PHYS-F-314

Electronique

Chapitre III
Les transistors

Table des matières

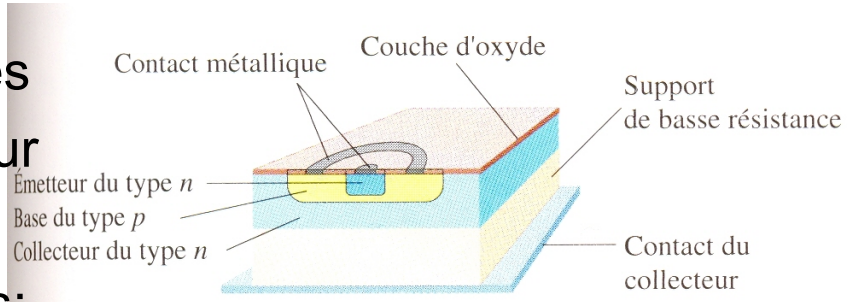
- Introduction
- Principe de fonctionnement du transistor bipolaire à jonction (BJT)
- Relation des courants
- Courbes caractéristiques
- Principe d'amplification avec un transistor
- Polarisation
- Opération linéaire et distorsion
- Différents schémas de polarisation
- Circuits équivalents à paramètres r
- Amplificateur à émetteur commun
- Circuits équivalents hybrides

Introduction

- Le transistor a été inventé en 1948 par les physiciens Américains J. Bardeen, W. Schockley et W. Brattain, chercheurs à la compagnie Bell Téléphone. Ils ont reçu le prix Nobel de physique en 1956.
- Le transistor est l'élément actif le plus utilisé en électronique où il a remplacé les tubes à vide.
- On distingue plusieurs types de transistors:
  - Les transistors bipolaires
    - Met en jeu le déplacement des deux types de porteurs (électrons et trous)
    - Exemple : le transistor à jonctions
  - Les transistors unipolaires
    - Met en jeu le déplacement d'un seul type de porteurs (électrons ou trous)
    - Exemple : les transistors à effet de champ (FET)

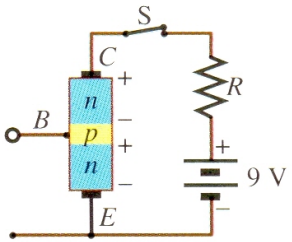
Le transistor bipolaire à jonctions

- Un transistor à jonctions est constitué essentiellement de deux diodes mises dos à dos. Deux configurations sont possibles: *pnp* ou *npn.*
- Nous nous limiterons à expliquer le fonctionnement des transistors *npn*. La même explication est valable pour les transistors *pnp* à condition d'intervertir les rôles joués par les électrons et les trous ainsi que les signes des courants et des tensions.
- La croissance cristalline des trois couches est réalisée l'une au-dessus de l'autre pour préserver la structure monocristalline

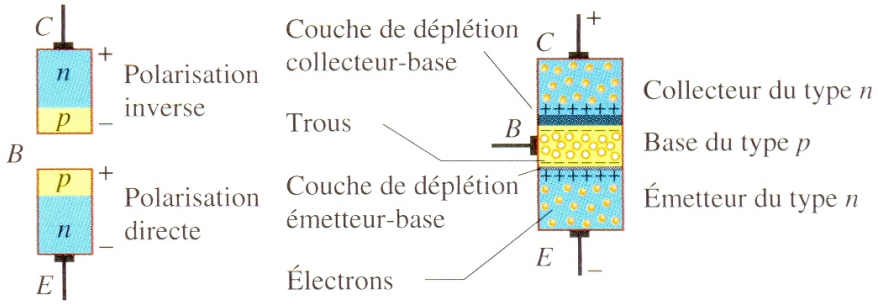


- Le transistor est composé de trois bornes: l'émetteur (E), la base (B) et le collecteur (C).
  - L'émetteur est très dopé et a une très faible résistance.
  - La base, la partie centrale, est très mince et légèrement dopée
  - Le collecteur est également légèrement dopé.
- Habituellement le transistor est placé en série avec une source continue de courant. Il sert alors comme une vanne électrique de contrôle, ouvrant complètement ou partiellement et permettant le passage d'un courant intense de passer ou bien coupant ce courant. Ce contrôle est réalisé à l'aide d'un faible courant à travers la base.

Fonctionnement npn



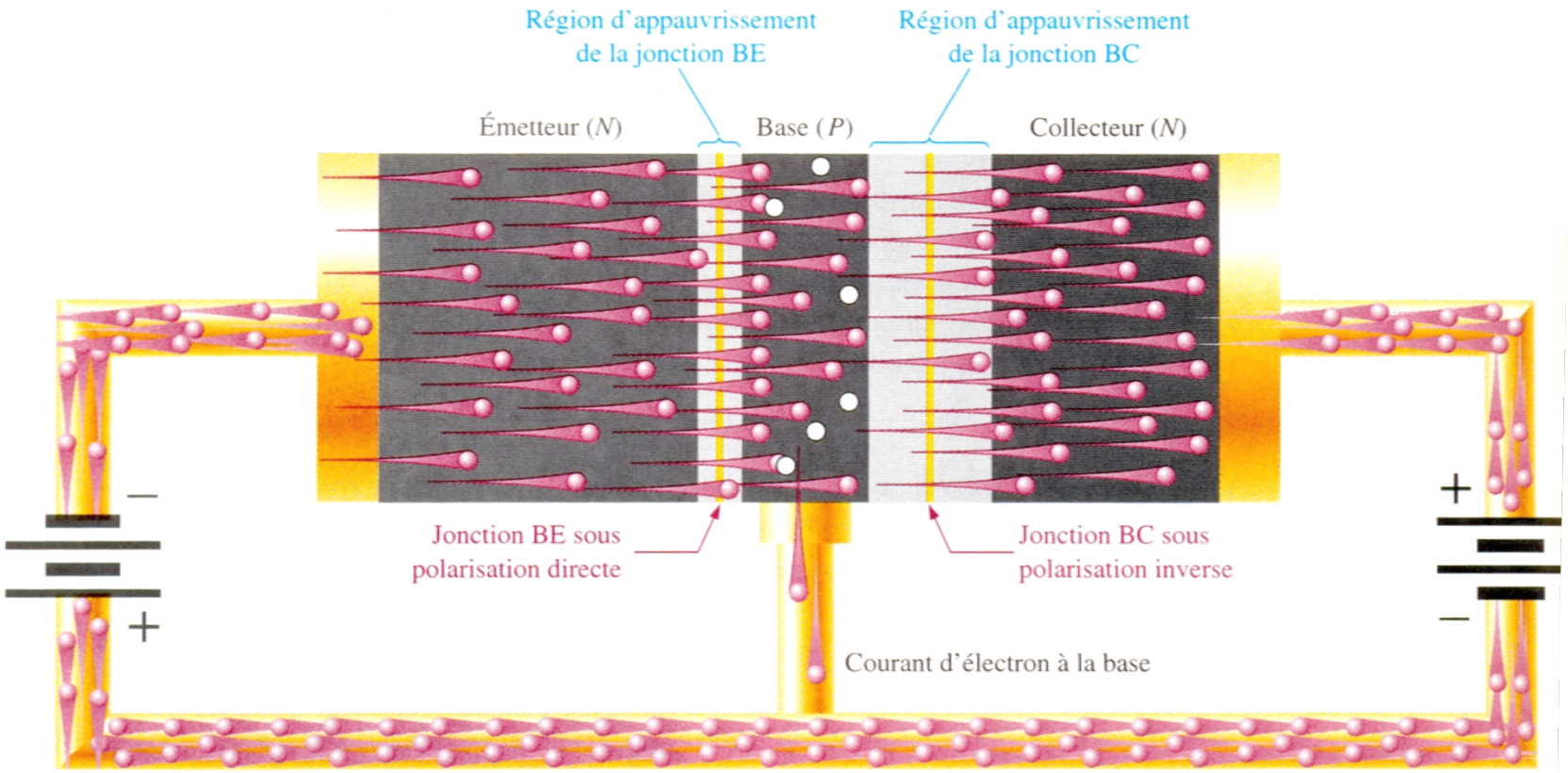
- Considérons un transistor *npn* branché à une pile de 9V
- Assimilons le à deux diodes *np* dos à dos
  - Deux jonctions sont formées, une à chaque surface de la base très mince (10µm)
  - Rappel:
    - si région p a un potentiel > potentiel de la région n : polarisation directe
    - si région p a un potentiel < potentiel de la région n : polarisation inverse



- A la fermeture de l'interrupteur:
  - Si la polarisation directe > ~650mV, les électrons se déplacent facilement de E vers B.
  - Comme B est mince, la plupart des électrons traversent B (par diffusion)
  - Passés B, les électrons sont fortement accélérés vers le collecteur
  - → courant dans le circuit extérieur
  - Cependant la base sera rapidement « vidée » de ses trous → apparition d'une charge négative dans B qui s'oppose à l'arrivée de nouveaux électrons de E.

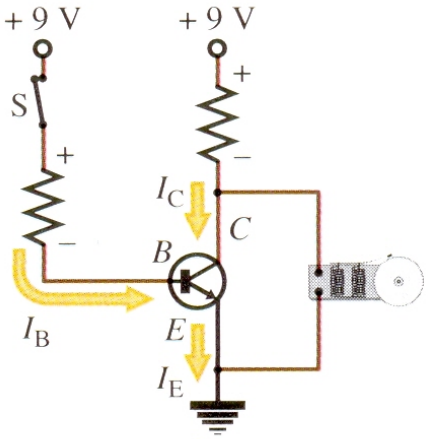
→ Pour faire passer le courant de E vers C, il faut un petit courant positif vers B.

Illustration



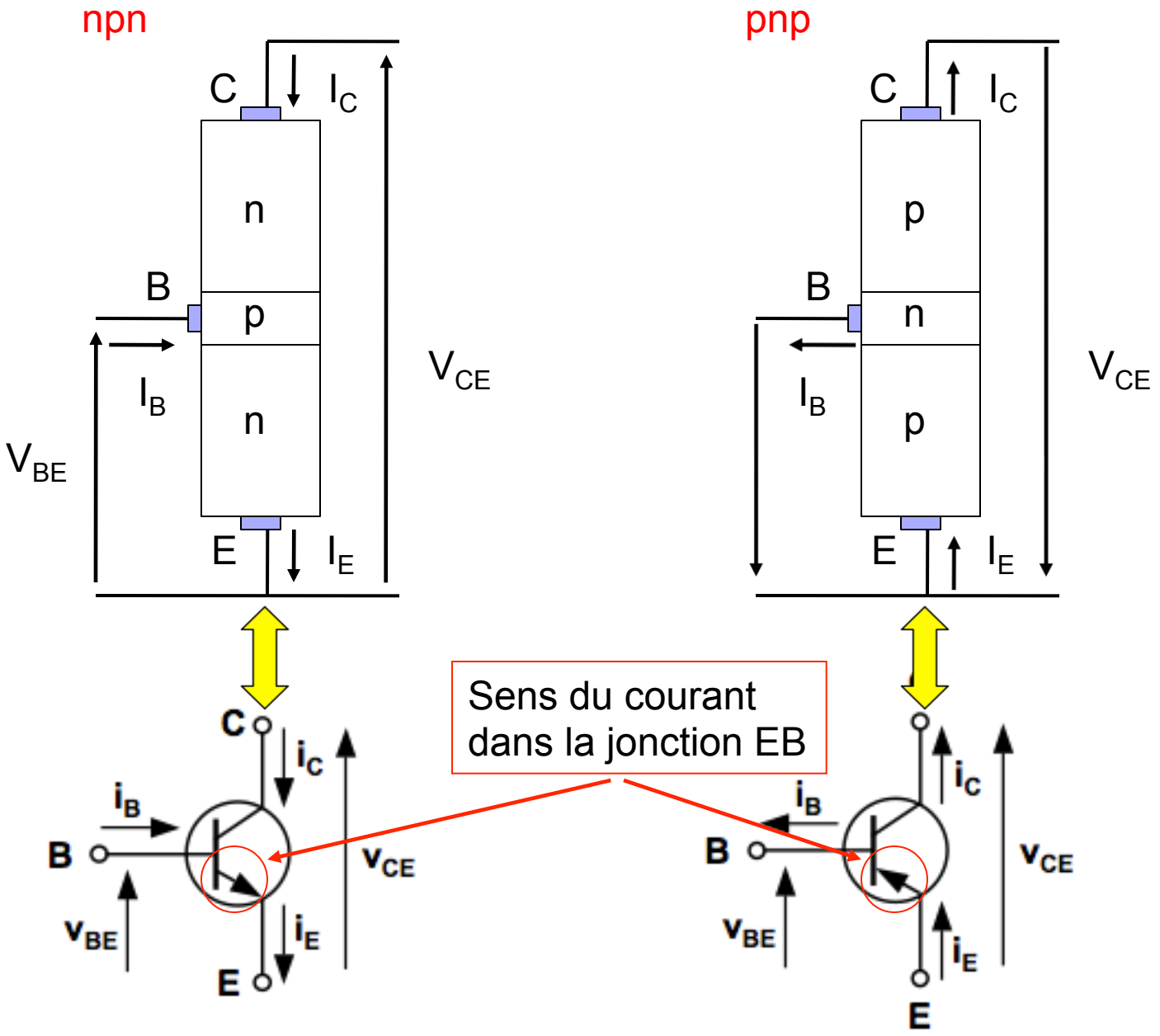
Exemple d'utilisation

- Un transistor utilisé comme interrupteur dans une alarme:
  - En ouvrant l'interrupteur S, la sonnerie se déclenche
  - Aussi longtemps que I_B entre dans la base, le courant entre C et E n'est pas gêné.
  - L'interruption de I_B fait que le transistor ouvre pratiquement le circuit et le courant ne peut que passer dans la sonnerie qui se déclenche.



Le fonctionnement du transistor en détail (I)

- Les 2 modèles:



Relations des courants

- β_{CC} = le rapport entre le courant I_C et le courant I_B: $\beta_{CC} = \frac{I_C}{I_B}$ (3.1)
  - c'est le gain direct du transistor
  - β_{CC} ~ 20 à 200
- α_{CC} = le rapport entre le courant I_C et le courant I_E: $\alpha_{CC} = \frac{I_C}{I_E}$ (3.2)
  - α_{CC} vaut typiquement 0,95 – 0,99
  - α_{CC} est toujours inférieur à 1 puisque I_B est petit mais non nul
- Relation entre β_{CC} et α_{CC} :

$$\frac{I_E}{I_C} = \frac{I_C}{I_C} + \frac{I_B}{I_C} = 1 + \frac{I_B}{I_C}$$

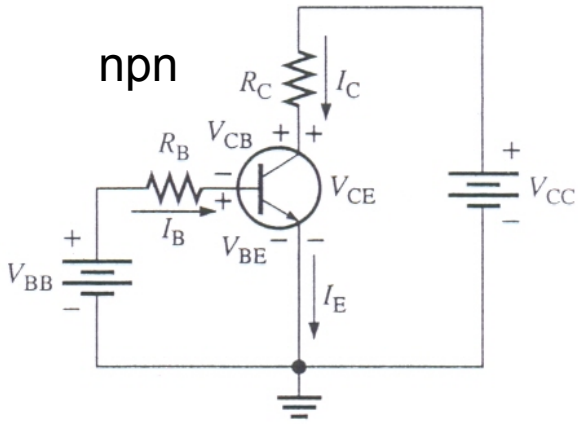
$$\frac{1}{\alpha_{CC}} = 1 + \frac{1}{\beta_{CC}}$$

$$\beta_{CC} = \frac{\alpha_{CC}}{1 - \alpha_{CC}} \qquad (3.3)$$

  - Cette équation montre que plus α_{CC} se rapproche de 1, plus la valeur de β_{CC} est élevée
  - Nous verrons ultérieurement qu'il existe aussi des valeurs α_{AC} et β_{AC} pour les courants alternatifs

Note: les notations CC et DC sont utilisées pour indiquer « courant continu ». Les notations CA ou AC pour « courant alternatif »

Analyse des courants et des tensions



- V_{BB} établit une polarisation directe de la jctn B-E; V_{CC} établit la polarisation inverse de jctn B-C
- sous polarisation directe, la jctn B-E fonctionne cô une diode : $V_{BE} \cong 0,7V$
- Note: E est à la masse → tension aux bornes de R_B : $V_{R_B} = V_{BB} - V_{BE}$ (3.4)
- Par la loi d'Ohm : $V_{R_B} = I_B R_B$

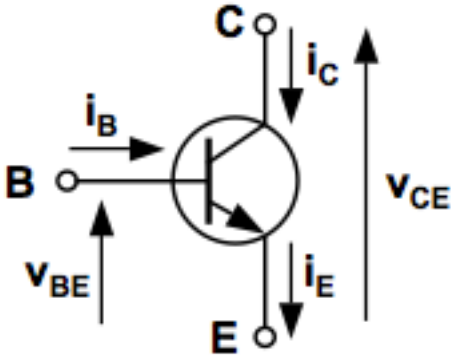
- → (3.4) devient : $I_B = \dfrac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$
- D'autre part: $V_{R_C} = I_C R_C$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \qquad \text{où} \qquad I_C = \beta_{CC} I_B$$

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

Courbes caractéristiques

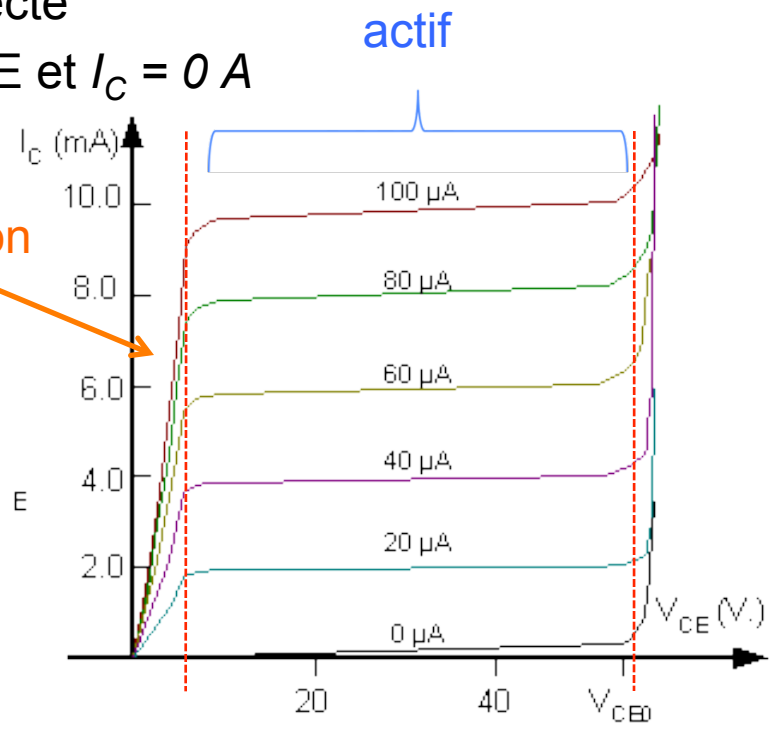
- 6 paramètres I_E, I_B, I_C, V_{BE}, V_{BC}, V_{EC}
- 2 *équations* $I_E + I_B + I_C = 0$ et $V_{BE} + V_{BC} + V_{EC} = 0$
- => 4 paramètres indépendants
- En général on considère le transistor comme un quadripole dont une des électrodes est commune à l'entrée et à la sortie.



- Trois montages sont donc à envisager:
  - Base commune, utilisé pour des applications à haute fréquence
  - Collecteur commun, utilisé en adaptation d'impédance
  - Emetteur commun, utilisé en amplification et le plus commun
- Dans ce dernier cas:
  - Les bornes d'entrées sont B et E => les grandeurs correspondantes sont I_B et V_{BE}
  - Les bornes de sorties sont C et E => les grandeurs correspondantes sont I_C et V_{CE}
- 2 courbes caractéristiques:
  - 1 pour l'entrée: $I_B = I_B (V_{BE})$
  - 1 pour la sortie: $I_C = I_C (V_{CE})$

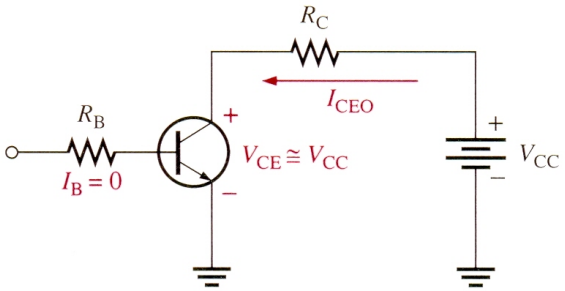
Courbes caractéristiques

- Reprenons le circuit de la page 10, mais avec V_{CC} et V_{BB} ajustables
- Si $V_{CC} = 0V$ et $V_{BB} \sim 0,7\ V$
  - Les jctns B-E et B-C sont en polarisation directe
  - Tout le courant de la base traverse la jctn B-E et $I_C = 0\ A$
- Si on augmente V_{CC}
  - V_{CE} augmente aussi
    - Le transistor est en mode de saturation
  - I_C augmente
  - Lorsque V_{CE} excède 0,7 V
    - la jnct B-C passe en polarisation inverse
    - Le transistor entre en mode actif (ou linéaire)
  - I_C se stabilise pendant que V_{CE} augmente
    - En réalité augmente I_C légèrement à cause de l'élargissement de la zone de dépeuplement → moins de recombinaisons électron-trou → β augmente légèrement.
  - Lorsque V_{CE} est très élevée, la jctn B-C passe en mode « claquage »
    - I_C augmente très rapidement
- On peut tracer une famille de courbes en utilisant différents I_B
  - Lorsque I_B = 0A, le transistor est en blocage (il n'y a qu'un courant de fuite)

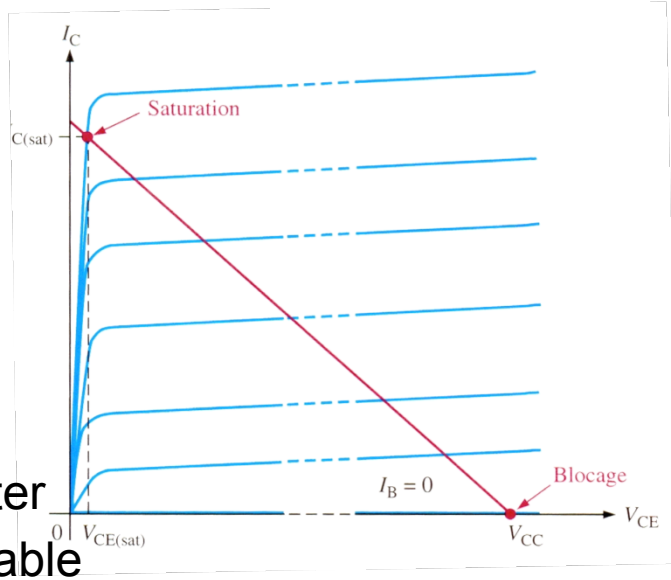


Courbes caractéristiques

- Le Blocage
  - Le transistor est en blocage quand $I_B = 0$
  - Il n'existe qu'un courant de fuite
  - Ce courant de fuite est causé par l'effet thermique
  - Ce courant de fuite est en général négligé
  - $V_{CE} \sim V_{CC}$
  - Les deux jctns sont en polarisation inverse

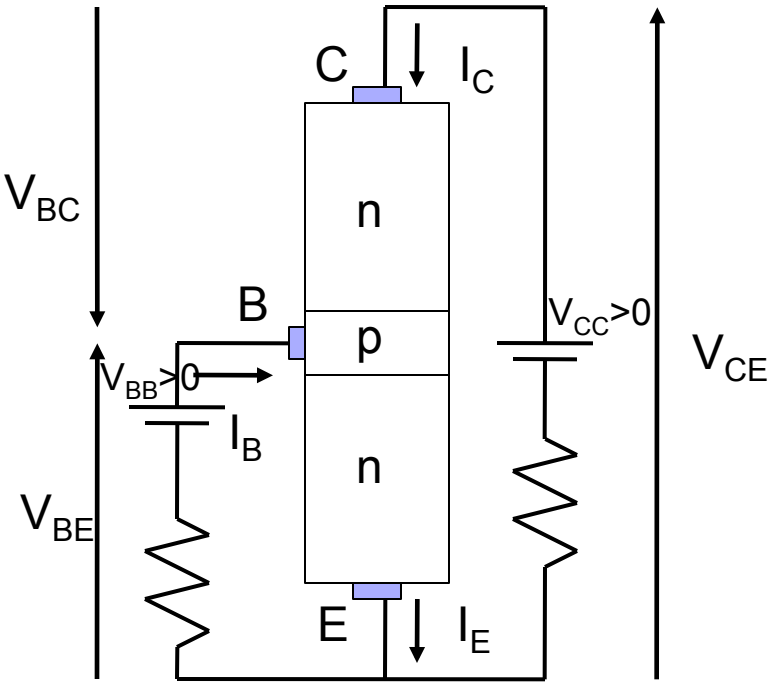


- La saturation
  - Lorsque jctn B-E passe en polarisation directe et que le courant $I_B \nearrow$, $I_C \nearrow$: $I_C = \beta_{CC} I_B$
  - $V_{CE} \searrow$ car la tension aux bornes de $R_C \nearrow$ aug
  - Lorsque V_{CE} atteint sa valeur se saturation ($V_{CE(sat)}$) la jctn B-C passe en pol. directe et I_C cesse d'augmenter
  - Au point de saturation $I_C = \beta_{CC} I_B$ n'est plus valable
  - $V_{CE(sat)}$ est de quelques dixièmes de volt pour le Si



- Droite de charge
  - Cette droite est dessinée entre les points de blocage idéal (où I_C=0 et $V_{CE} = V_{CC}$) et le point de saturation. La région active du transistor se situe le long de la droite. $V_{CE(sat)}$ est généralement fourni par le fabricant.

Résumé

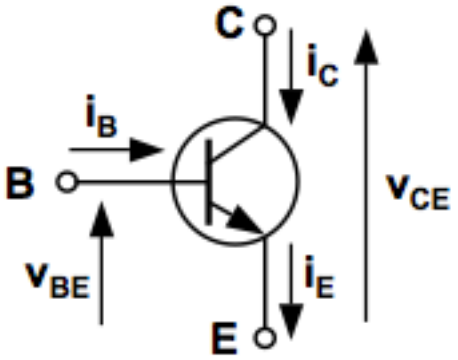


Loi des nœuds: $I_E = I_B + I_C$

mais $I_B \sim 0$ suffit pour faire passer le courant de C vers E => $I_E \sim I_C$

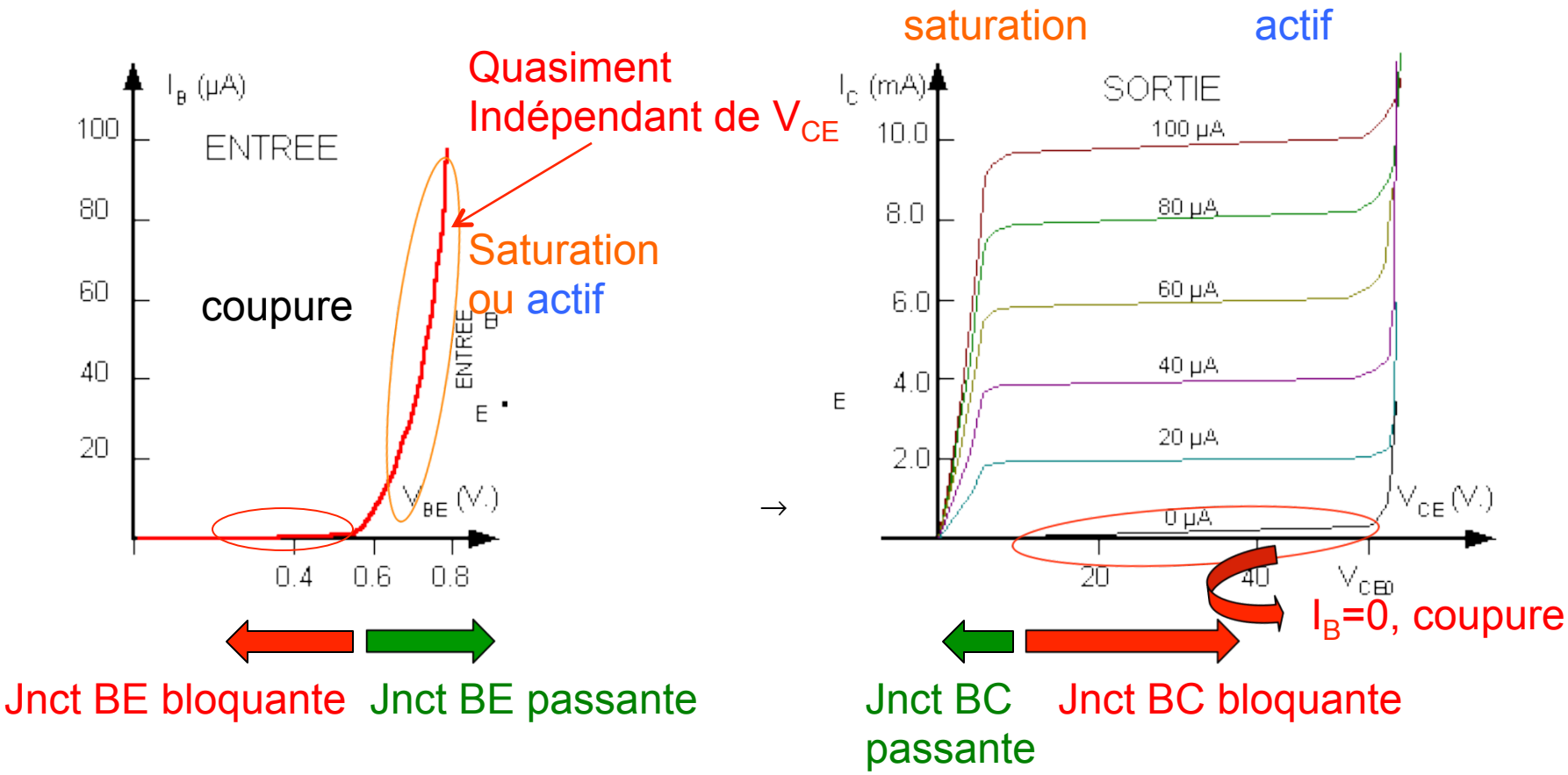
V_{BE}	Jonction BE	V_{BC}	Jonction BC	Régime BJT	
$<V_0$	bloquante			blocage	Pas de courant
$\sim V_0$	passante	$\sim V_0$	passante	saturation	$V_{CE}\sim 0$
$\sim V_0$	passante	$<V_0$	bloquante	actif	$V_{CE}>0$

Courbes caractéristiques



- En émetteur commun, il y a une 2nde courbe caractéristique, pour l'entrée: $I_B = I_B (V_{BE})$
- Dès que $V_{BE} > 0,7$ V, la jctn B-E est polarisé en sens direct et $I_B \neq 0$.
- Lorsque $V_{BE} < 0,7$ V, : $I_B = 0$ et le transistor est bloqué
- La courbe caractéristique est celle d'une diode.

Résumé



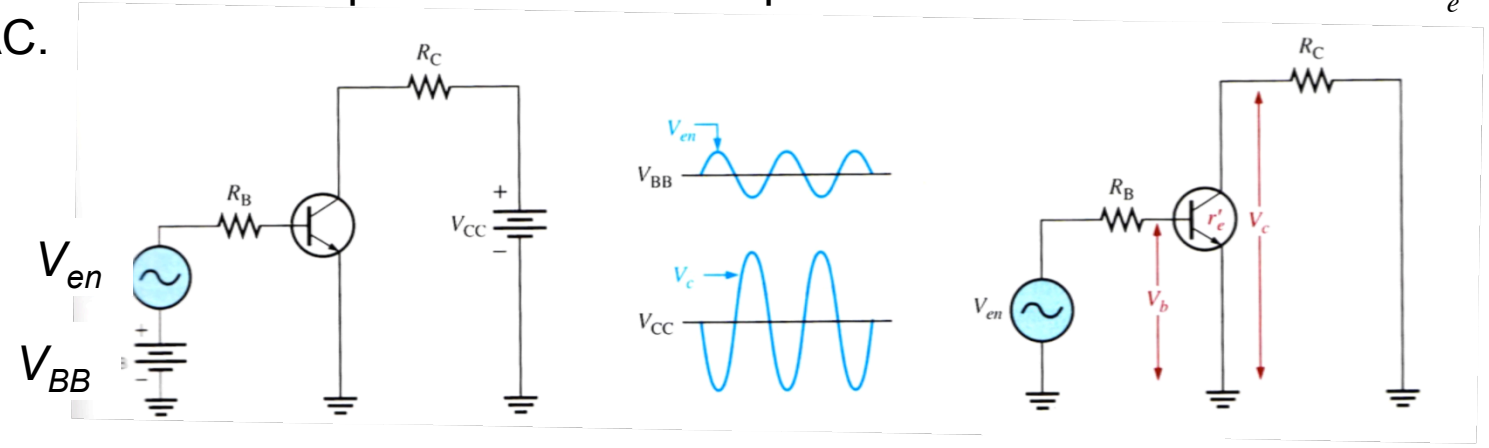
- I_B (V_{BE}) a la forme d'un caractéristique d'une diode; V_{CE} a, ici, très peu d'influence, sauf s'il est très petit.
- Si V_{CE} ~ 0,25V et V_{BE}~0,65V => V_{BC}~ -0.4 V → Jnct BC polarisée en dir.
- Si V_{CE} est grand, comme Jnct BC polarisée en inverse => décharges
- Entre, lorsque V_{CE}↗, la zone de recombinaison ↘ et I_C ↗ linéairement

Notations

- Comme les circuits d'amplificateurs possèdent des valeurs DC et des valeurs AC, voici un rappel des conventions d'écriture:
  - Valeurs continues (DC)
    - V_{AB} , V_{BC} : tension mesurée entre les bornes en indices
    - V_A , V_B : tension mesurée au point en indice par rapport à la masse
    - I_A , I_B : courant continu
  - Valeurs alternatives
    - V_{ab} , V_{bc} : tension (C-C, max ou efficace) mesurées entre les bornes en indices
    - V_a , V_b : tension (C-C, max ou efficace) au point en indice par rapport à la masse
    - I_a , I_b : courant (C-C, max ou efficace)
    - Les lettres minuscules (v_{ab} , i_a) représentent les valeurs instantanées
- Les résistances
  - Les résistances peuvent également avoir des valeurs différentes entre le circuit DC et le circuit AC, à cause de la présence de capacités (par exemple).
    - R_C indiquera la valeur DC et R_c la valeur AC
  - *r'* est utilisé pour les résistances internes du transistor

Amplification avec le transistor

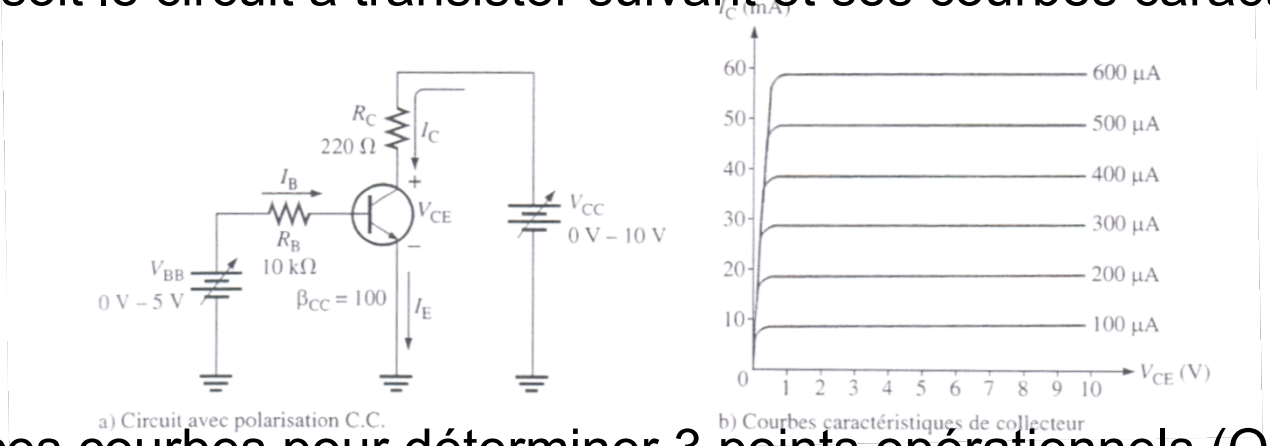
- Le transistor amplifie le courant : $\beta_{CC} = \frac{I_C}{I_B}$
- Pour un transistor le courant I_B est infime et nous pouvons dire que: $I_C = I_E$
- Dans la figure, le circuit de droite est le circuit alternatif équivalent du circuit de gauche:
  - Idéalement les sources de polarisation DC se comportent comme des courts-circuits par rapport à la tension AC;
  - La Jnct B-E sous polarisation directe présente une faible résistance r'_e au signal AC.



- A la base sont connectées en série une source de tension DC de polarisation V_{BB} et une source de tension AC V_{en}.
- La tension AC d'entrée produit un courant AC à la base qui provoque une augmentation importante de courant AC au collecteur. Ce courant collecteur produit une tension aux bornes de R_C qui est une version amplifiée et inversée de la tension AC d'entrée

Polarisation des transistors

- Pour fonctionner le transistor doit être alimenté. Un point opérationnel DC doit donc être défini pour un fonctionnement linéaire.
- Si le point opérationnel (appelé point Q) n'est pas bien choisi, le transistor peut passer en saturation / blocage → distorsion du signal de sortie
- Exemple: soit le circuit à transistor suivant et ses courbes caractéristiques

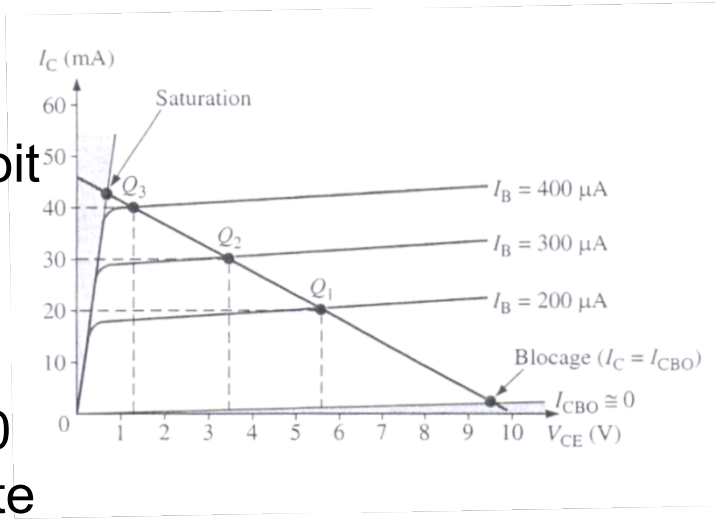


a) Circuit avec polarisation C.C. b) Courbes caractéristiques de collecteur

- Utilisons ces courbes pour déterminer 3 points opérationnels (Q_1,Q_2,Q_3)
  - Q_1 : V_{BB} est ajusté pour que I_B=200µA
    - I_B = 200µA → I_C = 20mA ($I_C = \beta_{CC} I_B$)
    - $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$ = 10 V – 20 mA x 220 Ω = 5,6 V
    - → Q_1 = (5,6 V; 20 mA)
  - Q_2 : V_{BB} est augmenté pour que I_B=300µA et I_C = 30mA
    - V_{CE} = 3,4 V
  - Q_3 : V_{BB} est augmenté pour que I_B=400µA et I_C = 40mA
    - V_{CE} = 1,2 V

Polarisation (suite)

- A mesure que la tension V_{BB} est augmentée ou diminuée, le point Q se déplace le long d'une droite, appelée droite de charge DC
- Cette droite intercepte l'axe *OX* à V_{CE} ~10 V, soit quand $V_{CE} \rightarrow V_{CC}$: point de blocage; I_B et I_C = 0 idéalement
- La droite intercepte l'axe *OY* à I_C ~ 45,5 mA. C'est le point de saturation. Idéalement V_{CE} = 0 et I_C est max et vaut V_{CC} / R_C. Cependant il reste un faible tension $V_{CE(sat)}$ et $I_{C(sat)}$ < 45,5 mA
- Selon les lois de Kirchhoff appliquées à la boucle du collecteur:



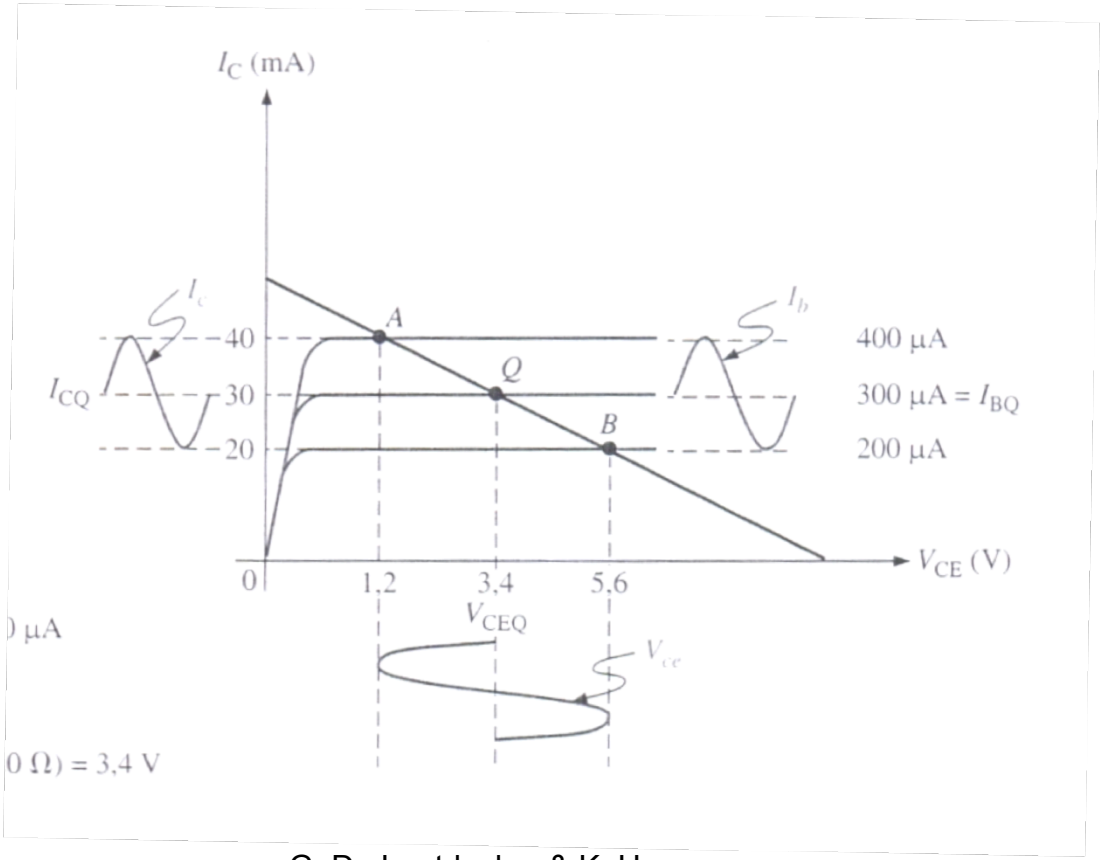
$$V_{CC} - I_C R_C - V_{CE} = 0 \qquad (3.5)$$

$$I_C = -\left(\frac{1}{R_C}\right) V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C} \qquad (3.6)$$

Ceci est l'équation de la droite où $-1/R_C$ est la pente et V_{CC} / R_C est l'ordonnée à l'origine

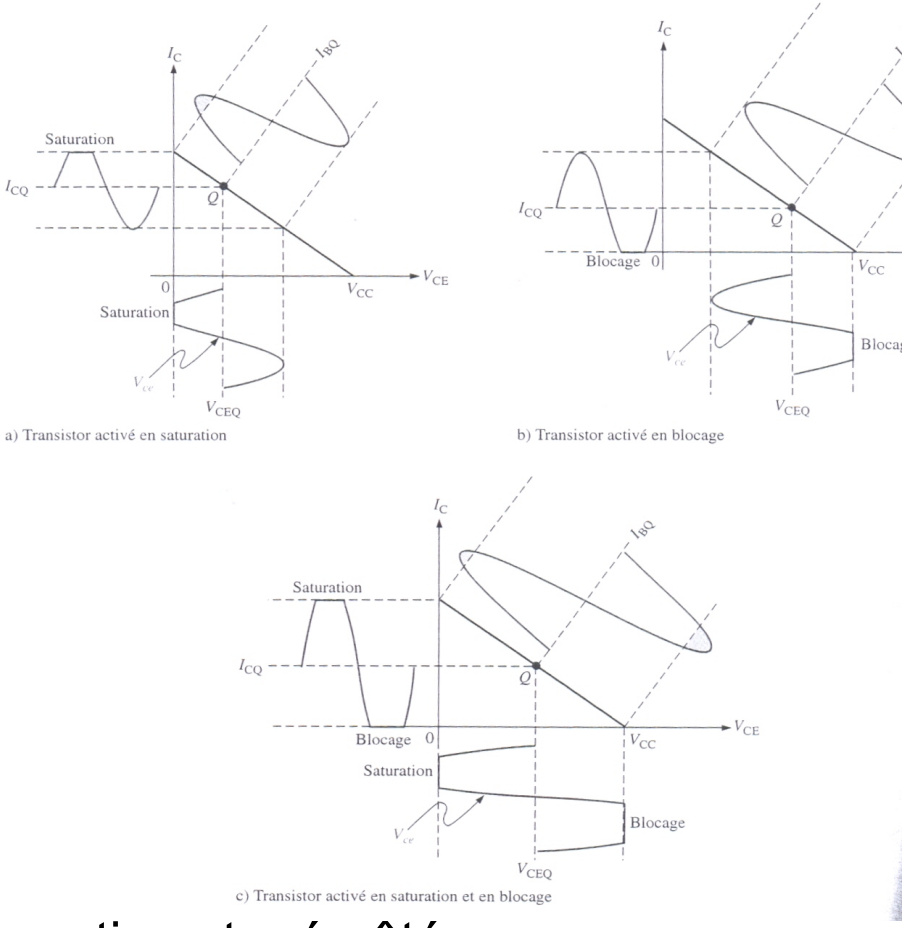
Opération linéaire

- La région de la droite située entre le point de blocage et de saturation est appelée *région linéaire*.
- Idéalement dans cette région, le signal de sortie est une reproduction linéaire de l'entrée
- La figure illustre un exemple d'utilisation du transistor avec une tension sinusoïdale superposée à la tension DC V_{BB}:



Distorsion

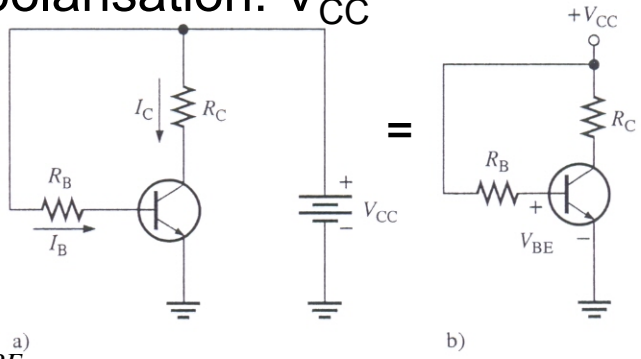
- Selon la position du point opération et/ou si le signal sinusoïdal d'entrée est trop grand, le transistor atteint la région de saturation, de blocage, ou les deux:



- On dit que le signal de sortie est « écrêté »
- Pour éviter cela on travaille typiquement avec :
  - Point *Q* au milieu de la droite
  - $0{,}05\ V_{CC} < V_{CE(min)}$ et $V_{CE(max)} < 0{,}95\ V_{CC}$

Polarisation par la base

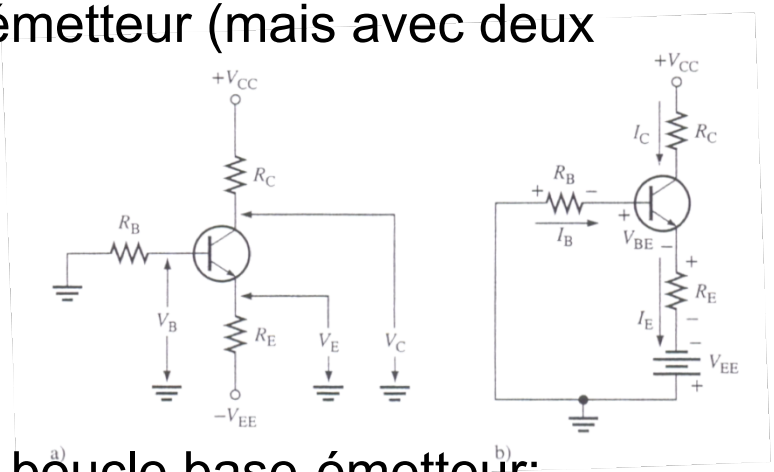
- Il est plus pratique de n'utiliser qu'une source de polarisation: V_{CC}
- Exemple de circuit:



- Fonctionnant dans son régime linéaire: $I_B = \dfrac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$
- En utilisant $I_C = \beta_{CC} I_B$ on obtient: $I_C = \beta_{CC}\left(\dfrac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}\right)$ (3.6)
- D'autre part on a que $V_{CC} - I_C R_C - V_{CE} = 0$ → $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$
- L'équation (3.6) illustre la dépendance de I_C sur le gain β_{CC}
  - Une variation du gain cause une variation de I_C et de V_{CE}, déplaçant ainsi le pt *Q*
  - β_{CC} varie avec la température, avec I_C , ainsi que d'un composant à l'autre
    - → Instable et résultats non reproductibles si on remplace un composant…

Polarisation par l'émetteur

- Pour plus de stabilité, une polarisation par l'émetteur (mais avec deux sources de tensions) est préférable:



- En appliquant la loi de Kirchhoff autour de la boucle base-émetteur:

$$V_{EE} - I_B R_B - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

$$\Rightarrow V_{EE} = I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E \qquad (3.7)$$

- Puisque $I_C \cong I_E$ et $I_C = \beta_{CC} I_B$ alors $I_B \cong \dfrac{I_E}{\beta_{CC}}$

- En substituant I_B dans (3.7) et en regroupant et isolant les termes en I_E :

$$I_C \cong I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E + R_B / \beta_{CC}} \qquad (3.8)$$

- Les tensions V_E, V_B et V_C sont obtenues à partir des lois de Kirchhoff:

$$V_E = -V_{EE} + I_E R_E \qquad V_B = V_E + V_{BE} \qquad V_C = V_{CC} - I_C R_C \qquad (3.9)$$

Stabilité

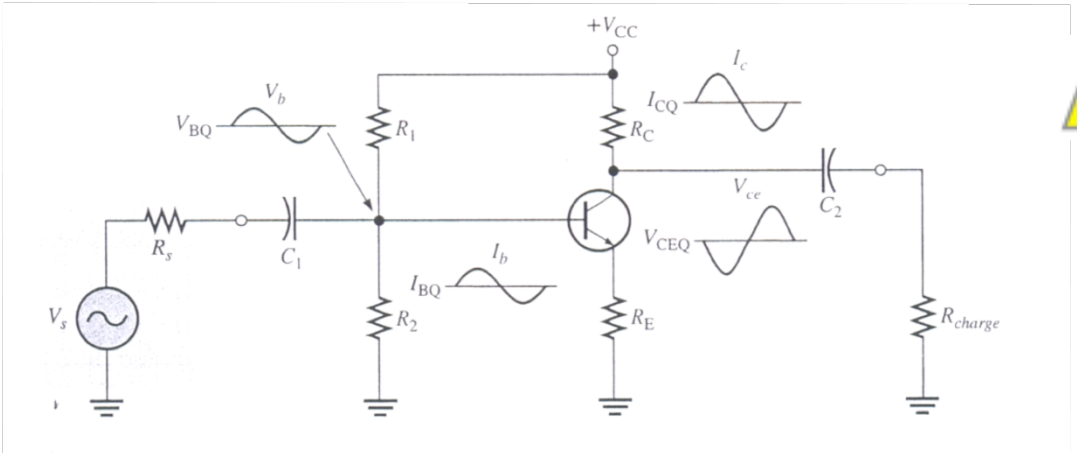
- L'équation (3.8) montre la dépendance de I_E en V_{BE} et β_{CC}
- Si $R_E \gg R_B / \beta_{CC}$ alors: $I_E \cong \dfrac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E}$
- D'autre part si V_{EE} >> V_{BE} alors: $I_E \cong \dfrac{V_{EE}}{R_E}$

→ I_E est essentiellement indépendant de V_{BE} et de β_{CC}

→ Le point Q est stable

Fonctionnement

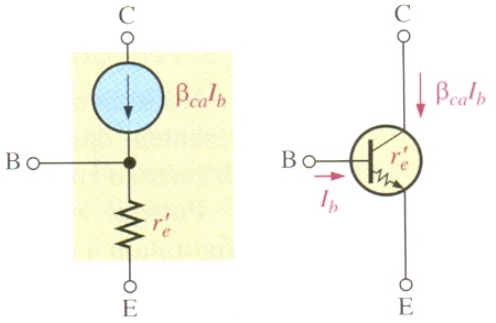
- Le but de la polarisation est d'établir un point de fonctionnement autour duquel des variations en tension et en courant peuvent survenir suite à la superposition d'un signal alternatif (AC).
- Le circuit illustre un transistor polarisé par diviseur de tension avec une source sinusoïdale couplée à la base par C_1. La charge du circuit est couplée au collecteur par C_2.
- C_1 et C_2 bloquent les courants continus et empêchent R_s et R_{charge} de modifier le point de fonctionnement
- Idéalement C_1 et C_2 se comportent comme des courts-circuits pour les courants AC.
- La tension de la source sinusoïdale fait osciller la tension de base autour du niveau de polarisation DC. Ainsi les variations de I_B provoquent des variations plus grandes de I_C . Notez le déphasage de 180°



Le circuit AC équivalent a $R_{charge} \parallel R_C$
→ affecte la *droite de charge*
→ *(cf. annexe 2)*

Circuits équivalents à paramètres *r*

- Une fois le point de fonctionnement établi, il est parfois utile de représenter le transistor du point de vue des courants alternatifs:



- Le transistor peut être vu comme ayant une résistance r'_b à la base, une résistance r'_e entre la base et l'émetteur et une source de courant $\beta_{ca} I_b$.* Habituellement une résistance r'_c de plusieurs centaines de kΩ en parallèle à la source de courant est traitée comme un circuit ouvert; r'_b est généralement minime et peut être négligée. Elles ne sont donc pas représentées.
- L'analyse détaillée du fonctionnement des transistors permet de montrer que:

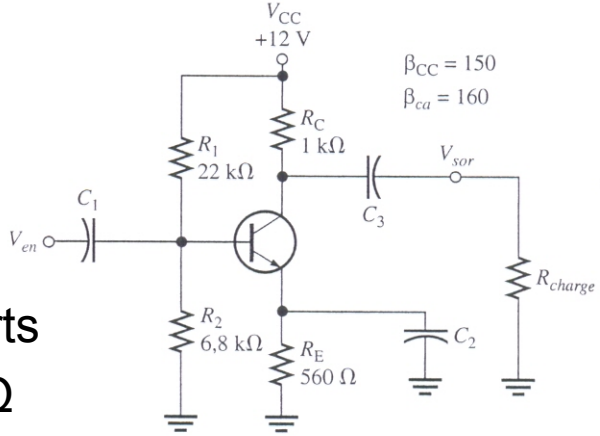
$$r'_e \sim 25\text{mV} / I_E \qquad (3.11)$$

  - La démonstration de Eq. 3.11 n'est pas vue dans le cadre de ce cours

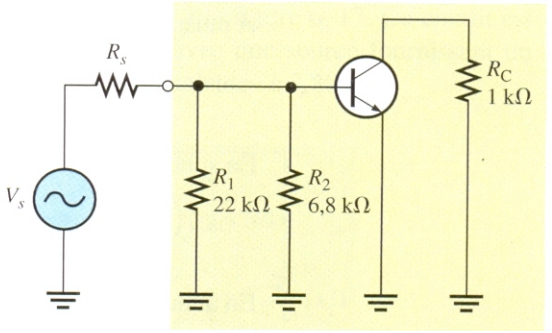
* β est noté β_{ac}, pour le différencier de β_{CC}

Amplificateurs à émetteur commun

- Voyons à présent l'étude complète d'un amplificateur à émetteur commun polarisé par diviseur de tension.

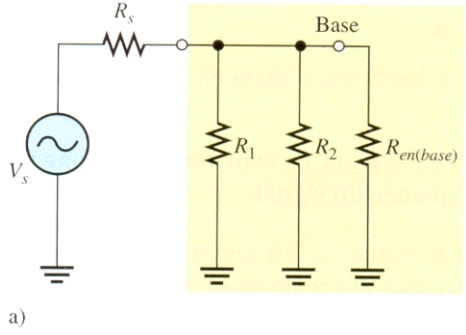


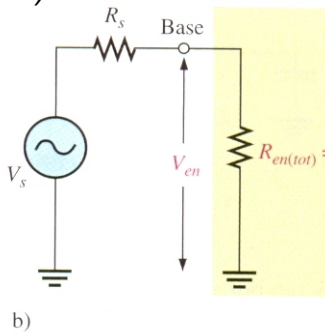
- Analyse DC:
  - On remplace les condensateurs par des circuits ouverts
  - Cf. Annexe 1: $R_{EN(base)} = \beta_{CC}\, R_E = 150 \times 560\ \Omega = 84\ k\Omega$
  - $R_{EN(base)} >> R_2$ → peut être négligée car en ||
  - → $V_B = (R_2 / R_1 + R_2)\, V_{CC} = 2{,}83\ V$
  - → $V_E = V_B - V_{BE} = 2{,}83 - 0{,}7 = 2{,}13\ V$
  - → $I_E = V_E / R_E = 2{,}13\ V / 560\ \Omega = 3{,}80\ mA$
  - → $V_C = V_{CC} - I_C R_C = 12\ V - 3{,}80\ mA \times 1k\Omega = 8{,}20\ V$
  - → $V_{CE} = V_C - V_E = 8{,}2\ V - 2{,}13\ V = 6{,}07\ V$
- Analyse AC:
  - Les condensateurs sont vus comme des courts-circuits
  - La source V_{CC} correspond à une masse en AC.
  - Si la source possède une résistance interne R_S , alors pour obtenir V_b , il faut tenir compte de R_S , les résistances de polarisation (R_1,R_2), autrement dit, l'impédance d'entrée (cf. page suivante)



Amplificateurs à émetteur commun

- D'après la figure, nous constatons que dans le circuit simplifié, V_s est divisée par R_s et $R_{en(tot)}$ où $R_{en(tot)} = R_1 \| R_2 \| R_{en(base)}$ où $R_{en(base)}$ est la résistance d'entrée de la base
  - Si on connaît $R_{en(tot)}$, alors on peut appliquer la formule du diviseur de tension:

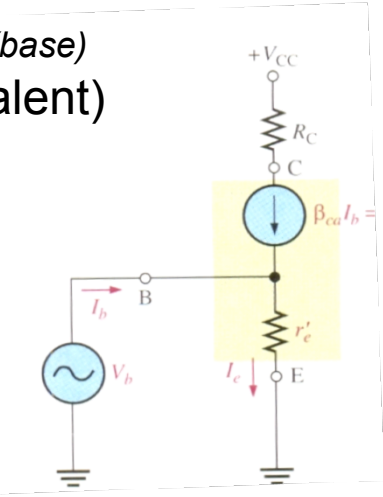




$$V_{en} = V_b = \frac{R_{en(tot)}}{(R_{en(tot)} + R_s)} V_s$$

Que vaut la résistance d'entrée $R_{en(base)}$? ⚠ $R_{en(base)} \neq R_{EN(base)}$

- Par définition: $R_{en(base)} = \frac{V_{en}}{I_{en}} = \frac{V_b}{I_b}$ et $V_b = I_e r'_e$ (cfr. Schéma équivalent)
- D'autre part, comme $I_e \cong I_c$, $I_b \cong \frac{I_e}{\beta_{ac}}$
- → $R_{en(base)} = \frac{V_b}{I_b} = \frac{I_e r'_e}{I_e / \beta_{ac}}$
- → $R_{en(base)} = \beta_{ac} r'_e$ (à comparer avec $R_{EN(base)} = \beta_{CC} R_E$ en DC)
- → $R_{en(tot)} = R_1 \| R_2 \| R_{en(base)}$



- Que vaut la résistance de sortie R_{sor} ?
  - $R_{sor} = R_C \| r'_c$ mais r'c est généralement >> R_C → $R_{sor} \cong R_C$

Gain en tension de l'amplificateur à émetteur commun

- Par définition: $A_v = \frac{V_{sor}}{V_{en}} = \frac{V_c}{V_b}$
- Or $V_c = \alpha_{ac} I_e R_C$ et $V_b = I_e r'_e$ → $A_v = \frac{R_C}{r'_e}$

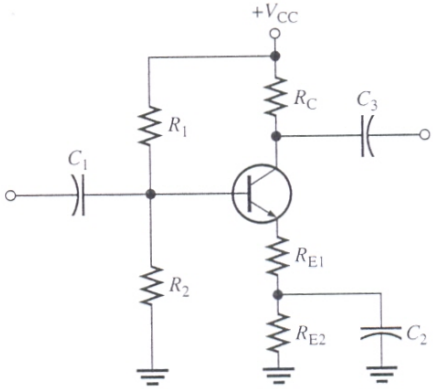
- Notez qu'en présence de R_S, il y a une chute de potentiel entre la source et la base. Le rapport V_b/V_S est appelé « atténuation ». La gain total A'_v du circuit est le produit de A_v et de l'atténuation.
- Effet du condensateur C_2:
  - si on retire le condensateur de dérivation C_2, l'émetteur n'est plus à la masse du point de vue AC. R_E est alors vue par le courant AC et s'ajoute donc à r'_e :

$$A_v = \frac{R_C}{r'_e + R_E}$$

  - Le gain est ainsi diminué
  - => avec un condensateur de dérivation à l'émetteur, le gain est maximal
- Effet de la charge (R_{charge})
  - En AC, R_{charge} est en || avec R_C => $R_c = \frac{R_C R_{charge}}{R_C + R_{charge}}$ => $A_v = \frac{R_c}{r'_e}$
  - => si R_c << R_C alors la gain diminue.
  - => si R_{charge} >> R_C alors R_{charge} n'a que très peu d'effet sur le gain

Stabilité du gain de l'amplificateur à émetteur commun

- Comme $A_v = \frac{R_c}{r'_e}$, le gain en tension dépend de I_E (via r'_e, cfr Eq. 3.11) qui varie fortement avec la température
- Comme vu page précédente, sans C_2, si $R_E >> r'_e$, alors le gain dépendra faiblement de la température mais le gain est réduit
- Pour stabiliser le gain sans le réduire on procède à une dérivation partielle autour de R_E :



- Dans ce cas R_E est formée de deux résistances, R_{E1} et R_{E2} . La dérivation est placée uniquement autour de R_{E2} . Les deux résistances affectent la polarisation DC et seul R_{E1} affecte le gain en tension:

$$A_v = \frac{R_c}{r'_e + R_{E1}}$$

- En prenant $R_{E1} >> r'_e$, on minimisera l'effet de r'_e.
- Notons encore que $R_{en(base)}$ est alors modifiée: $R_{en(base)} = \beta_{ac}(r'_e + R_{E1})$

Gain en courant de l'amplificateur à émetteur commun

- Par définition le gain en courant = $\beta_{ac} = \frac{I_c}{I_b}$
- Le gain total de l'amplificateur est : $A_i = \frac{I_c}{I_s}$, où I_S est le courant total sortant de la source dont une partie entre dans la base et une partie entre dans le circuit de polarisation (R_1 || R_2)
- Le courant total du signal produit par la source est: $I_S = \frac{V_S}{R_{en(tot)} + R_S}$

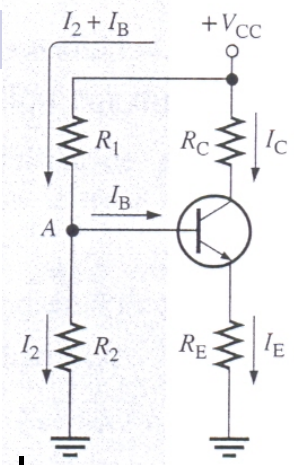
- Pour finir, le gain en puissance A_p est défini comme le produit du gain en tension total et du gain en courant total:

$$A_p = A_i A'_v$$

ANNEXE 1: POLARISATION PAR DIVISEUR DE TENSION

Polarisation par diviseur de tension

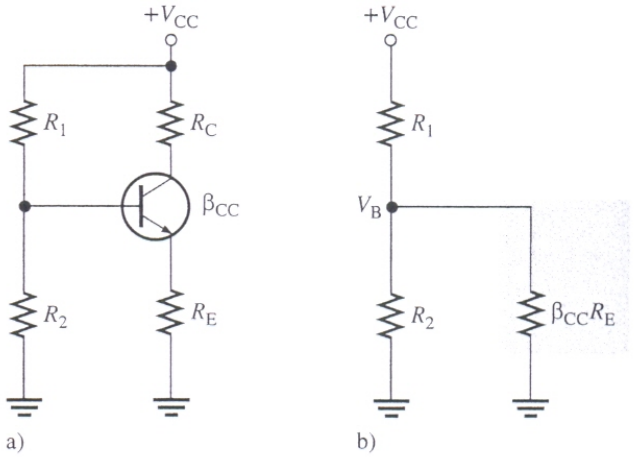
- Un diviseur de tension formé des résistances R_1 et R_2 fournit une tension de polarisation à la base:



- Au point *A*, 2 chemins permettent le passage du courant vers la masse:
  - Via R_2 ou à travers la jonction B-E
- Si $I_B << I_2$, alors le circuit peut être vu comme un diviseur de tension
- Par contre si I_B n'est pas négligeable, alors on doit tenir compte de la résistance d'entrée du transistor $R_{EN(base)}$. $R_{EN(base)}$ est parallèle à R_2 .
- Détermination de $R_{EN(base)}$: soit V_{EN} et I_{EN}, la tension à la base par rapport à la masse et le courant entrant dans la base ($I_{EN} = I_B$).
  - Par la loi d'Ohm: $R_{EN(base)} = V_{EN} / I_{EN}$
  - Loi de Kirchhoff : $V_{EN} = V_{BE} + I_E R_E$
  - Supposant $V_{BE} << I_E R_E$, $V_{EN} = I_E R_E$
  - Or $I_E \sim I_C = \beta_{CC} I_B \rightarrow V_{EN} \sim \beta_{CC} I_B R_E$
  - $R_{EN(base)} = V_{EN} / I_{EN} = V_{EN} / I_B \sim \beta_{CC} I_B R_E / I_B$
  - $R_{EN(base)} = \beta_{CC} R_E$ (typiquement $\beta_{CC} \sim 100$) (3.10)

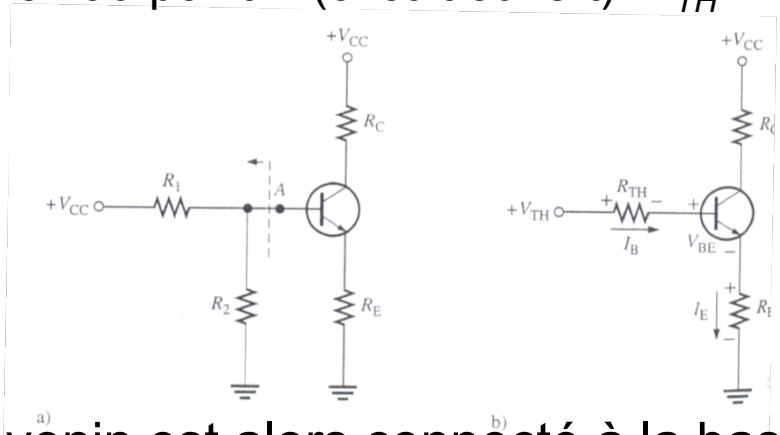
Analyse du circuit de polarisation

- Si on ne néglige pas I_B , la base est connectée à la masse via deux résistances en parallèle : R_2 et $R_{EN(base)}$. $R_{éq} = (R_2\ R_{EN(base)}) / (R_2 + R_{EN(base)})$
- Si $R_2 << R_{EN(base)}$, $R_{éq} \sim R_2$
- Le même courant traverse R_1 et $R_{éq}$ → $V_B = (R_{éq} / R_1 + R_{éq})\ V_{CC}$
- → $V_B = (R_2 / R_1 + R_2)\ V_{CC}$
- → $V_E = V_B - V_{BE}$
- → $I_E = V_E / R_E$ et $I_C \sim I_E$
- → $V_C = V_{CC} - I_C R_C$
- → $V_{CE} = V_C - V_E$
- Loi de Kirchhoff : $V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E - V_{CE} = 0$
- *Utilisant* $I_C \sim I_E$: $V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C - R_E)$



Analyse avec utilisation du Théorème de Thévenin

- Pour ce faire on redessine le circuit
- Th. de Thévenin: on peut remplacer la partie à gauche de *A* par un générateur de tension V_{TH} et une résistance en série R_{TH}:
  - Pour obtenir R_{TH} , on court-circuite V_{CC} : $R_{TH} = (R_1\ R_2) / (R_1 + R_2)$
  - V_{TH} est la tension au point A (circuit ouvert): $V_{TH} = V_{CC}\, R_2 / (R_1 + R_2)$



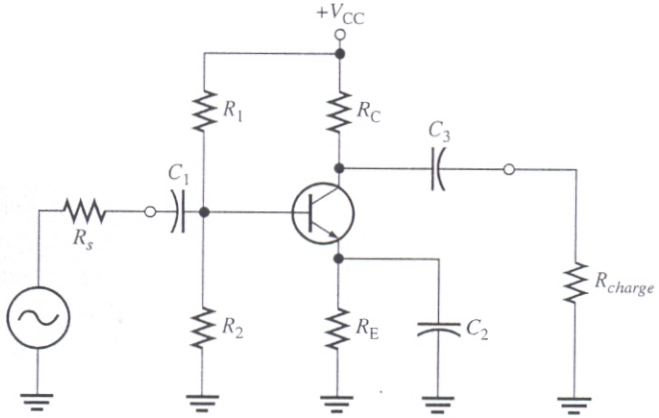
- L'équivalent Thévenin est alors connecté à la base. Par les lois de Kirchhoff:
  - $V_{TH} = I_B R_{TH} + V_{BE} + I_E R_E$
  - Comme $I_B = I_E / \beta_{CC}$: $V_{TH} = I_E (R_E + R_{TH} / \beta_{CC}) + V_{BE}$
  - $I_E = (V_{TH} - V_{BE}) / (R_E + R_{TH} / \beta_{CC})$
  - Si $R_E >> R_{TH} / \beta_{CC}$, alors $I_E \sim (V_{TH} - V_{BE}) / R_E$
- La dernière équation illustre que I_E est essentiellement indépendant de β_{CC} .

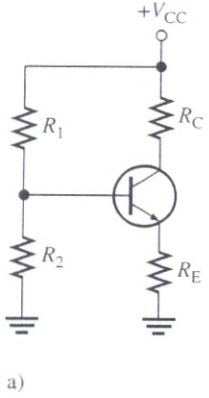
C'est le cas en réalité si R_E est au moins 10x plus élevé que R_{TH} divisé par le gain minimal. Ce circuit de polarisation est largement utilisé car il fournit une bonne stabilité à partir d'une source de tension

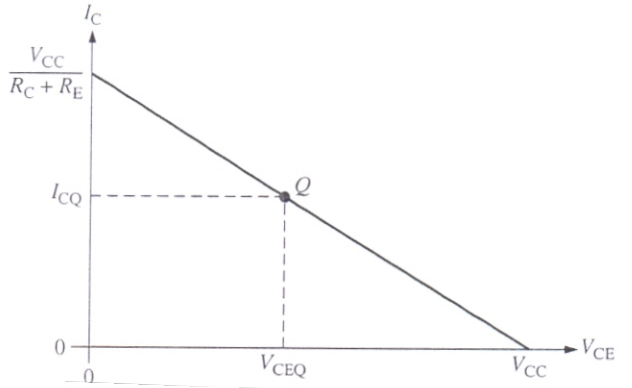
ANNEXE 2: DROITE DE CHARGE AC

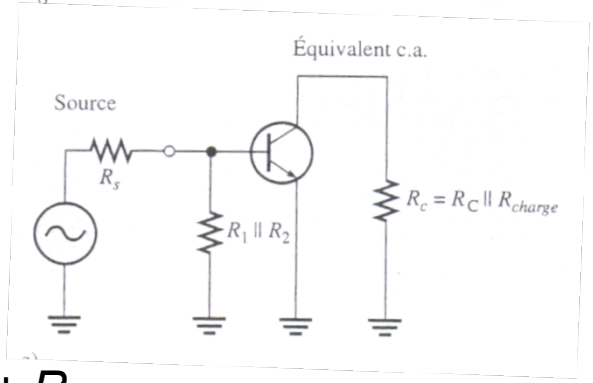
Droite de charge AC

- Pour établir la droite de charge AC, nous utiliserons le cas du transistor utilisé comme amplificateur à émetteur commun dont le circuit est le même que celui de la page précédente mais avec un condensateur supplémentaire entre l'émetteur et la masse.





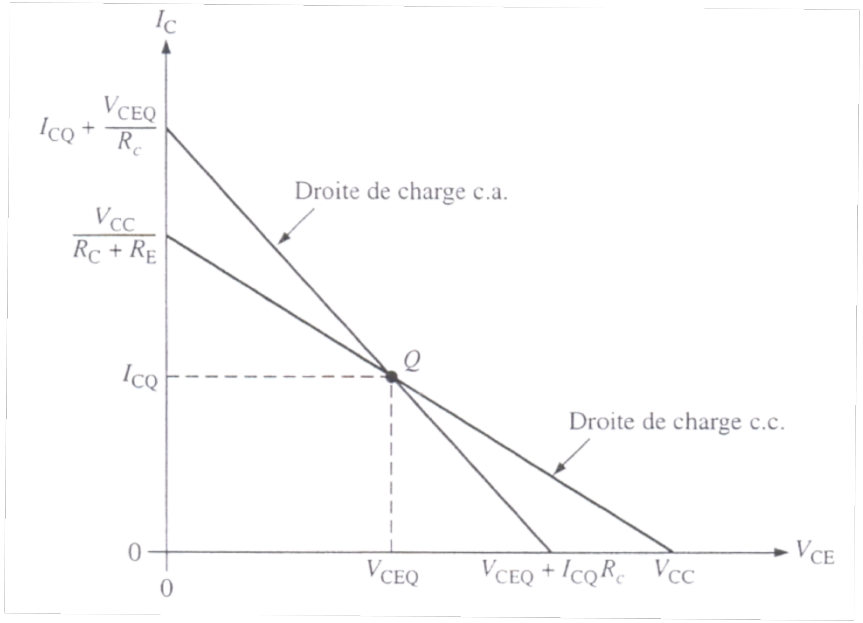




- Utilisant le circuit DC équivalent:
  - Saturation: $I_{C(stat)}$ tel que $V_{CE} \sim 0 \Rightarrow I_{C(stat)} = V_{CC} / R_C + R_E$
  - Blocage: $I_C \sim 0 \Rightarrow V_{CE(blocage)} \sim V_{CC}$
- Circuit AC équivalent diffère du circuit DC :
  - Résistance au collecteur est ≠ car R_{charge} est en || avec R_C (à cause de C_3)
  - Résistance à l'émetteur est nulle à cause de C_2

Droite de charge AC

- En partant du point *Q* DC vers le point de saturation, V_{CE} varie de V_{CEQ} à ~0;
  → $\Delta I_C = V_{CEQ} / R_c$ où $R_c = R_C \parallel R_{charge}$
- → $I_{c(stat)} = I_{CQ} + \Delta I_C$ soit $I_{CQ} + V_{CEQ} / R_c$
- D'autre part, en allant de *Q* au blocage où $I_C \sim 0$, $\Delta I_C \sim I_{CQ}$
  - $\Delta V_{CE} = \Delta I_C R_c = I_{CQ} R_c$
  - $V_{ce(blocage)} = V_{CEQ} + I_{CQ} R_c$
- Notez que le point *Q* n'est pas au centre de la droite AC



- Centre de la droite AC (V_{CEQ}, I_{CQ}) = $((V_{CEQ} + I_{CQ} R_c)/2, (I_{CQ} + V_{CEQ} / R_c)/2)$
- => $2V_{CEQ} = V_{CEQ} + I_{CQ} R_c$ => $V_{CEQ} = I_{CQ} R_c$
- => le point Q peut être déplacé approximativement au centre de la droite en ajustant R_E pour ne pas affecter la droite de charge AC

ANNEXE 3: CIRCUITS ÉQUIVALENTS HYBRIDES

Les circuits équivalents hybrides

- Comme nous l'avons vu page 32, il est parfois utile de représenter un transistor par un circuit équivalent. Une représentation est la représentation à paramètres *r*. Une autre est celle à paramètres hybrides ou paramètres *h*.
- La paramétrisation *h* est utilisée quand on veut connaître la réponse du transistor à certaines tensions ou certains courants appliqués.
- La paramétrisation *r* est plutôt une représentation des processus en cours dans le transistor.
- Dans le cas de la paramétrisation *h*, les paramètres sont dits hybrides car ils lient des tensions aux des courants et vice-versa.
- Prenant les courbes caractéristiques de la page 16, les courbes de sortie permettent de relier une variation i_c du courant de collecteur I_C à des variations du courant de base i_b et de la tension collecteur-émetteur v_{ce} :

$$i_c = h_{21e} i_b + h_{22e} v_{ce}$$

- Les paramètres *h* représentent des dérivées partielles. Le suffixe *e* indique que nous discutons d'un circuit en émetteur-commun.
- De même pour l'entrée, on peut écrire:

$$v_{be} = h_{11e} i_b + h_{12e} v_{ce}$$

Les paramètres *h*

- Les suffixes 1 et 2 indiquent respectivement l'entrée et la sortie. On réécrit souvent les deux équations précédentes sous forme matricielles:

$$v_1 = h_{11e} i_1 + h_{12e} v_2 \quad (3.12)$$
$$i_2 = h_{21e} i_1 + h_{22e} v_2 \quad (3.13)$$

où $v_1 = v_{be}, v_2 = v_{ce}$, $i_1 = i_b, i_2 = i_c$

- Signification physique
  - De l'Eq. 3.12, lorsque v_2=0, alors $h_{11e} = v_1/i_1$, autrement dit h_{11e} est *l'impédance d'entrée* quand la sortie est en court-circuit. On la note souvent h_{ie}. Sa valeur peut être déduite de l'inverse de la pente de la courbe caractéristique (~kΩ).
  - De même, $h_{12e} = v_1/v_2$, lorsque i_1=*0*, autrement dit h_{12e} est la variation de tension d'entrée nécessaire dans le cas d'une variation de tension de sortie pour garder le courant d'entrée constant. Comme la dépendance des caractéristiques de l'entrée est très faible par rapport à v_{ce}, h_{12e} est typiquement de 10^{-3} à 10^{-4}. On l'appelle *Rapport de rétroaction de tension*; il est noté h_{re}.
  - De l'Eq. 3.13, $h_{21e} = i_2/i_1$, lorsque v_2=*0*, autrement dit h_{21e} est le rapport entre le courant de sortie et le courant d'entrée lorsque la tension de sortie reste constante. Il est appelé *Gain en courant avant* et représente le facteur *β*. On le note h_{fe}.
  - Et $h_{22e} = i_2/v_2$, lorsque i_1=*0*, autrement dit h_{22e} est la variation de courant de sortie avec la tension de sortie lorsque le courant d'entrée est constant. C'est la pente des courbes caractéristiques de sortie. C'est la *Conductance de sortie* h_{oe} .

Circuit équivalent hybride de l'émetteur-commun

****FIGURE 60****

- Vérifions que ce circuit reflète bien les équations 3.12 et 3.13:
  - A l'entrée il y a une résistance h_{ie} en série avec une source de tension $h_{re}v_2$:
    - *Loi de Kirchhoff :* $v_1 - h_{re}v_2 = i_1 h_{ie}$
  - A la sortie il y a une source de courant $h_{fe}\, i_1$ en parallèle avec une résistance de $1/h_{oe}$:
    - *Le courant traversant* $1/h_{oe} = h_{fe}\, i_1 - i_2$
    - Ce courant vaut aussi : $-v_2 / (1/h_{oe})$
    - $-v_2 / (1/h_{oe}) = h_{fe}\, i_1 - i_2$
- Souvent on néglige h_{re} *et* h_{oe} , le circuit se simplifie: ****FIGURE 61****
  - v_1 provoque un courant i_1 égal à v_1 / h_{ie}
  - A la sortie le générateur crée un courant i_2 égal à $h_{fe}i_1$
  - Faisant le parallèle avec le circuit équivalent à paramètre *r*:
    - $h_{fe} = \beta_{ac}$
    - $h_{ie} \sim R_{en(base)} = \beta_{ac} r'_e$