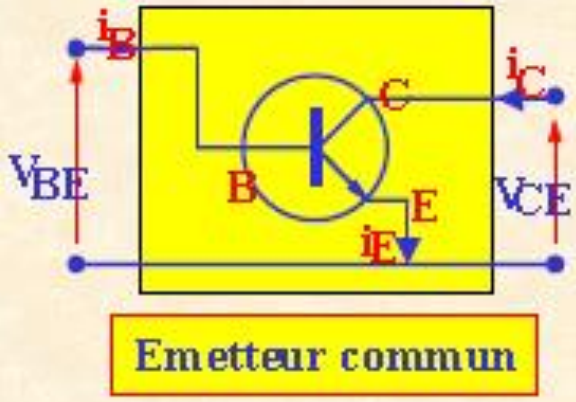


- Diode émetteur : commande par VBE le nombre d 'électrons libres injectés dans la base
- 95% des électrons injectés par l'émetteur atteignent le collecteur
    - IC # IE
- **c. rapport statique α**
  - α = IC /IE souvent α > 0,99
- **d. tension de claquage**
  - Breakdown Voltage : dépend du dopage
  - BV_{BE} = 5 à 30 V
  - BV_{CE} = 20 à 300 V

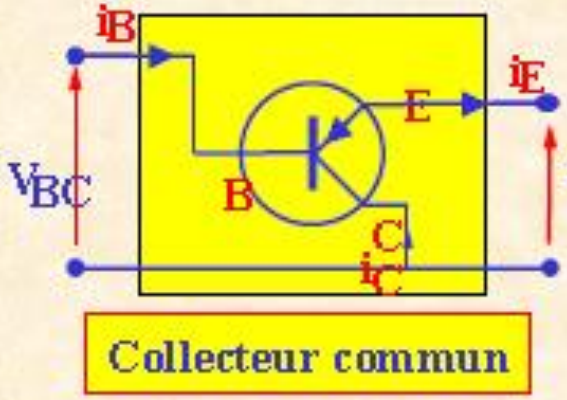
III - Représentation du transistor

Puisque le transistor a trois "pattes" il y aura 3 représentations quadripolaires possibles:

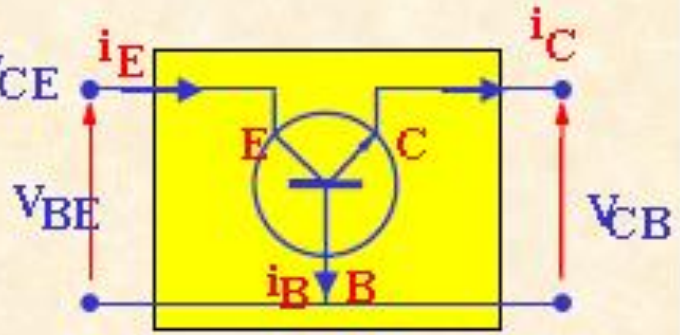
Base commune
Emetteur commun
Collecteur commun



Emetteur commun



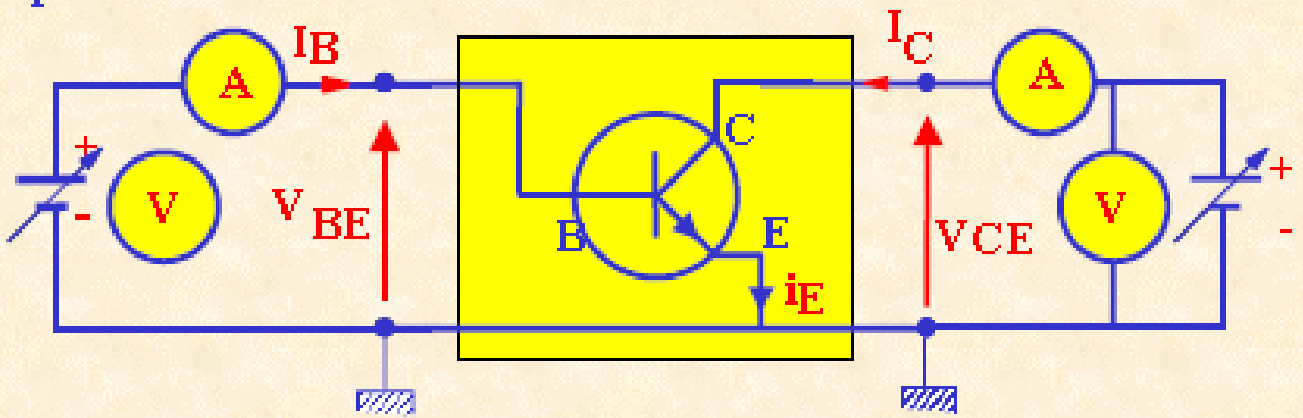
Collecteur commun



Base commune

IV - Caractéristiques des transistors

Nous allons maintenant nous intéresser au montage émetteur commun pour tracer les caractéristiques du transistor NPN



Avec les mêmes conventions que celles utilisées pour le montage explicatif du fonctionnement du transistor (montage base commune) on peut écrire:

$$I_C = I_E - I_B \quad (1)$$

$$I_C = I_{C0} + \alpha I_E \quad (2)$$

en tirant I_E de (1) et en reportant sa valeur dans (2) on obtient:

$$I_C = I_{C0} + \alpha(I_C + I_B)$$

$$I_C (1 - \alpha) = I_{C0} + \alpha . I_B$$

$$I_C = I_{C0}' + \beta I_B$$

Cette relation est très importante car elle permet de comprendre les caractéristiques du transistor.

IV - Caractéristiques des transistors

Comme dans le cas des quadripoles nous allons considérer les différents quadrants suivants:

$I_2 = f(V_2)_{I1 = cste}$ $\quad$ $I_2 = g(I_1)_{V2 = cste}$

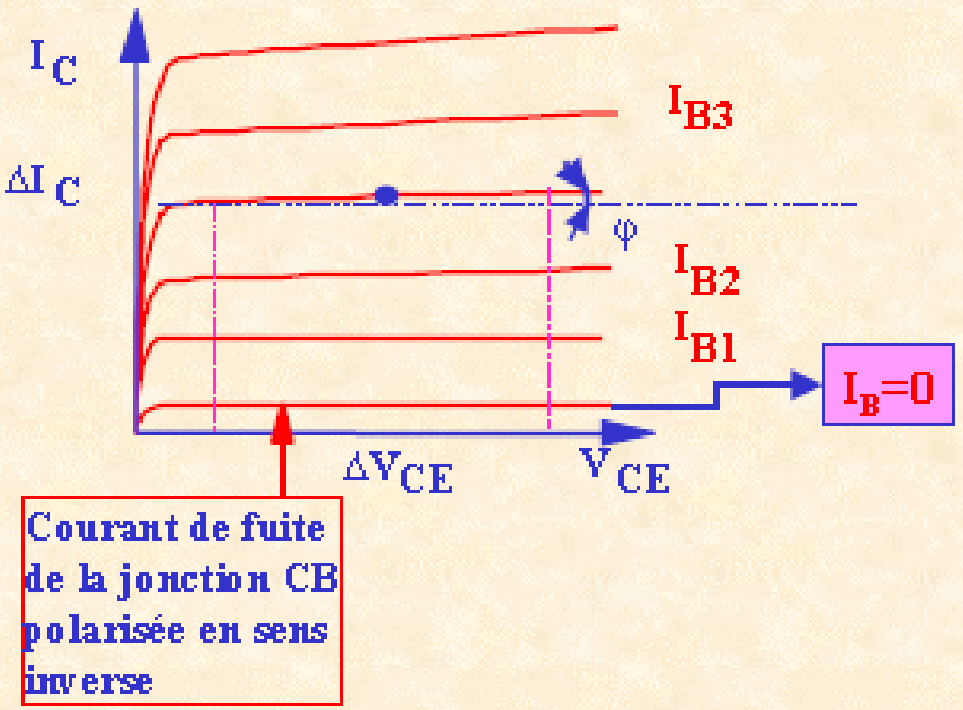
$V_1 = h(I_1)_{V2 = cste}$ $\quad$ $v_1 = k(V_2)_{I1 = cste}$

ici $I_2 = I_C$, $I_1 = I_B$, $V_1 = V_{BE}$ et $V_2 = V_{CE}$

$$I_C = f(V_{CE})_{I_B = cste}$$

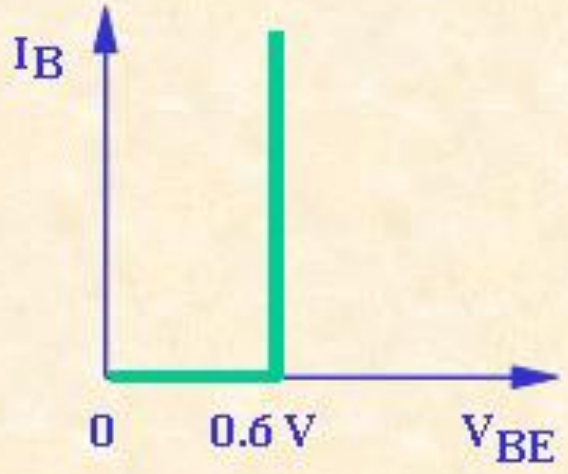
Résistance de sortie du montage émetteur commun:

$$\rho = \left(\frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C}\right)_{I_B = cste} = \mathrm{Cotg}\,\varphi$$



V - Le transistor idéal

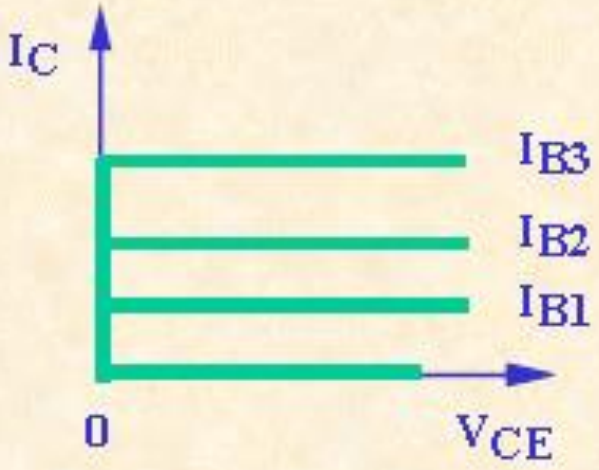
La caractéristique $I_B = f(V_{BE})$ est une caractéristique de diode polarisée en direct, on peut donc dans le cas du silicium idéaliser cette caractéristique par:



De même I_{C0} est indépendant de la tension collecteur émetteur et

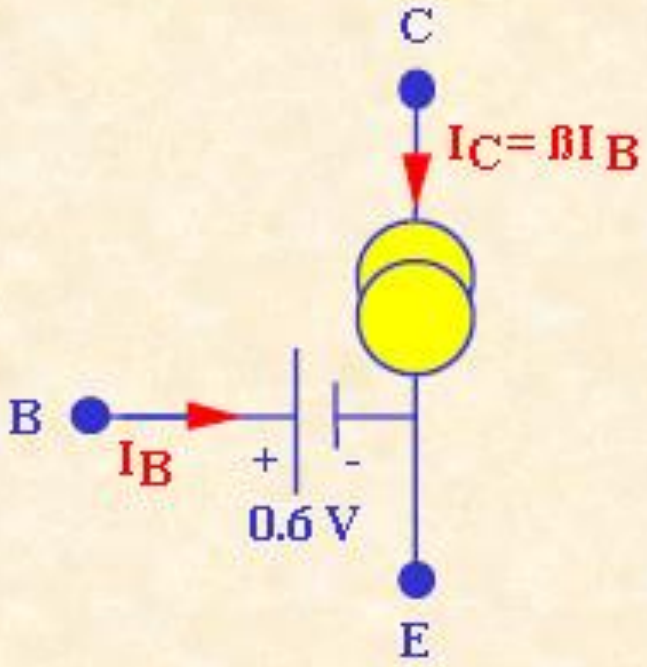
$$I'_{C0} = \frac{I_{C0}}{1-\alpha}$$

pour $I_B = 0$, est faible devant
ß I_B dès que $I_B \neq 0$



V - Le transistor idéal (suite)

Le schéma équivalent du transistor idéal est donc:

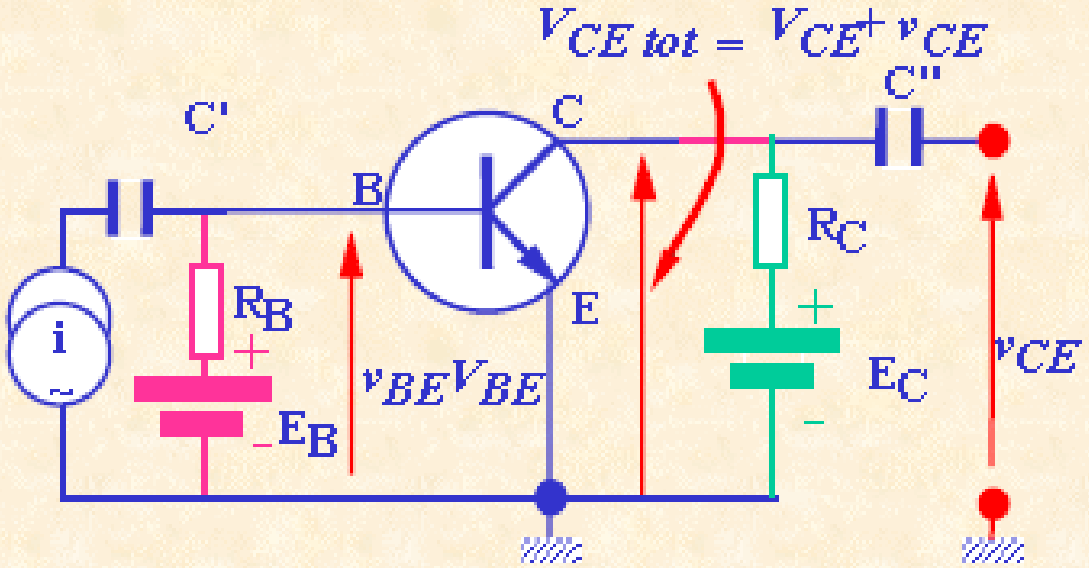


Nota : Les constructeurs ne donnent très souvent que les caractéristiques :

$$I_B = f(V_{BE})$$
$$I_C = f(V_{CE})$$

VI - Amplification par transistor

Considérons un transistor monté en émetteur commun et polarisons-le comme nous l'avons fait pour les quadripoles.



Sur ce schéma on voit en rose et vert les circuits de polarisation d'entrée (EB et RB) et de sortie (EC et RC). Par ailleurs on distingue aussi les circuits permettant d'appliquer un signal alternatif sur l'entrée (v et C') et de récupérer le signal de sortie (C''). A noter que le circuit est attaqué en courant.

On a : $E_B = V_{BE} + R_B I_B$ (entrée)

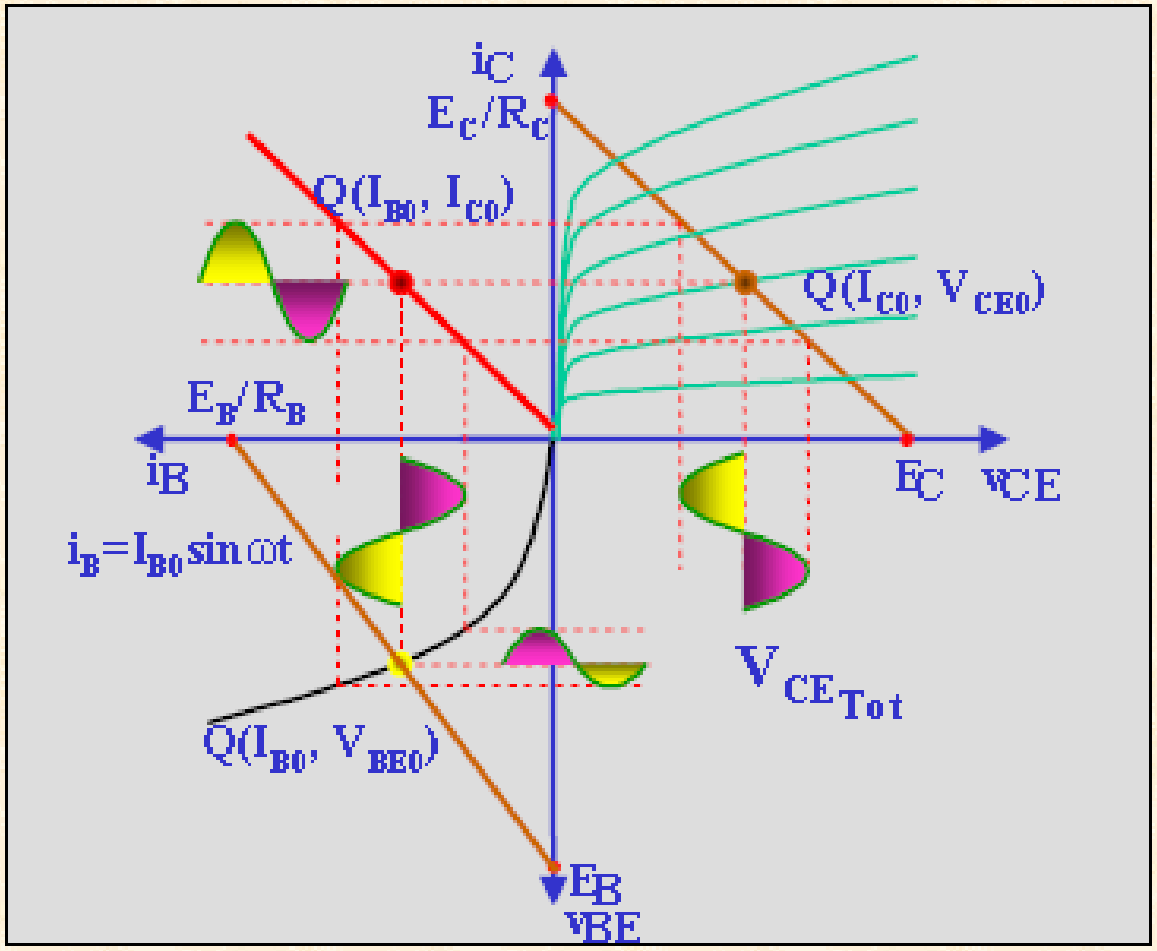
$E_C = V_{CE} + R_C I_C$ (sortie)

Ce sont les équations des droites de charge d'entrée et de sortie.

Regardons maintenant ce qui se passe dans les trois quadrants $i_C = f(v_{CE})$, $i_C = g(i_B)$ et $v_{BE} = h(i_B)$ afin de comprendre le principe de l'amplification.

VI - Amplification par transistor

En vert, composantes alternatives



$I_{Btot} = I_B + i_B$

$V_{CEtot} = E_C - R_C I_{Ctot}$

avec $I_{Ctot} = I_C + i_C$

$V_{CEtot} = E_C - R_C(I_C + i_C)$

$= V_{CE} - R_C i_C$

posons $v_{CE} = -R_C i_C$

donc $V_{CEtot} = V_{CE} + v_{CE}$

Composante alternative sinusoïdale déphasée de π par rapport à la tension d'entrée

VIII – Comportement du transistor en dynamique

A – Cas des signaux de basse fréquence et de faible amplitude – notion de circu équivalent (suite)

$$h_{21e} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right)_{V_{CE}=cste} = \beta$$

β = gain en courant

$$h_{22e} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}}\right)_{I_B=cste} = \frac{1}{\rho}$$

ρ = résistance de sortie en émetteur commun

Si l'on pose $v_{be} = \Delta V_{BE}$, $v_{ce} = \Delta V_{CE}$, $i_b = \Delta I_B$ et $i_c = \Delta I_C$ on peut alors écrire:

$$v_{be} = r i_b + \gamma v_{ce}$$

$$i_c = \beta i_b + \frac{1}{\rho} v_{ce}$$

Mais comme $\gamma \sim 0$ il vient :

$$v_{be} = r i_b$$

$$i_c = \beta i_b + \frac{1}{\rho} v_{ce}$$

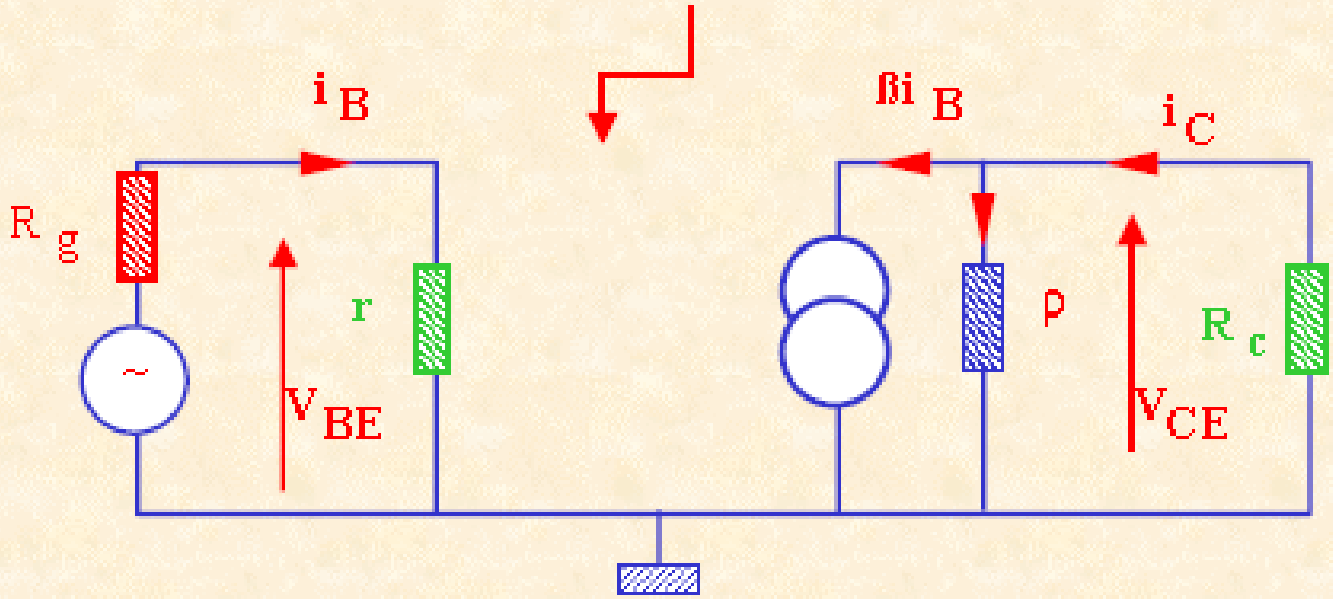
VIII – Comportement du transistor en dynamique

A – Cas des signaux de basse fréquence et de faible amplitude – notion de circuit équivalent (suite)

$$v_{be} = r i_b$$

$$i_c = \beta i_b + \frac{1}{\rho} v_{ce}$$

Ces équations nous permettent de tracer le schéma équivalent suivant :



VIII – Comportement du transistor en dynamique

A – Cas des signaux de basse fréquence et de faible amplitude – notion de circuit équivalent (suite)

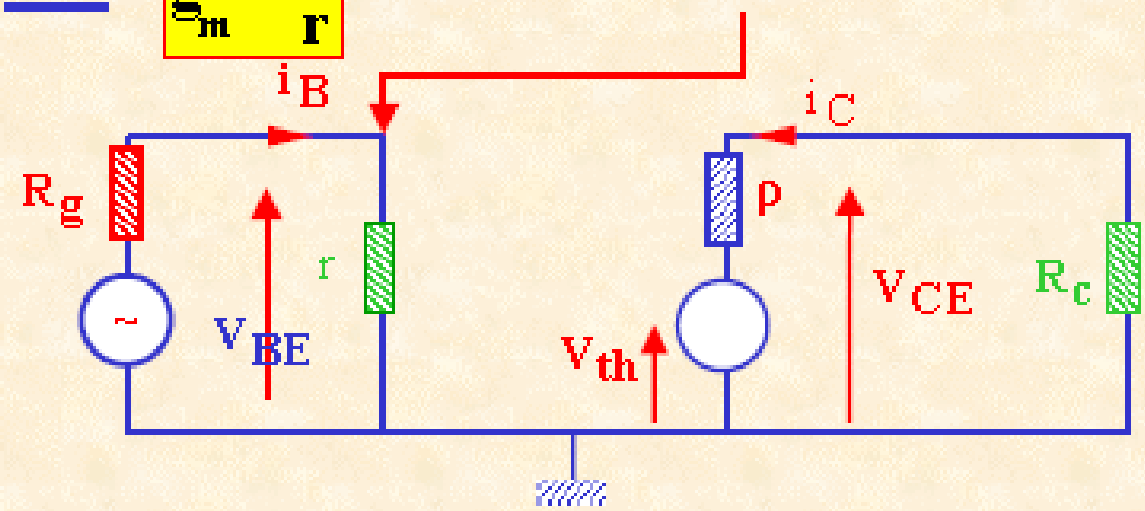
Les expressions précédentes peuvent aussi s'écrire :

$$i_b = \frac{v_{be}}{r}$$

$$i_c = g_m v_{be} + \frac{1}{\rho} v_{ce}$$

Avec : $g_m = \frac{\beta}{r}$

En utilisant NORTON il vient :



Et on peut écrire :

$$-\rho g_m v_{be} = v_{ce} - \rho i_c$$

Par ailleurs :

$$v_{ce} - \rho i_c - v_{th} = 0$$

$$v_{th} = -\rho g_m v_{be} = -\frac{\rho\beta}{r} v_{be}$$

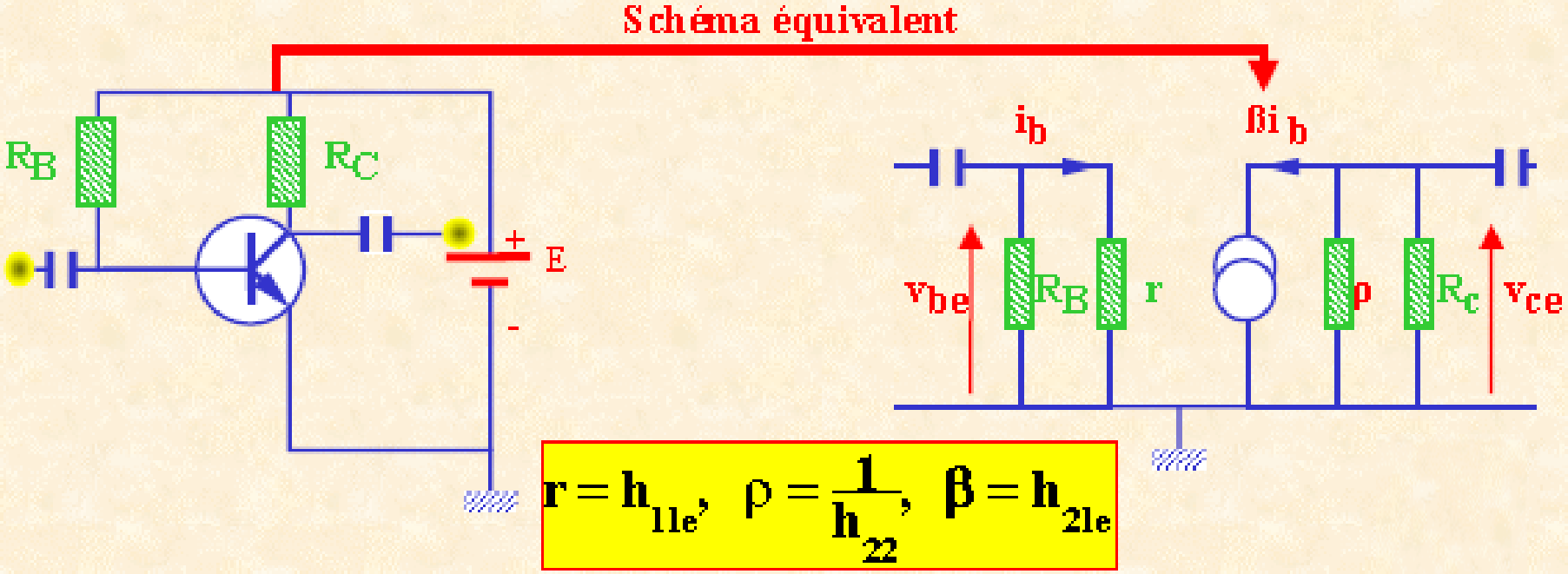
Ceci est le gain en tension du transistor (à noter le signe négatif qui indique que le montage est inverseur

XI – Les trois montages fondamentaux

A - MONTAGE EMETTEUR COMMUN

Dans le cas de composants au silicium (E_g > 1eV) le montage simple qui consiste en 1 résistance de base, une résistance de collecteur et l'émetteur à la masse est possible, à condition que l'on ne travaille pas à forte puissance. Aussi nous allons étudier tout d'abord ce montage puis celui avec résistance de stabilisation d'émetteur puis nous les comparerons.

i) Montage simple



$$r = h_{11e},\quad \rho = \frac{1}{h_{22}},\quad \beta = h_{21e}$$

XI – Les trois montages fondamentaux

A - MONTAGE EMETTEUR COMMUN (suite)

i) Montage simple (suite)

Impédance d'entrée

$$Z_e = \frac{h_{11e} R_B}{h_{11e} + R_B} \approx h_{11e}$$

Si $R_B >> h_{11e}$

Impédance de sortie

$$Z_s = \frac{R_C \rho}{R_C + \rho} = R_C$$

Si $\rho >> R_C$

Gain en courant

$$G_I = \beta$$

Gain en tension

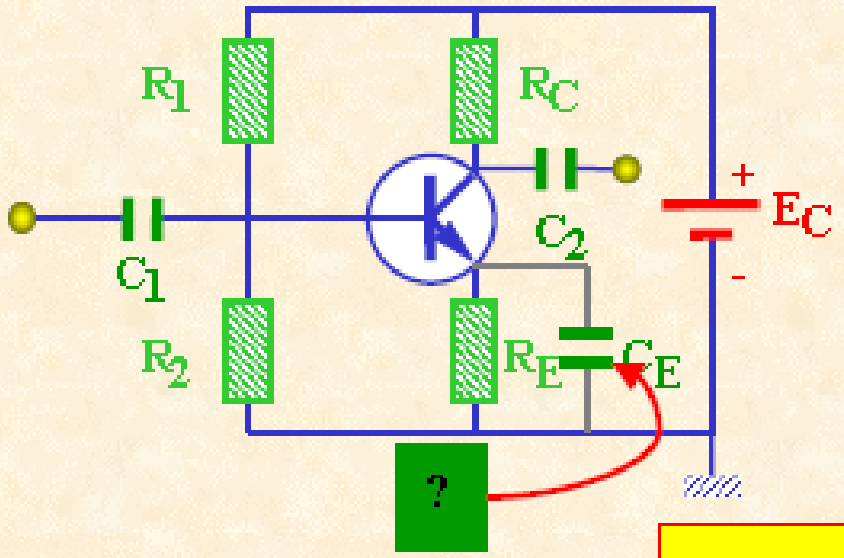
$$G_V = \frac{v_{ce}}{v_{be}} = -\frac{Z_s . i_C}{h_{11} . i_B} = -\frac{Z_s . \beta . i_B}{h_{11} . i_B} = -\frac{\beta Z_s}{h_{11}} = -\frac{\beta R_C}{h_{11}}$$

Si $\rho >> R_C$

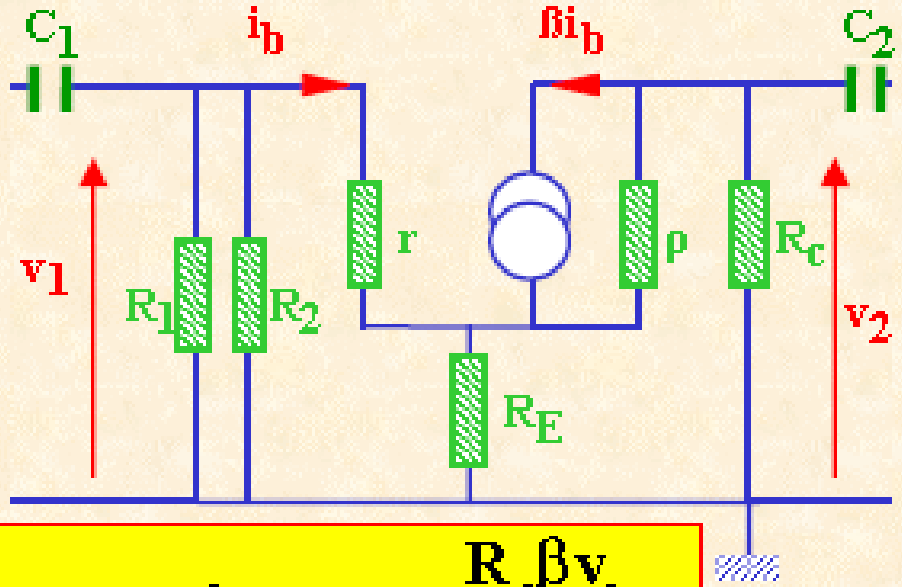
XI – Les trois montages fondamentaux

A - MONTAGE EMETTEUR COMMUN (suite)

ii) Montage avec résistance de stabilisation



Montage équivalent



$$v_1 = r.i_b + R_E(\beta+1)i_b$$

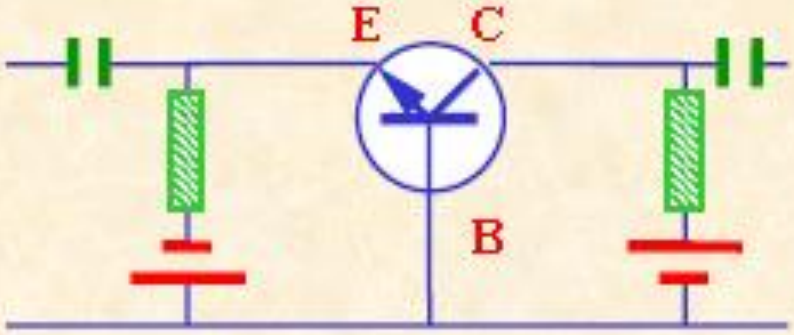
$$v_2 = -R_C.i_c = -R_C\beta i_b = -\frac{R_C\beta v_1}{r + R_E(\beta+1)}$$

$$i_b = \frac{v_1}{r + R_E(\beta+1)}$$

$$G_V = \frac{v_2}{v_1} = -\frac{R_C\beta}{r + R_E(\beta+1)}$$

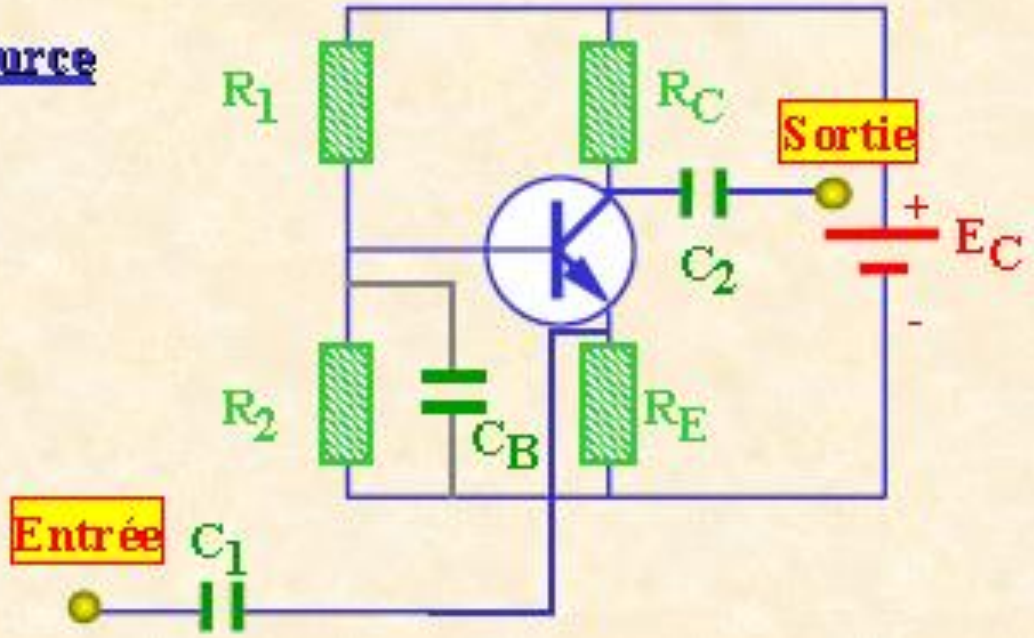
XI – Les trois montages fondamentaux

B - MONTAGE BASE COMMUNE



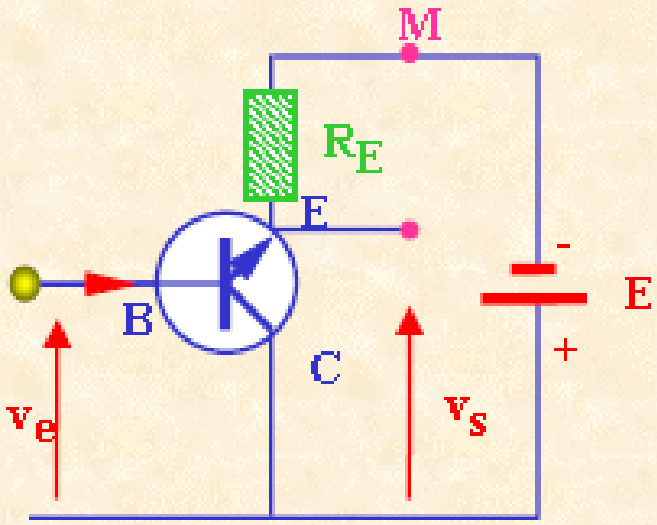
i) Montage à deux sources (peu usité)

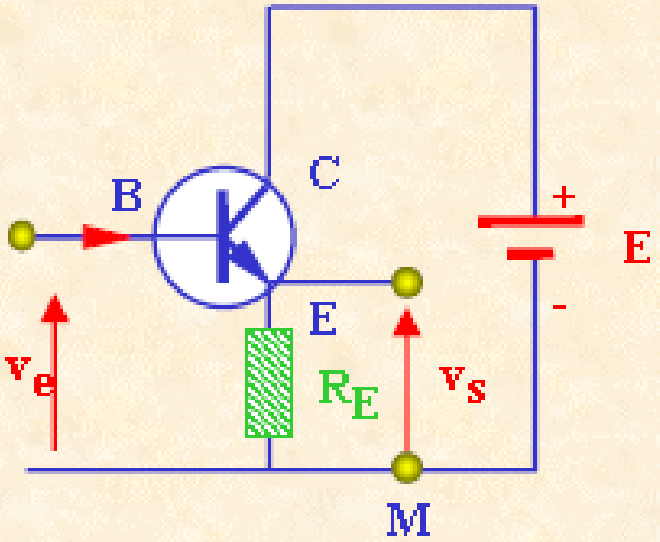
ii) Montage à une source



XI – Les trois montages fondamentaux

C - MONTAGE COLLECTEUR COMMUN





En effet :

- <u>pour les continus</u>

$V_{BC} = V_{BE} + V_{EM} + V_{MC}$

$V_{EC} = V_{EM} + V_{MC} = V_{EM} + E$

- <u>pour les alternatifs</u>

$v_e = v_{BC} = v_{BE} + v_{EM} = v_{BM}$

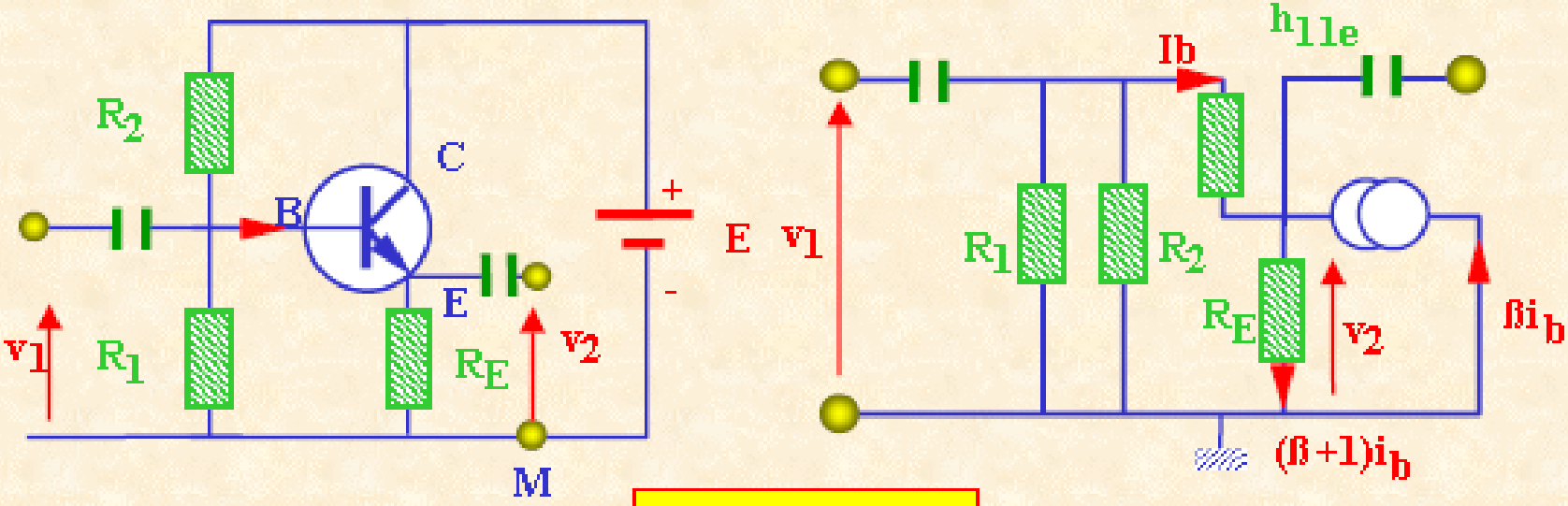
$v_s = v_{EM} = v_{EC}$

On retrouve bien les mêmes équations pour les 2 montages. Le second montage est cependant plus facile à analyser.

XI – Les trois montages fondamentaux

C - MONTAGE COLLECTEUR COMMUN (suite)

Soit le schéma de polarisation et le schéma équivalent suivants :



$$v_1 = (h_{11e} + (\beta + 1)R_E)\,.i_b$$

$$v_2 = (\beta + 1)R_E i_b$$

Gain en courant

$$G_i = \beta + 1$$

Gain en tension

$$G_V = \frac{v_2}{v_1} = \frac{(\beta + 1)R_E}{h_{11e} + (\beta + 1)R_E} \approx 1$$

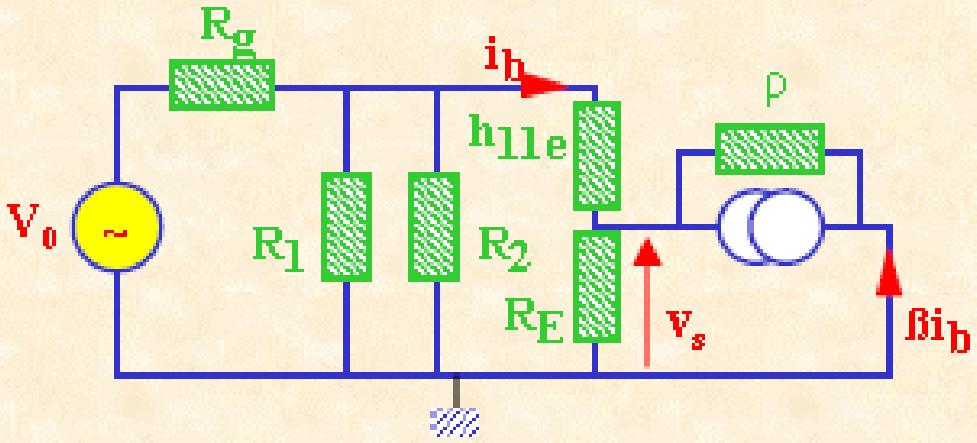
XI – Les trois montages fondamentaux

C - MONTAGE COLLECTEUR COMMUN (suite)

Impédance d'entrée

$$Z_{étage} = \frac{v_1}{i_b} = h_{11e} + (\beta + 1)R_E \rightarrow Z_e = Z_{étage} // R_1 // R_2$$

Impédance de sortie



Si l'on suppose que R_1 et R_2 sont grandes on peut les négliger.

On peut alors écrire: $v_s = V_0 - (R_g + h_{11e})i_b$

par ailleurs le courant, i, qui circule dans R_E est égal à : $i = (\beta + 1)i_b$, donc:

$$v_s = v_0 - \frac{(Rg + h_{11e})\,i}{\beta + 1}$$

En remplaçant maintenant v_s par $R_E i$ il vient:

$$v_0 = R_E i + \frac{(R_g + h_{11e}).i}{(\beta + 1)}$$

Le générateur de THEVENIN qui attaque la résistance R_E a pour impédance interne :

$$\frac{R_g + h_{11e}}{\beta + 1}$$

XI – Les trois montages fondamentaux

	Emetteur commun	Collecteur commun	Base commune
Gain en courant	β	$-(\beta + 1)$	-1
Gain en tension	$-\frac{\beta R_c}{h_{11e}}$	1	$\frac{\beta R_c}{h_{11e}}$
Gain en puissance	$-\frac{\beta^2 R_c}{h_{11e}}$	$-(\beta + 1)$	$-\frac{\beta R_c}{h_{11e}}$
Impédance d'entrée transistor	h_{11e}	βR_E	$\frac{h_{11e}}{\beta+1}$
Impédance d'entrée montage	$R_B // h_{11e}$	$\beta R_E // R_B$	$R_E // \frac{h_{11e}}{\beta+1}$
Impédance de sortie transistor	ρ	$\frac{R_g + h_{11e}}{\beta+1}$	ρ
Impédance de sortie montage	R_C	$\frac{R_g + h_{11e}}{\beta+1} // R_E$	R_C

Les TEC

- Transistors unipolaires : un seul type de charge (trou ou électron)
- Transistor à Effet de Champ = TEC
- *Field Effect Transistor = FET*
- 2 familles :
  - JFET : *Junction FET* ou TEC à jonction
  - MOSFET : *Metal-Oxyde- Semiconductor FET*
- commandés par tension
- 3 électrodes : Drain, Source et Grille

II. MOSFET

II.1. MOSFET à appauvrissement

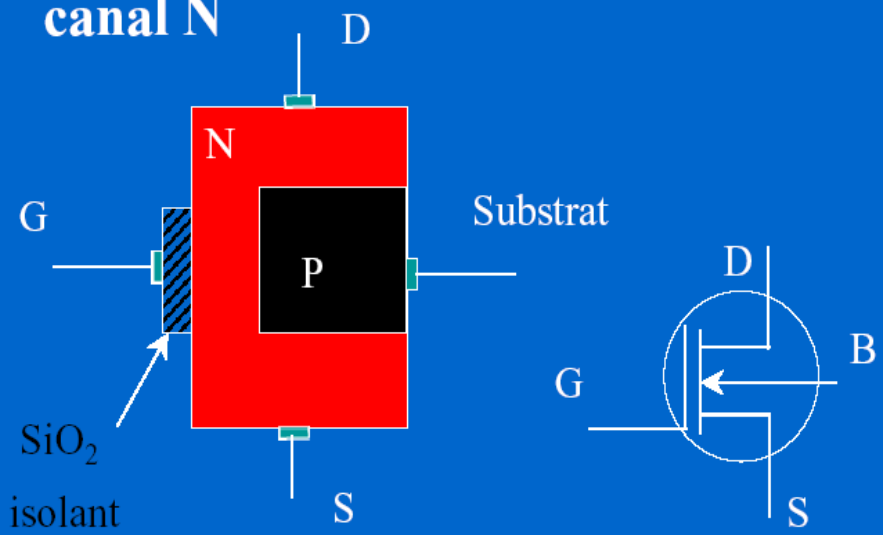
FET à grille isolée

1. MOSFET à appauvrissement

ou à déplétion

a. Présentation

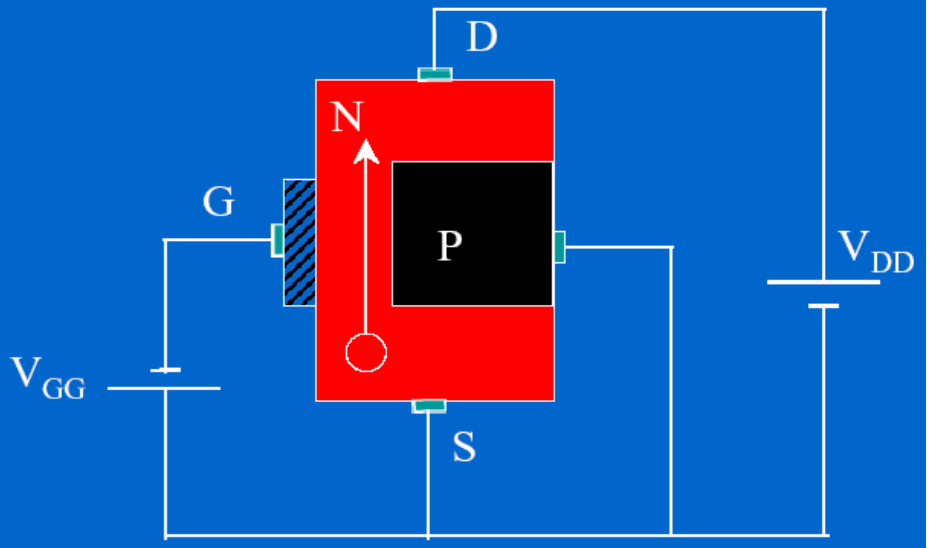
canal N



b. Régimes

* Régime d 'appauvrissement

plus $V_G < 0$, plus I_D faible jusqu'au blocage



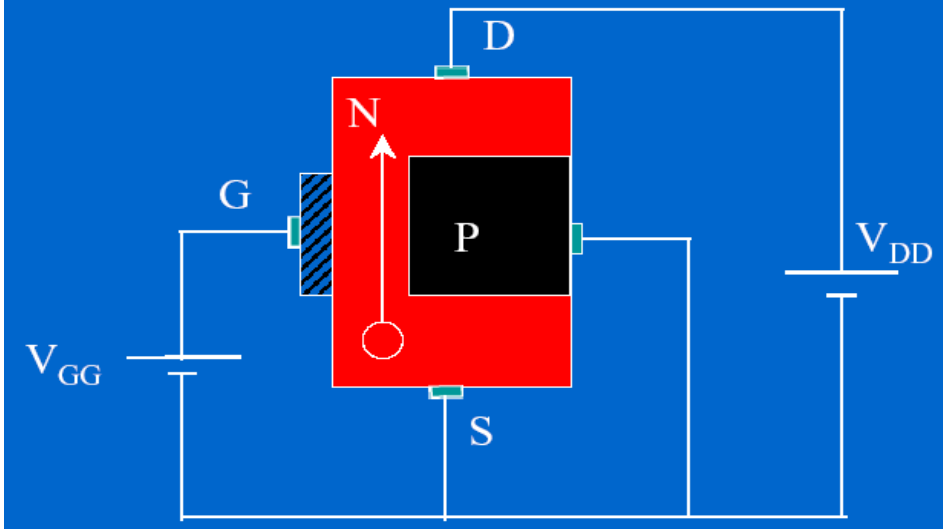
fonctionnement proche du JFET

II.1. MOSFET à appauvrissement

b. Régimes

* Régime d 'enrichissement

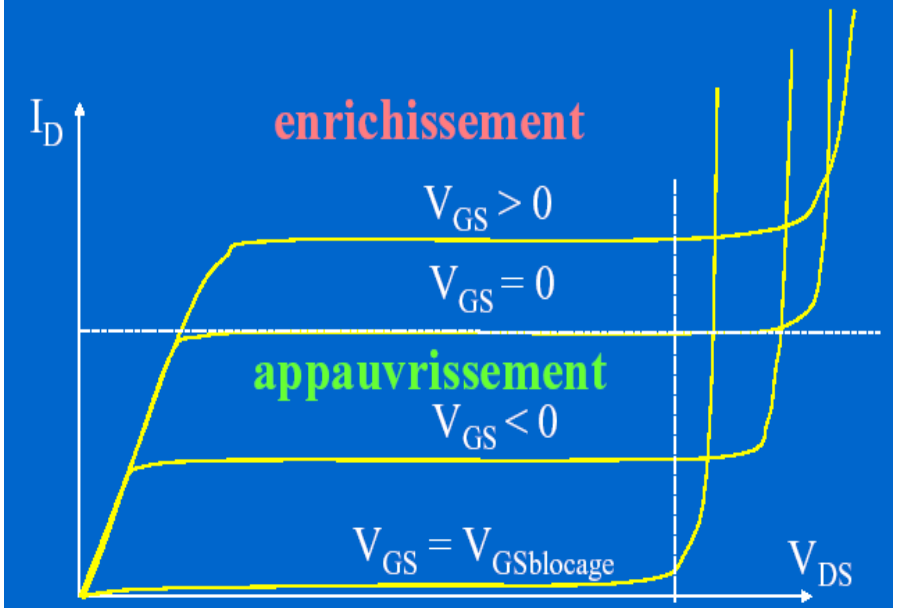
$V_{GG} > 0$ car grille isolée ; le nombre d 'électrons libres traversant le canal augmente



R_e (MOSFET) = 10^{10} à 10^{13} Ω

c. Caractéristiques

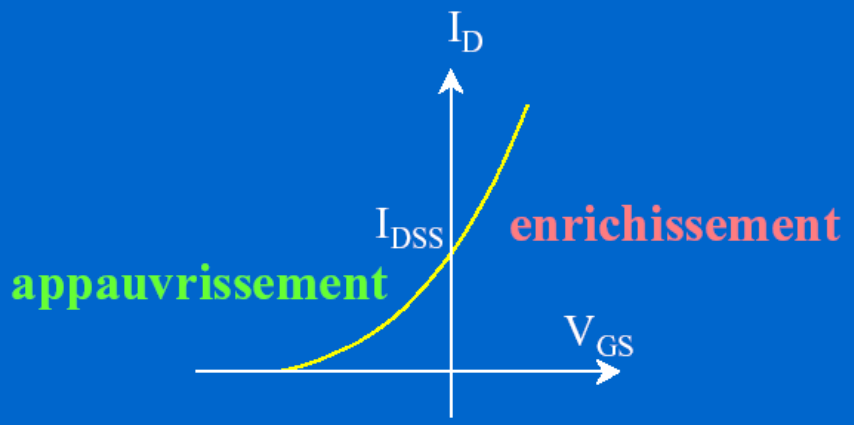
* caractéristiques de drain



II.1. MOSFET à appauvrissement

* caractéristique de transconductance

I_{DSS} : courant drain à grille court-circuitée



$$I_D = I_{DSS} [1 - V_{GS} / V_{GSblocage}]^2$$

avec $V_{GS} < 0$ ou > 0

Transistor normalement passant

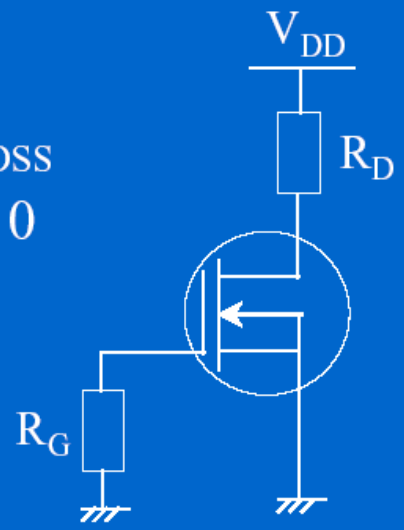
d. Polarisation

polarisations identiques au JFET : diviseur de tension, source de courant et automatique

polarisation nulle :

$I_D = I_{DSS}$

$V_{GS} = 0$



II.1. MOSFET à appauvrissement

e. Applications

- amplification petit signal avec une forte impédance d 'entrée
- étage tampon quasi idéal
- amplificateur faible bruit
- amplification à contrôle automatique de gain
- amplificateur cascode (HF) à l 'aide de transistors multi-grilles



II.2. MOSFET à enrichissement

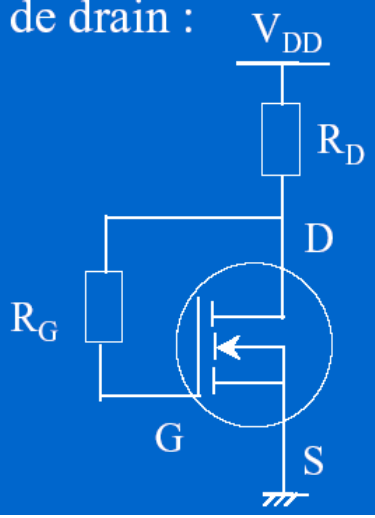
- Transconductance :

  $I_D = K (V_{GS} - V_{GSth})^2$

  K : constante dépendant du MOSFET ; V_{GSmax} # 30 V
- auto-stabilisé en température

d. Polarisation

- de grille et diviseur de tension
- par réaction de drain :



e. Polarisations des FET

Méthodes de polarisation	JFET	MOSFET à appauv.	MOSFET à enrich.
de grille	oui	oui	oui
nulle	non	oui	non
universelle	oui	oui	oui
source de courant	oui	oui	non
automatique	oui	oui	non
réaction de drain	non	non	oui