



Cours 4 : Le transistor bipolaire (BJT) en régime statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

Le transistor bipolaire (Bipolar junction transistor : BJT)

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

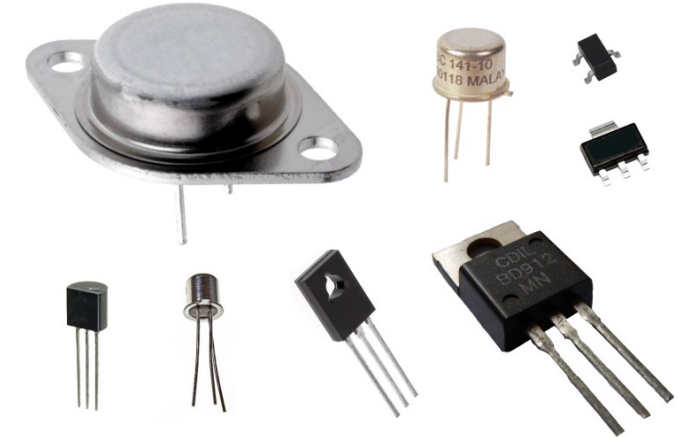
- A. Ebers-Moll
- B. Exemple



Premier transistor à pointes en 1947

Inventeurs : Bardeen, Brattain et Shockley
laboratoires Bell

Nobel de physique en 1956



Transistors de nos jours
(Technique de fabrication maîtrisée en 1951)

Quelques chiffres :

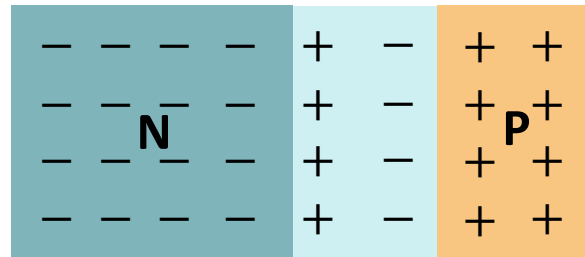
- **50 milliards de dollars** : somme dédiée par les Etats-Unis pour créer le premier transistor. Beaucoup de ses fonds furent injectés pour arriver à purifier le germanium.
- **10^{-5} €** : cout approximatif d'un transistor de nos jours.
- **1,5 cm** : taille approchée du premier transistor.
- **Quelques nanomètres**: taille approchée d'un transistor de nos jours.

1. Le transistor bipolaire
 - A. Historique
 - B. L'effet transistor
 - C. Modes de fonctionnement
 - D. Caractéristiques
 - E. Emetteur commun
2. Polarisation
 - A. Point de fonctionnement
 - B. Polarisation par la base
 - C. Polarisation par l'émetteur
 - D. Polarisation par diviseur de tension
 - E. Commutation
3. Modèle statique
 - A. Ebers-Moll
 - B. Exemple

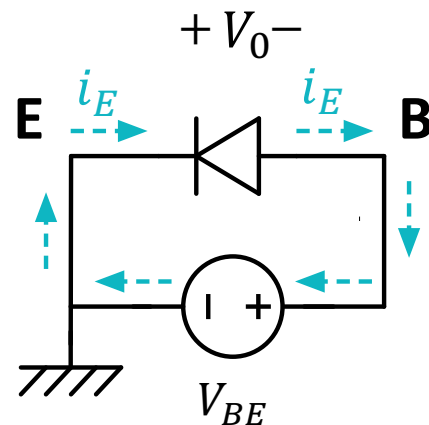
L'effet transistor (expliqué pour un NPN)

Un transistor est la juxtaposition de 2 jonctions PN tête bêche, qu'il soit bipolaire ou pas. Pour comprendre ce qu'il se passe, on va décomposer le raisonnement en regardant ce qu'il se passe à chaque jonction, chacune représentée par une diode.

1^{ère} jonction :



Rappel : Lors d'une jonction NP **non polarisée** une barrière de potentielle V_0 se crée spontanément au niveau de la jonction.



On polarise maintenant la jonction NP, c'est-à-dire : On branche un générateur aux bornes de la jonction NP. La tension V_{BE} (légèrement) supérieure à la barrière de potentielle V_0 la supprime et permet **la diffusion des porteurs de charges de N vers P**, c.a.d. de E vers B.

(Remarque : on retiendra ici comme sens du courant le sens de déplacement des électrons.)

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

2. Polarisation

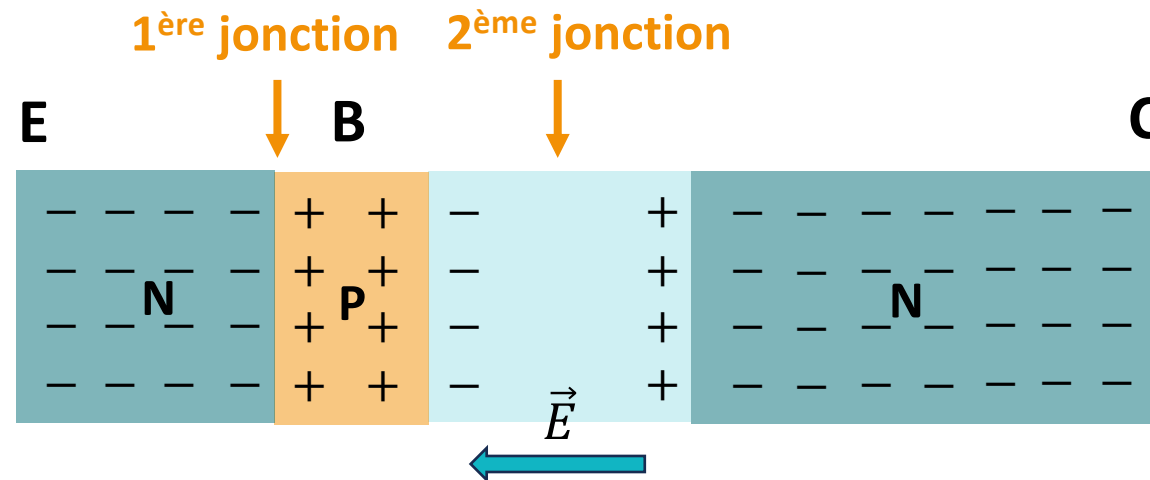
- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

Or ce n'est pas du tout ce que l'on observe!

Effectivement dans la première jonction, lors de la diffusion des électrons de E vers B, des électrons arrivent dans la zone P. Ce sont des porteurs minoritaires (d'un point de vue de la zone P) qui viennent se rajouter au peu d'électrons libres de la zone P.



Parallèlement, l'augmentation de la barrière de potentielle crée un champ électrique \vec{E} élevé (orienté vers les potentiels décroissants).

- Les électrons libres minoritaires de la zone P sont alors soumis à une forte force électrostatique $\vec{F} = -e \vec{E}$, opposée à \vec{E} , qui leur permet de franchir facilement la barrière de potentielle et d'arriver au point C \Rightarrow **Phénomène de dérive de B vers C**.

- En conclusion : Avec une tension faible (V_{BE} juste supérieure à V_S) on obtient un fort courant I_C . **C'est l'effet transistor**.

- E est donc appelé **Emetteur** (d'électrons), les électrons sont récupérés en C, appelé naturellement le **Collecteur** et B est une zone de transit appelée la **Base**.

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

2. Polarisation

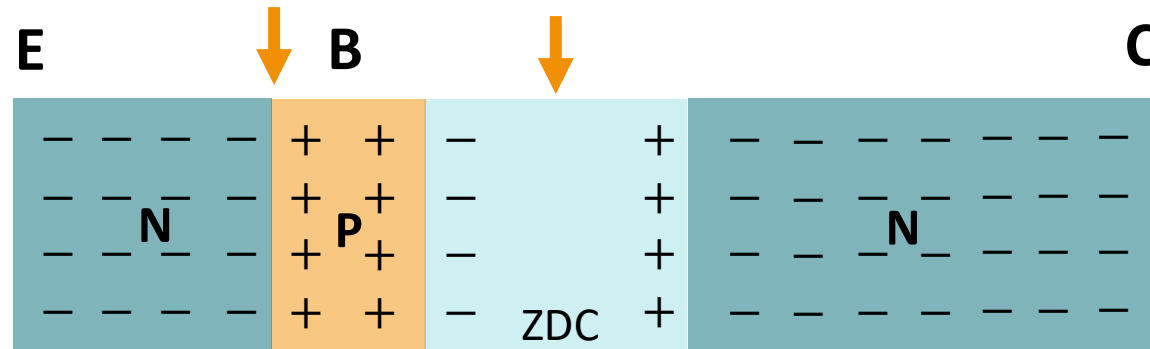
- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

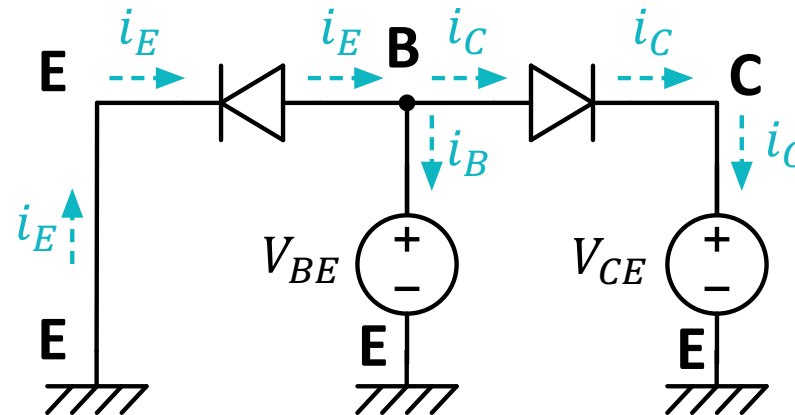
- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

1^{ère} jonction
polarisée en direct

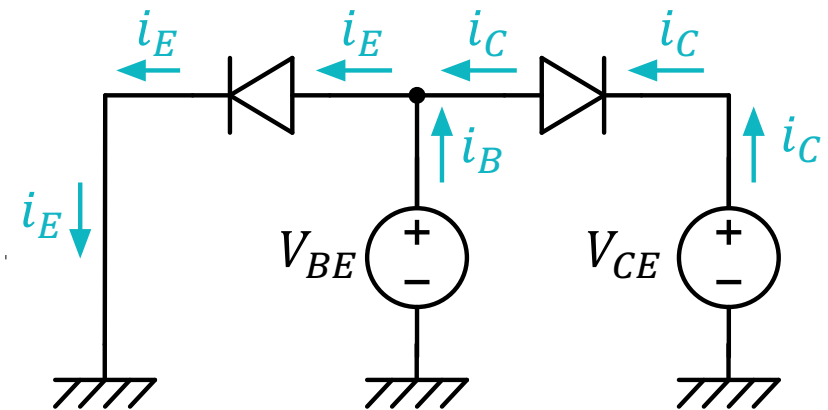
2^{ème} jonction
polarisée en inverse



Ce fonctionnement est d'autant plus efficace que le dopage N de la jonction EB est important et que la zone P est très fine (entre 50 et 100 μm). Presque tous les électrons minoritaires passent de B vers C.



Sens de déplacement des électrons



Sens conventionnel du courant

- Représentation très simplifiée du transistor : 2 diodes têtes bêtes, l'une polarisée en directe et l'autre en inverse.
- i_B est très faible devant i_E et i_C . Loi des nœuds : $i_E = i_B + i_C$ et $\frac{i_C}{i_B} = \beta \approx 100$

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

2. Polarisation

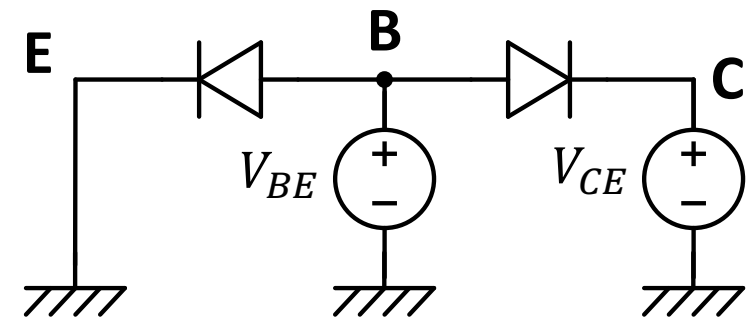
- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

Modes de fonctionnement

Déterminons quelles sont les conditions sur les tensions pour que le transistor **NPN** soit passant, bloqué ou saturé?



- **Transistor bloqué** si la tension V_{BE} aux bornes de la jonction BE n'arrive pas à compenser la barrière de potentiel V_0

Transistor bloqué si $V_{BE} < 0,7V$ pour une jonction au silicium

- **Transistor actif**, c.a.d en mode amplification si :

- jonction BE passante : $V_{BE} \geq 0,7V$ ($\Rightarrow V_{BE} = V_S = 0,7V$)
- jonction BC polarisée en inverse : $V_{CB} > 0$ (ce qui augmente la barrière de potentiel)

$$\text{De plus : } V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

$$\Rightarrow V_{CE} > V_{BE} \Rightarrow V_{CE} > 0,7V$$

- **Transistor saturé au max** si : jonction BE passante : $V_{BE} \geq 0,7V$ ($\Rightarrow V_{BE} = 0,7V$)
+ jonction BC passante : $V_{BC} = 0,7V \Rightarrow V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} = -0,7 + 0,7 = 0V$

Transistor commence à saturer si : jonction BE passante : $V_{BE} = 0,7V$

+ jonction BC polarisée en direct : $V_{BC} \geq 0 \Rightarrow V_{CB} \leq 0$

$$\Rightarrow V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} \leq 0,7V \rightarrow 0 \leq V_{CE} \leq 0,7V$$

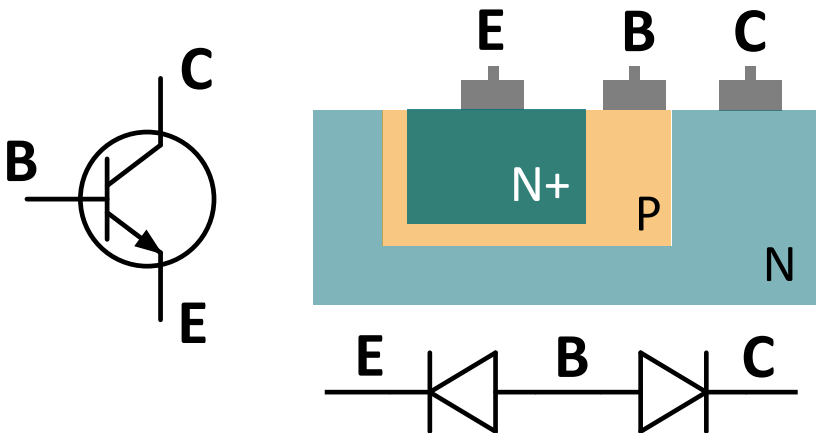
BJT en statique

- 1. Le transistor bipolaire
 - A. Historique
 - B. L'effet transistor
 - C. Modes de fonctionnement
 - D. Caractéristiques
 - E. Emetteur commun

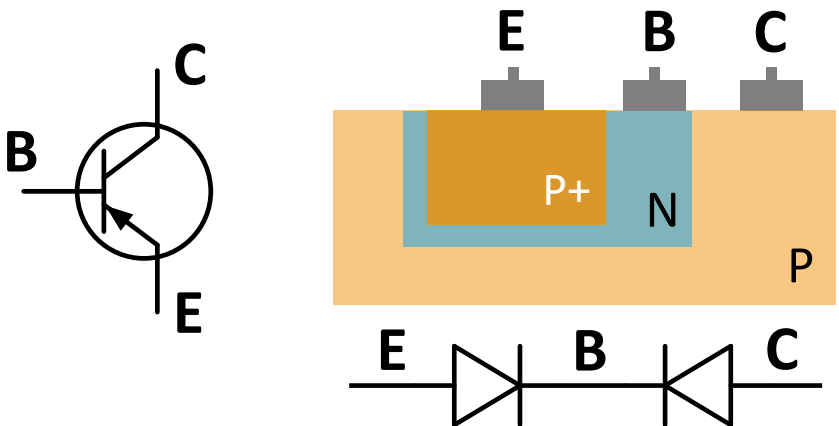
- 2. Polarisation
 - A. Point de fonctionnement
 - B. Polarisation par la base
 - C. Polarisation par l'émetteur
 - D. Polarisation par diviseur de tension
 - E. Commutation

- 3. Modèle statique
 - A. Ebers-Moll
 - B. Exemple

Transistor NPN



Transistor PNP



Pour polariser le transistor il faut l'alimenter par 2 sources extérieures.
Les deux jonctions ainsi polarisées donnent lieu à 3 modes de fonctionnement :

jonction BE	jonction BC	Mode de fonctionnement
polarisation directe	polarisation inverse	amplification
polarisation directe	polarisation directe	Saturation (« ON »)
polarisation inverse		Bloqué (« OFF »)

jonction BE	jonction BC	Mode de fonctionnement
polarisation inverse	polarisation directe	amplification
polarisation directe	polarisation directe	Saturation (« ON »)
polarisation inverse		Bloqué (« OFF »)

Transistor bloqué :
 $V_{BE} < 0,7V$

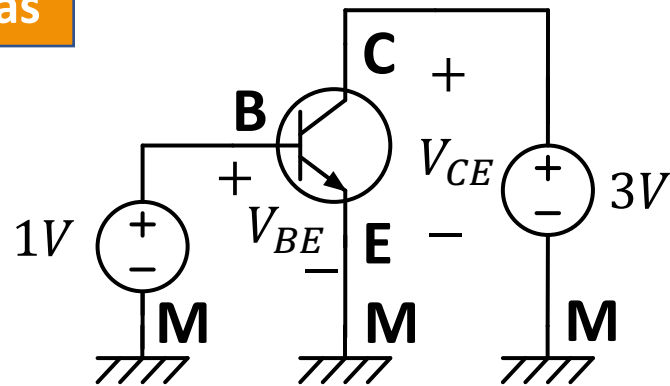
Transistor amplification :
 $V_{BE} = 0,7V$ et $V_{BC} < 0V$

Transistor saturé : $V_{BE} = 0,7V$
et début de sat si $V_{BC} \geq 0$
ou max de sat si $V_{BC} \geq 0,7V \Rightarrow V_{BC} = 0,7V$

EXERCICE : Déterminer les modes de fonctionnement des transistors dans les 3 cas suivants:

Pour faciliter le raisonnement pédagogique, les résistances (nécessaires) ne sont pas mises.

1^{er} cas



- Le transistor est-il bloqué ou passant? Pour cela il faut déjà vérifier si la jonction BE est passante et donc déterminer la valeur de V_{BE} :

Le schéma donne directement : $V_{BE} = 1V$

$$\Rightarrow V_{BE} > 0,7V$$

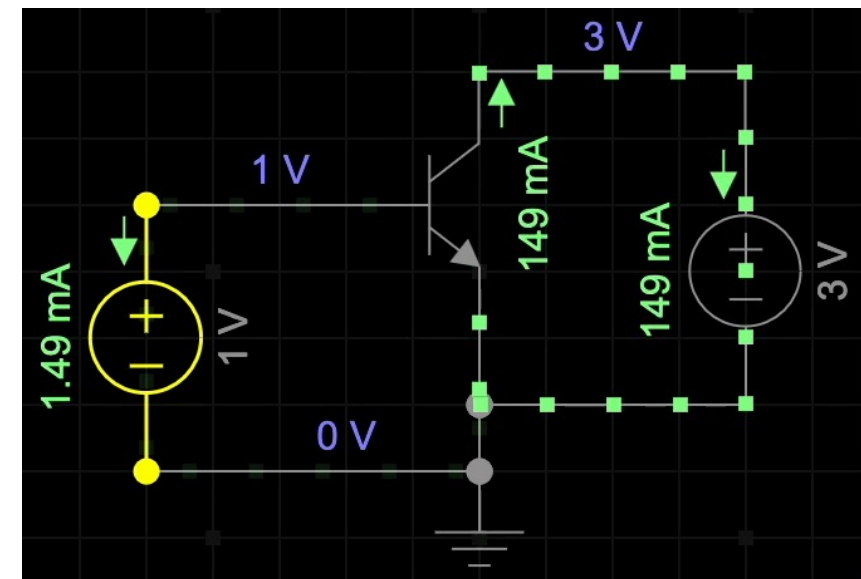
\Rightarrow **jonction BE passante**

- Maintenant que nous savons que la jonction BE est passante il faut déterminer si le transistor amplifie ou sature. Il faut déterminer V_{BC} :

$$V_{BC} = V_{BM} + V_{MC} = 1 - 3 = -2V:$$

$$\Rightarrow V_{BC} < 0V \Rightarrow \text{transistor NON saturé}$$

- Conclusion : le transistor est actif et fonctionne en mode amplification**

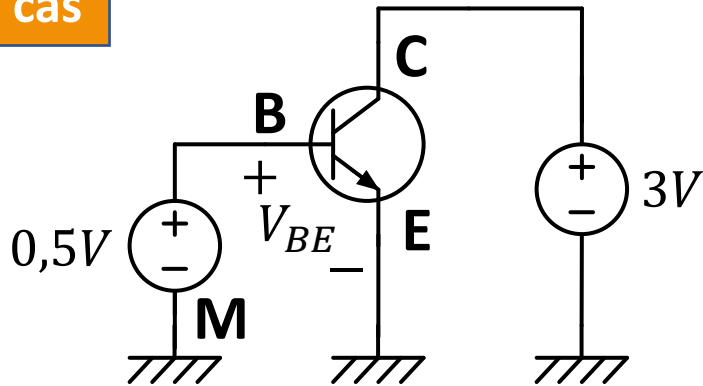


Transistor bloqué :
 $V_{BE} < 0,7V$

Transistor amplification :
 $V_{BE} = 0,7V + V_{BC} < 0V$

Transistor saturé : $V_{BE} = 0,7V$
+ début de sat si $V_{BC} \geq 0$
+ max de sat si $V_{BC} \geq 0,7V \Rightarrow V_{BC} = 0,7V$

2ème cas

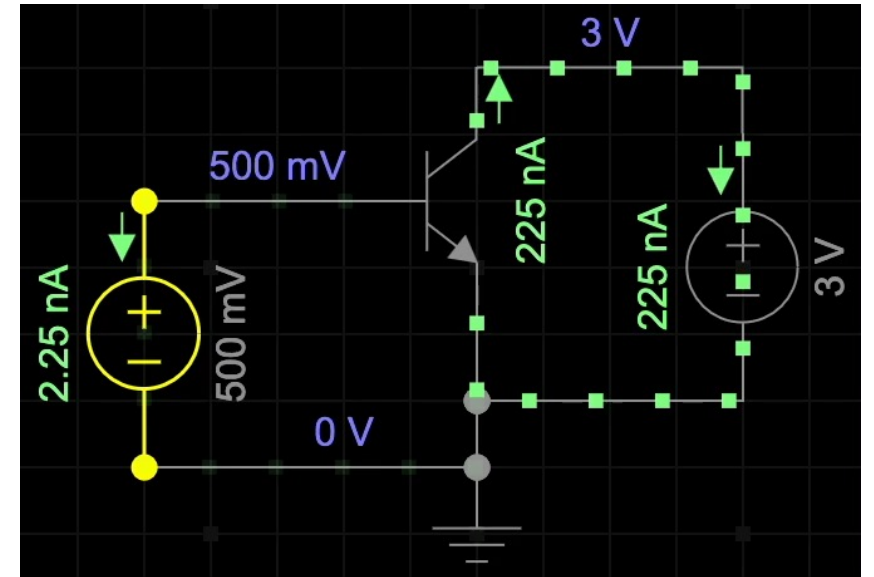


Le transistor est-il bloqué ou passant? Pour cela il faut déterminer la valeur de V_{BE} :

Le schéma donne directement :

$$V_{BE} = V_{BM} = 0,5V$$

$\Rightarrow V_{BE} < 0,7V \Rightarrow$ jonction BE bloquée \Rightarrow **transistor bloqué**



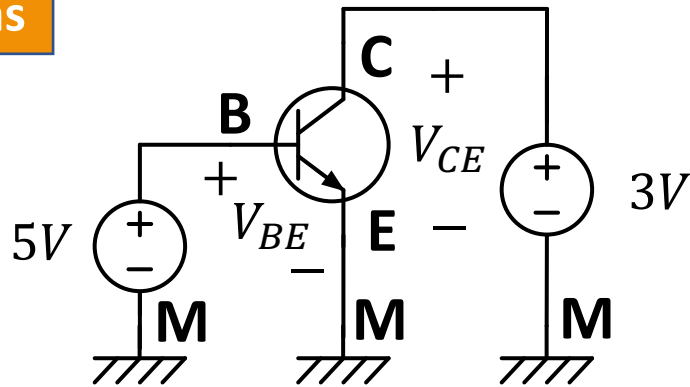
I_B en nA montre que le transistor est bloqué

Transistor bloqué :
 $V_{BE} < 0,7V$

Transistor amplification :
 $V_{BE} = 0,7V + V_{BC} < 0V$

Transistor saturé : $V_{BE} = 0,7V$
+ début de sat si $V_{BC} \geq 0$
+ max de sat si $V_{BC} \geq 0,7V \Rightarrow V_{BC} = 0,7V$

3^{ème} cas



Le transistor est-il bloqué ou passant? Pour cela il faut déterminer la valeur de V_{BE} :

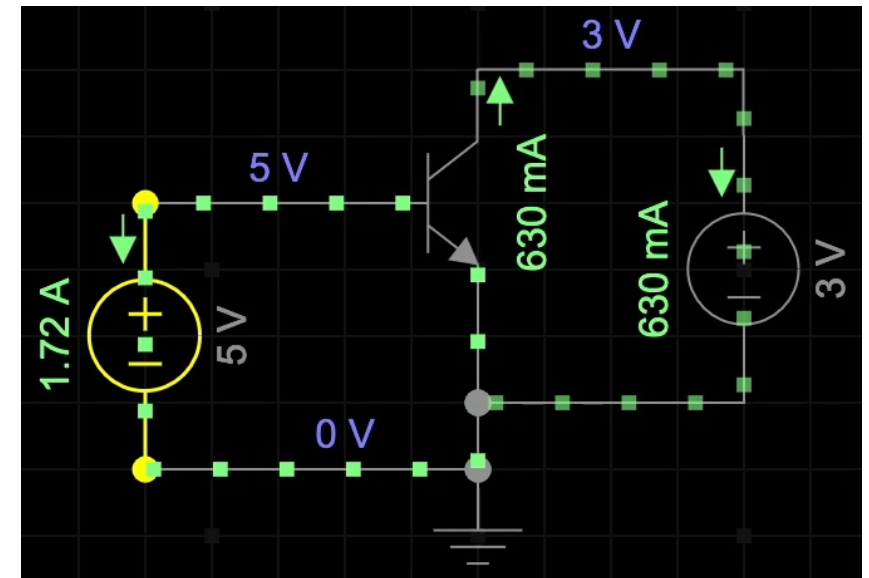
Le schéma donne directement $V_{BE} = 5V$
 $\Rightarrow V_{BE} > 0,7V \Rightarrow$ **jonction BE passante**

- Maintenant que nous savons que la jonction BE est passante il faut déterminer si le transistor amplifie ou sature. Il faut déterminer V_{BC} :

$$V_{BC} = V_{BM} + V_{MC} = 5 - 3 = 2V:$$

$\Rightarrow V_{BC} > 0,7V \Rightarrow$ **transistor saturé** (au maximum)

- Conclusion : le transistor est saturé**



Caractéristiques du transistor : ex 2N3904

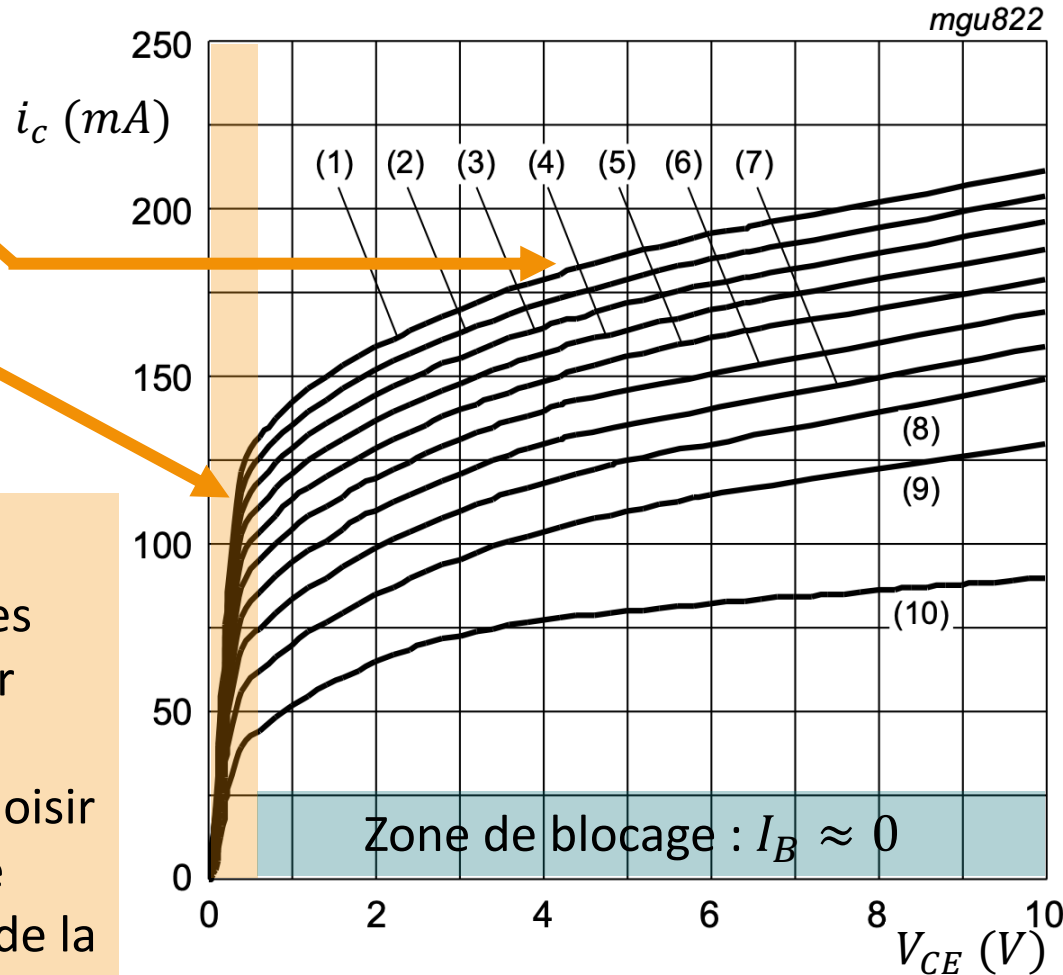
(Source : Nexperia)

Zone de
Fonctionnement
linéaire

Zone de
saturation

Important :

Comme les courbes sont données pour $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$, il faudra toujours choisir cette température pour les données de la datasheet.



Courant collecteur i_c en fonction de la tension collecteur-émetteur V_{CE}

Le transistor de référence 2N3904 est un transistor **basse fréquence** fréquemment utilisé.

$T_{amb} = 25^\circ\text{C}$

- (1) $I_B = 5.0\text{ mA}$
- (2) $I_B = 4.5\text{ mA}$
- (3) $I_B = 4.0\text{ mA}$
- (4) $I_B = 3.5\text{ mA}$
- (5) $I_B = 3.0\text{ mA}$
- (6) $I_B = 2.5\text{ mA}$
- (7) $I_B = 2.0\text{ mA}$
- (8) $I_B = 1.5\text{ mA}$
- (9) $I_B = 1.0\text{ mA}$
- (10) $I_B = 0.5\text{ mA}$

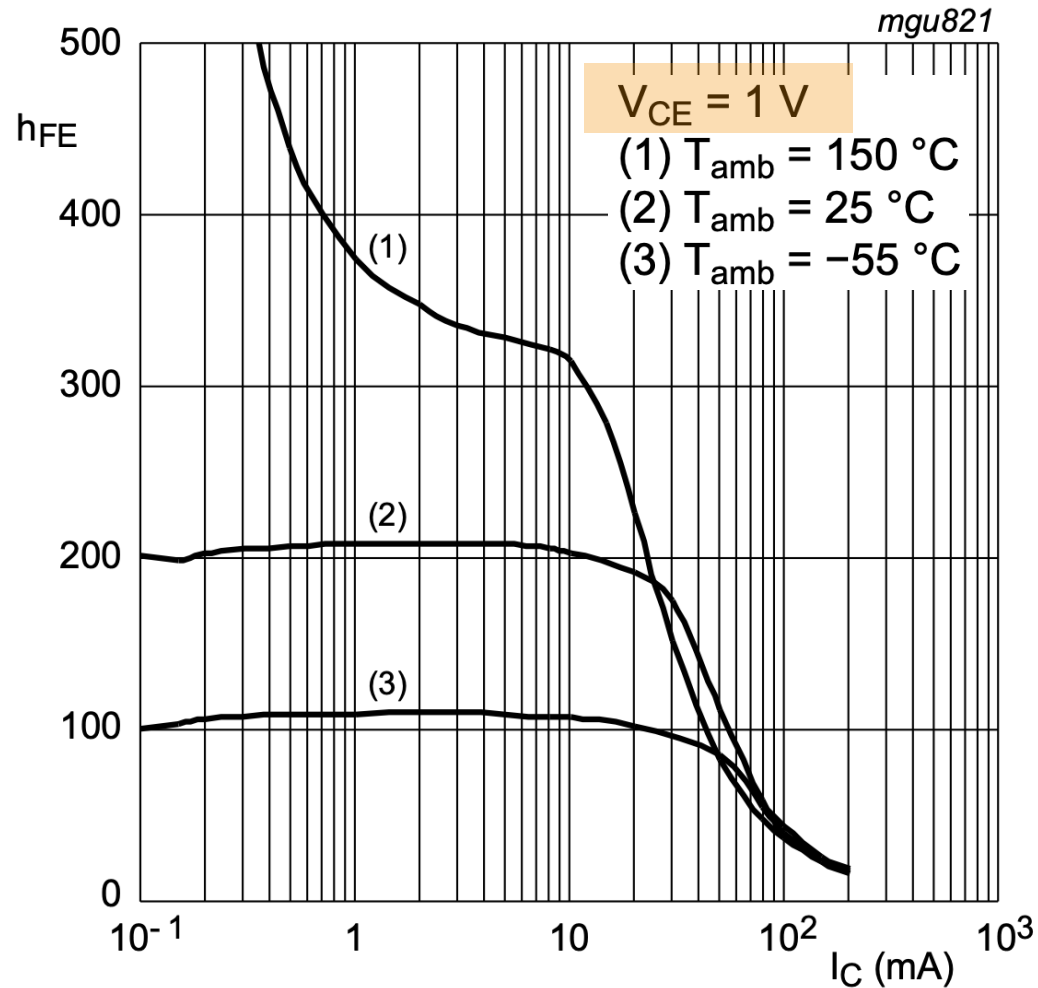
1. Le transistor bipolaire
 - A. Historique
 - B. L'effet transistor
 - C. Modes de fonctionnement
 - D. Caractéristiques
 - E. Emetteur commun

2. Polarisation
 - A. Point de fonctionnement
 - B. Polarisation par la base
 - C. Polarisation par l'émetteur
 - D. Polarisation par diviseur de tension
 - E. Commutation

3. Modèle statique
 - A. Ebers-Moll
 - B. Exemple

Caractéristiques du transistor : ex 2N3904

(Source : Nexperia)



Gain en courant h_{FE} en
fonction du courant collecteur I_C

- Le gain en courant continu β s'appelle aussi h_{FE} . Il dépend de la température, si celle-ci augmente, β augmente aussi.
- A température ambiante, $\beta \approx 200$ (pour ce transistor)
- Autres expressions du gain :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \approx 200 \quad \alpha = \frac{I_C}{I_E} \approx 1$$

$$\gamma = \frac{I_E}{I_B} \quad \gamma = \beta + 1 = \frac{1}{1 - \alpha}$$

- Le transistor bipolaire
 - Historique
 - L'effet transistor
 - Modes de fonctionnement
 - Caractéristiques
 - Emetteur commun

- Polarisation
 - Point de fonctionnement
 - Polarisation par la base
 - Polarisation par l'émetteur
 - Polarisation par diviseur de tension
 - Commutation

- Modèle statique
 - Ebers-Moll
 - Exemple

Caractéristiques du transistor : ex 2N3904

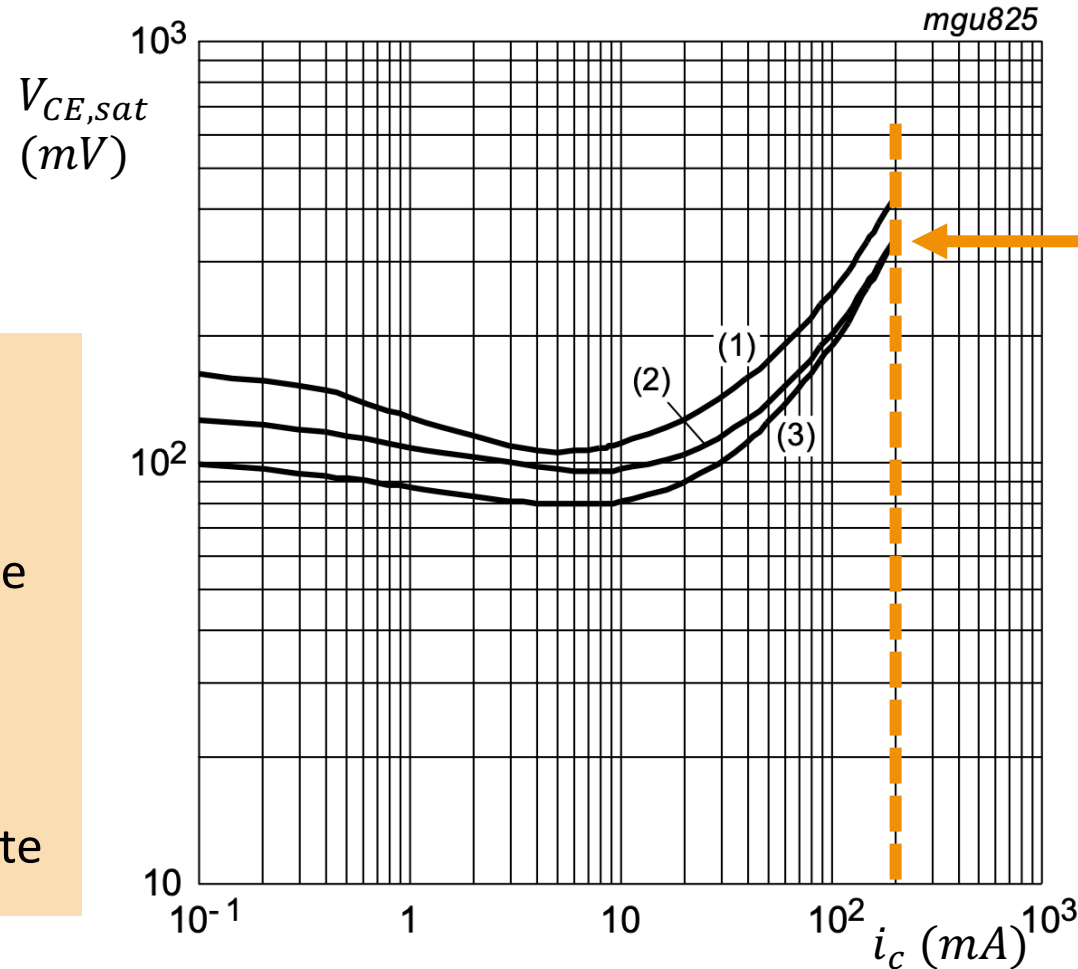
(Source : Nexperia)

1. Le transistor bipolaire
 - A. Historique
 - B. L'effet transistor
 - C. Modes de fonctionnement
 - D. Caractéristiques**
 - E. Emetteur commun

2. Polarisation
 - A. Point de fonctionnement
 - B. Polarisation par la base
 - C. Polarisation par l'émetteur
 - D. Polarisation par diviseur de tension
 - E. Commutation

3. Modèle statique
 - A. Ebers-Moll
 - B. Exemple

Important :
Ici, nous regardons la valeur $V_{CE,sat}$ de saturation du transistor, il est normal que le gain $\beta = \frac{i_C}{i_b}$ chute



Les courbes s'arrêtent ici indiquant que la valeur maximale supportée par le 2N3904 est 200mA.

$$I_C/I_B = 10$$

(1) $T_{amb} = 150^\circ\text{C}$

(2) $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$

(3) $T_{amb} = -55^\circ\text{C}$

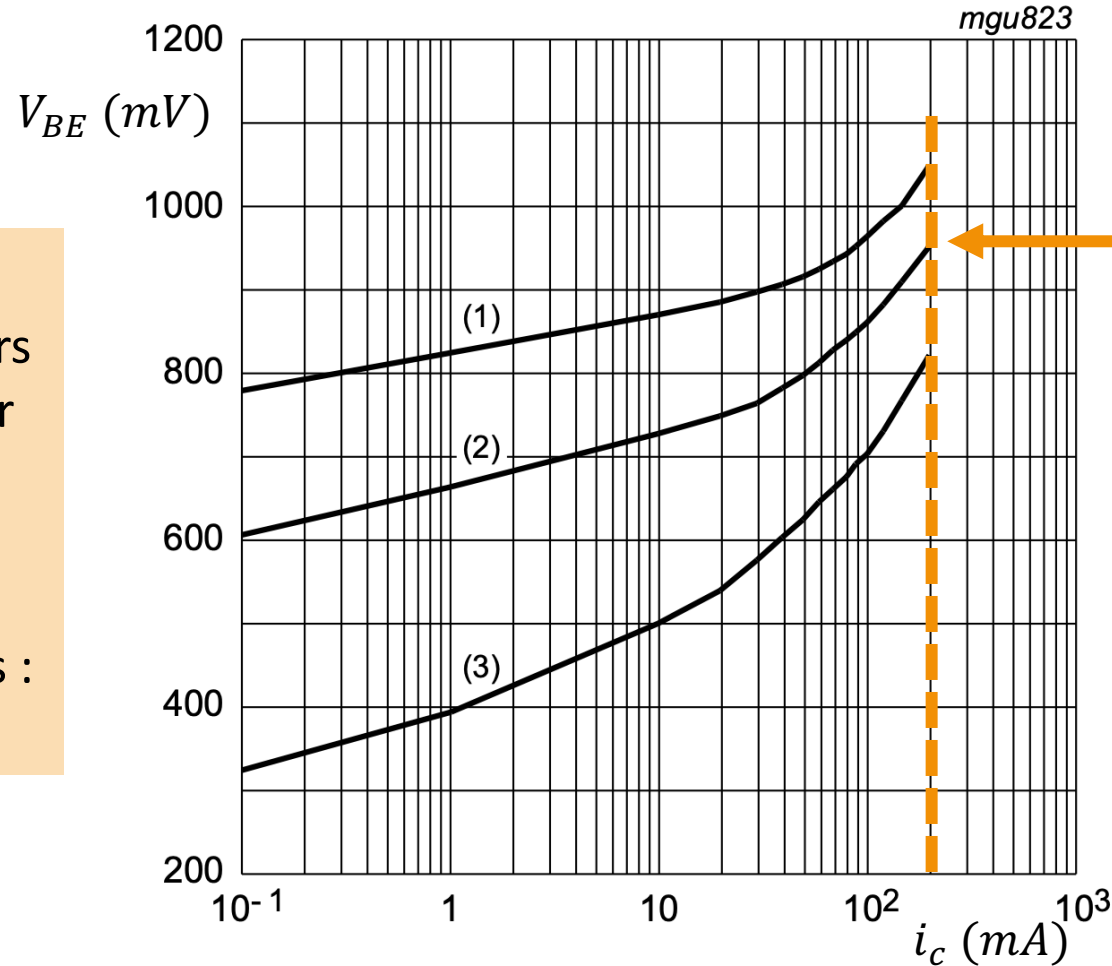
Tension collecteur-émetteur de saturation
 $V_{CE,sat}$ en fonction du courant collecteur i_C

Caractéristiques du transistor : ex 2N3904

(Source : Nexperia)

1. Le transistor bipolaire
 - A. Historique
 - B. L'effet transistor
 - C. Modes de fonctionnement
 - D. Caractéristiques
 - E. Emetteur commun
2. Polarisation
 - A. Point de fonctionnement
 - B. Polarisation par la base
 - C. Polarisation par l'émetteur
 - D. Polarisation par diviseur de tension
 - E. Commutation
3. Modèle statique
 - A. Ebers-Moll
 - B. Exemple

Important :
Il faut toujours regarder pour quelle valeur de la tension les courbes sont données : Ici $V_{CE} = 1V$



De nouveau, les courbes s'arrêtent ici indiquant que la valeur maximale supportée par le 2N3904 est 200mA.

$V_{CE} = 1V$

- (1) $T_{amb} = -55^\circ C$
- (2) $T_{amb} = 25^\circ C$
- (3) $T_{amb} = 150^\circ C$

Tension base-émetteur V_{BE} en fonction du courant collecteur i_C

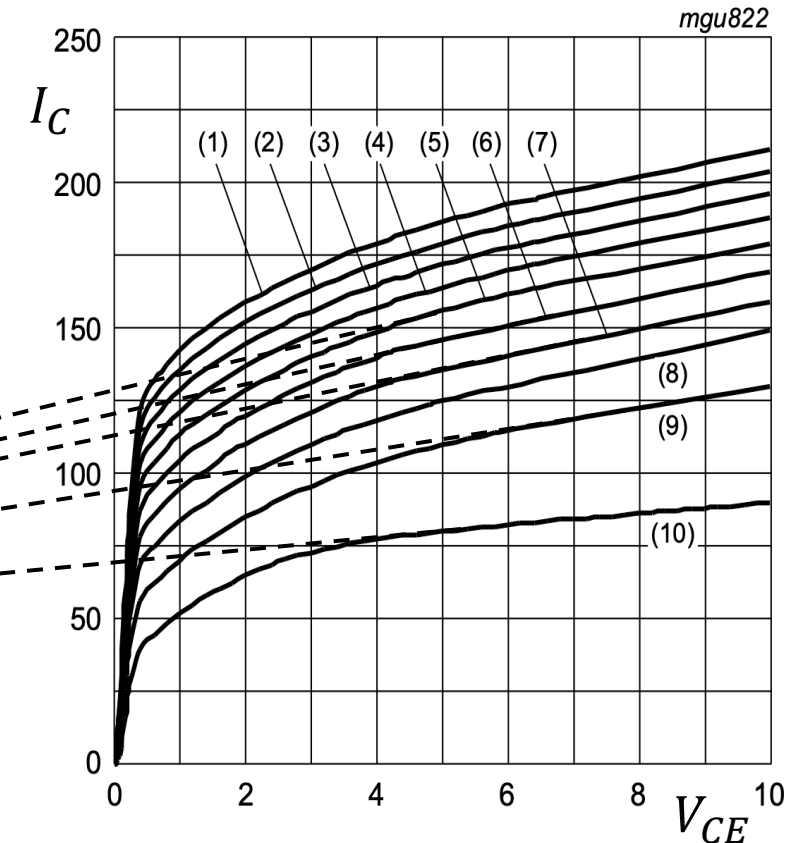
Caractéristiques du transistor : ex 2N3904

(Source : Nexperia)

Complément : Effet Early

- La légère pente dans la caractéristique dans la zone active traduit une résistance due à la diminution de la zone de déplétion effective dans la base, par effet Early.

Tension
Early V_A



- Les droites se coupent en un point situé sur la partie négative de l'axe des abscisses. La tension associée est la tension d'Early, notée V_A .
- L'effet Early peut ainsi être modélisé par une résistance parallèle entre le collecteur et l'émetteur traduisant un courant de fuite.

- Le transistor bipolaire
 - Historique
 - L'effet transistor
 - Modes de fonctionnement
 - Caractéristiques
 - Emetteur commun
- Polarisation
 - Point de fonctionnement
 - Polarisation par la base
 - Polarisation par l'émetteur
 - Polarisation par diviseur de tension
 - Commutation

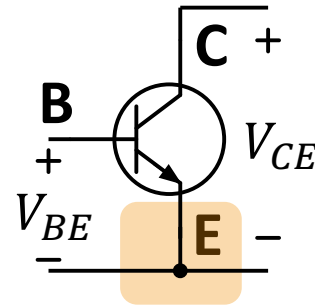
- Modèle statique
 - Ebers-Moll
 - Exemple

1. **Le transistor bipolaire**
 - A. Historique
 - B. L'effet transistor
 - C. Modes de fonctionnement
 - D. Caractéristiques
 - E. **Emetteur commun**
2. **Polarisation**
 - A. Point de fonctionnement
 - B. Polarisation par la base
 - C. Polarisation par l'émetteur
 - D. Polarisation par diviseur de tension
 - E. Commutation
3. **Modèle statique**
 - A. Ebers-Moll
 - B. Exemple

Montages à base de transistors

Il existe 3 grands types de montage en fonction de l'usage que l'on souhaite faire du transistor : Mais nous nous intéresserons uniquement au montage le plus utilisé :
Emetteur commun

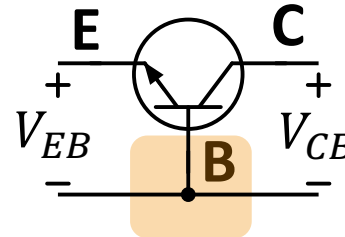
► montage **émetteur commun**



L'**émetteur** est **commun**
aux tensions d'entrée et de sortie

Usage type :
Amplification en courant

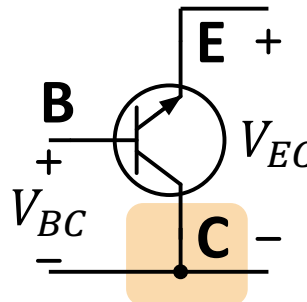
► montage **base commune**



La **base** est **commune**
aux tensions d'entrée et de sortie

Usage type :
Amplification en tension

► montage **collecteur commun**

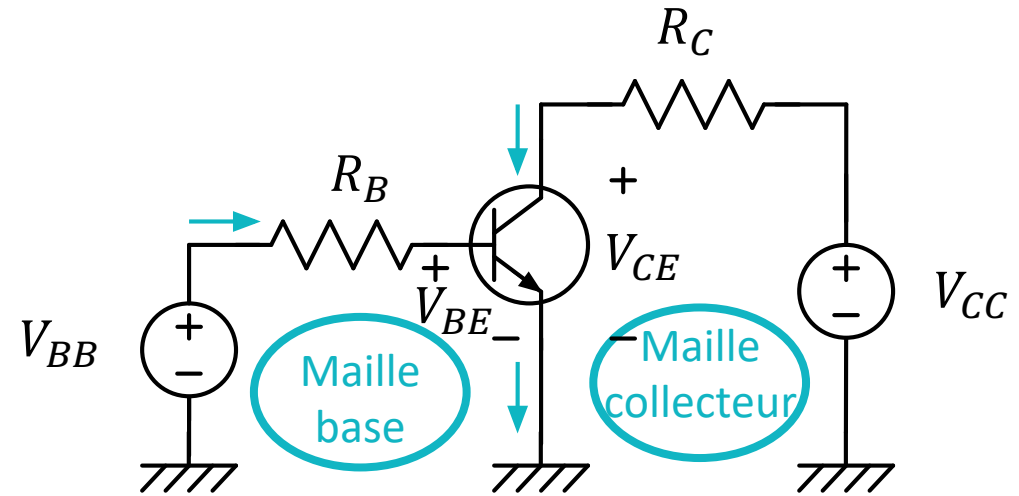


Le **collecteur** est **commun**
aux tensions d'entrée et de sortie

Usage type :
Amplification de puissance

BJT en statique

Principe du montage Emetteur commun



- L'émetteur est relié à la masse et la borne négative de chaque alimentation est commune à l'émetteur.
- Le circuit a **deux mailles**, la maille base et la maille collecteur.
- Dans la maille base, la source V_{BB} polarise la jonction base-émetteur en direct à travers R_B qui permet aussi de limiter le courant. En changeant V_{BB} ou R_B , on change le courant base i_B , donc on change le courant collecteur i_C , car $i_C = \beta i_B$, en d'autres termes **le courant de base commande le courant émetteur**.
- Dans la maille du collecteur, la source V_{CC} polarise la jonction collecteur-base en inverse à travers R_C , c'est nécessaire sinon le transistor ne va pas fonctionner normalement, c'est-à-dire amplifier. Le collecteur doit toujours être positif pour collecter la plus grande partie des électrons dans la base.

1. Le transistor bipolaire
A. Historique
B. L'effet transistor
C. Modes de fonctionnement
D. Caractéristiques
E. Emetteur commun
2. Polarisation
A. Point de fonctionnement
B. Polarisation par la base
C. Polarisation par l'émetteur
D. Polarisation par diviseur de tension
E. Commutation
3. Modèle statique
A. Ebers-Moll
B. Exemple

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. **Emetteur commun**

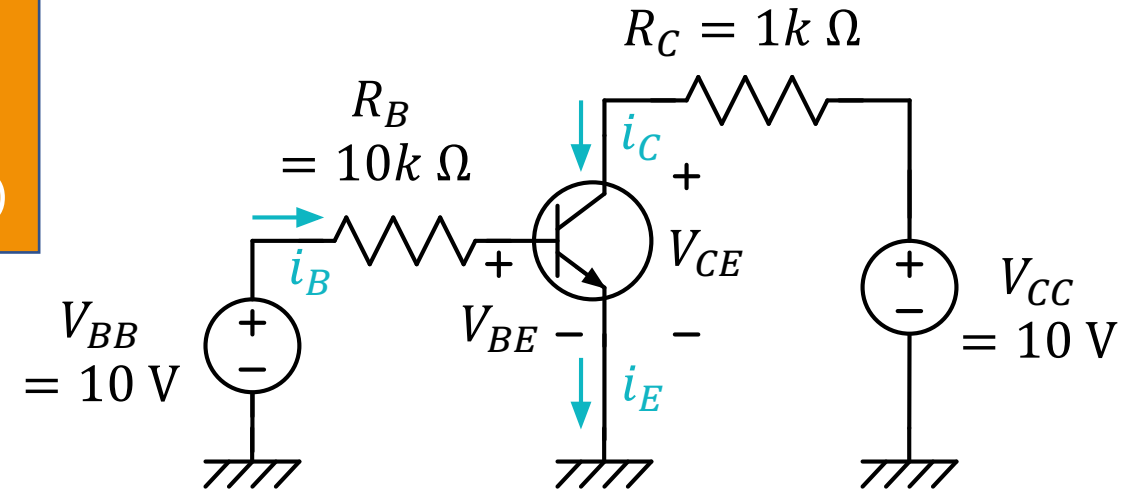
2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

EXERCICE : Exploitation des caractéristiques du transistor 2N3904 : Déterminer i_B , i_C et V_{CE} dans le cas suivant : ($\beta = 200$ à 25°C , $V_{BE} = 0,7\text{V}$)



- Calcul de i_B :

$$i_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{10 - 0,7}{10^4}$$

$$i_B = 9,3 \times 10^{-4} \text{ A} = \mathbf{930 \mu\text{A}}$$

- Calcul de i_C : $i_C = \beta i_B = 200 \times 9,3 \times 10^{-4} = 1,86 \times 10^{-2} \text{ A} = 186 \text{ mA}$
- Calcul de $i_{C,sat}$, obtenue pour $V_{CE} = 0$ en approximation grossière :

$$i_{C,sat} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{10}{(1 \times 10^3)} = 1 \times 10^{-2} \text{ A} = 10 \text{ mA}$$

i_C ne peut pas être supérieur à $i_{C,sat}$ donc $i_C = i_{C,sat} = 10 \text{ mA}$ et **le transistor sature**.

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. **Emetteur commun**

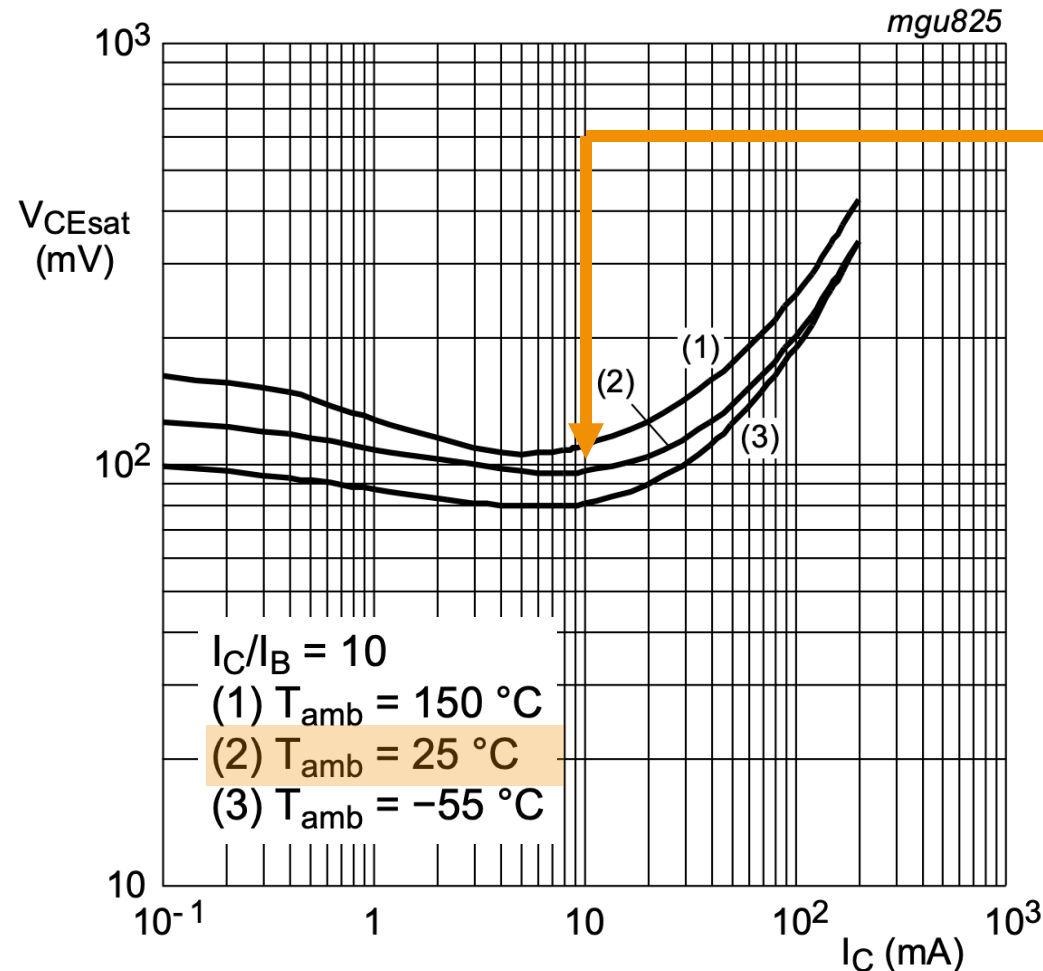
2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

- Comme le transistor sature, utilisons la caractéristique $V_{CE,sat}$ en fonction du courant collecteur i_C pour déterminer $V_{CE,sat}$



Tension collecteur-émetteur de saturation
 $V_{CE,sat}$ en fonction du courant collecteur i_C

Pour $i_C \approx 10\text{ mA}$, on lit
 $V_{CE,sat} = 95\text{ mV}$, à 25 °C

Il reste alors à peaufiner la
valeur de i_C calculer
précédemment :

$$i_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$

$$i_C = \frac{10 - 0,095}{1 \times 10^3} = \mathbf{9,91\text{ mA}}$$

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. **Emetteur commun**

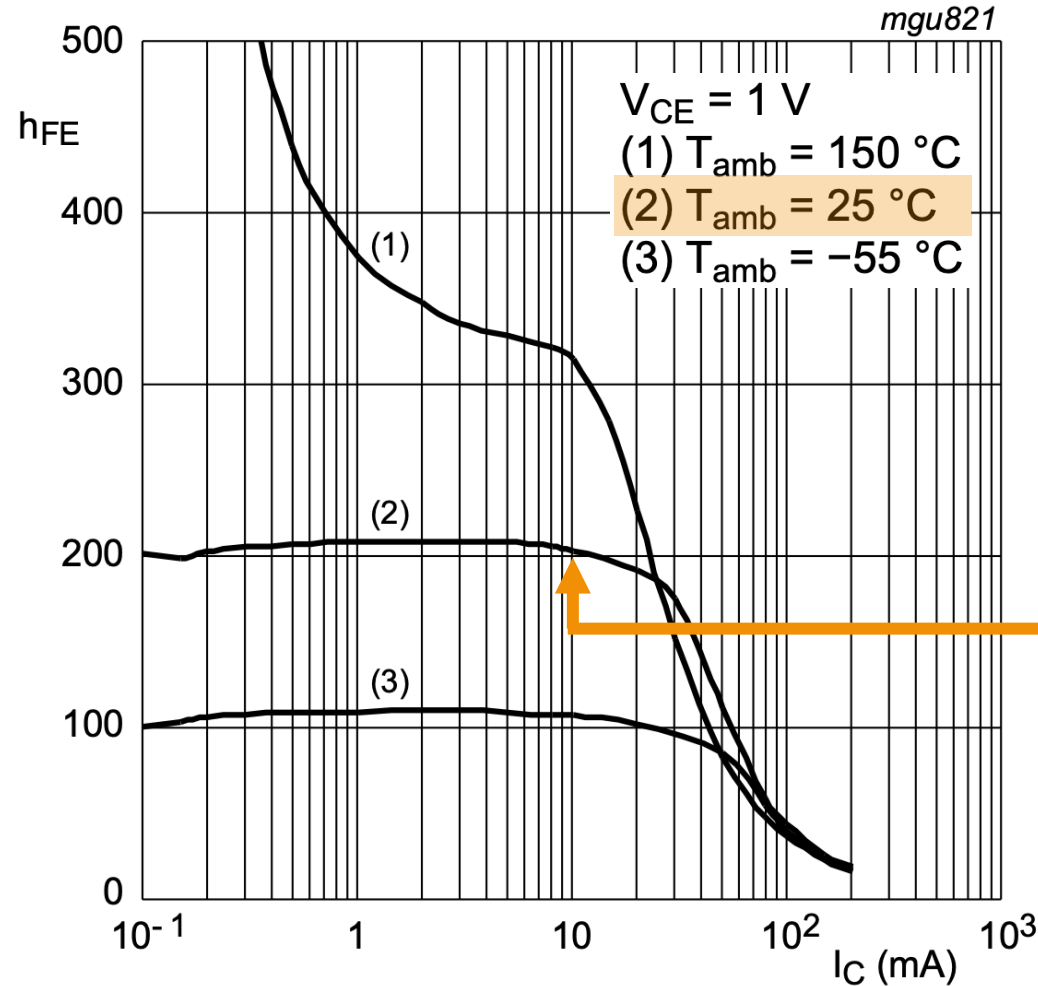
2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

Est-ce que l'hypothèse de $\beta = 200$ était judicieuse dans l'énoncé?



Gain en courant h_{FE} en fonction du courant collecteur i_C

Nous venons de trouver $i_C = 9,91\text{ mA}$, utilisons la courbe h_{FE} en fonction du courant collecteur i_C pour déterminer h_{FE} (qui rappelons-le est une autre appellation de β)

On lit $\beta \approx 200$, donc l'hypothèse de l'énoncé était correcte.

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. **Emetteur commun**

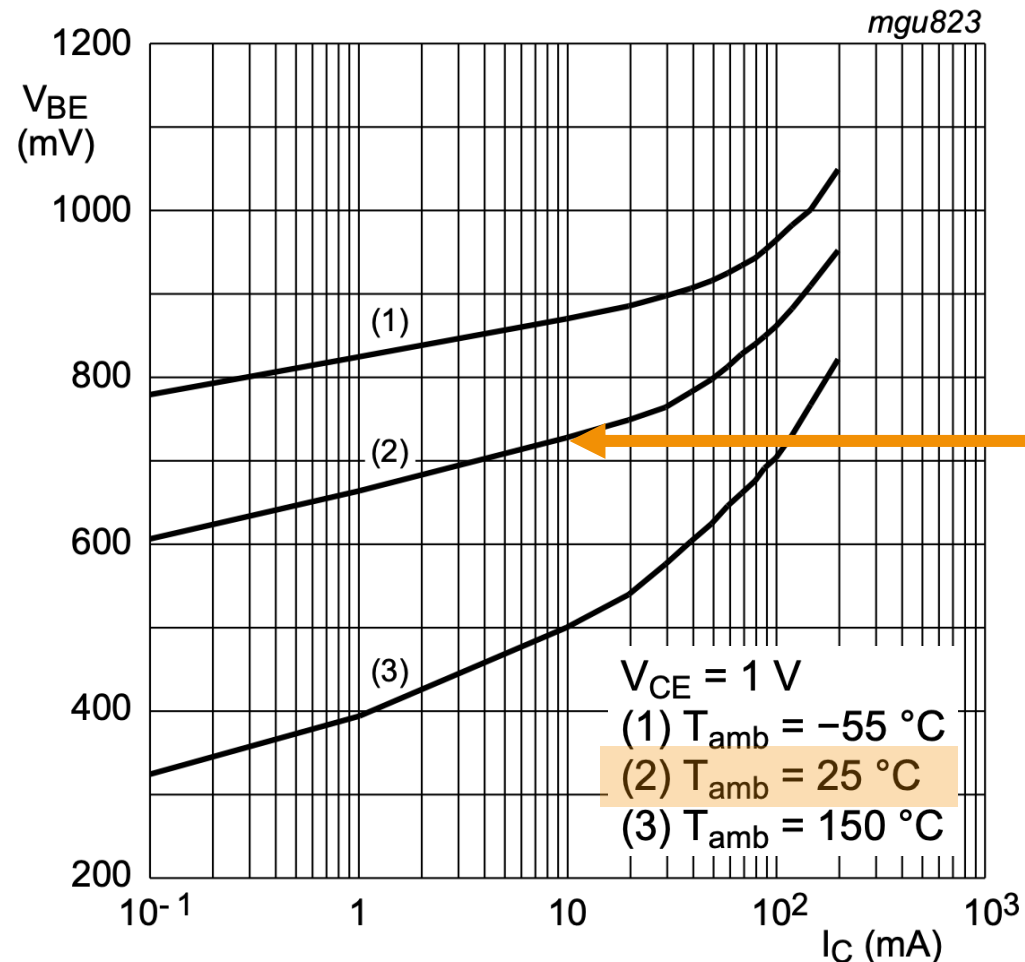
2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

Est-ce que l'hypothèse de $V_{BE} = 0,7V$ était judicieuse dans l'énoncé?



Tension base-émetteur V_{BE} en
fonction du courant collecteur I_C

- Nous avons trouvé $i_c = 9,91mA$, utilisons la courbe V_{BE} en fonction du courant collecteur I_C pour déterminer V_{BE}

- On lit, pour $T = 25^\circ C$,
 $V_{BE} = 730mV = 0,73V$

- Cela nous permet de recalculer plus finement i_B :

$$i_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{10 - 0,73}{10^4}$$

$$\mathbf{i_B = 9,27 \times 10^{-4} A = 927 \mu A}$$

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

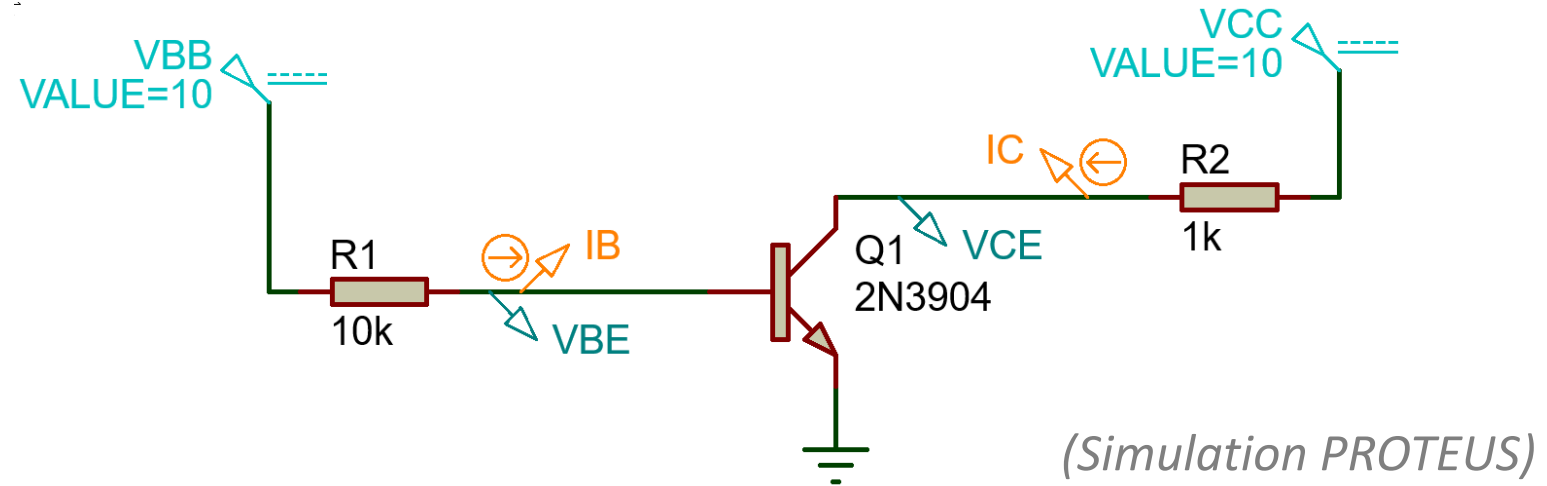
2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

Comparons nos résultats trouvés avec ceux donnés par la simulation PROTEUS pour le transistor 2N3904 de Fairchild (*modifié 2015*)



PROTEUS:

$$i_B = 926\mu A$$

$$i_C = 9,91mA$$

$$V_{BE} = 0,74V$$

$$V_{CE} = 89mV$$

Nos résultats :

$$i_B = 927\mu A \quad (\text{par calcul})$$

$$i_C = 9,91mA \quad (\text{par calcul})$$

$$V_{BE} = 0,73V \quad (\text{lecture graphique})$$

$$V_{CE} = 95mV \quad (\text{lecture graphique})$$

La simulation confirme la précision de nos calculs !

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

Polarisation du transistor

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

2. Polarisation

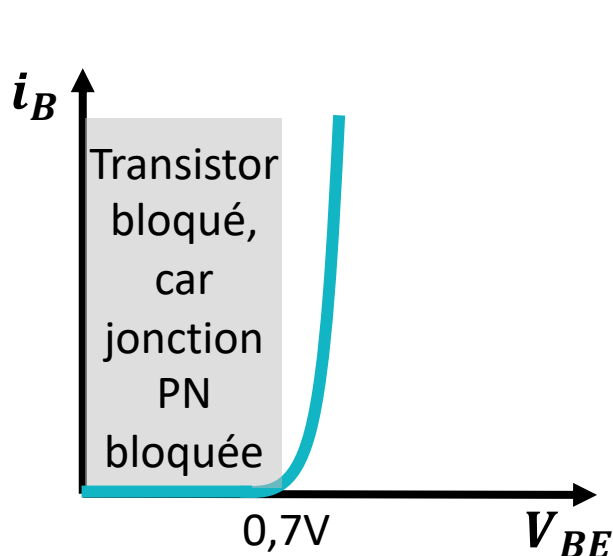
- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

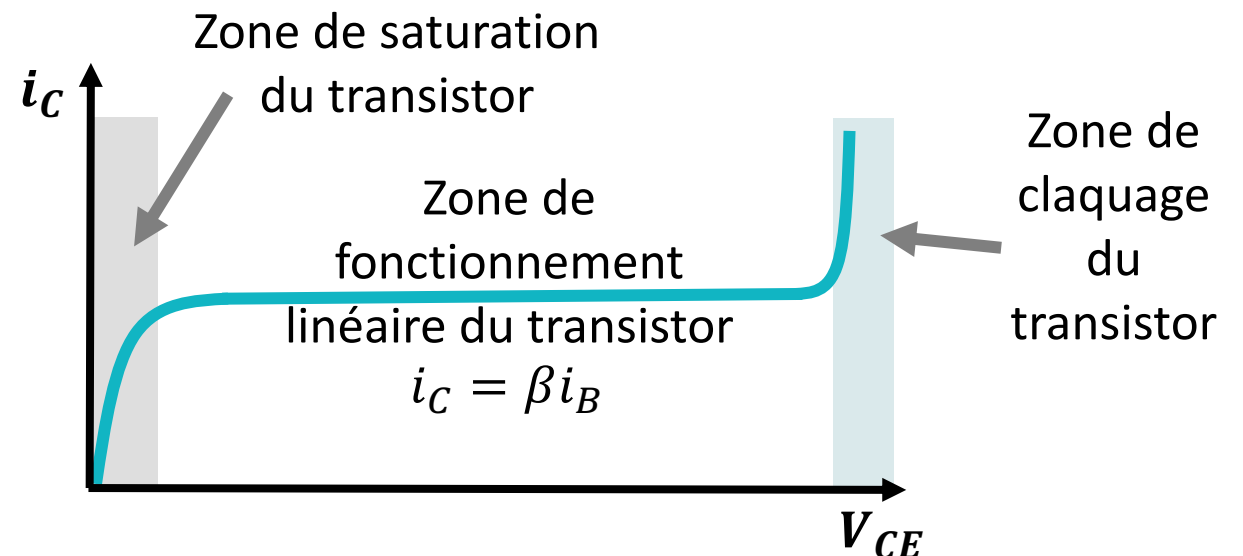
- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

« Que signifie polariser un transistor? »

- **Polariser un transistor consiste à l'amener à un régime de fonctionnement voulu.** Pour cela il faut lui apporter les tensions continues adéquates et donc calculer les valeurs des résistances R_B , R_C et R_E à chaque patte du transistor.
- Considérons un transistor dont les deux caractéristiques $i_B = f(V_{BE})$ et $i_C = f(V_{CE})$ (déjà étudiées précédemment) sont les suivantes :



Caractéristique d'entrée



Caractéristique de sortie

BJT en statique

A ce transistor ajoutons-lui un montage émetteur commun :

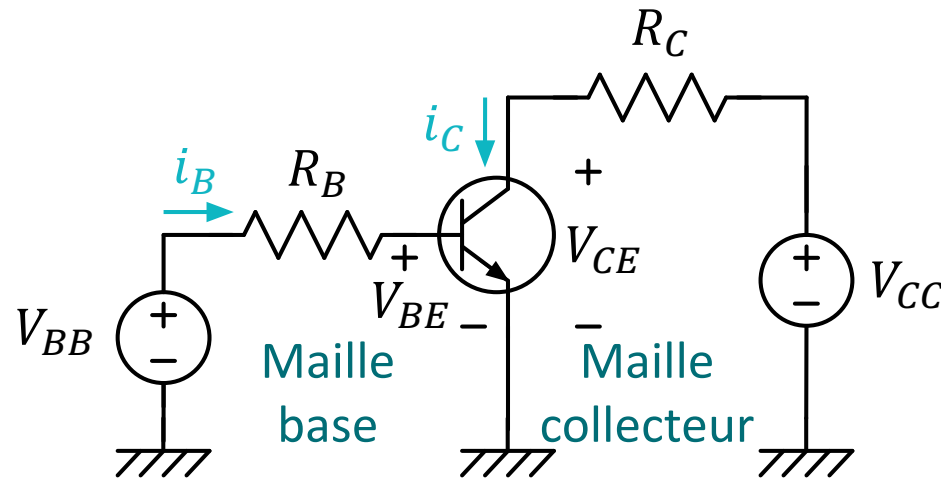


Schéma fondamental avec les masses

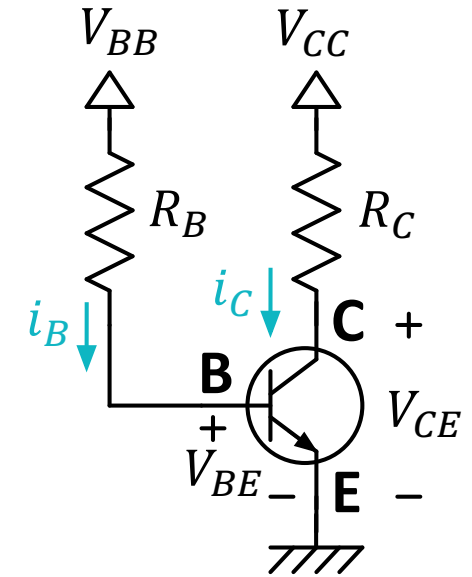


Schéma fondamental simplifié

- Maille base : $V_{BB} - R_B i_B - V_{BE} = 0 \Rightarrow i_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = -\frac{1}{R_B} V_{BE} + \frac{V_{BB}}{R_B}$
 $i_B = f(V_{BE})$ s'appelle la **droite d'attaque statique**
- Maille collecteur : $V_{CC} - R_C i_C - V_{CE} = 0 \Rightarrow i_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} = -\frac{1}{R_C} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$
 $i_C = f(V_{CE})$ s'appelle la **droite de charge statique**

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

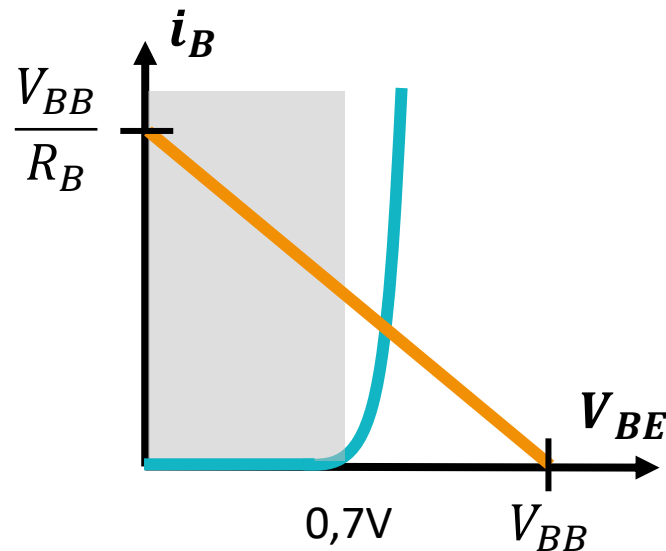
3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

- Rajoutons sur les deux caractéristiques du transistor ces deux droites :

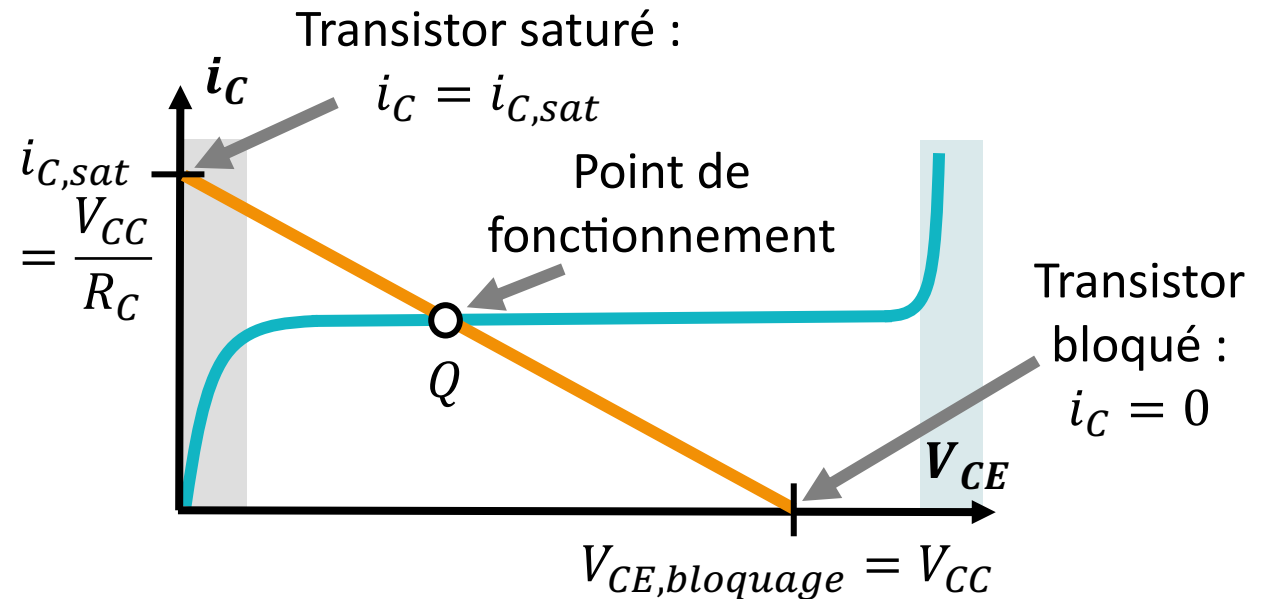
$$i_B = -\frac{1}{R_B}V_{BE} + \frac{V_{BB}}{R_B}$$

droite d'attaque statique



$$i_C = -\frac{1}{R_C}V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$$

droite de charge statique



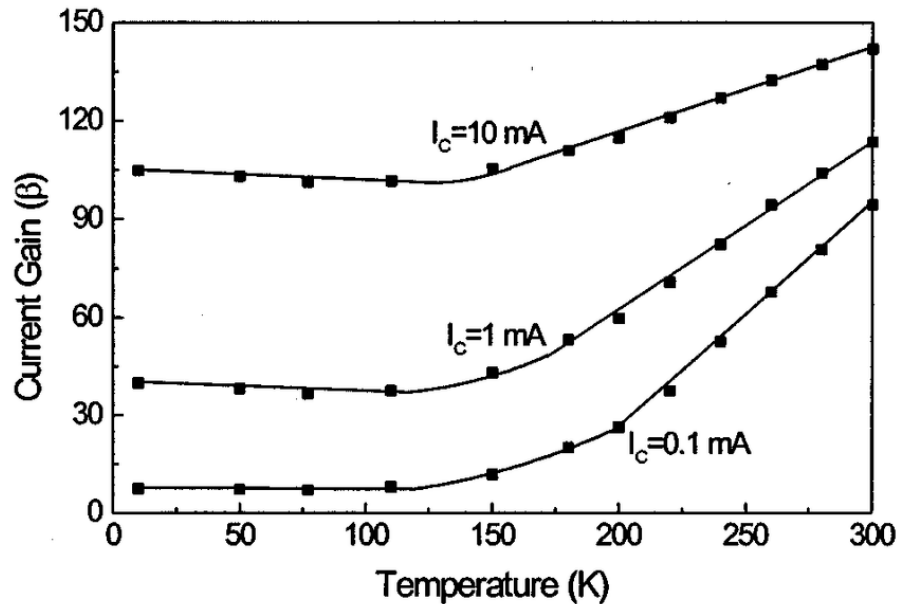
- On définit **le point de fonctionnement Q** comme étant le point d'intersection de la droite de charge avec la caractéristique $i_C = f(V_{CE})$ du transistor.
- L'intérêt de la droite de la charge est qu'elle donne la représentation visuelle de tous les points de fonctionnement possibles du transistor : de bloqué à saturé en passant par le **mode actif : l'amplification**.

Remarque : Effet de la température sur la polarisation

La température affecte directement les coordonnées du point de fonctionnement en modifiant i_C . En toute rigueur, en tenant compte du **courant de fuite** i_{CB0} entre le collecteur et la base, l'expression de i_C s'écrit :

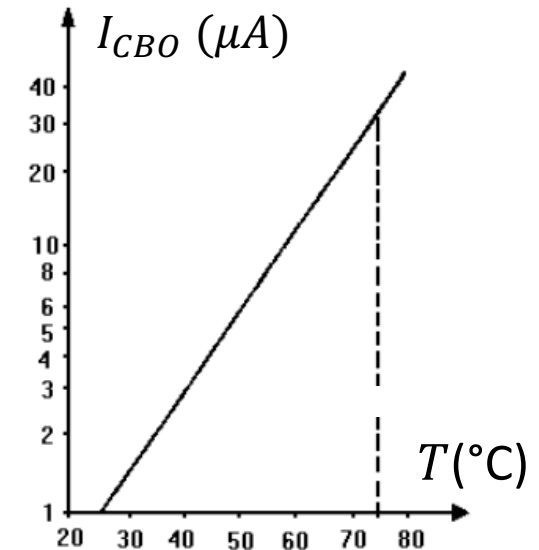
$$i_C = \beta i_B + (\beta + 1) i_{CB0}$$

■ Si $T \nearrow$ alors $\beta \nearrow$



(H. Wang, G. Ng, IEEE Transactions on Electron Devices 48(8):1492 – 1497)

■ Si $T \nearrow$ alors $i_{CB0} \nearrow$



Rappel : i_{CB0} négligeable devant i_B dans les calculs usuels

1. Le transistor bipolaire
 - A. Historique
 - B. L'effet transistor
 - C. Modes de fonctionnement
 - D. Caractéristiques
 - E. Emetteur commun

2. Polarisation
 - A. Point de fonctionnement
 - B. Polarisation par la base
 - C. Polarisation par l'émetteur
 - D. Polarisation par diviseur de tension
 - E. Commutation

3. Modèle statique
 - A. Ebers-Moll
 - B. Exemple

BJT en statique

- 1. Le transistor bipolaire
 - A. Historique
 - B. L'effet transistor
 - C. Modes de fonctionnement
 - D. Caractéristiques
 - E. Emetteur commun
- 2. Polarisation
 - A. Point de fonctionnement
 - B. Polarisation par la base
 - C. Polarisation par l'émetteur
 - D. Polarisation par diviseur de tension
 - E. Commutation
- 3. Modèle statique
 - A. Ebers-Moll
 - B. Exemple

EXERCICE :

1. Déterminer un point de fonctionnement à l'aide de la datasheet du 2N3904

Symbol	Parameter	Conditions		Min	Typ	Max	Unit
I_{CBO}	collector-base cut-off current	$V_{CB} = 30\text{ V}; I_E = 0\text{ A}$		-	-	50	nA
I_{EBO}	emitter-base cut-off current	$V_{EB} = 6\text{ V}; I_C = 0\text{ A}$		-	-	50	nA
h_{FE}	DC current gain	$V_{CE} = 1\text{ V}; I_C = 0.1\text{ mA}$		60	-	-	
		$V_{CE} = 1\text{ V}; I_C = 1\text{ mA}$		80	-	-	
		$V_{CE} = 1\text{ V}; I_C = 10\text{ mA}$		100	-	300	
		$V_{CE} = 1\text{ V}; I_C = 50\text{ mA}$		60	-	-	
		$V_{CE} = 1\text{ V}; I_C = 100\text{ mA}$		30	-	-	
V_{CEsat}	collector-emitter saturation voltage	$I_C = 10\text{ mA}; I_B = 1\text{ mA}$		-		200	mV
		$I_C = 50\text{ mA}; I_B = 5\text{ mA}$		-	-	300	mV
V_{BEsat}	base-emitter saturation voltage	$I_C = 10\text{ mA}; I_B = 1\text{ mA}$		650	-	850	mV
		$I_C = 50\text{ mA}; I_B = 5\text{ mA}$		-	-	950	mV

- Les données sont fournies pour $V_{CE} = 1V$, on va donc choisir $V_{CE} = 1V$.
- On va choisir $i_C = 10mA$ car on a un encadrement des valeurs du gain en courant. (entre 100 et 300). On choisit la moyenne : $\beta = 200$. De plus pour $i_C = 10mA$ on a $V_{CE} = 1V$ qui est supérieur à $V_{CE,sat} = 200mV$: c'est parfait, le transistor va pouvoir amplifier.

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

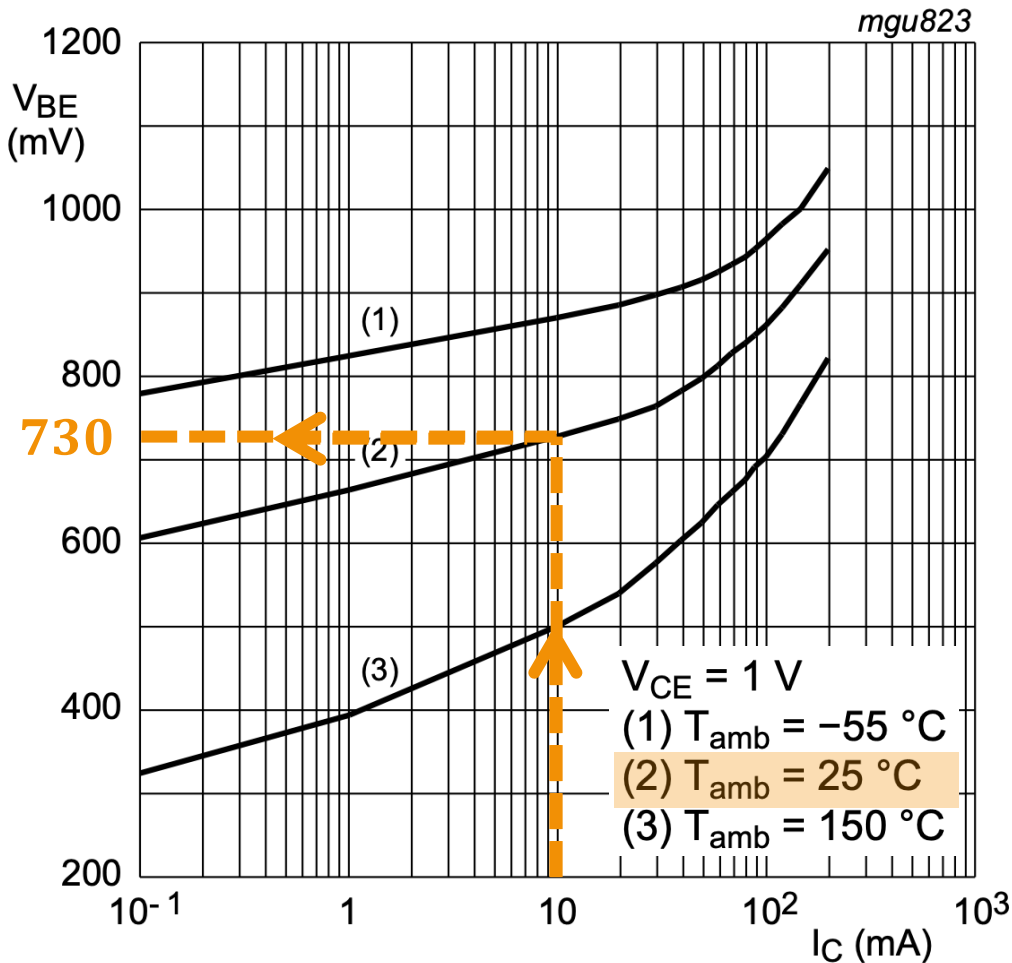
2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

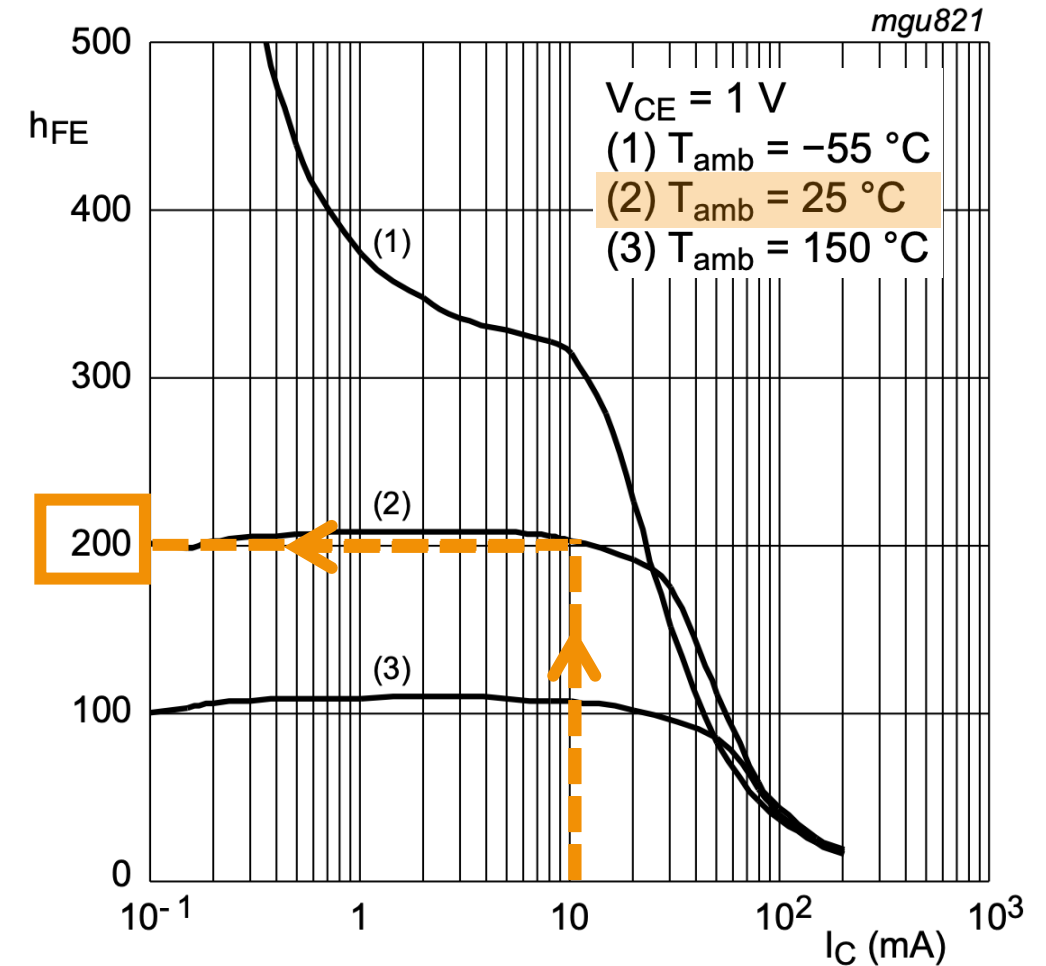
3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

2. Déterminer, à l'aide la datasheet du 2N3904, la valeur de V_{BE} et du gain β , pour la valeur de $i_C = 10mA$ précédemment trouvée, à $25^\circ C$.



On retiendra $V_{BE} = 730mV$



Et $\beta = 200$ ce qui confirme notre choix précédent.

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

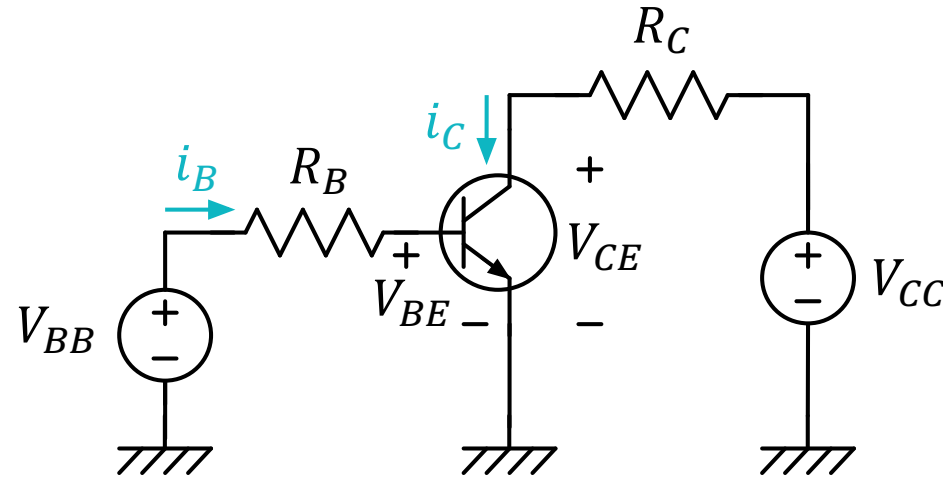
2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

3. En déduire les valeurs de R_B et R_C dans le cadre d'un montage émetteur commun pour obtenir notre point de fonctionnement $V_{CE} = 1V$ et $i_C = 10mA$. Prendre $V_{BB} = V_{CC} = 10V$.



Résumé de ce que l'on a trouvé avant grâce à la DATASHEET pour obtenir le point de fonctionnement souhaité :

$$V_{CE} = 1V \text{ et } V_{BE} = 0,73V$$

$$i_C = 10mA \text{ et } \beta = 200$$

- $i_B = \frac{i_C}{\beta} = \frac{10 \times 10^{-3}}{200} = 5 \times 10^{-5} A$
- Maille base : $V_{BB} - R_B i_B - V_{BE} = 0 \Rightarrow R_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{i_B} = \frac{10 - 0,73}{5 \times 10^{-5}} = 185,4 k\Omega$
- Maille collecteur : $V_{CE} + R_C i_C - V_{CC} = 0 \Rightarrow R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{i_C} = \frac{10 - 1}{10 \times 10^{-3}} = 900 \Omega$

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

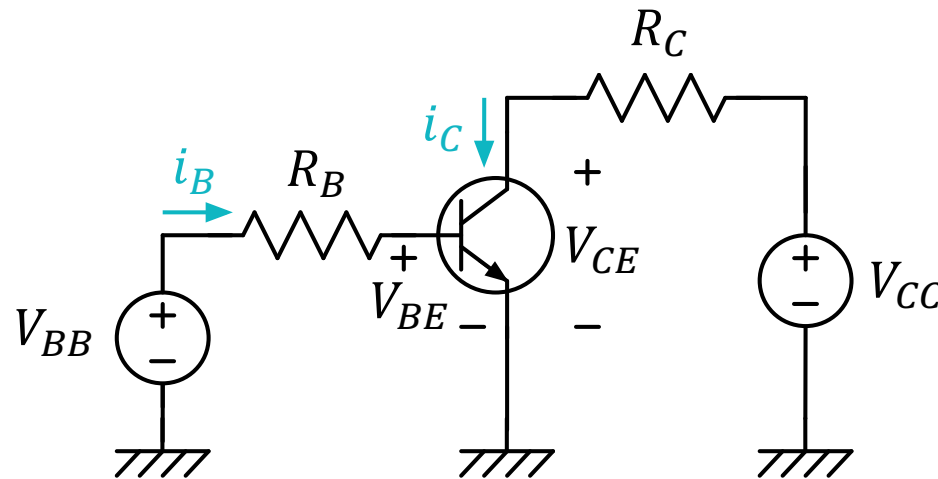
2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

4. Vérifier les résultats avec la simulation



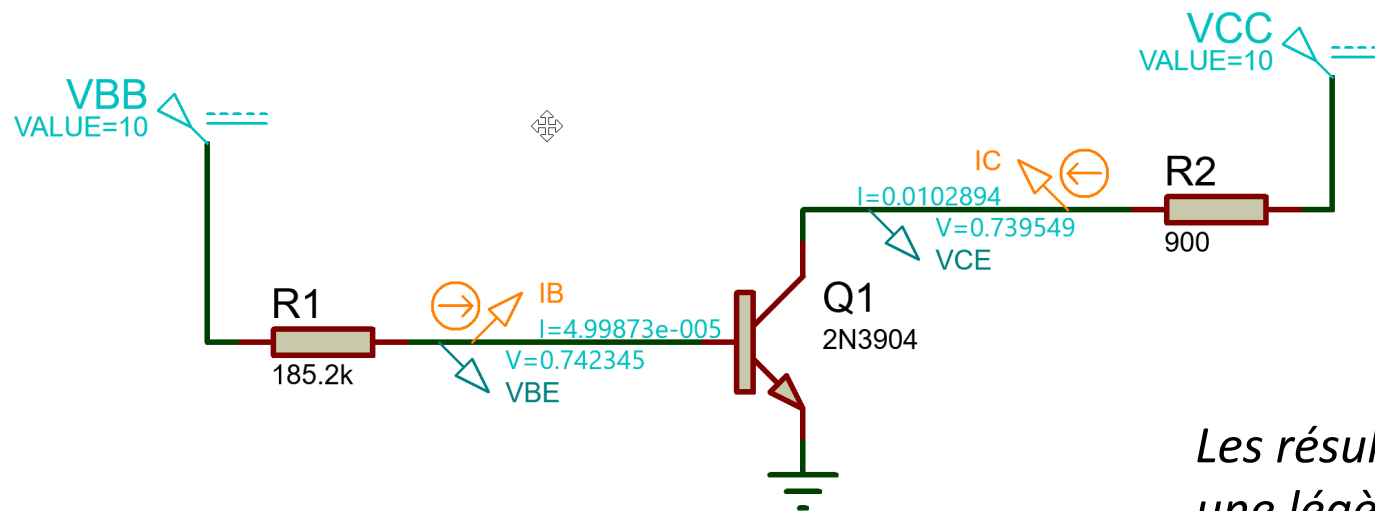
Les calculs ont donné :

$$V_{CE} = 1V \text{ et } V_{BE} = 0,73V$$

$$i_C = 10mA \text{ et } i_B = 50\mu A$$

$$R_B = 185,4k\Omega$$

$$R_C = 900\Omega$$



La simulation donne:

$$i_C = 10mA$$

$$i_B = 50\mu A$$

$$V_{BE} = 0,74V$$

$$V_{CE} = 0,74V$$

Les résultats sont cohérents, malgré une légère différence pour V_{CE}

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

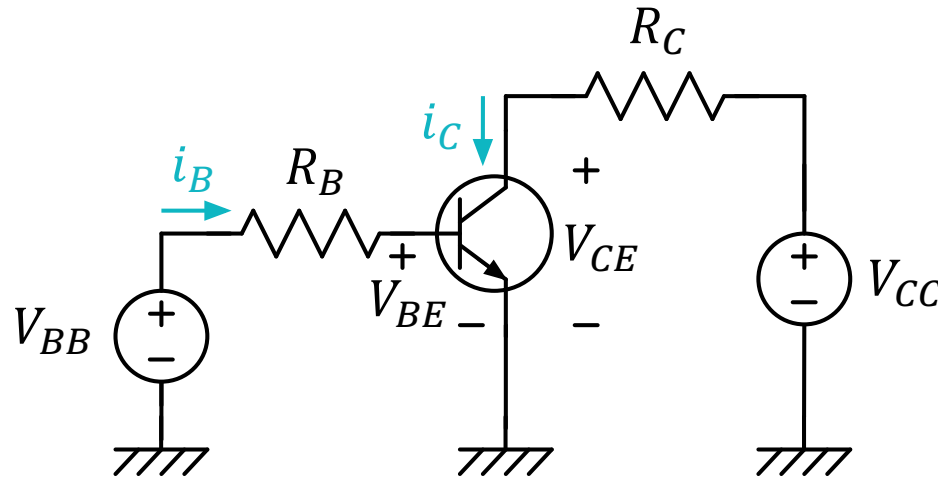
2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

Polarisation du transistor par la base



Il s'agit du montage émetteur commun et les relations de ce montage ont déjà été vue :

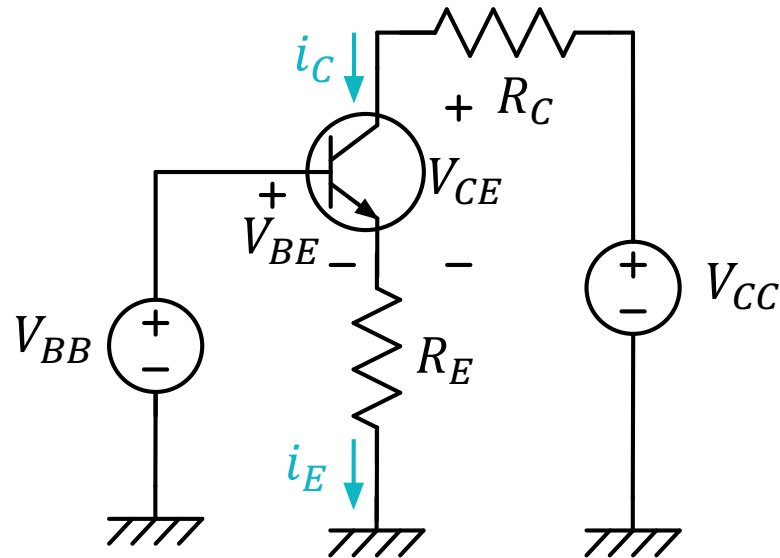
$$i_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

$$i_C = \beta i_B$$

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

- Le montage émetteur commun est un exemple de polarisation par la base. La polarisation par la base signifie qu'on applique une petite tension à la base V_{BE} pour contrôler un courant plus grand i_C qui passe par le transistor.
- Etant donné que les valeurs de i_C et V_{CE} sont dépendantes des valeurs de β en polarisation par la base, on dit que le circuit est β - dépendant.

Polarisation du transistor par l'émetteur



Ex: $V_{BB} = 5V$, $V_{CC} = 10V$,
 $R_C = 1k\Omega$, $R_E = 3,3k\Omega$,
 $\beta = 100$, $V_{BE} = 0,7V$

Pour calculer les coordonnées V_{CE} et i_C du point Q de fonctionnement, on ne s'est jamais servi de β ! On dit que le montage est β - indépendant.

La résistance de la base est déplacée au niveau de l'émetteur. Les relations sont :

- Calcul de V_E : (Maille base)
 $V_E = V_{BB} - V_{BE} = 5 - 0,7 = 4,3V$
- Calcul de i_E :

$$i_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{4,4}{3,3 \times 10^3} = 1,3mA$$
- Calcul de V_C : (Maille collecteur)
 Sachant que $i_C = \alpha i_E \approx i_E$ car $\alpha \approx 1$
 soit $i_C = 1,3mA$ et $V_C = V_{CC} - R_C i_C$
 $V_C = 10 - 1 \times 10^3 \times 1,3 \times 10^{-3} = 8,7V$
- Calcul de V_{CE} :
 $V_{CE} = V_C - V_E = 8,7 - 4,3 = 4,4V$



BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

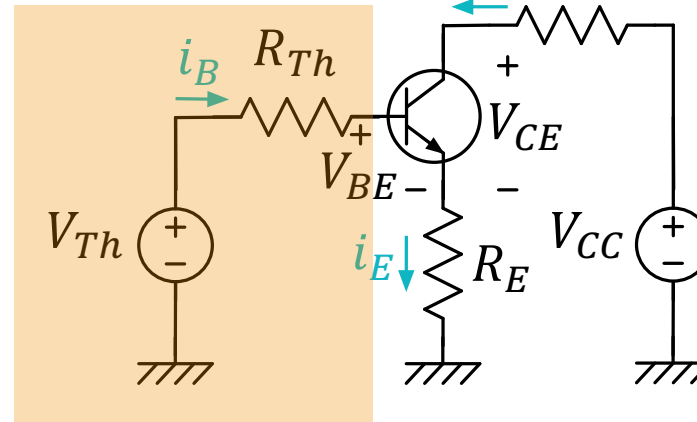
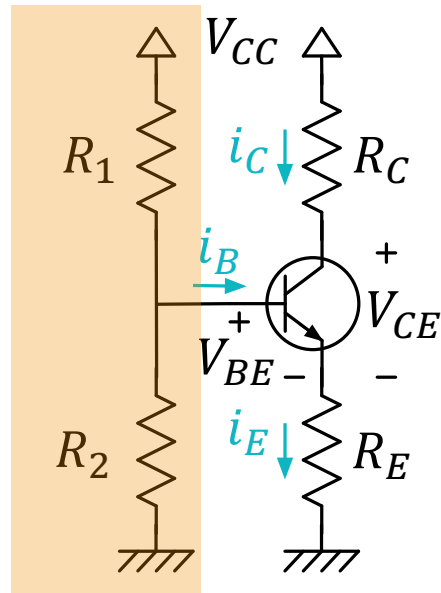
- Avant la tension d'alimentation V_{BB} se trouvait sur la résistance de base pour créer un courant base donné, c'est ce qu'on appelait **la polarisation par la base**.
- Inconvénient du montage « polarisation par la base » :
Le point Q de fonctionnement bouge sur la droite de charge en fonction des valeurs du gain en courant β , car si β varie, i_C varie et donc V_{CE} varie.

- Maintenant, la tension d'alimentation V_{BB} se retrouve sur l'émetteur (diminuée de $V_{BE} = 0,7V$) pour établir un courant émetteur donné, c'est ce qu'on appelle **la polarisation par l'émetteur**.
- Intérêt du montage « polarisation par l'émetteur » :
Le point Q de fonctionnement est très stable. Il ne bouge quasiment plus sur la droite de charge, même si le gain en courant β passe de 200 à 50.

	Polarisation par la base	Polarisation par l'émetteur
Mode de fonctionnement du transistor :	Blocage ou saturation	Actif ou encore linéaire
Applications :	Commutation / circuits numériques	Amplification

Polarisation du transistor par Diviseur de Tension (Encore appelée PDT)

Transistor 2N3904, avec $V_{CC} = 10V$, $V_{BE} = 0,7V$, $\beta = 200$
 $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 2,2k\Omega$, $R_C = 3,6k\Omega$ et $R_E = 1k\Omega$



Ces deux schémas sont équivalents en utilisant le modèle de Thevenin.

$$V_{Th} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 1,803V$$

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 1803\Omega$$

Déterminons par un **calcul complet** les coordonnées du point de fonctionnement Q :

• Maille base : $V_{Th} - R_{Th}i_b - V_{BE} - R_E(\beta + 1)i_B = 0$ car $i_E = i_C + i_B = \beta i_B + i_B$

$$\Rightarrow i_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + R_E(\beta + 1)} = 5,44\mu A \quad \Rightarrow i_C = \beta i_B = 1,09mA$$

• Maille collecteur : $R_E(\beta + 1)i_B + V_{CE} + R_C i_C - V_{CC} = 0$

$$\Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - R_E(\beta + 1)i_B - R_C i_C \quad \Rightarrow V_{CE} = 4,98V$$

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension**
- E. Commutation

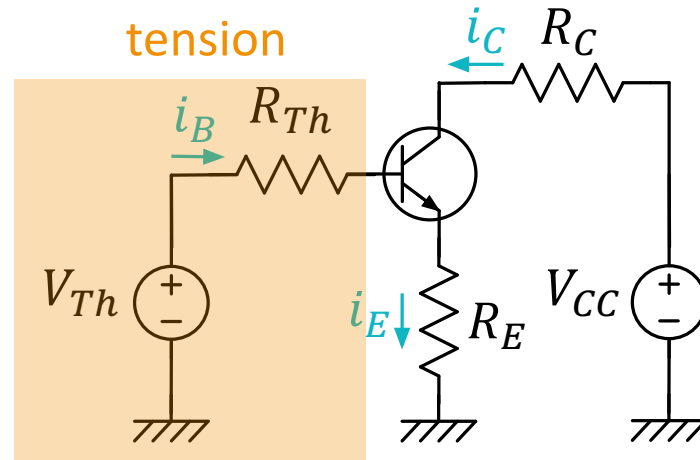
3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire
 - A. Historique
 - B. L'effet transistor
 - C. Modes de fonctionnement
 - D. Caractéristiques
 - E. Emetteur commun
2. Polarisation
 - A. Point de fonctionnement
 - B. Polarisation par la base
 - C. Polarisation par l'émetteur
 - D. Polarisation par diviseur de tension
 - E. Commutation
3. Modèle statique
 - A. Ebers-Moll
 - B. Exemple

Source de tension



Autre méthode sans passer par le calcul complet

Une source de tension est considérée équivalente à une tension constante si sa résistance interne est 100 fois inférieure à la résistance de charge : c'est-à-dire :
 $R_{interne} = 0,01 R_{charge}$

- La résistance interne de la source est la résistance vue à gauche de la base (on remplace V_{Th} par un fil) : $R_{vue,gauche} = R_{Th} (= R_1 // R_2)$
- Comme la source de tension est entre la base et l'émetteur, il faut aussi considérer la charge entre la base et l'émetteur. De plus comme la source est parcourue par un courant i_B il faut aussi considérer la charge parcourue par un courant i_B . Une astuce consiste alors à dire que $R_E i_E = (\beta + 1) R_E i_B$ car $i_E = (\beta + 1) i_B$.
- On regarde ensuite la résistance vue à droite de la base : $R_{vue,droite} = (\beta + 1) R_E$
- Conclusion : Si $R_1 // R_2 < 0,01 (\beta + 1) R_E$, alors on peut considérer que la source de tension est constante avec une résistance interne R_{Th} négligeable devant la charge.

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

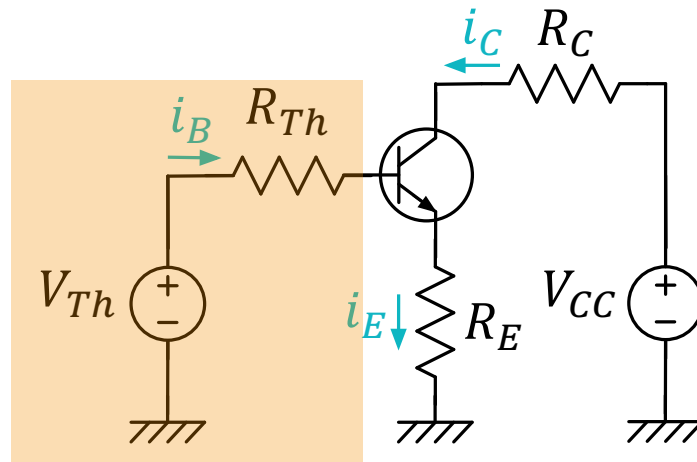
- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

2. Polarisation

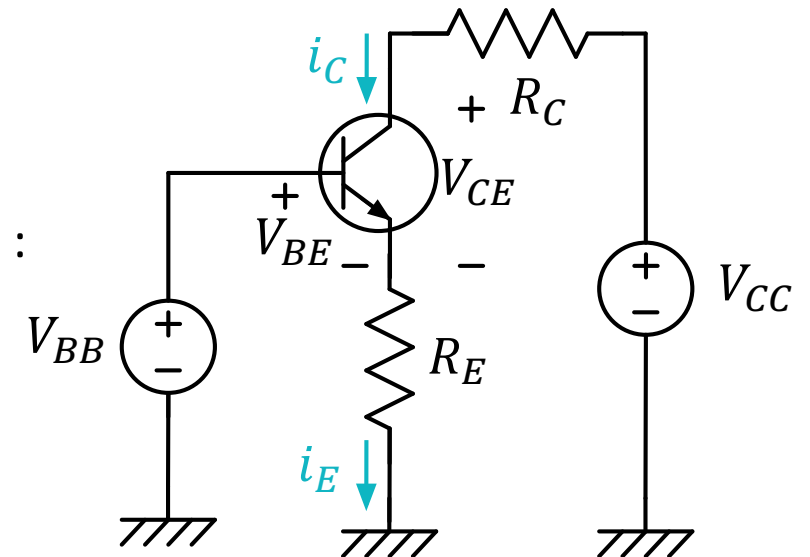
- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple



Le schéma est alors équivalent à :



$$\text{Avec : } V_{BB} = V_{Th} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

C'est la formule du diviseur de tension

- On s'est finalement ramené à une polarisation par l'émetteur qui est β – *indépendant*. **Faire une PDT stabilise donc le point de fonctionnement.**

➡ Quel est alors l'intérêt de la polarisation par pont par rapport à une polarisation par l'émetteur?

La polarisation par pont permet de changer la valeur de V_{BB} (qui rappelons-le est égal à V_{Th}) en changeant simplement les valeurs de R_1 et R_2 sans changer la tension d'alimentation au niveau de la base qui est fixe et imposée dans le montage.

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

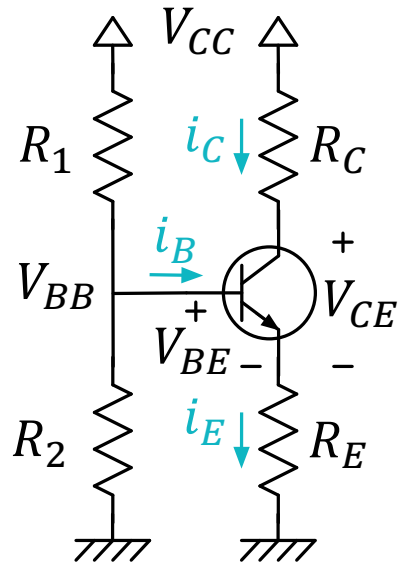
2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

EXERCICE : Après avoir vérifié que l'on peut considérer R_1 , R_2 et V_{CC} équivalent à un diviseur de tension déterminer le point de fonctionnement du transistor



$$V_{CC} = 10V, V_{BE} = 0,7V, \beta = 200$$

$$R_1 = 10k\Omega, R_2 = 2,2k\Omega, R_C = 3,6k\Omega \text{ et } R_E = 1k\Omega$$

- Vérifier que R_1 , R_2 et V_{CC} est équivalent à un diviseur de tension revient à vérifier que $R_1 // R_2 < 0,01 (\beta + 1) R_E$. Ce que l'on va vérifier en premier :

$$R_1 // R_2 = 1803 \Omega$$

$$0,01 (\beta + 1) R_E = 2010 \Omega \quad \Rightarrow 1803 < 2010 \quad \text{OK !}$$

- On peut maintenant calculer le point de fonctionnement avec le diviseur de tension et les relations classiques de la polarisation par l'émetteur :

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = 1,8V \quad V_E = V_{BB} - V_{BE} = 1,1V \quad i_E = \frac{V_E}{R_E} = 1,1mA$$

$$i_C \approx i_E \Rightarrow i_C = 1,1mA \text{ à comparer avec } 1,1mA \text{ avec le calcul complet}$$

$$V_C = V_{CC} - R_C i_C = 6,0V \quad ; \quad V_{CE} = V_C - V_E = 4,9V \text{ au lieu de } 5,0V \text{ avec le calcul complet}$$

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

EXERCICE : Après avoir vérifié que l'on peut considérer R_1 , R_2 et V_{CC} équivalent à un diviseur de tension déterminer le point de fonctionnement du transistor

Remarque : A ce stade on pourrait vérifier que le transistor ne sature pas.

Précédemment on a démontré que le transistor commence à saturer si $V_{CB} < 0$.

De plus : $V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$

Donc un transistor commence à saturer si $V_{CE} < V_{BE} \approx 0,7V$.
Le transistor sature vraiment si $V_{CE} < 0,2V$

Dans l'exercice $V_{CE} = 4,9V > V_{BE} = 0,7V \Rightarrow$ le transistor ne sature pas, il amplifie.

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

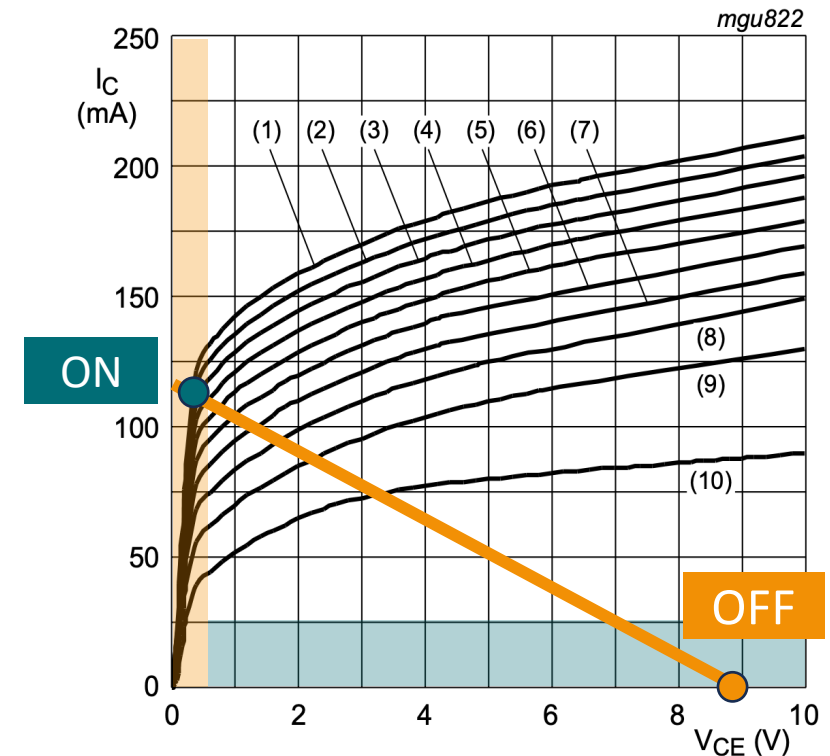
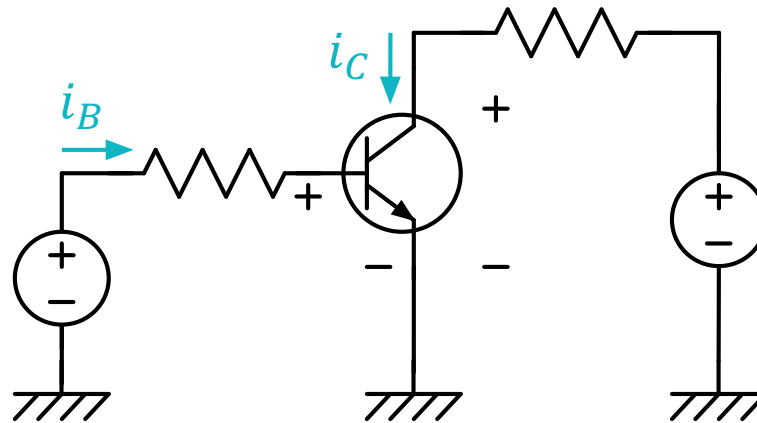
2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

Commutation



En mode commutation le transistor NPN fonctionne comme un interrupteur, contrôlé par la tension appliquée à la base.

- Interrupteur fermé (ON) : Quand la tension de base est suffisamment élevée pour permettre un courant de base et que $\beta i_B > i_{C,sat}$ alors le transistor sature et laisse passer le courant entre l'émetteur et le collecteur comme un interrupteur fermé.
- Interrupteur ouvert (OFF) : Quand la tension de base est trop faible ou inexistante, le transistor est bloqué empêchant tout courant de circuler entre l'émetteur et le collecteur, comme un interrupteur ouvert.

ON

OFF

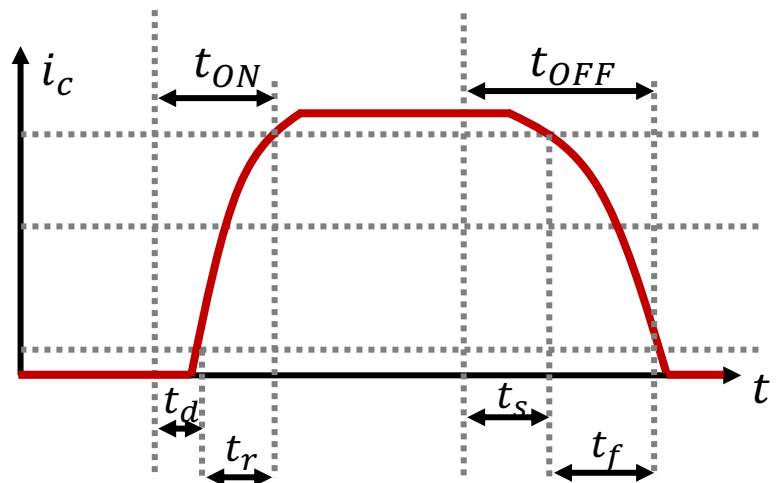
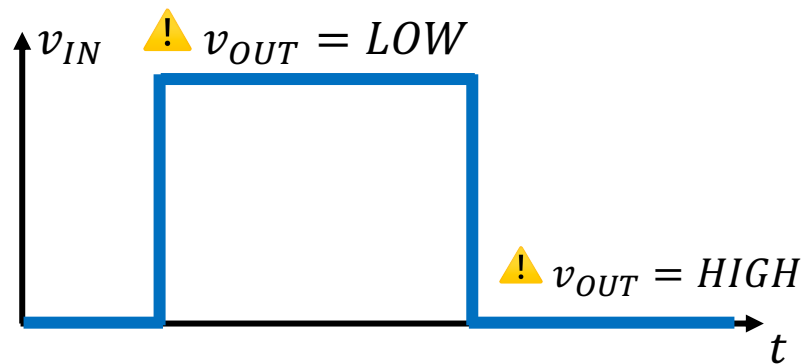
BJT en statique

- 1. Le transistor bipolaire
 - A. Historique
 - B. L'effet transistor
 - C. Modes de fonctionnement
 - D. Caractéristiques
 - E. Emetteur commun
- 2. Polarisation
 - A. Point de fonctionnement
 - B. Polarisation par la base
 - C. Polarisation par l'émetteur
 - D. Polarisation par diviseur de tension
 - E. Commutation
- 3. Modèle statique
 - A. Ebers-Moll
 - B. Exemple

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C unless otherwise noted) (Continued)

POUR INFO

Characteristic		Symbol	Min	Max	Unit
SWITCHING CHARACTERISTICS					
Delay Time	(V _{CC} = 30 Vdc, V _{BE(off)} = -2.0 Vdc, I _C = 150 mA, I _{B1} = 15 mA) (Figure 1)	t _d	–	10	ns
Rise Time		t _r	–	25	ns
Storage Time	(V _{CC} = 30 Vdc, I _C = 150 mA, I _{B1} = I _{B2} = 15 mA) (Figure 2)	t _s	–	225	ns
Fall Time		t _f	–	60	ns

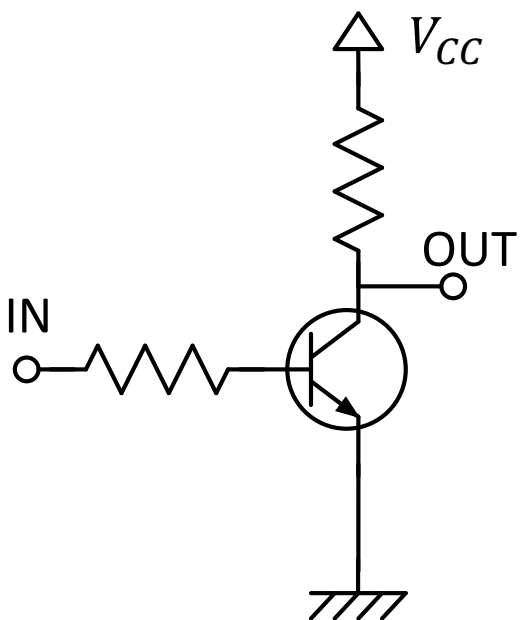


- **t_d : delay time**
Durée entre le déclenchement de l'impulsion et le moment où i_C atteint 10% de sa charge (charge de la capacité de la jonction d'émetteur)
- **t_r : rise time**
Durée pour passer de 10 à 90% de la valeur maximale.
- **t_{ON} : turn ON time** $t_{ON} = t_d + t_r$
- **t_s : storage time**
Durée pour arriver à 90% de charge
- **t_f : fall time**
Durée pour passer de 90 à 10%
- **t_{OFF} : turn OFF time** $t_{OFF} = t_s + t_f$

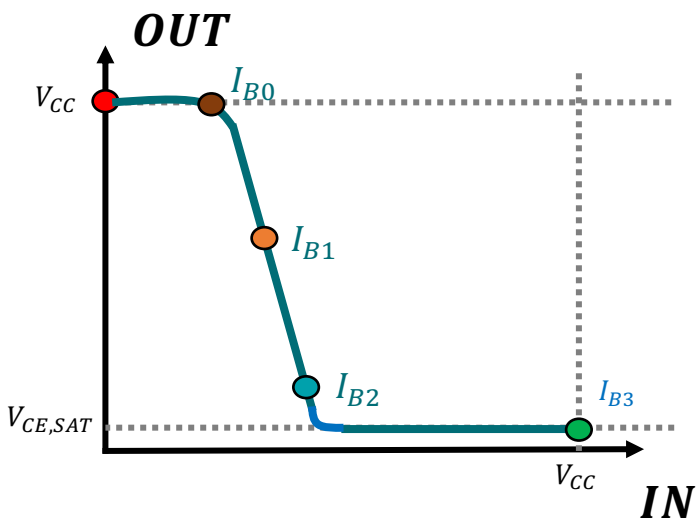
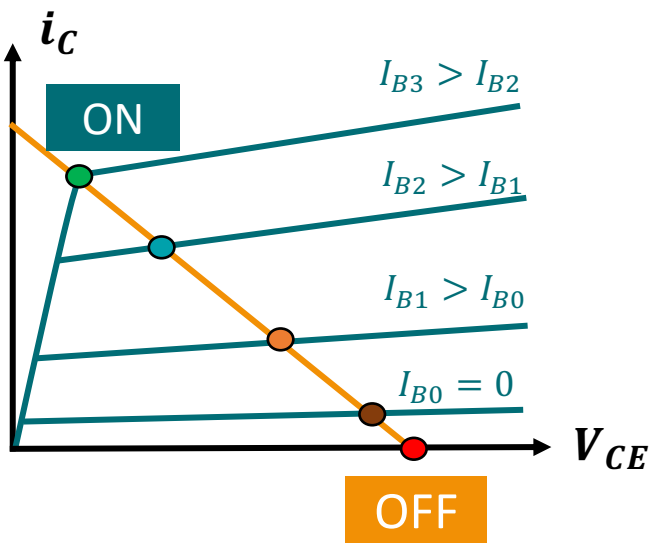
BJT en statique

- 1. Le transistor bipolaire
 - A. Historique
 - B. L'effet transistor
 - C. Modes de fonctionnement
 - D. Caractéristiques
 - E. Emetteur commun
- 2. Polarisation
 - A. Point de fonctionnement
 - B. Polarisation par la base
 - C. Polarisation par l'émetteur
 - D. Polarisation par diviseur de tension
 - E. Commutation
- 3. Modèle statique
 - A. Ebers-Moll
 - B. Exemple

■ Porte NOT



POUR INFO



IN	OUT
0	1
1	0

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

2. Polarisation

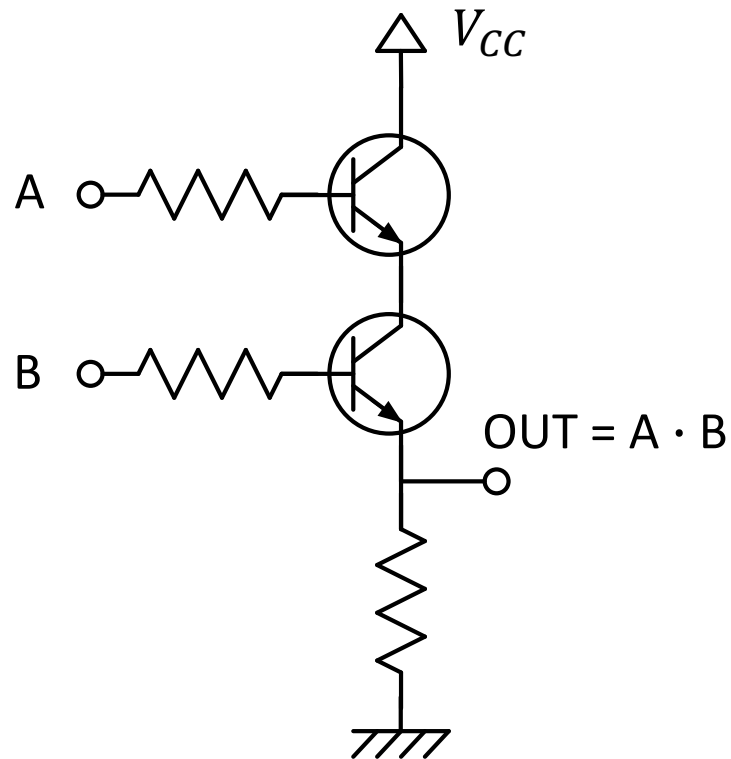
- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

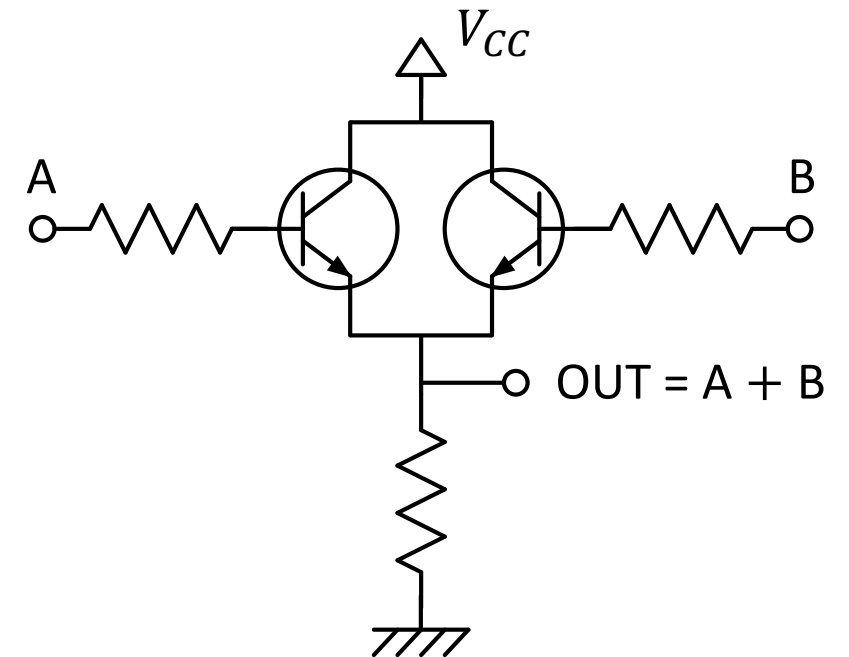
- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

POUR INFO

■ Porte AND



■ Porte OR



Les Transistors BJT utilisent la technologie TTL, plus rapide que la CMOS, et donc adaptée pour la commutation haute fréquence, mais qui consomme davantage.

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire
 - A. Historique
 - B. L'effet transistor
 - C. Modes de fonctionnement
 - D. Caractéristiques
 - E. Emetteur commun
2. Polarisation
 - A. Point de fonctionnement
 - B. Polarisation par la base
 - C. Polarisation par l'émetteur
 - D. Polarisation par diviseur de tension
 - E. Commutation
3. Modèle statique
 - A. Ebers-Moll
 - B. Exemple

Cas d'application concret : contrôler numériquement une charge avec un courant important. Le problème de l'ATMEGA328P est qu'il ne peut pas délivrer plus que $i_{\max} = 40\text{ mA}$ par pin donc on doit piloter un circuit alimenté par une tension plus élevée à l'aide d'un transistor.

EXEMPLE : Piloter à l'aide d'une Arduino Uno une charge R_L (à déterminer) traversée par un courant $i_C = 150\text{ mA}$ sous une alimentation de 12 V.

Comme on utilise un microcontrôleur, on va saturer le transistor.

➡ 1 Recherche de la tension et du courant maximum supporté par le transistor 2N2222 (spécialisé pour la commutation haute fréquence).

MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Value	Unit
Collector – Emitter Voltage	V_{CEO}	40	Vdc
Collector – Base Voltage	V_{CBO}	75	Vdc
Emitter – Base Voltage	V_{EBO}	6.0	Vdc
Collector Current – Continuous	I_C	600	mAdc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	625 5.0	mW mW/ $^\circ\text{C}$
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	1.5 12	W mW/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to +150	$^\circ\text{C}$

$i_C (= 150\text{ mA}) < i_{C,\max} = 600\text{ mA} : \text{OK}$
 $V_{CC} (= 12\text{ V}) < V_{CE,\max} = 40\text{ V} : \text{OK} \Rightarrow \text{Le 2N2222 est adapté pour le travail demandé.}$

BJT en statique

- 1. Le transistor bipolaire
 - A. Historique
 - B. L'effet transistor
 - C. Modes de fonctionnement
 - D. Caractéristiques
 - E. Emetteur commun
- 2. Polarisation
 - A. Point de fonctionnement
 - B. Polarisation par la base
 - C. Polarisation par l'émetteur
 - D. Polarisation par diviseur de tension
 - E. Commutation
- 3. Modèle statique
 - A. Ebers-Moll
 - B. Exemple

2 Détermination de $i_{B,sat}$ et $V_{BE,sat}$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
Base – Emitter Saturation Voltage (Note 1)	V _{BE(sat)}			Vdc
(I _C = 150 mAdc, I _B = 15 mAdc)		0.6	1.2	
(I _C = 500 mAdc, I _B = 50 mAdc)		–	2.0	

- La DATASHEET nous informe que pour obtenir la saturation, on peut prendre les valeurs suivantes pour les courants de saturation :
 $i_{C,sat} = 150mA$, $i_{B,sat} = 15mA$ ce qui au passage nous donne un gain $\beta = \frac{150}{15} = 10$
Ce gain est faible, mais c'est normal, quand le transistor sature, son gain passe rapidement de 200.
- De plus on retiendra $V_{BE,sat} = 1,2V$, ce qui nous donnera la plus petite valeur de R_B et donc la plus grande valeur de i_B , ce qui est favorable pour saturer le transistor.

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

3 Calcul de R_B

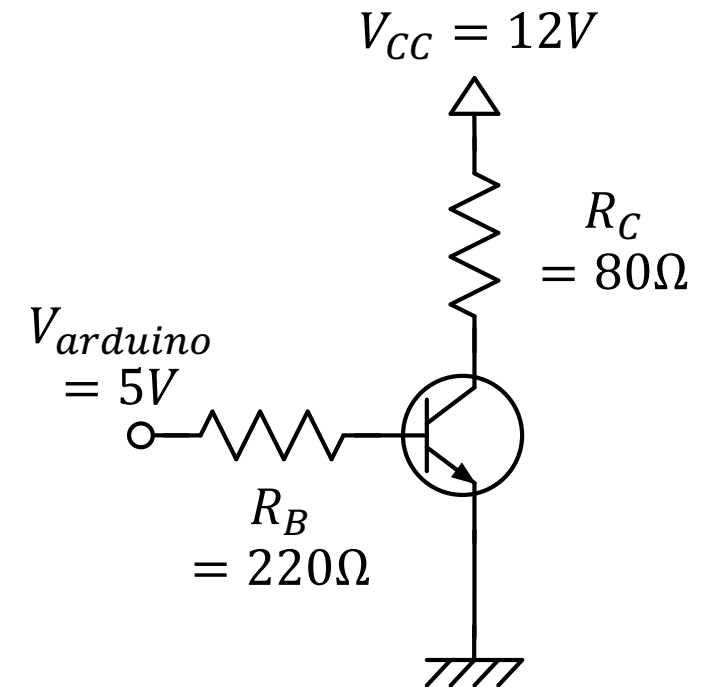
$$R_B = \frac{V_{arduino} - V_{BE,sat}}{i_{B,sat}} = \frac{5 - 1,2}{15 \times 10^{-3}} = 253\Omega \approx \mathbf{220\Omega} \quad (\text{en valeur normalisée}).$$

4 Calcul de R_C

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE,sat}}{i_{C,sat}} = \frac{12 - 0}{150 \times 10^{-3}} = \mathbf{80\Omega}$$

5 Pilotage de la pin de l'arduino

```
digitalWrite(pin, LOW); // bloqué (OFF)  
digitalWrite(pin, HIGH); // saturation (ON)
```



- 1. **Le transistor bipolaire**
 - A. Historique
 - B. L'effet transistor
 - C. Modes de fonctionnement
 - D. Caractéristiques
 - E. Emetteur commun
- 2. **Polarisation**
 - A. Point de fonctionnement
 - B. Polarisation par la base
 - C. Polarisation par l'émetteur
 - D. Polarisation par diviseur de tension
 - E. Commutation
- 3. **Modèle statique**
 - A. Ebers-Moll
 - B. Exemple

Modèle du transistor bipolaire en statique

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

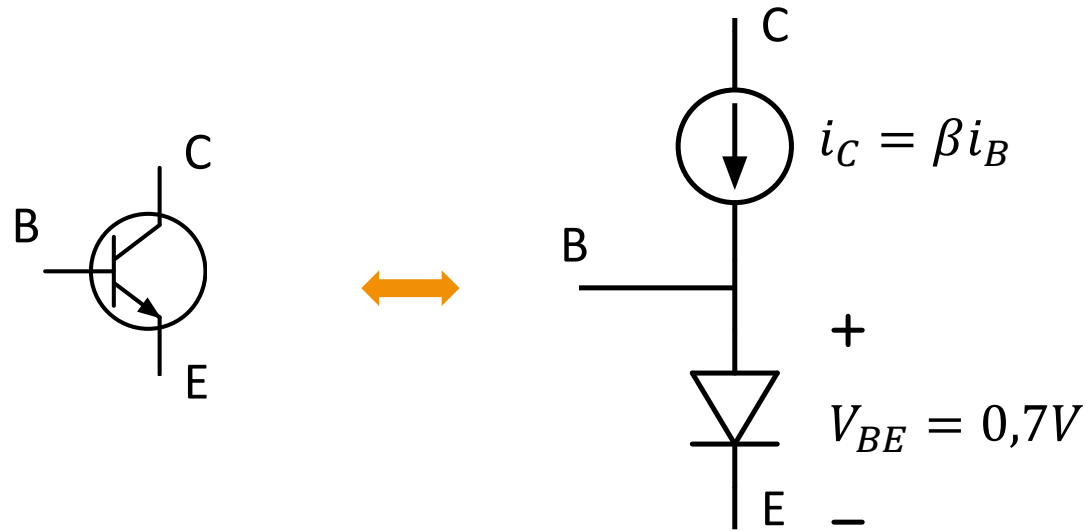
2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

Modèle d'Ebers-Moll



Une représentation simplifiée et plus juste du BJT est le modèle d'Ebers-Moll. Au lieu de simplifier le transistor par deux diodes tête-bêche, la diode entre la base et le collecteur est remplacée par un générateur de courant $i_C = \beta i_B$.

BJT en statique

1. Le transistor bipolaire

- A. Historique
- B. L'effet transistor
- C. Modes de fonctionnement
- D. Caractéristiques
- E. Emetteur commun

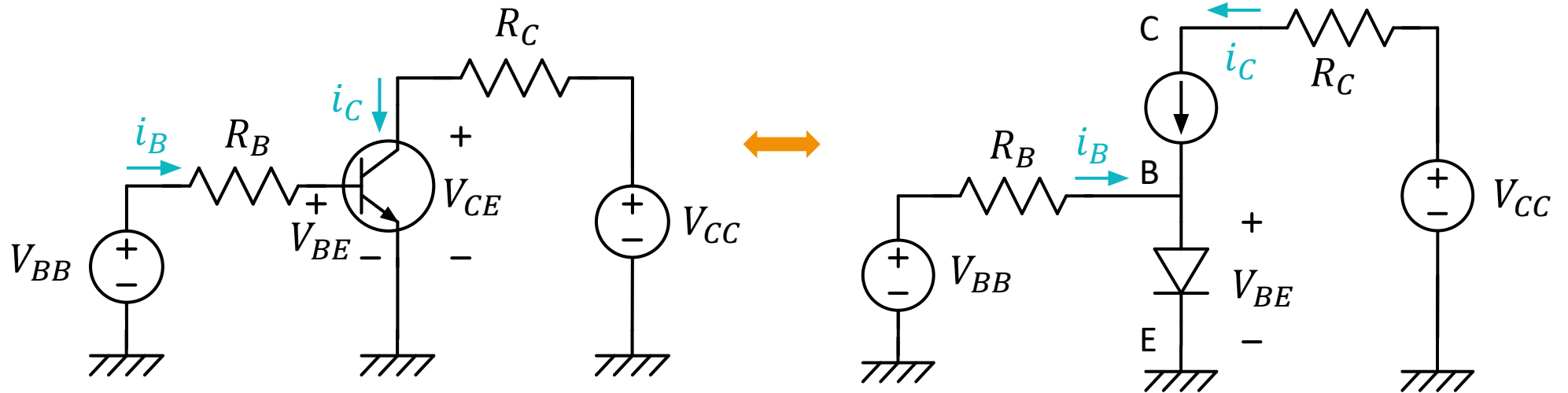
2. Polarisation

- A. Point de fonctionnement
- B. Polarisation par la base
- C. Polarisation par l'émetteur
- D. Polarisation par diviseur de tension
- E. Commutation

3. Modèle statique

- A. Ebers-Moll
- B. Exemple

EXEMPLE : Calculer à l'aide du modèle d'Ebers-Moll les courants i_B et i_C puis V_{CE} .
Prendre : $V_{BB} = 10V$, $V_{CC} = 15V$, $R_B = 200k\Omega$, $R_C = 1k\Omega$, $\beta = 100$ et $V_{BE} = 0,7V$.



- Maille base : $i_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = 46,5\mu A$
 $\Rightarrow i_C = \beta i_B = 4,65mA$

- Maille collecteur : $V_{CE} = V_{CC} - R_C i_C = 10,4V$

BJT en statique

- 1. Le transistor bipolaire**
 - A. Historique
 - B. L'effet transistor
 - C. Modes de fonctionnement
 - D. Caractéristiques
 - E. Emetteur commun
- 2. Polarisation**
 - A. Point de fonctionnement
 - B. Polarisation par la base
 - C. Polarisation par l'émetteur
 - D. Polarisation par diviseur de tension
 - E. Commutation
- 3. Modèle statique**
 - A. Ebers-Moll
 - B. Exemple

Fin du cours