

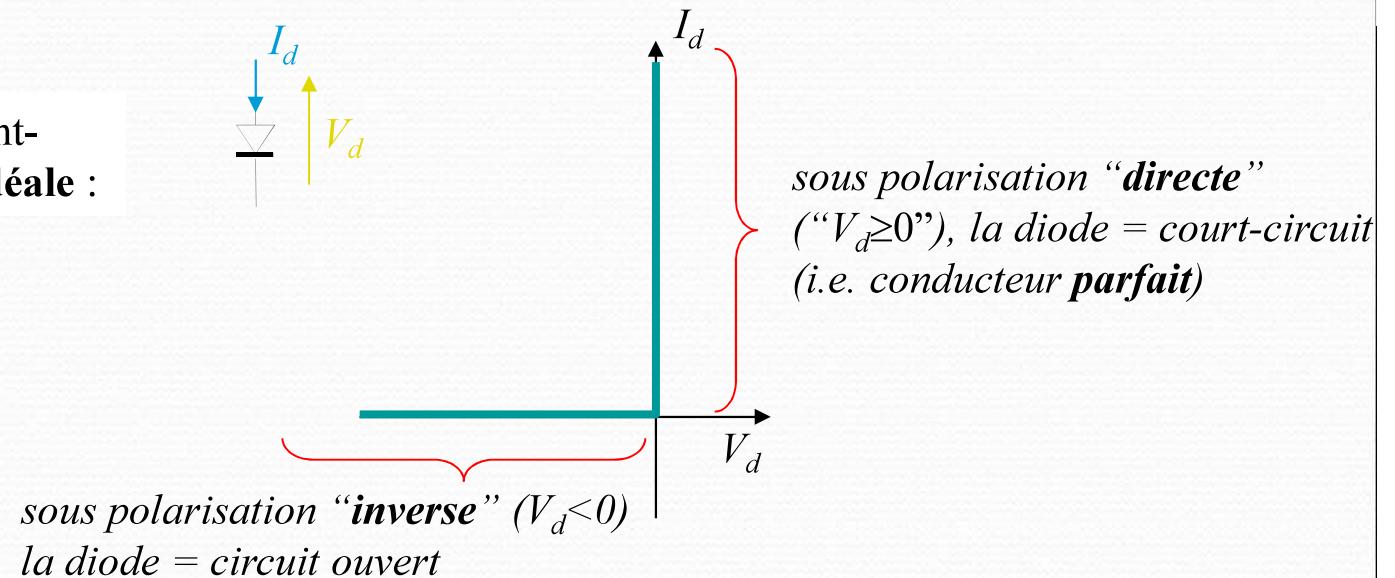
Chapitre 2

Les Diodes

1. Les Diodes

1.1 Définition

- Caractéristique courant-tension d'une **diode idéale** :

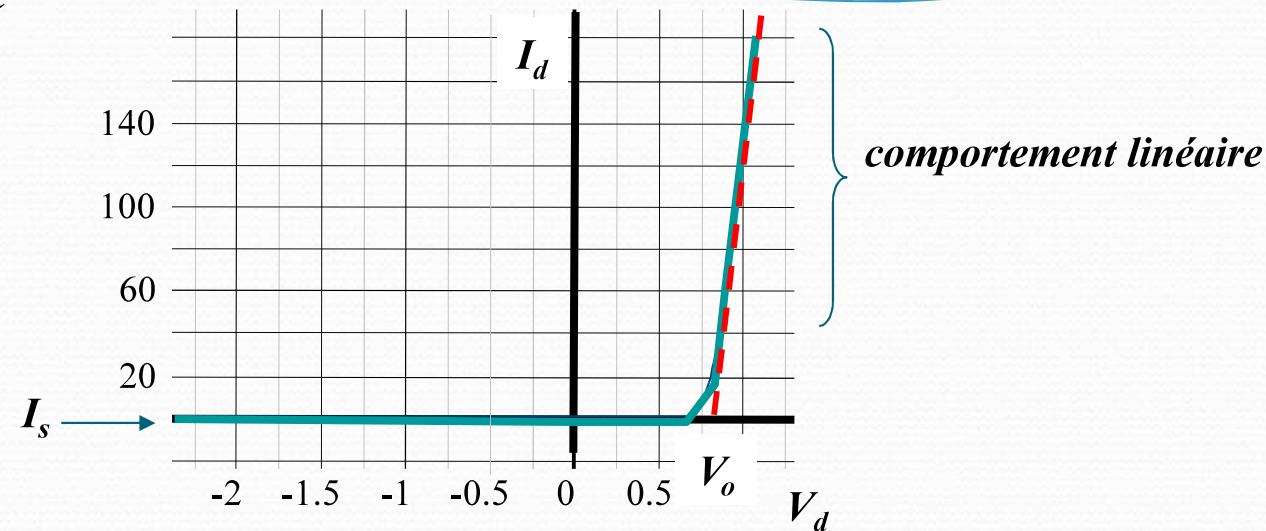


- ➔ Le courant I_d ne peut “passer que dans un sens”.
- ➔ Ce type de composant est utile pour réaliser des **fonctions électroniques** telles que le redressement d'une tension, la mise en forme des signaux (écrêtage, ...).
- ➔ La diode (même idéale) est un composant **non-linéaire**
- ➔ **Aujourd’hui la majorité** des diodes sont faites à partir de matériaux **semiconducteurs** (jonction PN ou diode Schottky, cf cours Phys. et Tech. des SC 1A et Option: Physique des dispositifs électroniques à base de SC, 2A)

1.2 Caractéristiques d'une diode réelle à base de Silicium

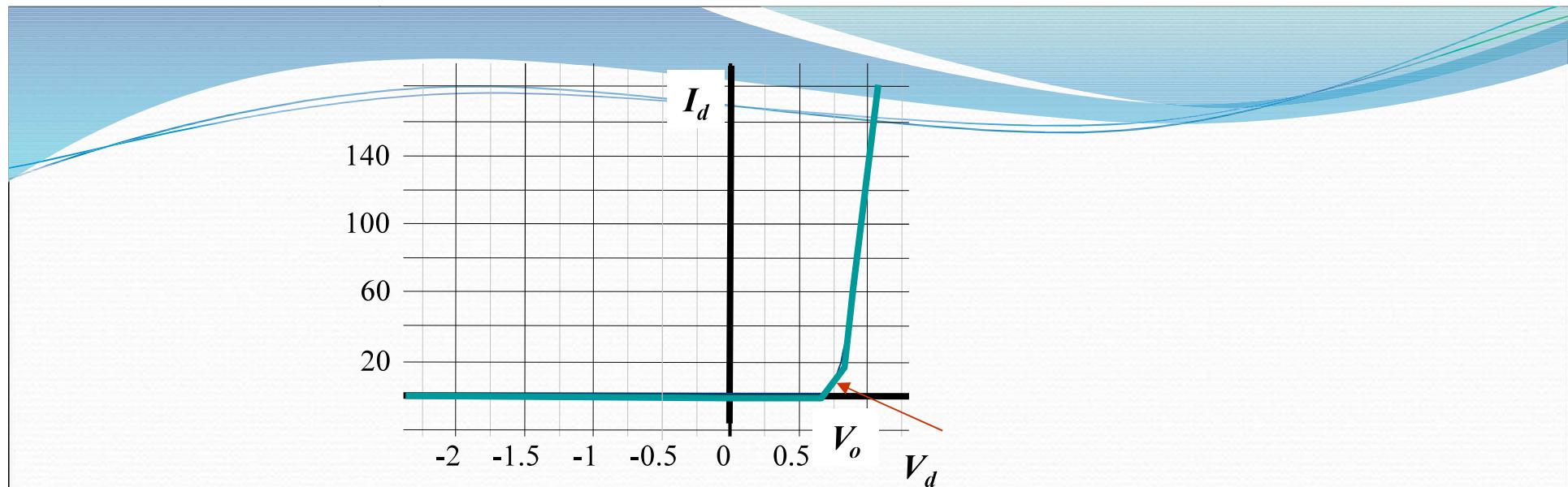
hyp: régime statique

(tension et courant indépendants du temps)



- Pour $V_d < 0$, la diode se comporte comme un **bon isolant** : $I_s \sim 1 \text{ pA} - 1 \mu\text{A}$,
→ la diode est dite “bloquée”
→ dans ce **domaine** son comportement est approximativement **linéaire**
→ le courant “inverse”, I_s , augmente avec la température

- Pour $V_d \gg \sim 0.7$, le courant augmente **rapidement** avec une **variation** à peu près **linéaire**
→ la diode est dite “passante”
→ mais I_d **n'est pas proportionnel** à V_d (il existe une “**tension seuil**” $\sim V_o$)



■ Zone « du coude » : $V_d \in [0, \sim V_o]$: augmentation **exponentielle** du courant

$$I_d \approx I_s \left[\exp\left(\frac{V_d}{\eta V_T}\right) - 1 \right] \quad \text{avec } 1 \leq \eta \leq 2 \quad (\text{facteur "d'idéalité"})$$

$$V_T = k \cdot T/e$$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ = constante de Boltzmann

$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$, T la température en °Kelvin

I_s = courant inverse

→ le comportement est fortement **non-linéaire**

→ forte **variation** avec la **température**

! $V_T(300K) = 26 \text{ mV}$ / “Diode idéale” car comportement identique à celle prévue pour une jonction PN...

Limites de fonctionnement :

■ Zone de claquage inverse

Ordre de grandeur :

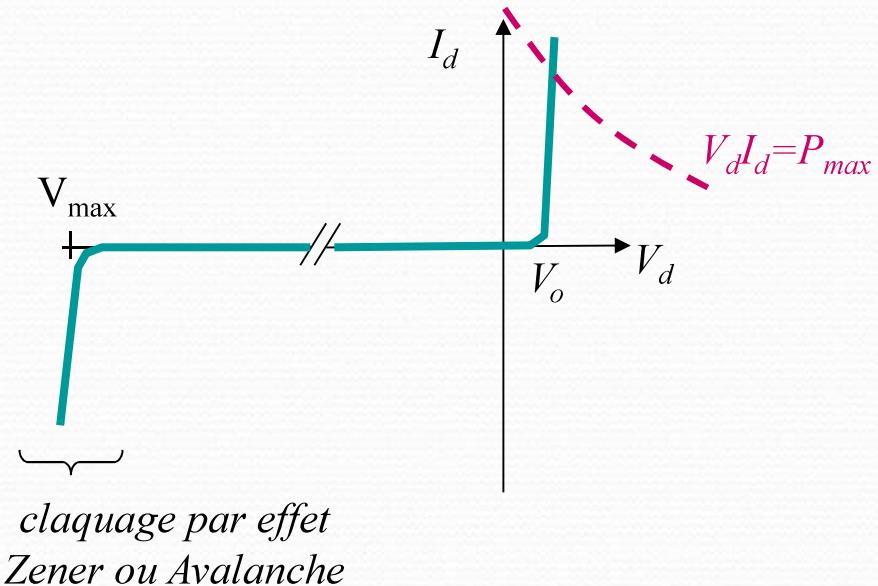
V_{max} = quelques dizaines de Volts

! peut conduire à la destruction pour une diode non conçue pour fonctionner dans cette zone.

! V_{max} = « P.I. V » (Peak Inverse Voltage) ou « P.R.V » (Peak Reverse Voltage)

■ Limitation en puissance (1/2W pour les diodes standards)

Il faut que $V_d I_d = P_{max}$



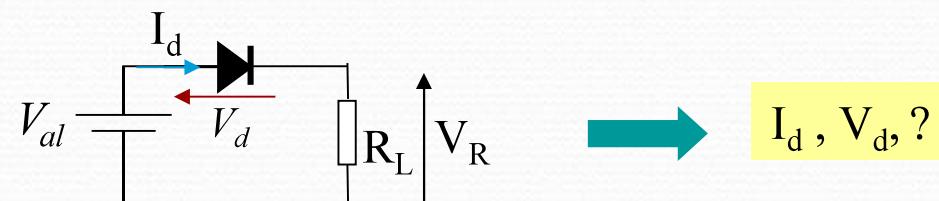
■ Influence de T : diode bloquée : $I_d = I_S$ double tous les 10°C (*diode en Si*)

diode passante : V_d (à I_d constant) diminue de $\sim 2\text{mV}/^\circ\text{C}$

1.3 Diode dans un circuit et droite de charge

Point de fonctionnement

- Comment déterminer la tension aux bornes d'une diode insérée dans un circuit et le courant qui la traverse?



→ I_d et V_d respectent les **Lois de Kirchhoff**

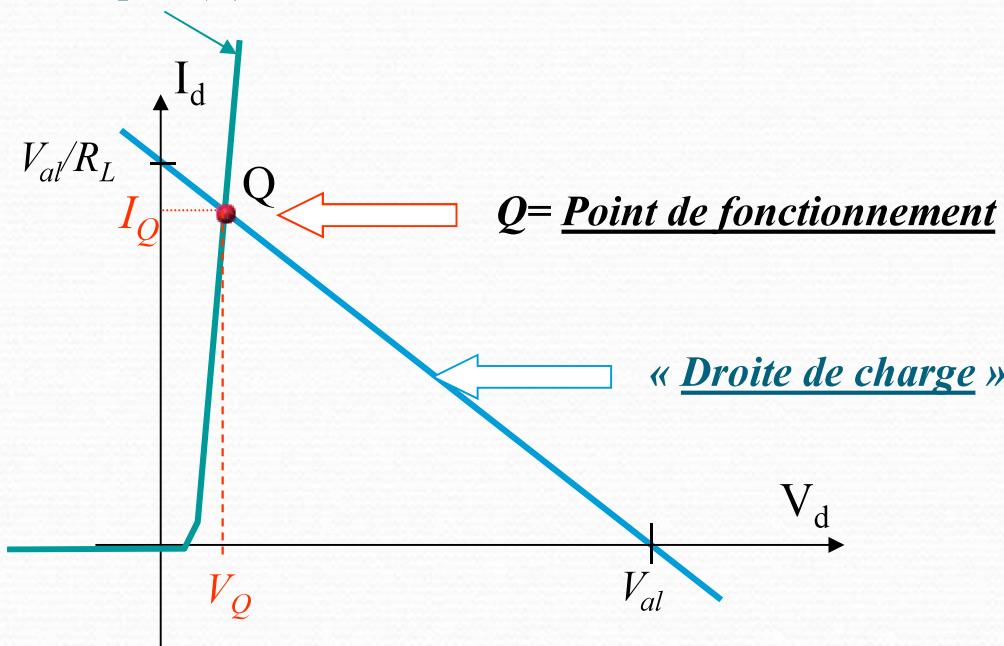
→ I_d et V_d sont sur la **caractéristique $I(V)$** du composant

→ Au **point de fonctionnement** de la diode, (I_d, V_d) remplissent ces **deux** conditions

Droite de charge

■ Loi de Kirchoff: $\Lambda \rightarrow I_d = \frac{V_{al} - V_d}{R_L}$ = **Droite de charge de la diode dans le circuit**

Caractéristique $I(V)$



- ➔ Connaissant $I_d(V_d)$ on peut **déterminer graphiquement** le point de fonctionnement ! procédure valable quelque soit la caractéristique $I(V)$ du composant !
- ➔ On peut “**calculer**” le point de fonctionnement en décrivant la diode par un **modèle simplifié**.

1.4 Modèles « statiques »

\leftrightarrow hyp: I_d, V_d constants ou à variation lente (pas d'effets transitoires).
= “modèles grands signaux, basses fréquences”

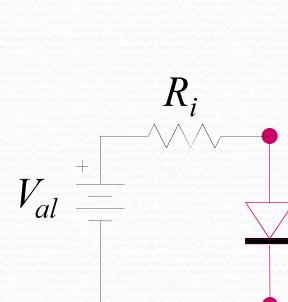
Modèle de “première” approximation: Diode « idéale »

\leftrightarrow On néglige l'écart entre les caractéristiques réelle et idéale

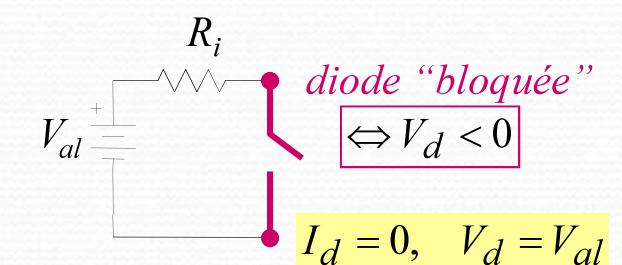
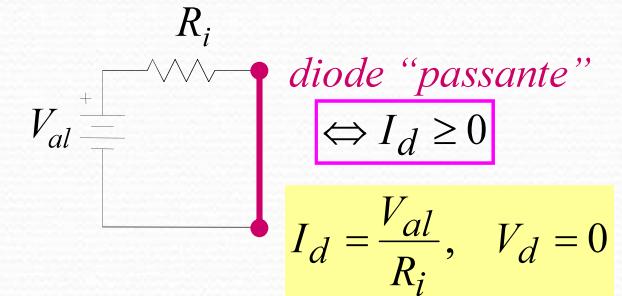
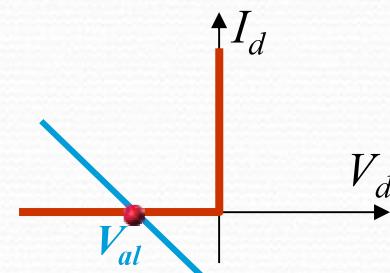
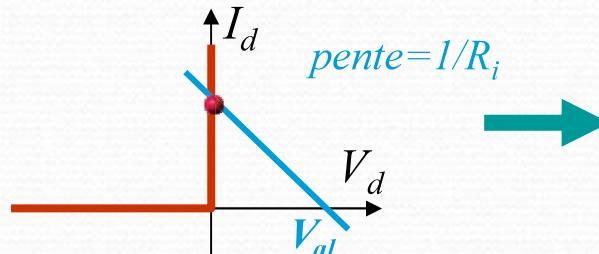
- pas de tension seuil
- conducteur parfait sous polarisation directe
- $V_d < 0$: circuit ouvert



Schémas équivalents :

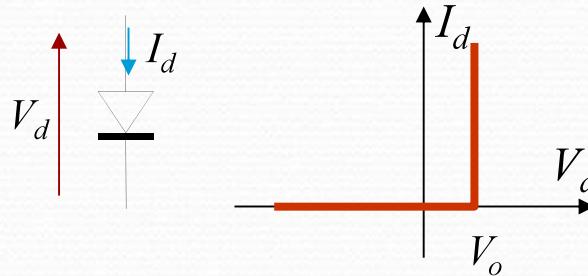


$V_{al} > 0$



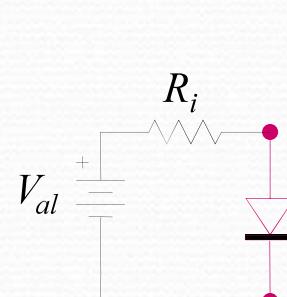
Modèle amélioré de « seconde approximation »

- tension seuil V_o non nulle
- caractéristique directe verticale
(pas de “résistance série”)
- $V_d < 0$: circuit ouvert

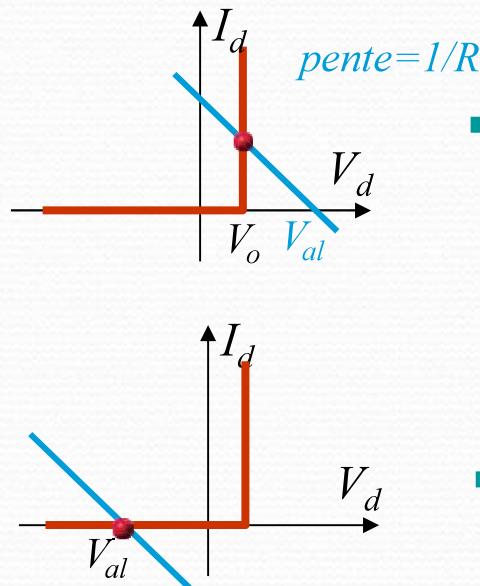


! Pour une diode en Si: $V_o \approx 0,6\text{-}0,7 \text{ V}$

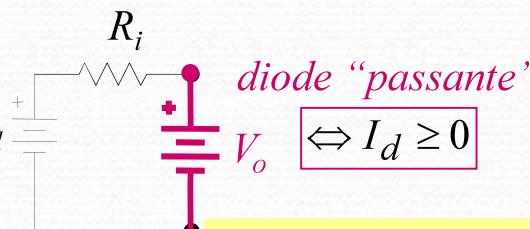
Schémas équivalents



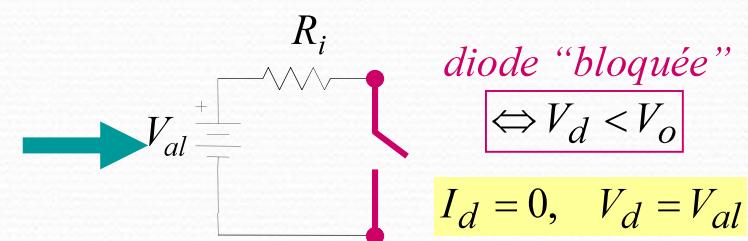
$$V_{al} > V_o \quad \text{and} \quad V_{al} < V_o$$



schémas équivalents :



$$I_d = \frac{V_{al} - V_o}{R_i}, \quad V_d = V_o$$



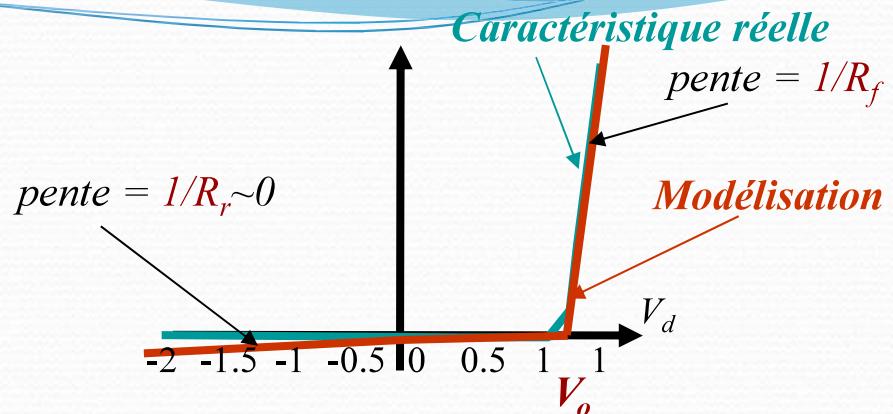
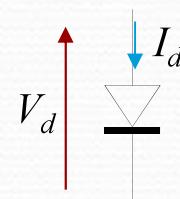
$$I_d = 0, \quad V_d = V_{al}$$

Modèle de 3^{ième} Approximation

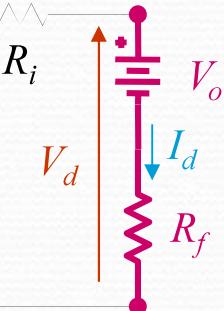
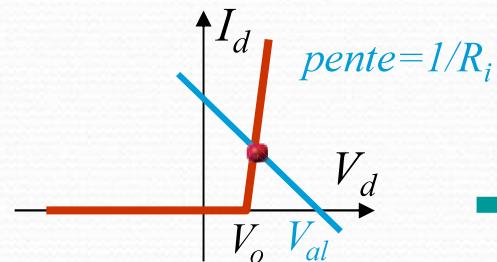
- tension seuil V_o non nulle
- résistance directe R_f non nulle
- $V_d < 0$: résistance R_r finie

! Pour une diode en silicium,
 $V_o = 0,6-0,7V$, $R_f \sim q.q. 10\Omega$,
 $R_r >> M\Omega$,

Schémas équivalents



$$V_{al} > V_o :$$



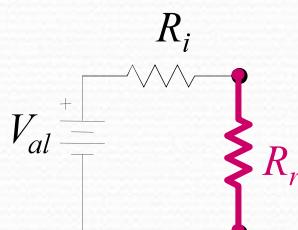
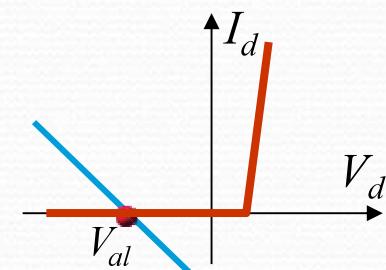
schémas équivalents :

diode passante

$$\Leftrightarrow I_d \geq 0 \text{ et } V_d \geq V_o$$

$$\rightarrow V_d = V_o + R_f I_d$$

$$V_{al} < V_o :$$



diode bloquée

$$\Leftrightarrow V_d < V_o$$

Remarques :

- $R_f \neq \frac{V_d}{I_d}$

- Le choix du modèle dépend de la précision requise.

- Les effets **secondaires** (influence de la température, non-linéarité de la caractéristique inverse,) sont pris en compte par des modèles plus évolués (modèles utilisés dans les simulateurs de circuit de type SPICE).

Calcul du point de fonctionnement via l'utilisation des schémas équivalents :

Problème: le schéma dépend de l'état (passante ou bloquée) de la diode. Il y a deux schémas équivalents possibles... Lequel est le bon?

Démarche (*pour débutant...):*

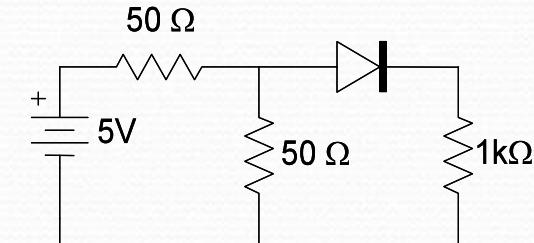
- a) **choisir le schéma** (ou état) le plus vraisemblable (en vous aidant par exemple de la droite de charge)
- b) **calculer le point de fonctionnement Q** de la diode
- c) **vérifier la cohérence** du résultat avec l'**hypothèse** de départ

S'il y a **contradiction**, il y a eu erreur sur l'état supposé de la diode.
Recommencer le calcul avec l'**autre schéma**.

Démarche pour étudiants entraînés...

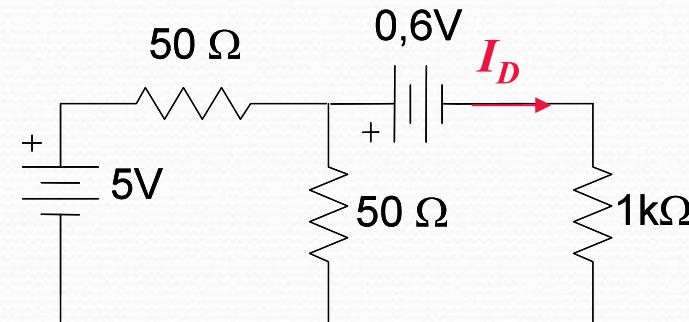
Un coup d'œil attentif suffit pour “deviner” l'état (passant/bloqué) de la diode !
Le calcul de Q se fait tout de suite avec le bon schéma équivalent...

Exemple : Calcul de Q du circuit suivant, en utilisant la **2ième approximation** pour la diode.



Diode en Si : $V_o = 0.6V$

hypothèse initiale : diode passante [$\leftrightarrow V_d > V_o, (I_d > 0)$]



OK!

$$\Lambda \rightarrow I_d = 1,85 \text{ mA}$$

$$V_d = 0,6V$$

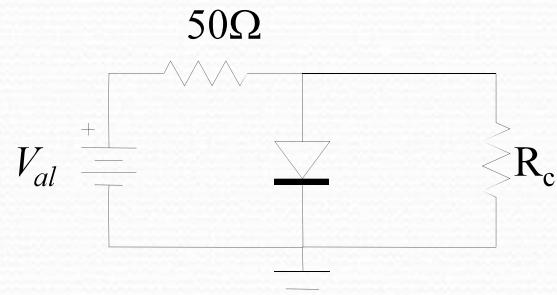
En partant de l'hypothèse d'une diode bloquée: $\rightarrow V_d = 2,5V > V_o$ K

En utilisant la 3ième approximation: ($R_f = 15\Omega$, $R_r = 10M\Omega$) $\Lambda \rightarrow I_d = 1,82mA$ et $V_d = 0,63V$

Rem: Refaites le calcul après avoir remplacée la résistance de $1k\Omega$ par 10Ω ...

Autres exemples :

1)



Diode au Si

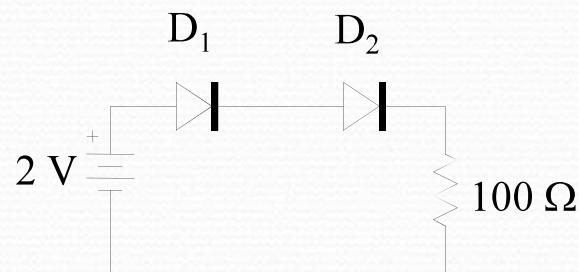
Calcul de I_d et V_d

pour :

- a) $V_{al} = -5V, R_c = 1k\Omega$
- b) $V_{al} = 5V, R_c = 1k\Omega$
- c) $V_{al} = 1V, R_c = 1k\Omega$
- d) $V_{al} = 1V, R_c = 10\Omega$

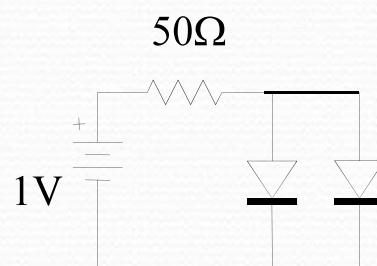
Conseil: simplifier le circuit d'abord avant de vous lancer dans des calculs

2)



Diode au Si

3)



Diodes au Si

Diode électroluminescente (ou LED)

■ **Principe :** La circulation du courant provoque la luminescence

Fonctionnement sous **polarisation directe** ($V > V_o$)

L'intensité lumineuse \propto courant électrique I_d

! Ne fonctionne pas avec le Si (cf. cours Capteurs)

$V_o \neq 0.7V$! (AsGa(rouge): $\sim 1.7V$; GaN(bleu): $3V$)



Diode Schottky

Une **diode Schottky** est une diode qui a un seuil de tension V_o très bas et un temps de réponse très court.

Diode Varicap

Une varicap est une diode à capacité variable. Elle utilise la variation de C_t avec V_d en **polarisation inverse**.

Photodiode

Sous **polarisation inverse**, la photodiode délivre un courant proportionnel à l'intensité de la lumière incidente.



Chapitre 3

Transistor Bipolaire

2. Transistor bipolaire

2.1 Introduction

■ le Transistor = l'élément “clef” de l'électronique

il peut :

amplifier un signal

→ amplificateur de tension, de courant, de puissance,...

être utilisé comme une **source de courant**

agir comme un **interrupteur commandé (= mémoire binaire)**

→ essentiel pour l'**électronique numérique**

...

il existe :

soit comme **composant discret**

soit sous forme de **circuit intégré**, i.e. faisant partie d'un circuit plus complexe, allant de quelques unités (ex: AO) à quelques millions de transistors par circuit (microprocesseurs)

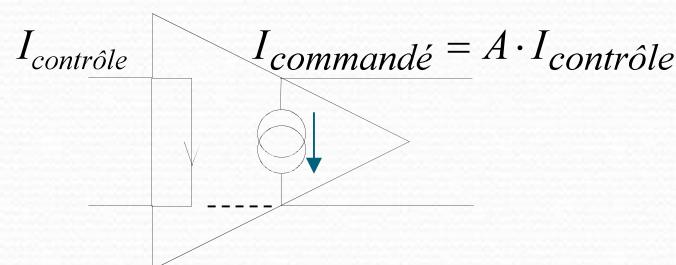
■ on distingue le transistor bipolaire du transistor à effet de champ

→ différents mécanismes physiques

■ Ils agissent, en 1^{ière} approx., comme une **source de courant commandé**

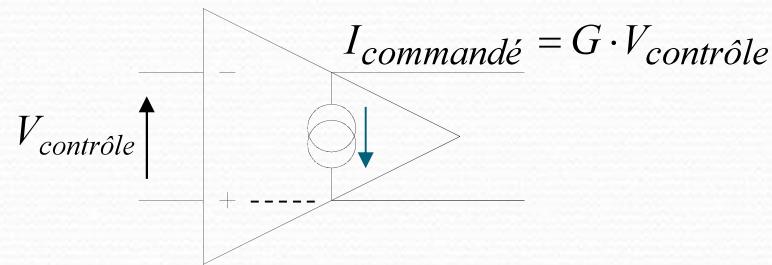
→ transistor bipolaire : commandé **par un courant**

→ transistor à effet de champ: commandé **par une tension**



*source de courant
commandée par un
courant*

A = “gain” en courant



*source de courant
commandée par une
tension*

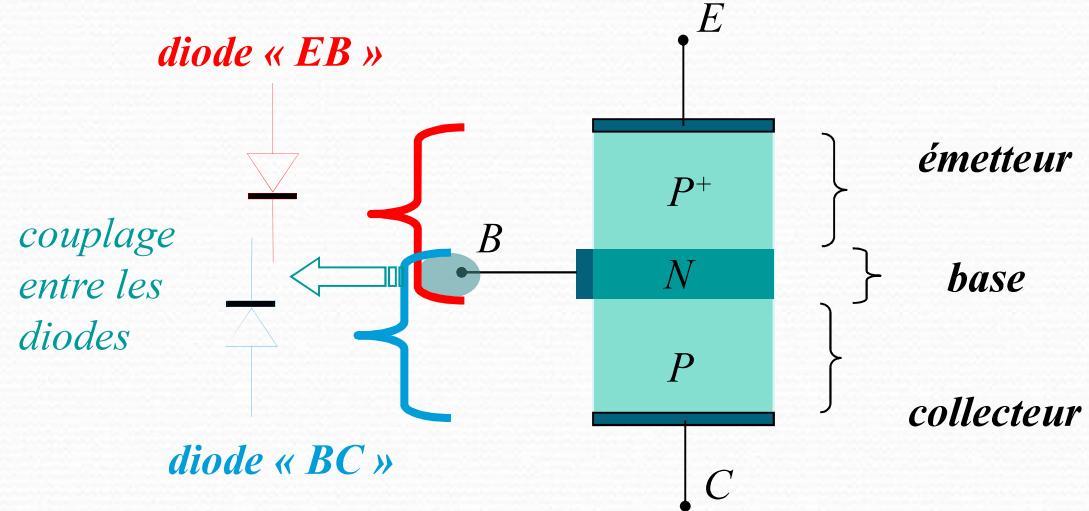
G = transconductance.

Idéalement : l'étage d'entrée ne dépend pas de l'étage de sortie.

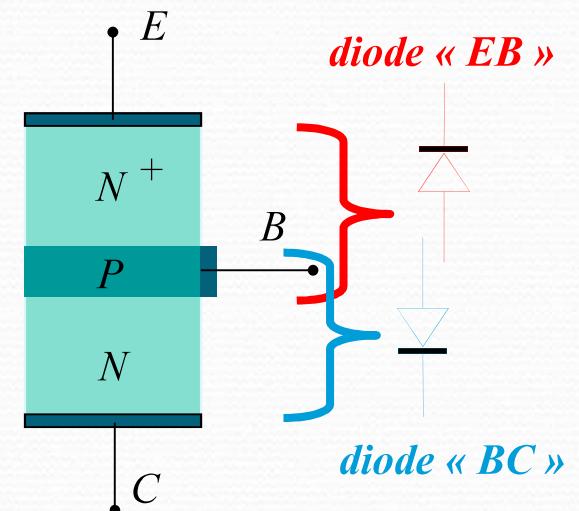
2.2 Structure et fonctionnement d'un transistor bipolaire

Structure simplifiée

Transistor PNP



Transistor NPN



Deux « jonctions PN ou diodes » couplées \Leftrightarrow « effet transistor »

Symétrie NPN/PNP

■ Effet transistor

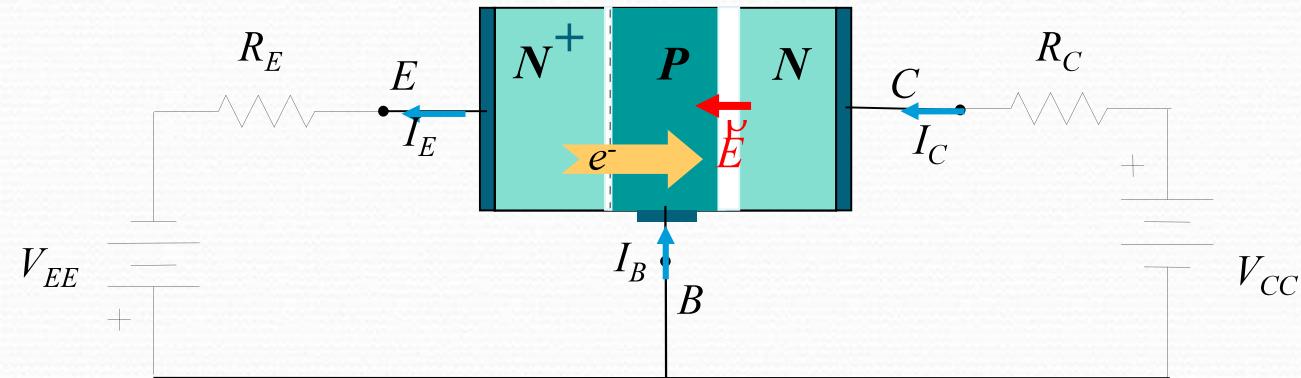
Exemple: Transistor NPN

Conditions de polarisation :

Jonction EB : directe

Jonction BC: inverse

= **MODE ACTIF** du transistor



→ si $V_{EE} > \sim 0.7V$, jonction EB passante → $V_{BE} \sim 0.7V$, $I_E \gg 0$

→ La jonction EB est **dissymétrique** (dopage plus élevé côté E)

→ courant porté essentiellement par les **électrons** (peu de trous circulent de B vers E)

→ $V_{CC} > 0$, jonction BC “bloquée” => **champ électrique intense** à l’interface Base/Collecteur

→ La **majorité** des électrons injectés par l’émetteur dans la base sont **collectés** par le champ

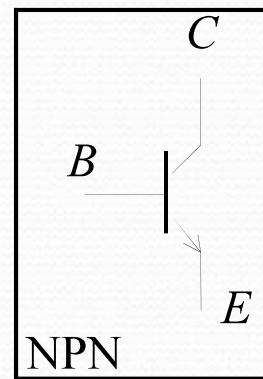
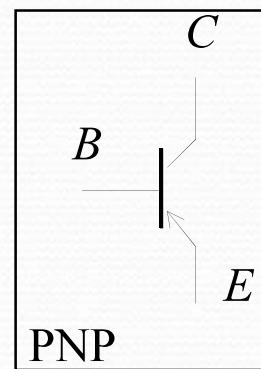
→ $I_C \sim I_E$ et $I_B = I_E - I_C \ll I_E$

→ En mode actif, I_C est **contrôlé par I_E** , et **non vice versa...**

■ Premières *differences* entre le transistor bipolaire et la source commandée *idéale*...

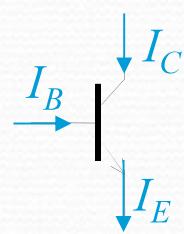
→ Contraintes de polarisation : $V_{BE} > \sim 0.7V$, $V_{CB} > -0.5V$

■ Symboles



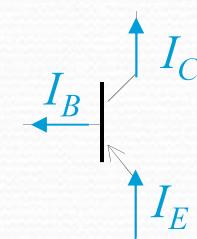
$I_E > 0$ en mode actif

■ Conventions des courants :



NPN

$$\rightarrow I_E = I_B + I_C$$



PNP

2.3 Caractéristiques du transistor NPN

■ Choix des paramètres :

Les différentes grandeurs électriques (I_E , I_B , V_{BE} , V_{CE} , ...) sont **liées**:

différentes représentations équivalentes des caractéristiques électriques existent

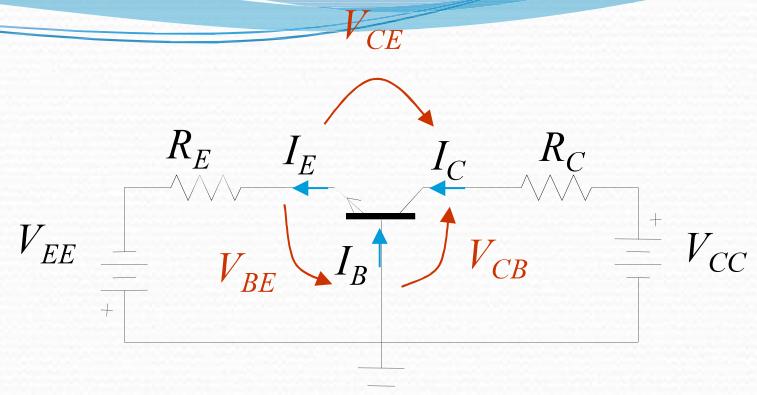
- Configuration “**Base Commune**”
(base = électrode commune)

Caractéristiques : $\mathbf{I}_E(V_{BE}, V_{BC})$, $\mathbf{I}_C(V_{BC}, I_E)$

- Configuration “**Emetteur Commun**”
(émetteur= électrode commune)

Caractéristiques : $\mathbf{I}_B(V_{BE}, V_{CE})$, $\mathbf{I}_C(V_{CE}, I_B)$

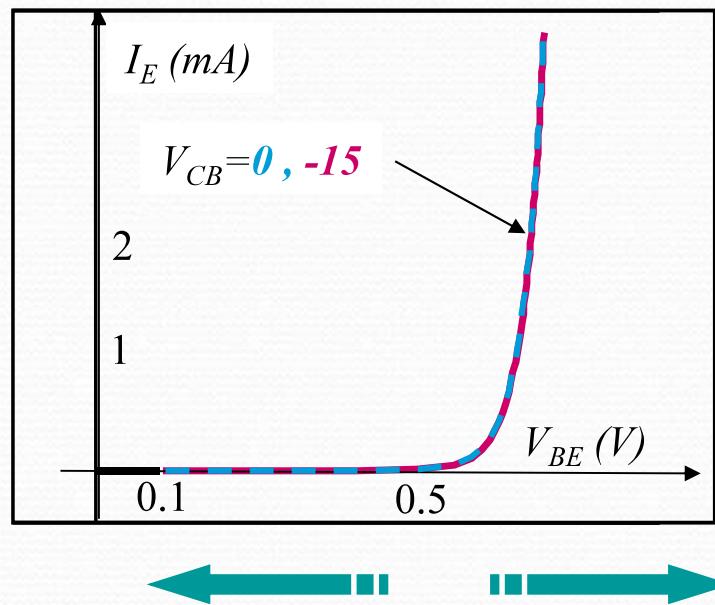
La représentation des caractéristiques en configuration “collecteur commun” est plus rare.



■ Caractéristiques en configuration BC :

CAS DU TRANSISTOR NPN

$I_E(V_{BE}, V_{CB})$: « caractéristique d'entrée »
hypothèse: diode BC bloquée (mode usuel)



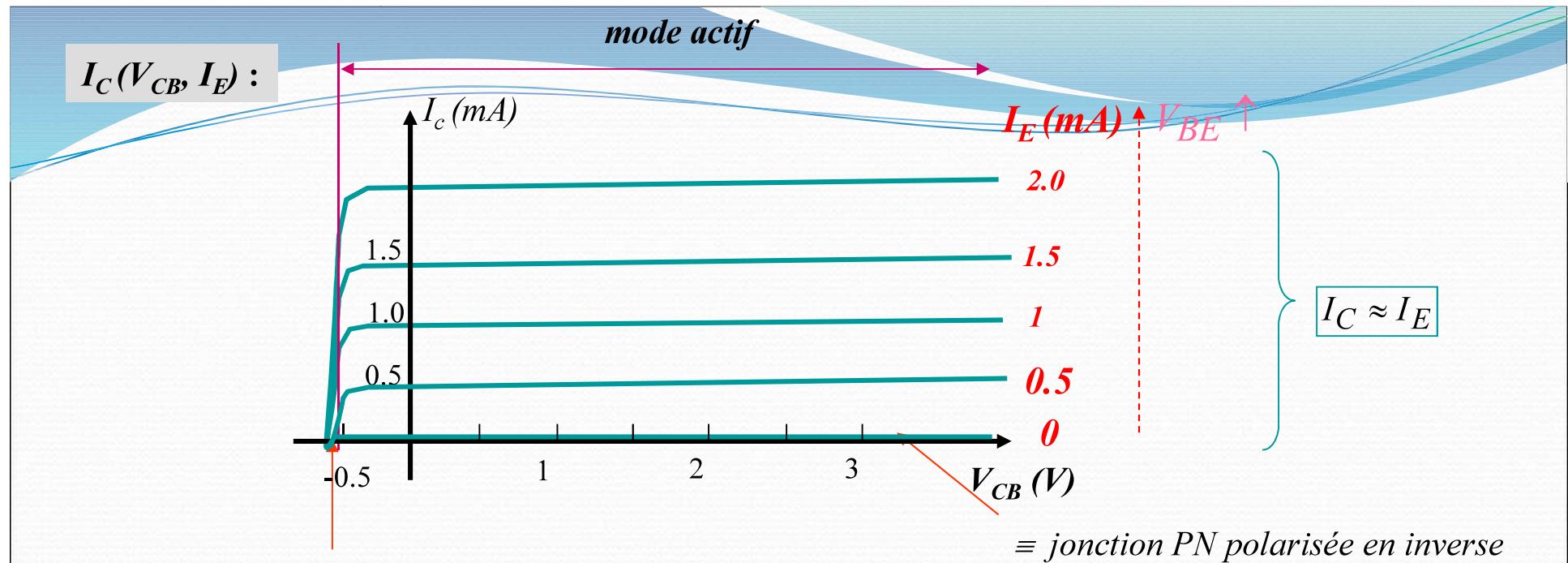
~ caractéristique d'une jonction PN

$$I_E \cong I_S \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

! très peu d'influence de I_C (resp. V_{CB})

Jonction BE bloqué
 $I_E \sim 0, V_{BE} < 0.5$ V

Jonction BE passante
 $I_E > 0, V_{BE} \approx 0.6-0.7$ V = « V_0 »



tension seuil de la jonction BC

↓ pour $V_{CB} > \sim -0.5V$, on a $I_C = \alpha_F I_E$, avec α_F proche de 1.

↗ En **mode actif**, $I_B = I_E - I_C = I_E(1 - \alpha_F)$

↓ pour $I_E = 0$, on a $I_C = \text{courant de saturation inverse}$ de la jonction BC ~ 0

↗ Transistor en “**mode bloqué**”

↓ pour $V_{CB} \approx -0.7$, la jonction BC est passante, I_C n'est plus contrôlée par I_E

↗ Transistor en “**mode saturé**”

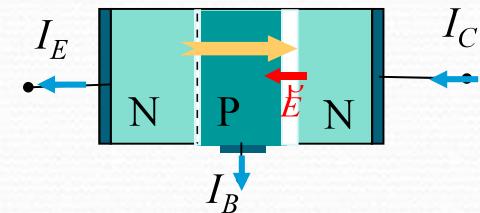
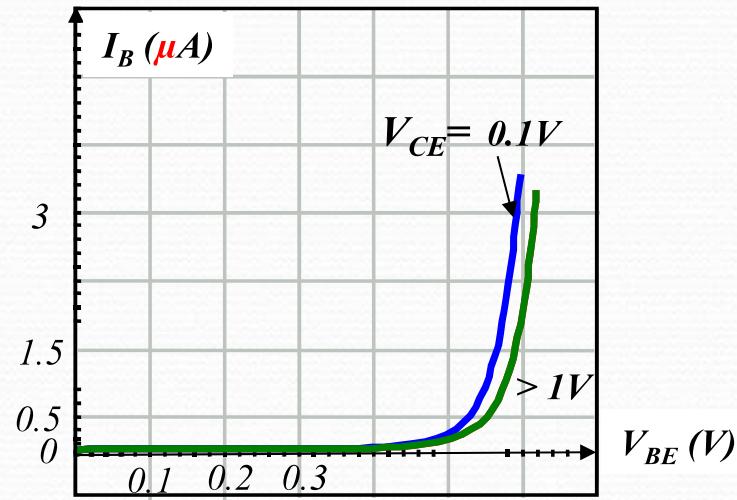
Ordre de grandeur : $\alpha_F \sim 0.95 - 0.99$ $\alpha_F = \text{“gain en courant continue en BC”}$

■ Caractéristiques en configuration EC :

$I_B(V_{BE}, V_{CE}) :$

« caractéristique d'entrée »

hypothèse: diode BC bloquée (mode usuel)

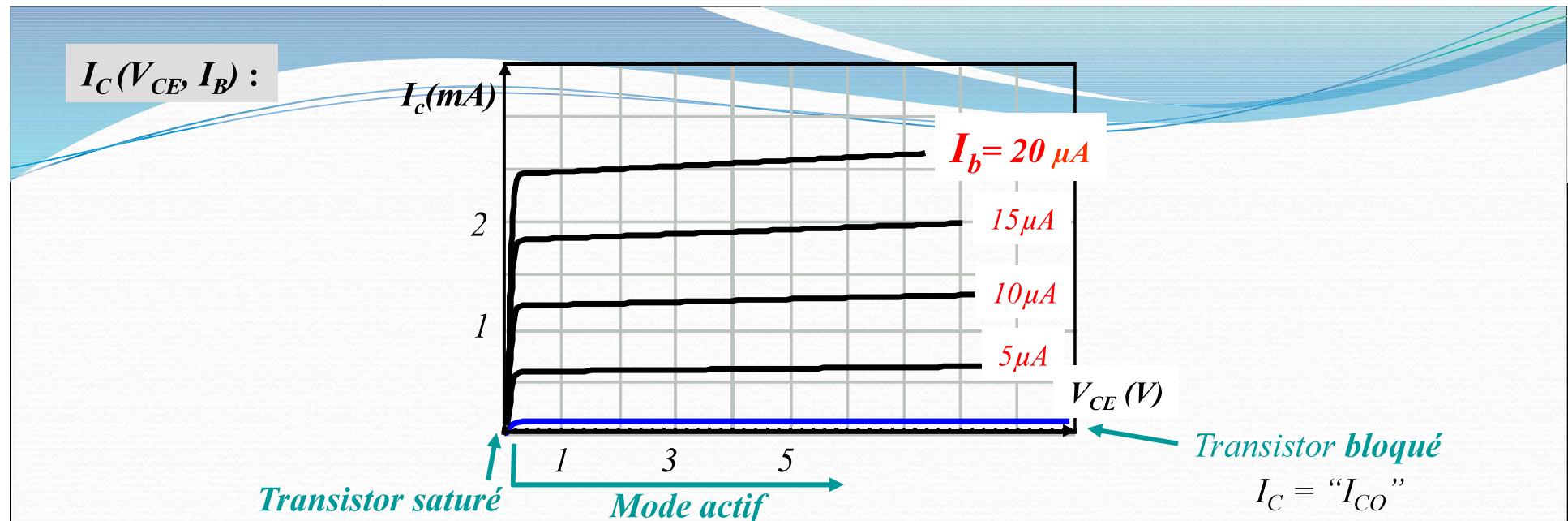


⬇️ $V_{BE} > 0.6V$, jonction PN passante

✉️ $I_B \ll I_E \leftrightarrow$ charges non collectées par le champ électrique de la jonction BC

$$I_B = (1 - \alpha_F) I_E$$

⬇️ Influence non-négligeable de V_{CE} sur $\alpha_F \leftrightarrow$ “Effet Early”



Mode actif : BE passant, BC bloquée $\rightarrow V_{BE} \approx 0.7V$ et $V_{CB} > -0.5 V$

$$\rightarrow V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} > -0.5 + 0.7 \sim 0.2 V$$

$$I_C = \alpha_F I_E = \alpha_F (I_C + I_B) \Rightarrow I_C = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_B = "h_{FE}" I_B$$

h_{FE} = "gain en courant continue en EC" = " β_F "

ordre de grandeur : $h_{FE} \sim 50 - 250$

! Grande dispersion de fabrication sur h_{FE} .

Effet Early : α_F tend vers 1 lorsque V_{CE} augmente $\rightarrow h_{FE}$ augmente avec V_{CE}

Mode saturé : Diode BC passante $\rightarrow I_C \sim$ indépendant de I_B

$\rightarrow h_{FE}$ diminue lorsque $V_{CE} \rightarrow 0$

Modes actif / bloqué / saturé

Transistor NPN

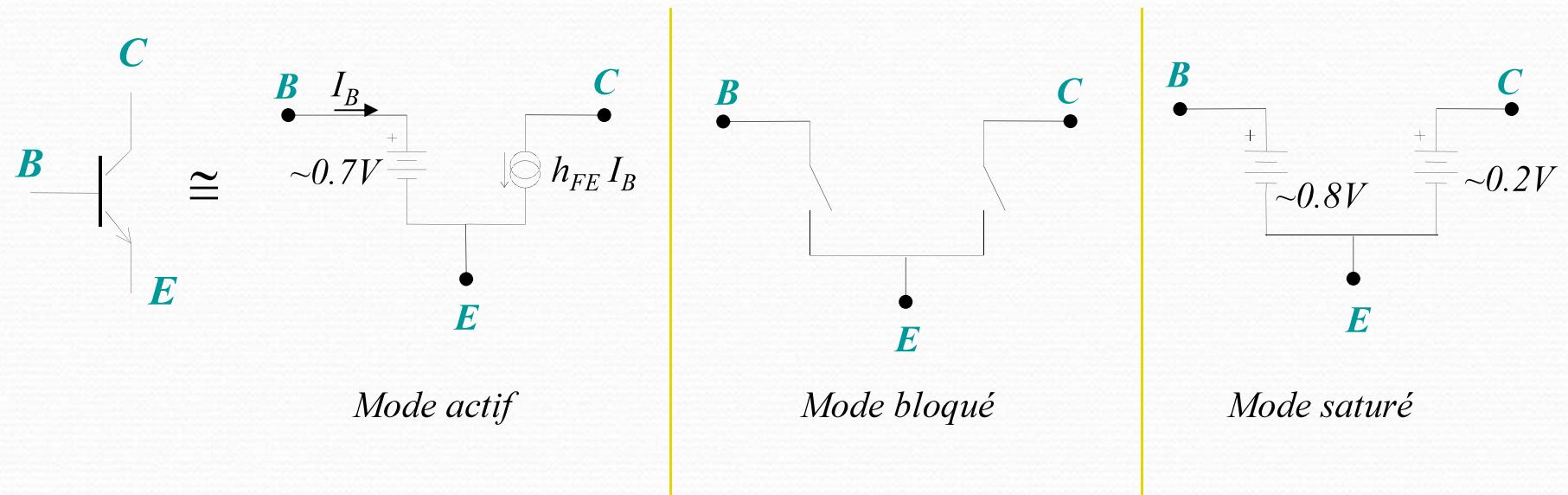
Configuration EC :

Mode actif : $V_{BE} \approx 0.7V$ $\sim 0.3V < V_{CE} < V_{CC}$

$$I_c \approx h_{FE} I_B$$

Mode bloqué : $I_B \cong 0$ $V_{CE} \cong V_{CC}$ $I_C \approx 0$

Mode saturé : $V_{BE} \approx 0.8V$ $V_{CE} \approx 0.2V$ $I_c \neq h_{FE} I_B$



V_{CC} = source de tension externe alimentant la maille contenant C et E (cf plus loin)

V_{CE} ne peut pas dépasser cette valeur!

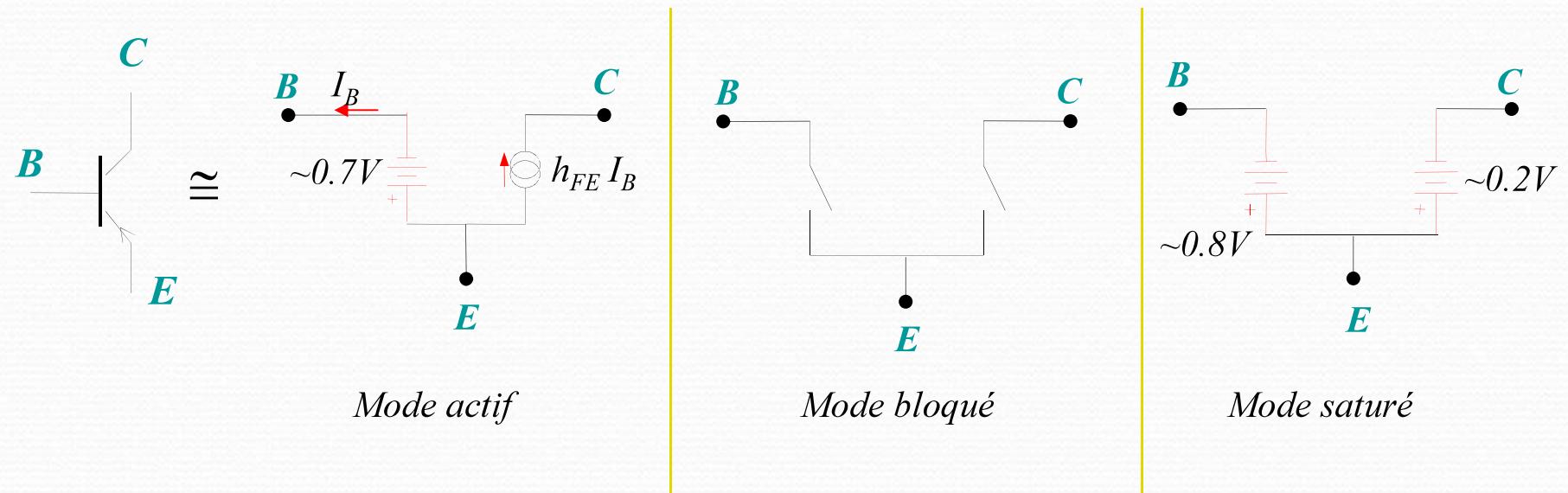
Transistor PNP

Configuration EC :

Mode actif : $V_{BE} \approx -0.7V$ $\sim -0.3V < V_{CE} < V_{CC}$ (< 0) $I_c \approx h_{FE}I_B$

Mode bloqué : $I_B \cong 0$ $V_{CE} \cong V_{CC}$ $I_C \approx 0$

Mode saturé $V_{BE} \approx -0.8V$ $V_{CE} \approx -0.2V$ $I_c \neq h_{FE}I_B$



2.4 Modes de fonctionnement du transistor dans un circuit

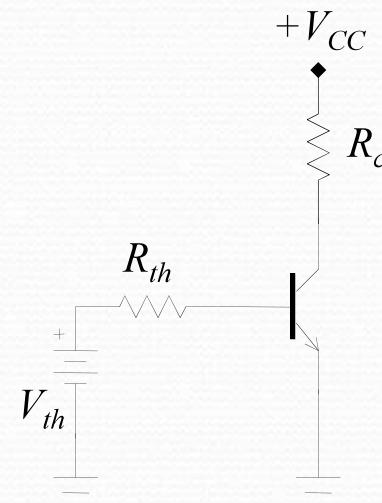
↔ Point de fonctionnement

Droites de charges :

Le point de fonctionnement est déterminé par les **caractéristiques** du transistor et par les **lois de Kirchhoff** appliquées au circuit.

Exemple :

- Comment déterminer I_B , I_C , V_{BE} , V_{CE} ?

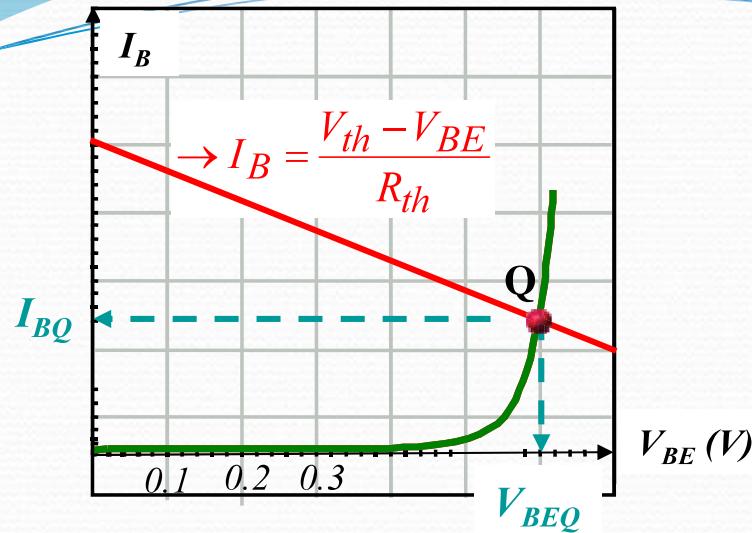


Droites de charges :

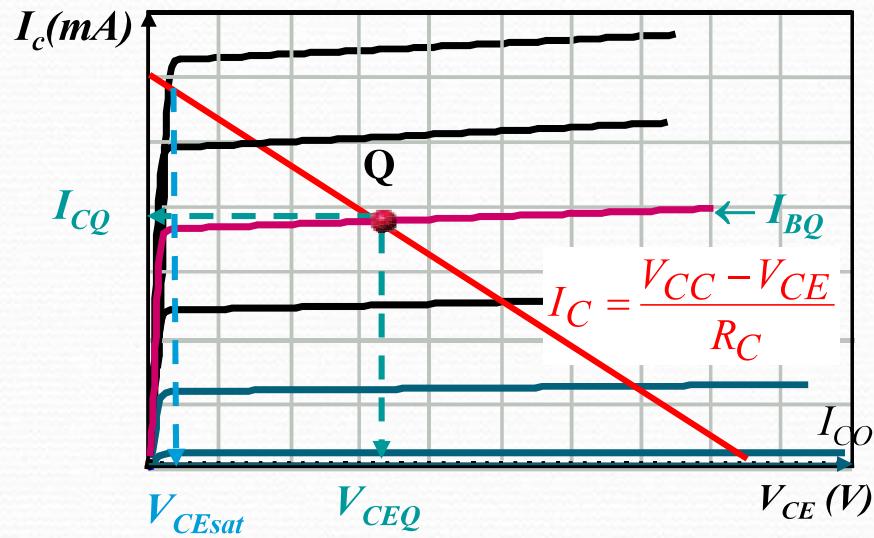
$$V_{th} = R_{th}I_B + V_{BE} \rightarrow I_B = \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_{th}}$$

$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} \rightarrow I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$

■ Point de fonctionnement



$V_{BEQ} \approx 0.6-0.7V$, dès que $V_{th} > 0.7V$
 (diode passante
 transistor actif ou saturé)



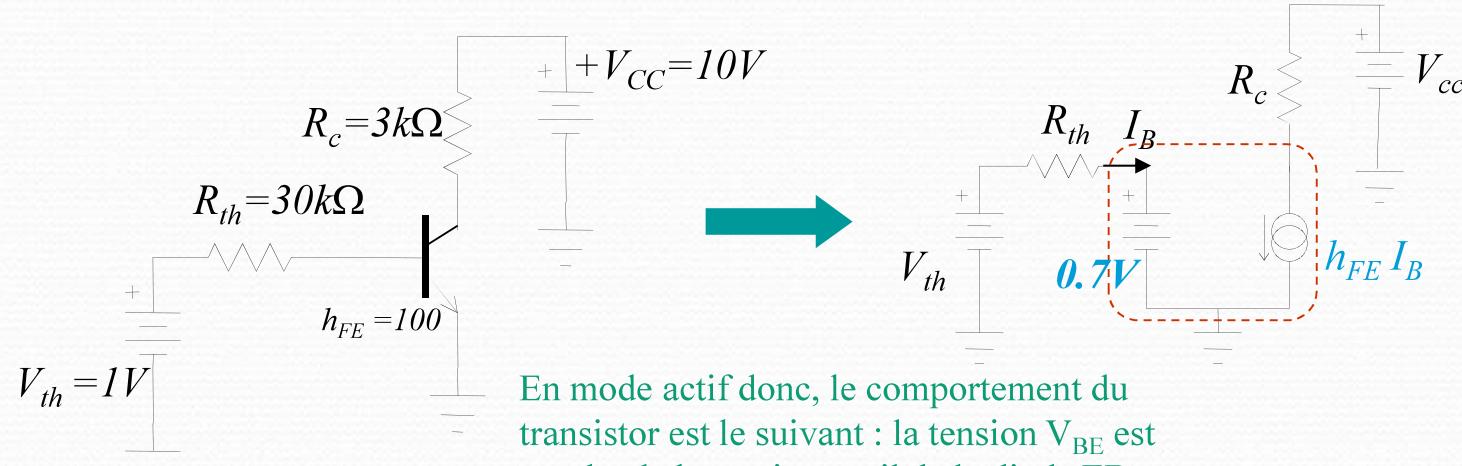
$$V_{CE_{sat}} \leq V_{CE_Q} \leq V_{CC}$$

$$I_{CO} \leq I_c \leq \frac{V_{CC} - V_{CE_{sat}}}{R_c} \approx \frac{V_{CC}}{R_c}$$

Q fixe le mode de fonctionnement du transistor

Exemple : Calcul du point de fonctionnement

Pour estimer le point de fonctionnement du transistor, on peut partir de l'**hypothèse** qu'il est en mode actif.



En mode actif donc, le comportement du transistor est le suivant : la tension V_{BE} est proche de la tension seuil de la diode EB et le collecteur est commandé par le courant de base.

En tenant compte de ce comportement on peut calculer les grandeurs électriques du montage :

$$\begin{aligned}\rightarrow I_{BQ} &= 10\mu A \\ \rightarrow I_{CQ} &= 1mA \\ \rightarrow V_{CEQ} &= 7V\end{aligned}$$

On a bien : $\sim 0,3 < V_{CEQ} < V_{CC}$

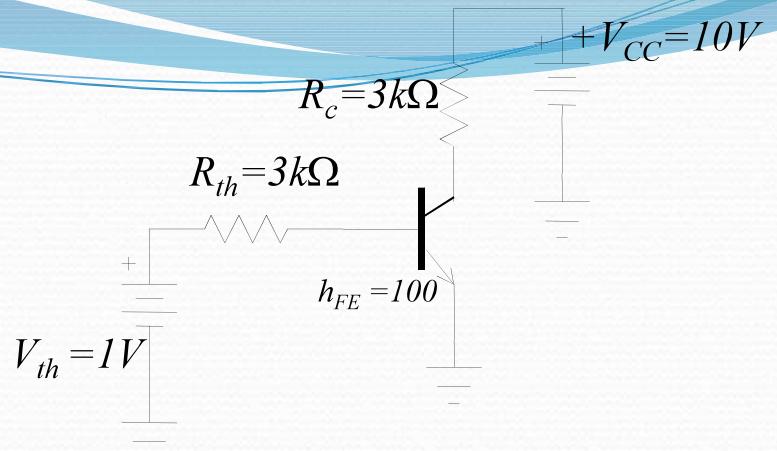
Résultat cohérent avec le **mode actif** du transistor.

- Remplacement de R_{th} par $3k\Omega$:

$$\Lambda \rightarrow I_{BQ} = 100 \mu A$$

$$\Lambda \rightarrow I_{CQ} = 10mA$$

$$\Lambda \rightarrow V_{CEQ} = -20V !!$$



Résultat incompatible avec le mode actif

! le modèle donne des valeurs erronées

Cause :

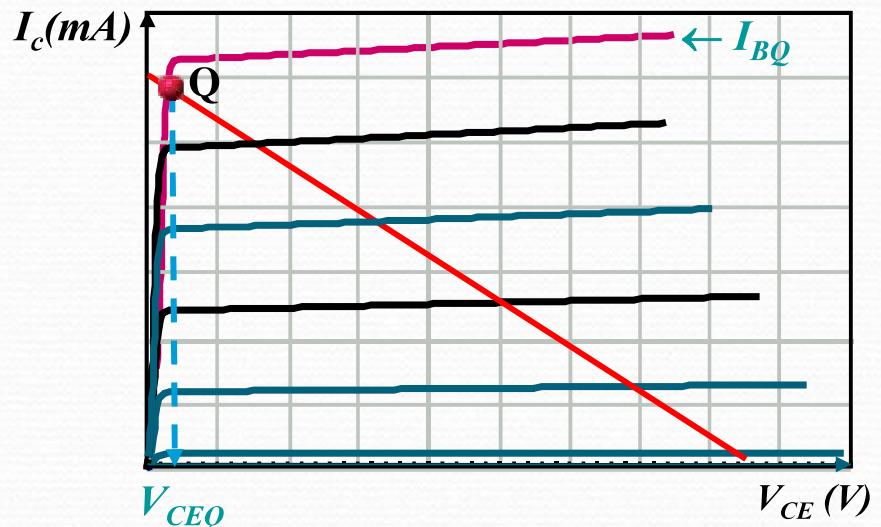
En ayant augmenté I_{BQ} , (réduction de R_{th})
Q a atteint la limite de la zone
correspondant au mode actif. (**T passe
dans l'état saturé**)

Partant de cette constation, on peut
considérer que:

$$\rightarrow V_{CEQ} \sim 0.3V$$

$$\text{et } I_{CQ} = 3.2mA$$

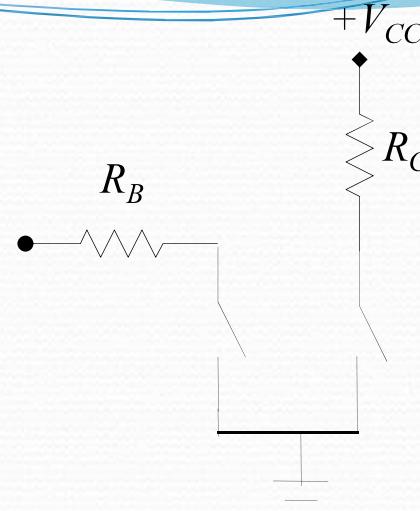
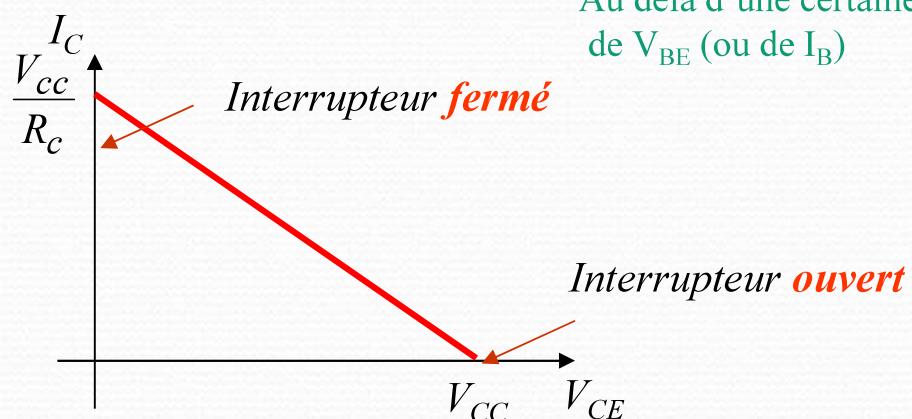
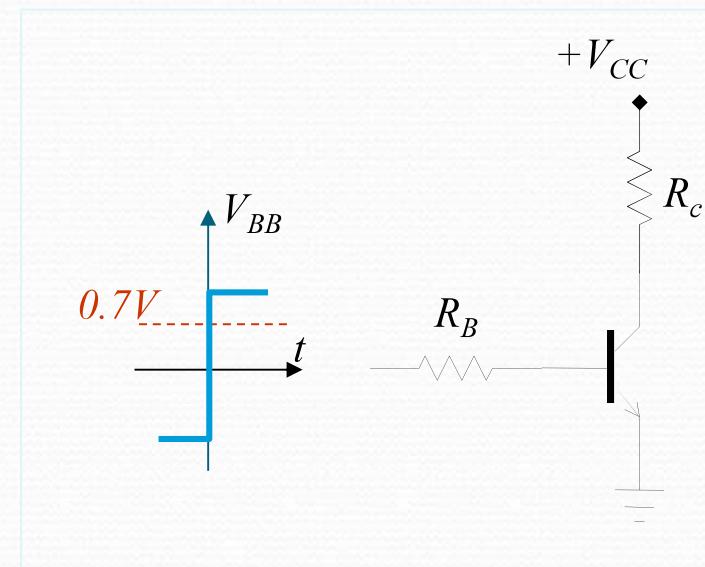
et on peut estimer les autres grandeurs électriques du montage.



■ Quelques circuits élémentaires :

Transistor interrupteur:

$t < 0 : V_{BE} < 0.7V \rightarrow$ Mode bloqué

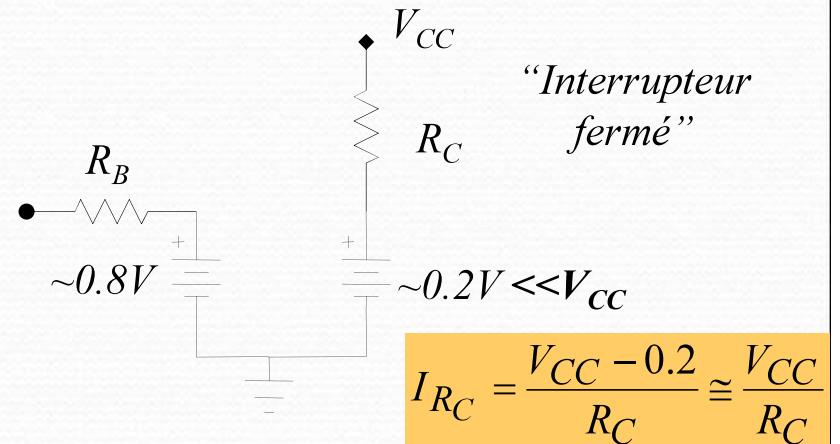


"Interrupteur
ouvert"

$$I_{RC} = 0$$

pas de courant dans
la « charge » (R_C)

$t > 0 : V_{BE} > \sim 0.8V$, tel que $R_c I_c \sim V_{CC}$
 $\rightarrow V_{CE} \sim qq. 100mV$



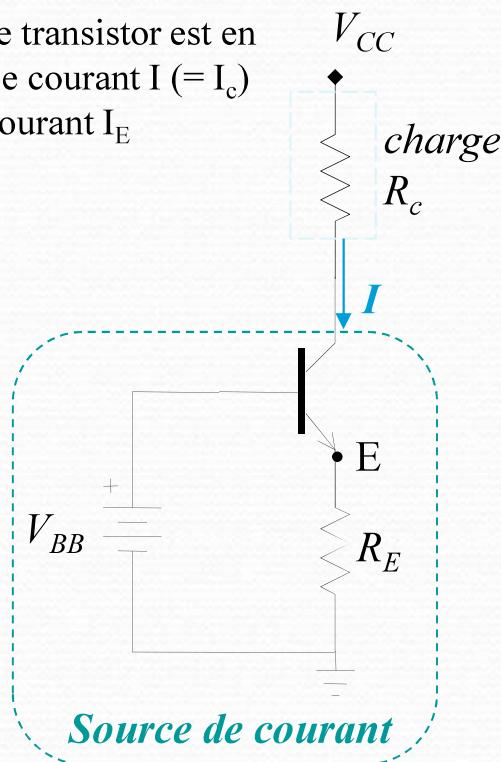
"Interrupteur
fermé"

$$I_{RC} = \frac{V_{CC} - 0.2}{R_C} \cong \frac{V_{CC}}{R_C}$$

Le courant dans la charge est dans ce cas proche de la valeur V_{CC}/R_C , c'est-à-dire le courant qui circulerait si le transistor était remplacé par un court-circuit (interrupteur fermé).

Transistor source de courant :

En effet, si le transistor est en mode actif, le courant $I (= I_c)$ est égal au courant I_E



Finalement, pour que ce circuit constitue une source de courant, il faut que le transistor soit en mode actif. Pour cela, la tension V_{CE} doit être supérieure à quelques 100 de mV

Par exemple:

$$\begin{aligned}
 & V_{CE} > 0.2 \\
 \Rightarrow & V_{CC} - (R_C + R_E)I > 0.2 \\
 \Rightarrow & V_{CC} > (V_{CC} - 0.2) / (R_C + R_E)I \\
 \Rightarrow & \frac{V_{CC}}{I} - R_E > R_C
 \end{aligned}$$

Le courant dans la charge (R_c) ne dépend pas (en première approximation) de la valeur de la charge.

$$\rightarrow I \approx \frac{V_{BB} - 0.7V}{R_E}$$

“quelque soit” R_c ...
tant que le transistor est en **mode actif**

Domaine de fonctionnement : $(V_{BB} > 0.7V)$

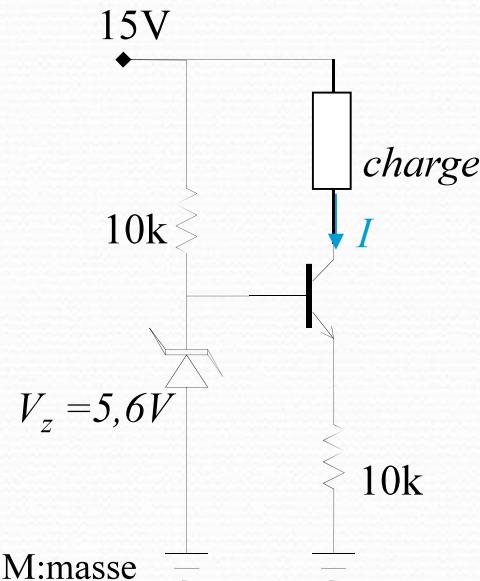
$$\approx 0 < V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C < V_{CC}$$

● $R_{c_{\max}} \cong \frac{V_{cc}}{I} - R_E$

pour R_c supérieure à $R_{c_{\max}}$ → *transistor saturé*

! $R_{c_{\min}} = 0$

Exercices : Calculer le courant dans la charge, la plage de tension



$$V_{BM} = V_Z$$

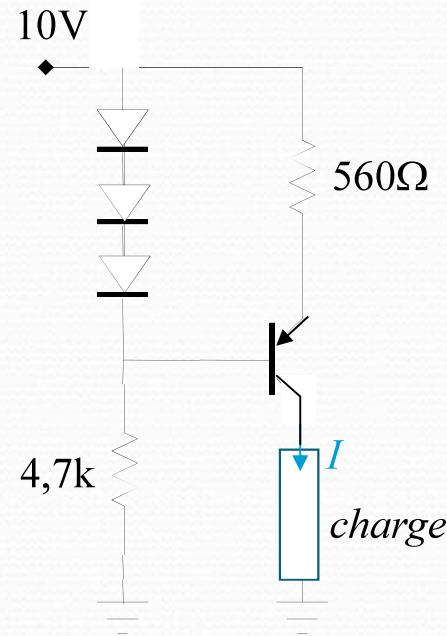
$$V_{EM} = V_{EB} + V_{BM} = V_Z - V_{BE}$$

$$V_{EM} \approx V_Z - 0,65V \text{ (transistor silicium)}$$

$$V_{EM} = R_E \cdot I_E$$

$$I_E = (V_Z - 0,65)/R_E$$

Mais $I_C = I_E + I_B \approx I_E$. La constance de I_E implique celle de I_C



On utilise 3 diodes en série pour polariser la base dont le potentiel est $10 - 3 \cdot 0.65V$

**Le courant qui circule dans la charge est donc constant
Et indépendant de la valeur de celle-ci.**

2.5 Circuits de polarisation du transistor

Notre transistor, pour fonctionner, a besoin d'être "polarisé". Cela signifie qu'on doit appliquer sur ses connections les tensions correctes et en amplitude et en polarité pour qu'il effectue la fonction qu'on lui demande.

- Le circuit de polarisation fixe le **point de repos** (ou point de fonctionnement statique) du transistor
- Le choix du point de repos dépend de **l'application** du circuit.
- Il doit être à l'intérieur du domaine de **fonctionnement** du transisr ($I_{C(B)} < I_{max}$, $V_{CE(BE)} < V_{max}$, ...)
- Les principales caractéristiques d'un circuit de polarisation sont :
 - sensibilité par rapport à la dispersion de fabrication du transistor (incertitude sur h_{FE} , ...)
 - stabilité thermique.
(coefficient de température des différents paramètres du transistor : V_{BE} , h_{FE} , ...).

■ Polarisation par diviseur de tension - « polarisation à courant (émetteur) constant »

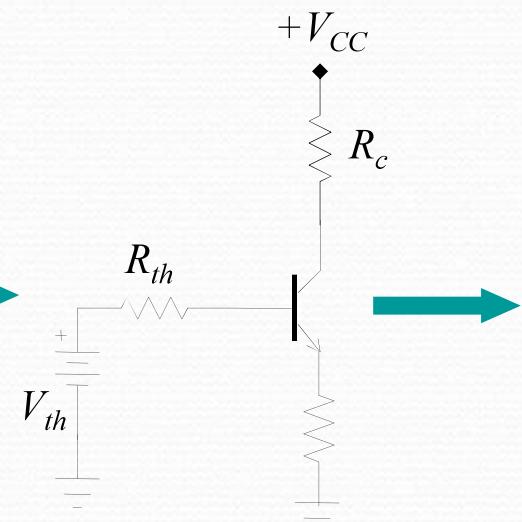
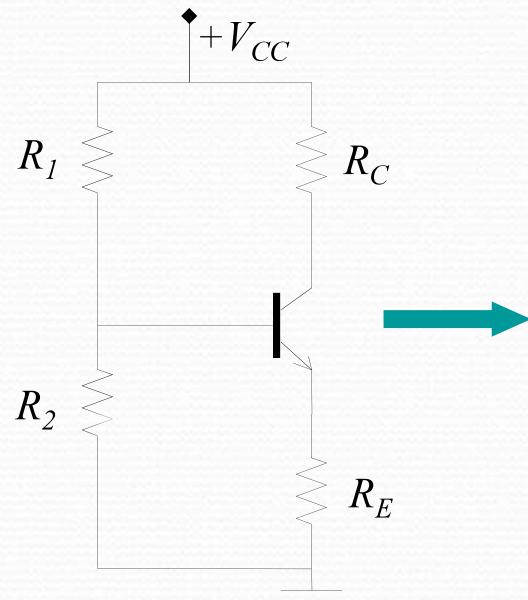
La tension polarisant la base est fournie par un pont diviseur formé par deux résistances.

Le principe du montage peut être résumé ainsi :

Si le **courant de base est très faible** devant le courant dans R_2 , la **tension de la base est fixée** par le pont diviseur R_1R_2 , c'est à dire $V_B \sim R_2 V_{CC} / (R_1 + R_2)$.

Quelque soit la valeur exacte de h_{FE} , la tension $V_E = V_B - 0.7V$. D'où le courant $I_E = V_E / R_E \sim I_C$.

Ce résultat n'est juste que si les valeurs de R_1 et R_2 sont choisies de manière à satisfaire la condition $I_B \ll I_{R2}$ et que la diode EB soit passante ($\Leftrightarrow V_{th}$ supérieure à 0.7V)



$$\left. \begin{aligned} I_C &\approx I_E \cong \frac{V_{th} - V_o}{R_E + R_{th}/h_{FE}} \quad (V_o \sim 0.7V) \\ V_{CE} &= V_{CC} - (R_C + R_E)I_C \\ \text{avec } V_{th} &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \quad \text{et} \\ R_{th} &= R_1 // R_2 \end{aligned} \right\}$$

Peu sensible à h_{FE} : si $\frac{R_{th}}{h_{FE}} \ll R_E \rightarrow I_C \approx \frac{V_{th} - V_o}{R_E}$

Bonne stabilité **thermique** de I_C à condition que $V_{th} \gg V_o \sim V_B \gg V_o$

$$\begin{aligned} V_{th} &= V_E + V_0 + R_{th} \frac{I_E}{h_{FE}} \\ &= V_E + V_0 = V_B \quad 70 \end{aligned}$$

$$I_B = \frac{I_E}{h_{FE}} = \frac{V_E}{R_E h_{FE}}$$

- $I_{R2} = V_B / R_2$
- $I_B = (V_B - V_o) / h_{fe} R_E$
 $\sim V_B / h_{FE} R_E \sim V_B / 10 R_2$
- $= I_{R2} / 10$

Règles « d'or » pour la conception du montage :

- $R_2 \sim 0.1 h_{FE} R_E \leftrightarrow I_{R2} \approx 10 I_B$
- $V_E \sim V_{CC}/3 \leftrightarrow$ permet de s'assurer que $V_B >> V_o$

$$V_B \sim V_{CC}/3 + V_o$$

(?) Diminuer R_{th} **augmente** le courant de polarisation I_{Rl}