

Le transistor bipolaire

P. Walther, B. Dutoit, T. Kluter

18 mars 2013

Table des matières

1	Introduction	1
2	Structure et fonctionnement d'un transistor	2
2.1	Structure du transistor bipolaire	2
2.2	Le fonctionnement des transistors	4
2.3	Tensions et courants du transistor	6
2.4	Domaine de fonctionnement du transistor	6
3	Montages de base des transistors	8
3.1	Le montage émetteur commun	8
3.2	Le montage base commune	9
3.3	Le montage collecteur commune	9
3.4	Caracteristiques des montages	9
4	Caractéristiques des transistors	11
4.1	La caractéristique d'entrée du transistor	11
4.2	La caractéristique de sortie du transistor	13
4.3	La caractéristique de transfert	14
4.4	La caractéristique de transfert inverse	15
4.5	Le graphique à quatre quadrants	16
5	Le transistor monté en amplificateur	19
5.1	La droite de charge	19
5.2	Stabilisation du point d'exploitation à l'aide d'une résistance de base	24
5.3	Stabilisation du point d'exploitation à l'aide d'un pont diviseur	24
5.4	Stabilisation thermique du point d'exploitation	25
5.5	La commande d'un transistor	29

1

Introduction

Le transistor (bipolaire) a été inventé par les messieurs Bardeen, Brattain et Shockley en 1948 dans les laboratoires de Bell, basé sur la théorie des diodes Schottky. Il s'agit d'une mise en série de trois couches semiconductrices. A l'époque, le germanium a été utilisé comme matériel semi-conducteur. Plus tard, le silicium a pris sa place dû à la stabilité thermique supérieure à celle de germanium et c'est le matériel semi-conducteur par excellence jusqu'à aujourd'hui. Le transistor a remplacé le tube électronique qui était utilisé autrefois comme élément amplificateur. Aujourd'hui le transistor est omniprésent. Le terme **transistor** est la contraction des termes anglais : **transfer** et **resistor**.

Les transistors sont utilisés pour l'amplification de signaux ainsi que comme commutateur. Les transistors peuvent être classés en deux classes principales :

- Les transistors bipolaires (Bipolar Junction Transistor, BJT)
- Les transistors à effet de champ (Field Effect Transistor, FET)

Chaque classe a des propriétés spécifiques qui sont exploitées de manière ciblée dans la pratique. Les transistors bipolaires sont beaucoup plus utilisés que les transistors à effet de champs comme élément discret (électronique discrète). Les transistors à effet de champ sont majoritairement utilisés dans les circuits intégrés digitaux. Mais les FET peuvent également être utilisés sous forme discrète pour des applications spéciales. Le but de ce chapitre est de donner un aperçu de la structure et du principe de fonctionnement des transistors bipolaires. Les transistors FET seront eux traités dans une autre manuscrit.

2

Structure et fonctionnement d'un transistor

But de ce chapitre :

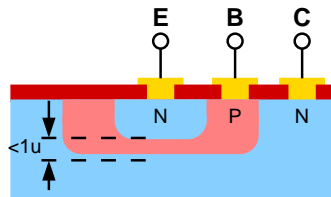
1. Comprendre le fonctionnement d'un transistor.
2. Connaître le montage d'un transistor.
3. Apprendre les caractéristiques les plus importantes d'un transistor.

Mots clés :

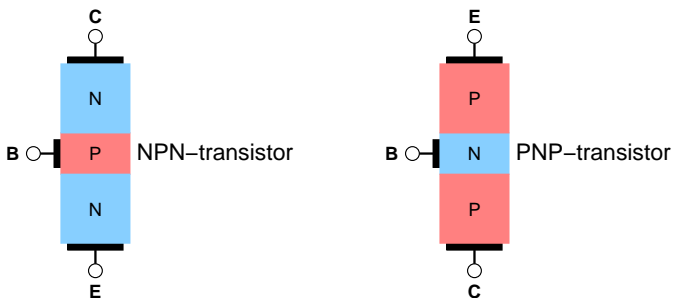
Transistor NPN et PNP.

2.1 Structure du transistor bipolaire

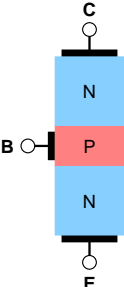
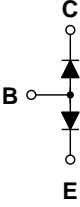
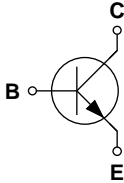
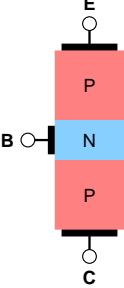
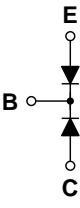
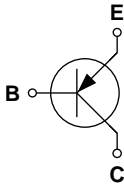
La structure d'un transistor bipolaire se présente comme suit :



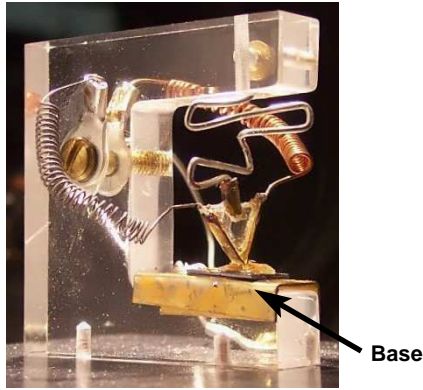
Et peut être schématiquement représenté comme suit :



Un transistor bipolaire consiste en une série de trois couches NPN ou PNP de matériel dopé semiconducteur. Dans le transistor en silicium de nos jours, la série NPN est la configuration la plus répandue. Le montage dont on parle possède deux diodes branchées en série. La zone du milieu doit être très mince (env. 1 μm). La tableau ci-dessous donne une vue d'ensemble de ces composants.

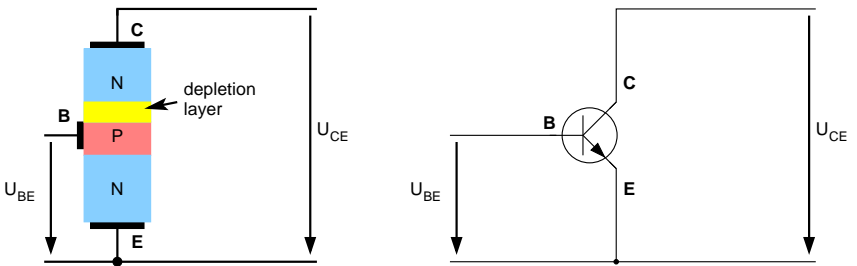
Type de transistor	Ordre des couches	Comparaison avec un circuit à diodes	Symbole
Transistor NPN			
Transistor PNP			

Les trois électrodes sont nommées collecteur **C**, base **B** et émetteur **E**. Le terme “base” a été choisi à l’époque parce que cette électrode servait comme fixation du montage du transistor. Le nom émetteur signifie émettre des porteurs de charges et collecteur signifie collecter des porteurs de charges. La base des montages des transistors modernes n’a plus rien à voir avec le montage ancien, mais le nom base est quand même resté.



2.2 Le fonctionnement des transistors

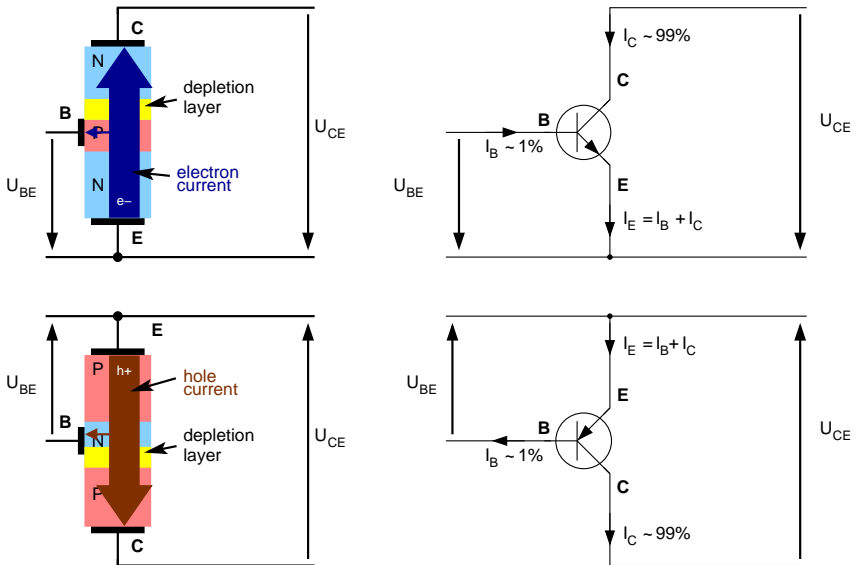
Dans son mode de fonctionnement normal, la diode base-émetteur du transistor est polarisée en sens direct et la diode collecteur-base est bloquée. En principe aucun courant ne pourrait passer par le transistor. Mais ici, la géométrie du montage joue un rôle important. L'épaisseur de la couche de la base mesure seulement env. $1\mu\text{m}$. Ainsi, les deux diodes ne sont pas indépendantes l'une de l'autre. Il peut être représenté schématiquement par le schéma ci-dessous :



Fonctionnement d'un transistor (cas d'un NPN).

La diode base-émetteur est polarisée en sens direct et un courant de base peut circuler. La diode collecteur-base est bloquée. Comme la couche de la base est

très mince, les porteurs de charges (pour le transistor NPN, les électrons, pour le transistor PNP les trous) provenant de l'émetteur peuvent pénétrer dans la zone de diffusion (*depletion layer*) entre le collecteur et la base. Ceux-ci sont attirés par le potentiel du collecteur et sont ainsi collectés. Il y a alors un courant collecteur. Ce courant de collecteur dépasse même de beaucoup l'intensité du courant de base, de sorte que la plupart des porteurs de charges passent par le collecteur et non par la base. La relation entre le courant de collecteur et le courant de base $\frac{I_C}{I_B}$ est autour de 100 pour des transistors courants. Ce facteur est appelée facteur d'amplification de courant.



Relations entre les courants d'un transistor.

S'il n'y a pas de courant de base (I_B), il n'y a pas non plus de porteurs de charges qui sont injectés de l'émetteur dans la base et alors il n'y a pas de courant de collecteur (I_C). On a donc :

$$\begin{cases} I_C = B \cdot I_B \\ I_E = I_C + I_B = (B + 1) \cdot I_B \end{cases} \Leftrightarrow B = \frac{I_C}{I_B} \quad (2.1)$$

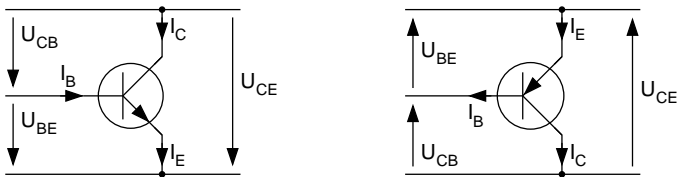
où B exprime le facteur d'amplification en courant continu.

On constatera également que :

- Dans un transistor, le courant ne peut s'écouler que dans une seule direction.
- Les courants de base, du collecteur et de l'émetteur ne peuvent varier qu'en intensité.

2.3 Tensions et courants du transistor

Les courants et tensions suivantes jouent un rôle important dans le transistor.



On a :

$$\begin{cases} U_{CE} = U_{CB} + U_{BE} \\ I_C = B \cdot I_B \\ I_E = I_C + I_B \end{cases} \quad (2.2)$$

Convention :

Flèche de tension :

$$\begin{array}{c} A \\ \downarrow \\ B \end{array} = U_{AB} = -U_{BA}$$

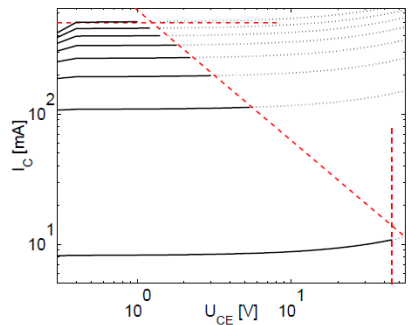
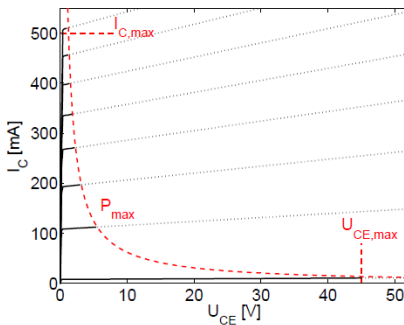
Définition : La tension (ou potentiel) mesurée au point A par rapport au point B. Les flèches de courant indiquent la direction du courant conventionnel (du pôle positif au pôle négatif dans le circuit externe de la source).

2.4 Domaine de fonctionnement du transistor

Le domaine de travail autorisé (SOA – *Safe Operating Area*) d'un transistor est défini par plusieurs limites. Ce sont essentiellement le courant collecteur

maximum $I_{CE,max}$, la perte de puissance maximale $P_{tot,max}$, et la tension maximale collecteur-émetteur $U_{CE,max}$.

Ces valeurs limites sont mentionnées dans les spécifications (Maximum Ratings, Limiting Values) et ne doivent en aucun cas être dépassées. Les figures ci-dessous montrent les limites pour le transistor BC 337 – $I_{CE,max} = 500\text{mA}$, $P_{tot,max} = 650\text{mW}$, et $U_{CE,max} = 45\text{V}$.



Questions de répétition :

1. Comment fonctionne le transistor et quel détail est très important pour l'effet transistor ?
2. Quels sont les différents types de transistors qui existent ?
3. Que signifie le rapport $\frac{I_C}{I_B}$?

3

Montages de base des transistors

But de ce chapitre :

- Connaître les montages de base possible avec un transistor.

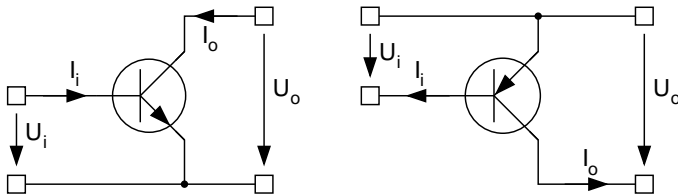
Mots clé :

Montage émetteur commun, montage base commune, montage collecteur commun.

Il y a différents circuits de base constitué de transistors : le montage émetteur commun, base commune et collecteur commun. Le nom du circuit indique quelle borne du transistor est connectée à la tension/la masse. Ces circuits sont présentés brièvement ci-dessous.

3.1 Le montage émetteur commun

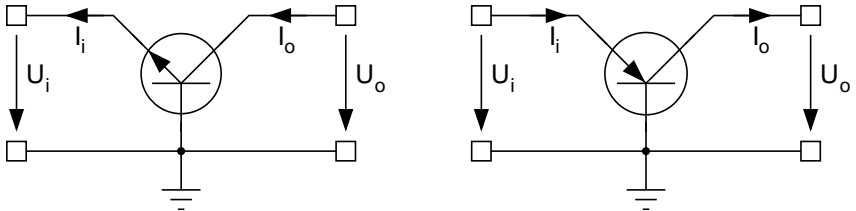
Le montage émetteur commun est le montage d'amplification le plus important dans la technique. L'émetteur est ici l'électrode de référence. La tension d'entrée (U_i) ainsi que la tension de sortie (U_o) se réfèrent à l'émetteur. La figure suivante montre la situation correspondante.



Le montage émetteur commun est utilisé pour des circuits d'amplification de signaux généraux, mais aussi comme commutateur. Ce montage permet l'amplification la plus élevée en tension. Certains circuits spéciaux seront discutés plus en détails plus loin.

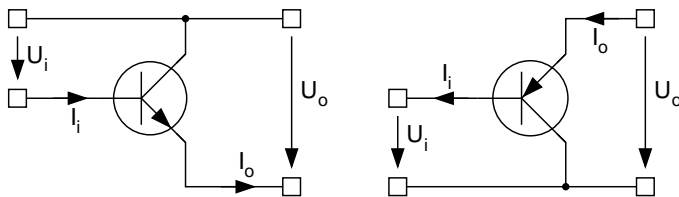
3.2 Le montage base commune

Dans ce montage, la base sert comme référence. La tension d'entrée (U_i) se situe entre l'émetteur et la base. Ce circuit est prédestiné pour des applications hautes fréquences, parce que la base est connectée avec la masse et sert ainsi comme blindage entre la sortie et l'entrée. Ceci évite une influence (capacitive) du signal de sortie sur l'entrée.



3.3 Le montage collecteur commun

Comme troisième possibilité il y a le montage collecteur commun. En effet, ici, l'émetteur est remplacé par le collecteur et vice et versa.



3.4 Caracteristiques des montages

Les trois montages peuvent être distingués par les paramètres suivants :

- Résistance d'entrée $R_i = \left| \frac{U_i}{I_i} \right|$.
- Résistance de sortie $R_o = \left| \frac{U_o}{I_o} \right|$.

- Facteur d'amplification de courant $V_I = \frac{I_o}{I_i}$.
- Facteur d'amplification de tension $V_U = \frac{U_o}{U_i}$.
- Fréquence de coupure $f_{.3dB}$.

Le tableau ci-dessous montre ces paramètres.

Montage	R_i	R_o	V_I	V_U	$f_{.3dB}$
Émetteur commun	moyenne	élevée	élevée	élevée	basse
Base commun	petite	moyenne	< 1	élevée	élevée
Collecteur commun	très élevée	petite	élevée	< 1	basse

Questions de répétition :

1. À quoi sert le montage émetteur commun ?
2. À quoi sert le montage base commune ?
3. Qu'est-ce qui est typique pour le montage base commune ?

4

Caractéristiques des transistors

But de ce chapitre :

- Comprendre le fonctionnement d'un transistor à l'aide de ses caractéristiques.

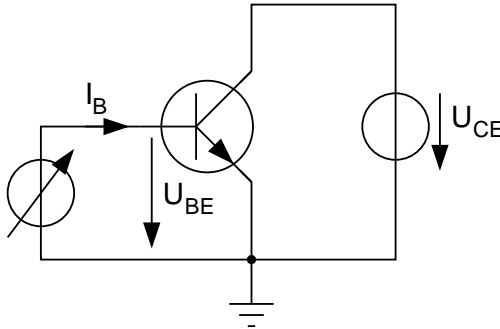
Mots clés :

La résistance d'entrée, la résistance de sortie, le facteur d'amplification de courant continu β , le facteur d'amplification petits signaux β , le facteur de réaction, les paramètres h .

Un transistor peut être décrit par les grandeurs I_E , I_C , I_B , U_{CE} , U_{BE} , et U_{CB} . La description du transistor se fait à l'aide de ces six grandeurs dont la dépendance est représentée graphiquement ci-dessous.

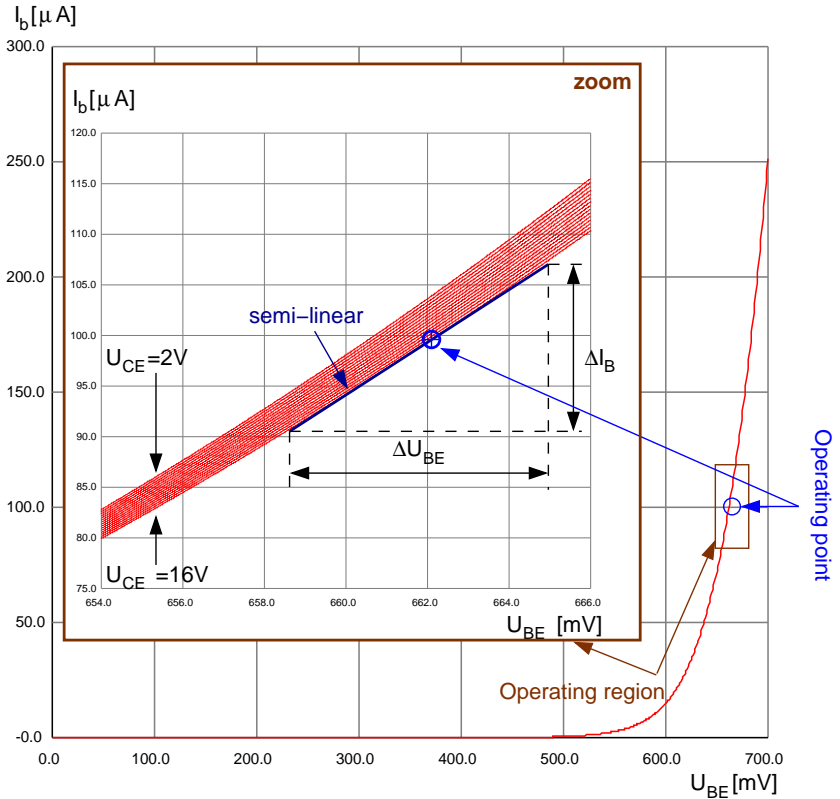
4.1 La caractéristique d'entrée du transistor

Soit le circuit suivant :



La caractéristique d'entrée d'un transistor correspond à peu près à celle d'une diode en silicium. La tension de seuil est d'environ 0.6V. Comme nous l'avons vu pour la diode, la résistance différentielle dépend du point d'exploitation (*operating point*) sur la courbe. De la même manière pour le transistor, celle-ci va dépendre du point d'exploitation du transistor comme nous le verrons plus loin.

Caractéristique d'entrée du transistor 2N2222 ($I_B = f(U_{BE})_{U_{CE}=\text{const}}$) :



La résistance différentielle ou dynamique r_{BE} correspond à la tangente de la courbe au point de travail (comme nous allons le voir plus loin) :

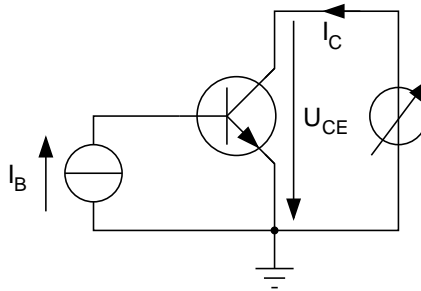
$$r_{BE} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \quad (4.1)$$

r_{BE} est aussi appelée résistance d'entrée différentielle. Elle peut aussi être décrite sous forme de paramètre h : elle se nomme h_{11} . Dans le zoom de la région d'exploitation (*operating region*) ci-dessus, nous voyons comment la caractéristique

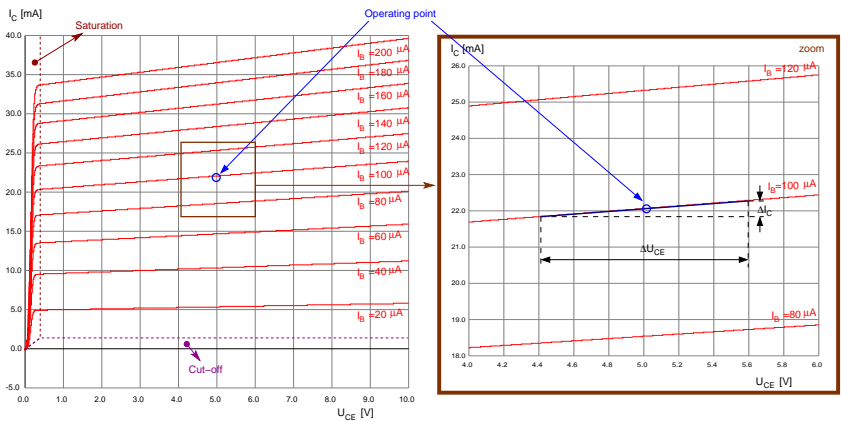
d'entrée et la résistance différentielle sont dépendantes de la tension de collecteur (U_{CE}).

4.2 La caractéristique de sortie du transistor

Dans ce cas, le circuit suivant est utilisé :



La caractéristique de sortie du 2N2222 ($I_C = f(U_{CE})_{I_B = \text{const}}$) :



On déduit de cette famille des caractéristiques, la résistance de sortie différentielle r_{CE} qui peut aussi s'exprimer par la relation suivante :

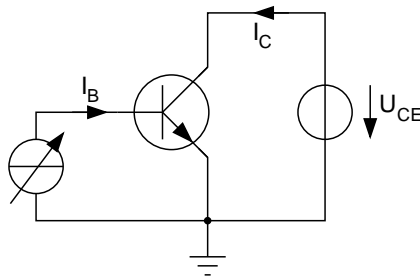
$$r_{CE} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} \quad (4.2)$$

Le paramètre h_{22} est la valeur inverse de la résistance r_{CE} avec les unités d'une conductance, soit des Siemens [S].

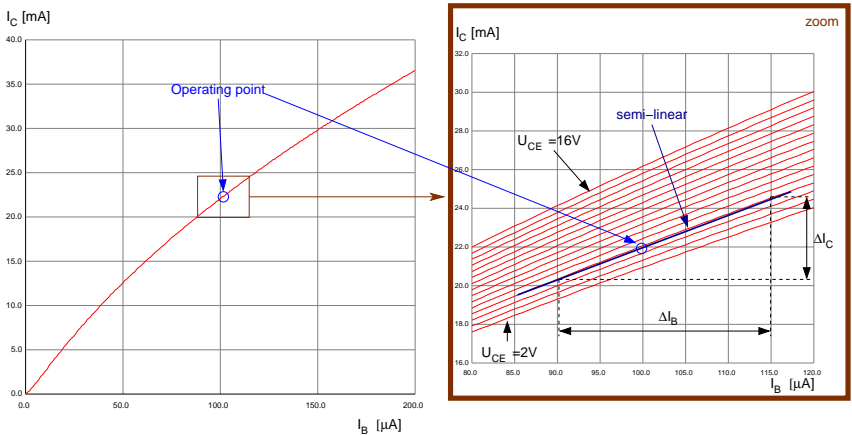
$$h_{22} = \frac{1}{r_{CE}} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \quad (4.3)$$

4.3 La caractéristique de transfert

On utilise le circuit suivant pour effectuer la mesure de la caractéristique de transfert :



La caractéristique de transfert du 2N2222 ($I_C = f(I_B)_{U_{CE}=\text{const}}$) :



De cette caractéristique on peut extraire le facteur d'amplification de courant

continu B,

$$B = \frac{I_C}{I_B} \quad (4.4)$$

ainsi que le facteur d'amplification de courant pour petits signaux β , aussi appelé facteur d'amplification différentiel :

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (4.5)$$

Dans le zoom de la caractéristique de transfert montrée ci-dessus, on peut voir que le facteur d'amplification de courant continu dépend fortement de la tension de collecteur U_{CE} , à savoir :

$$\begin{cases} B_{U_{CE}=2V} \approx \frac{21mA}{100\mu A} = 210 \\ B_{U_{CE}=16V} \approx \frac{26mA}{100\mu A} = 260 \end{cases} \quad (4.6)$$

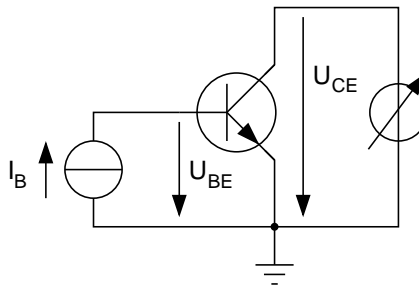
Le facteur d'amplification différentiel β , en revanche, est relativement indépendant de la tension de collecteur U_{CE} dans les environs du point d'exploitation, et est donné par :

$$\beta \approx \frac{24,2mA - 20,2mA}{115\mu A - 90\mu A} = \frac{4mA}{25\mu A} = 160 \quad (4.7)$$

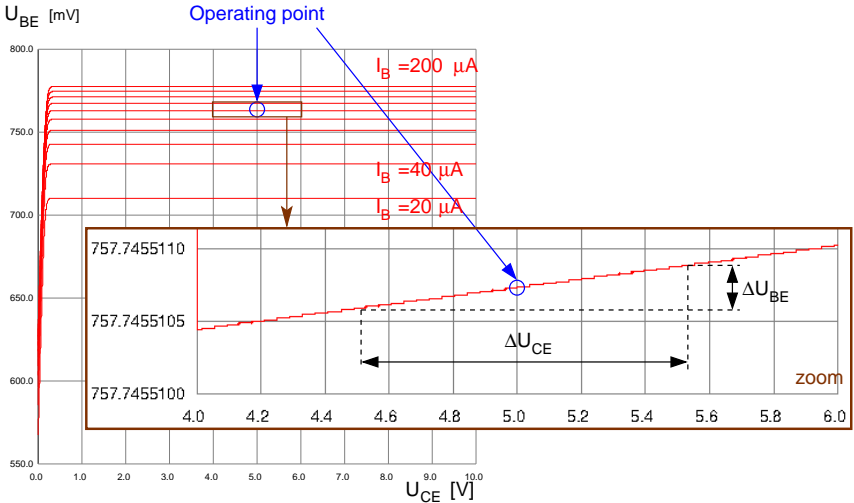
Le facteur d'amplification différentiel β peut aussi être décrite sous forme de paramètre h : il se nomme h_{21} .

4.4 La caractéristique de transfert inverse

On utilise le circuit suivant pour effectuer la mesure de la caractéristique de transfert inverse :



La caractéristique de transfert inverse du 2N2222 ($U_{BE} = f(U_{CE})_{I_B=\text{const}}$) :



Ici, il s'agit du facteur de transfert inverse D de la sortie sur l'entrée.

$$D = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} \quad (4.8)$$

Ce facteur D est aussi appelé paramètre h_{12} .

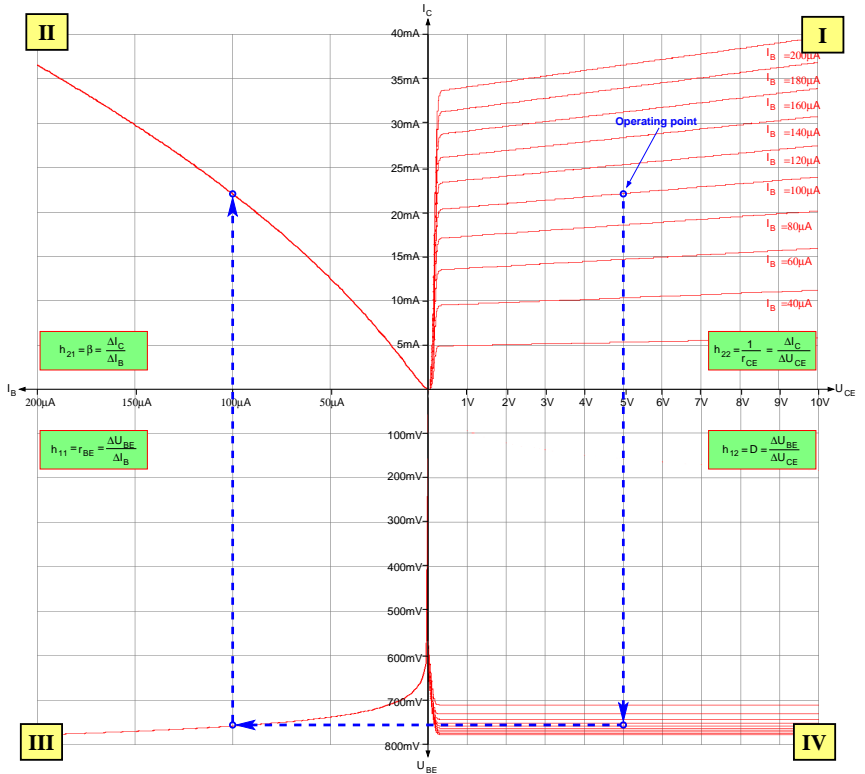
Le facteur de transfert inverse est dans la plupart des cas extrêmement faibles et peut donc être négligée dans la plupart des cas. Pour le 2N2222 sa valeur est :

$$D \approx \frac{757745511,0\text{nV} - 757745510,5\text{nV}}{5,8\text{V} - 4,2\text{V}} = \frac{0,5\text{nV}}{1,6\text{V}} = 312,5 \cdot 10^{-12} \quad (4.9)$$

4.5 Le graphique à quatre quadrants

Ces quatre caractéristiques décrites sont en général représentées dans un graphique à quatre quadrants. On obtient ainsi une vue globale des caractéristiques du transistor.

Le graphique à quatre quadrants du 2N2222 ci-dessous permet d'avoir une vision d'ensemble des quatre quadrants.



Quadrant	Caractéristique	Paramètre
I	de sortie	Conductance de sortie
II	de transfert	Amplification de courant
III	d'entrée	Résistance d'entrée
IV	de transfert inverse	Facteur de transfert inverse

Questions de répétition :

1. Comment peut-on déterminer la résistance d'entrée d'un transistor ?
2. D'où peut-on tirer le facteur d'amplification en courant continu ?
3. Qu'est-ce qu'est le facteur d'amplification pour petits signaux ?
4. Qu'est-ce qu'est la conductance de sortie ?
5. Qu'est-ce qu'est le facteur de transfert inverse ?

5

Le transistor monté en amplificateur

But de ce chapitre :

- Apprendre ce qu'est le point d'exploitation d'un circuit amplificateur.
- Maîtriser le choix du point d'exploitation.
- Apprendre comment on dimensionne un circuit d'amplificateur.

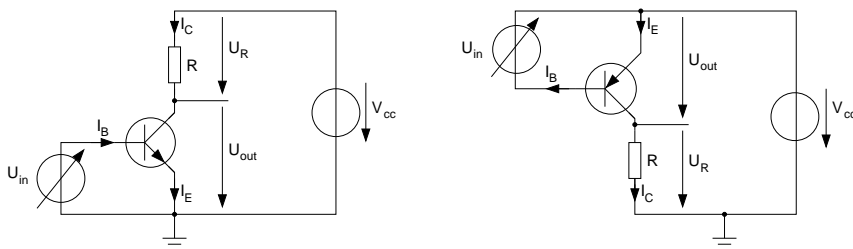
Mots clés :

Point d'exploitation, amplification de petits signaux, circuit d'amplification.

Le transistor bipolaire monté en amplificateur est un exemple classique d'un montage émetteur commun (expliqué dans le chapitre 3.1). Pour qu'un transistor puisse être utilisé comme élément d'amplification on doit définir un point d'exploitation ou point de repos. Si l'on appliquait simplement une tension sinusoïdale symétrique autour du zéro sur la base du transistor, le signal de sortie au collecteur serait fortement distordu. Pour éviter cette distorsion, le transistor est polarisé. Celui-ci impose une condition de fonctionnement statique et se compose d'un courant continu et d'une tension continue. La fixation de ce point d'exploitation est nécessaire pour que le circuit puisse fonctionner comme un amplificateur petits signaux.

5.1 La droite de charge

Pour la discussion nous choisissons le circuit suivant :



La tension de sortie (U_{out}) est :

$$U_{\text{out}} = V_{\text{cc}} - R \cdot I_{\text{C}} \quad (5.1)$$

On en déduit que :

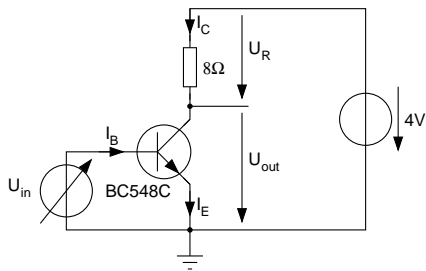
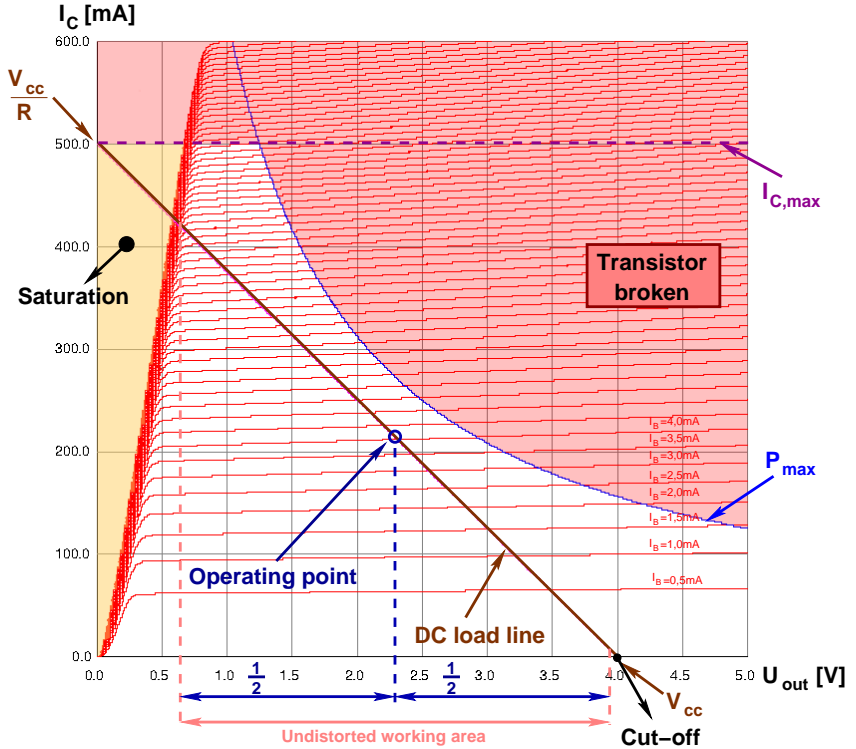
$$I_{\text{C}} = -\frac{U_{\text{out}} - V_{\text{cc}}}{R} = -\frac{1}{R} \cdot U_{\text{out}} + \frac{V_{\text{cc}}}{R} \quad (5.2)$$

C'est l'équation d'une droite dont la pente est de $-\frac{1}{R}$. Cette droite s'appelle *la droite de charge*. La droite de charge décrit la tension de sortie U_{out} en fonction du courant de collecteur I_{C} étant donné la résistance de charge R . La tension de sortie est égale à la tension collecteur-émetteur (U_{CE}) dans le cas d'un transistor NPN et la tension émetteur-collecteur (U_{EC}) dans le cas d'un transistor PNP. Le comportement $I_{\text{C}} = f(U_{\text{CE}})$ d'un transistor est illustré dans les caractéristiques de sortie du transistor. Pour cette raison, nous pouvons tracer la droite de charge dans les caractéristiques de sortie (voir page suivante).

Si le transistor était idéal, la tension de sortie U_{out} couvrirait toute la gamme de tension de la droite de charge ($0V \dots V_{\text{cc}}$). En réalité, il y a seulement une gamme limitée de tension dans laquelle le transistor projette une tension d'entrée sans distorsion sur la droite de charge. Cette gamme de tension limitée est appelé *la zone d'exploitation (undistorted working area)* de l'amplificateur. La zone d'exploitation est limitée par :

- **Saturation.** Pour "le bon fonctionnement" d'un transistor, la "jonction collecteur-base" doit être en état de blocage et la "jonction base-émetteur" dans l'état conducteur. Ce n'est le cas que lorsque la tension collecteur-émetteur (U_{out}) est assez grande (cela dépend de la construction du transistor). La plus petite tension collecteur-émetteur nécessaire pour assurer un fonctionnement correct est appelée la tension de saturation ($U_{\text{CE,sat}}$). La tension de saturation est une fonction du courant de collecteur (I_{C}). Si la tension de sortie se rapproche de la tension de saturation, la jonction collecteur-base se met à conduire (elle n'est plus bloquée), et le courant de collecteur (I_{C}) devient indépendant du courant de base (I_{B}), respectivement la tension de base (U_{in}). Il en résulte une forte distorsion de la tension d'entrée par rapport à la tension de sortie. Nous appelons cette situation une *surcharge* d'amplificateur.

Les caractéristiques de sortie d'un BC548C contenant la droite de charge (*DC load line*). Pour dessiner la droite de charge un circuit a été construit avec $V_{cc} = 4V$ et $R = 8\Omega$.



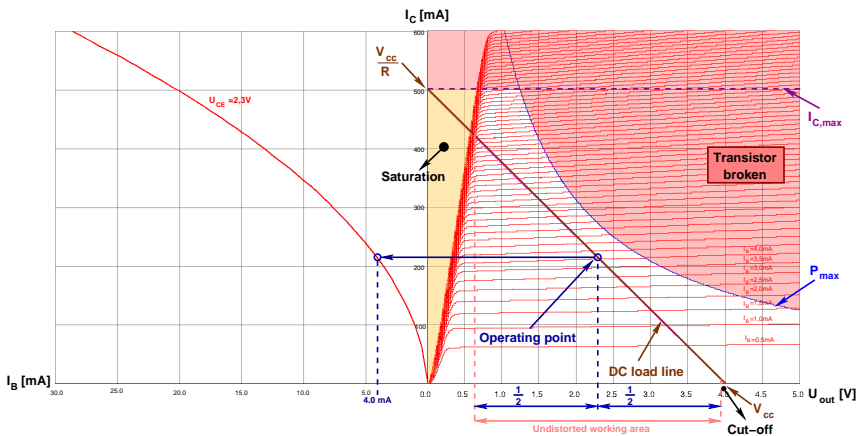
- Etat bloqué (cut-off).** L'état bloqué est provoqué par le blocage de la jonction base-émetteur. Si la tension d'entrée (U_{in}) est inférieure à la tension minimale (U_f) pour mettre la jonction base-émetteur dans l'état de conduction, le courant à travers le transistor est nul et la tension de sortie (U_{out}) est à V_{cc} . Il en résulte une forte distorsion de la tension d'entrée par rapport à la tension de sortie.

Dans les applications digitales (interrupteur ouvert ou fermé) on alterne entre l'état saturé à l'état bloqué du transistor. Dans les applications analogiques le transistor est, par exemple, utilisé comme amplificateur. La tension alternative appliquée sur la base doit être amplifiée et se retrouver aussi peu distordue que possible à la sortie. Ainsi on veille à ce que l'état de repos – le point d'exploitation (*operating point*) – se trouve environ au milieu de la plage disponible (*undistorted working area*) pour que l'amplitude possible du signal alternatif soit maximum.

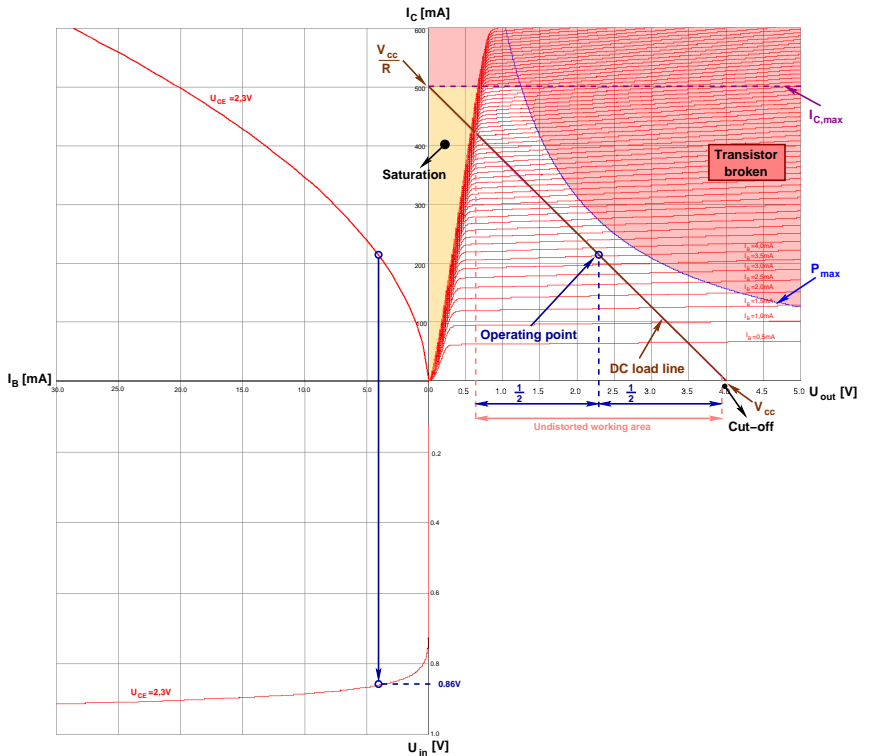
le point d'exploitation du circuit affiché sur la page précédente est à environ 2,3V. Le courant de collecteur correspondant est :

$$I_C = \frac{U_R}{R} = \frac{V_{cc} - U_{out}}{R} = \frac{4V - 2,3V}{8\Omega} \approx 212,5mA \quad (5.3)$$

Pour déterminer le courant de base I_B au point d'exploitation, nous pouvons transférer le point d'exploitation de la caractéristique de sortie dans la caractéristique de transfert comme montré ci-dessous.



Enfin, nous pouvons déterminer la tension d'entrée (U_{in}) requise par le transfert du point d'exploitation de la caractéristique de transfert dans la caractéristique d'entrée du transistor (comme montré ci-dessous).

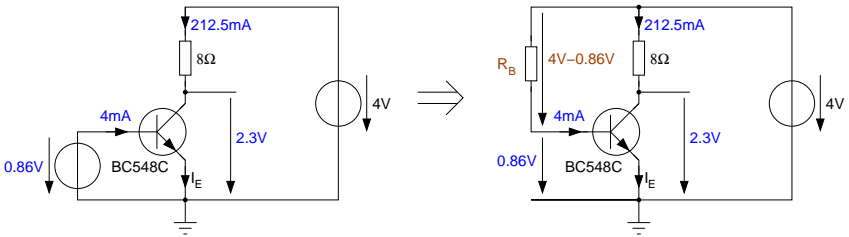


Pour le circuit donné, nous pouvons donc dériver les paramètres suivants pour le point d'exploitation :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_C = 212,5 \text{ mA} \\ U_{out} = U_{CE} = 2,3 \text{ V} \\ I_B = 4,0 \text{ mA} \\ U_{in} = U_{BE} = 0,86 \text{ V} \\ B = \frac{I_C}{I_B} = \frac{212,5 \text{ mA}}{4,0 \text{ mA}} \approx 53 \end{array} \right. \quad (5.4)$$

5.2 Stabilisation du point d'exploitation à l'aide d'une résistance de base

Nous avons maintenant déterminé les paramètres requis pour le point d'exploitation. Pour fixer celui-ci la base du transistor doit être correctement polarisée. Considérons maintenant le circuit suivant :



La tension base-émetteur peut être réalisé en connectant une résistance (R_B) entre la base et la source de tension (V_{cc}). À cause du courant de base (I_B) une chute de tension sur la résistance apparaît. Pour réaliser la tension U_{BE} requise pour fixer le point d'exploitation, la valeur de la résistance peut être déterminée par :

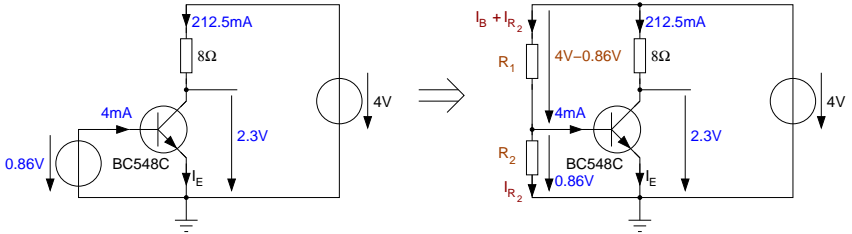
$$R_B = \frac{U_{R_B}}{I_B} = \frac{V_{cc} - U_{BE}}{I_B} = \frac{4V - 0.86V}{4mA} = 785\Omega \quad (5.5)$$

Cette méthode est la plus simple afin de fixer le point d'exploitation. Elle démontre cependant une grande sensibilité à la dispersion du facteur d'amplification continu de transistor à transistor. Des tolérances à la fabrication de $\pm 30\%$ sont tout à fait habituelles ! Pour cette raison, ce circuit ne se prête pas à un dimensionnement précis et cette technique de stabilisation n'est guère utilisée.

5.3 Stabilisation du point d'exploitation à l'aide d'un pont diviseur

Considérons maintenant ce qu'il se passe lorsque la tension de base est déterminée par un diviseur de tension (montrée sur la page suivante). L'idée étant que le point d'exploitation soit moins dépendant du facteur d'amplification de courant. On dimensionne le diviseur de tension composé de R_1 et R_2 , de sorte que le

courant I_{R_2} qui passe par R_2 soit relativement élevé (en général $\approx 100x$ fois le courant de base). Ainsi le courant de base devient négligeable pour le calcul des résistances.



Ainsi on peut calculer les résistances de la manière suivante :

$$\begin{cases} R_1 = \frac{V_{cc} - U_{BE}}{I_B + I_{R_2}} = \frac{V_{cc} - U_{BE}}{I_B + 100 \cdot I_B} \approx \frac{V_{cc} - U_{BE}}{100 \cdot I_B} = \frac{4V - 0.86V}{400mA} = 7,85\Omega \\ R_2 = \frac{U_{BE}}{I_{R_2}} = \frac{U_{BE}}{100 \cdot I_B} = \frac{0.86V}{400mA} = 2,15\Omega \end{cases} \quad (5.6)$$

Cette possibilité de régler le point d'exploitation n'est pas très robuste non plus. La modification de la caractéristique d'entrée lors du changement de transistor ou lors d'un changement de température change le point d'exploitation de manière très conséquente.

5.4 Stabilisation thermique du point d'exploitation

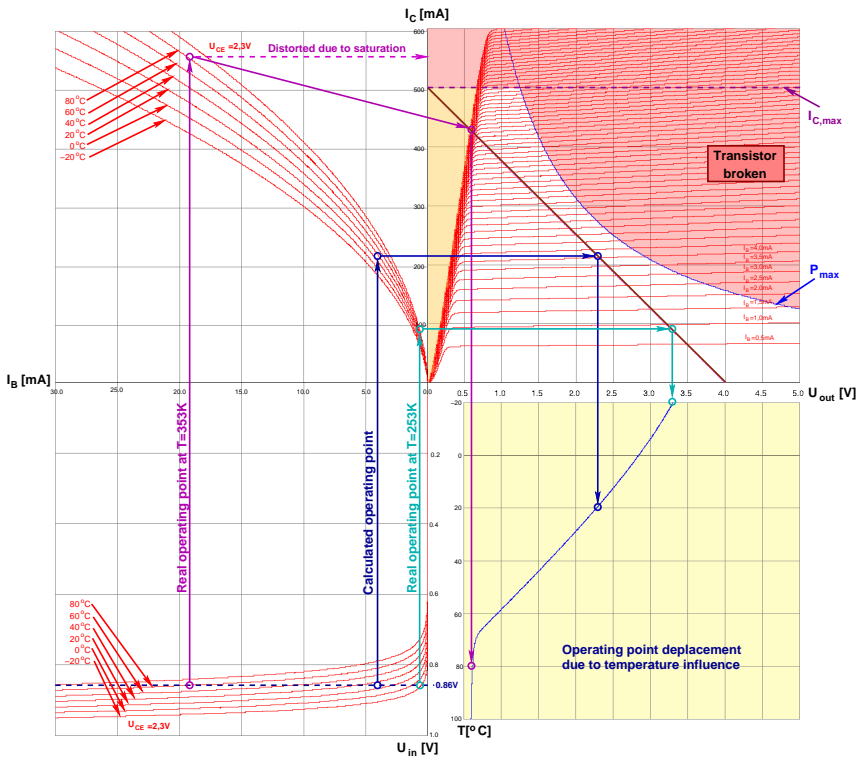
Occupons nous maintenant d'un autre inconvénient d'un circuit d'amplification : l'influence du point d'exploitation et les variations des caractéristiques du circuit d'amplification dues aux variations de la température. A partir de la description mathématique de la diode on sait que sa caractéristique dépend de la température. Elle conduit mieux à des températures élevées qu'à de basses températures :

$$I_f = I_{R,\max} \left(e^{\frac{U_f}{m \cdot U_T}} - 1 \right) \quad (5.7)$$

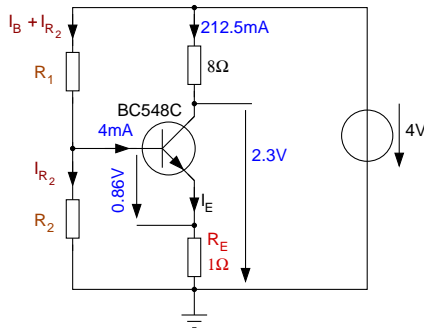
avec :

$$U_T = \frac{k \cdot T}{e} \quad \begin{cases} k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} \\ T = ^\circ C + 273K \\ e = 1,6 \cdot 10^{-19} C \end{cases} \quad (5.8)$$

La jonction base-émetteur d'un transistor possède un comportement semblable à celui d'une diode. Si la température du cristal augmente, le courant de base I_B augmente également pour une tension base-émetteur $U_{BE} = U_{in}$ constante. Le facteur d'amplification en courant continu B et le facteur d'amplification pour petits signaux β ne dépendent pas très fortement de la température. Ainsi, une augmentation du courant de base I_B dû à la température entraîne également une augmentation du courant collecteur I_C . Le point d'exploitation s'est ainsi déplacé :



À l'aide d'une contre-réaction sur l'émetteur on peut réduire cette influence. Dans ce but, une résistance R_E est placée en série avec l'émetteur selon le circuit de la page suivante.



Dû au fait que la résistance d'émetteur a été ajoutée, les valeurs des deux résistances R_1 et R_2 doivent être recalculées. Rappel : pour le circuit donné, nous avons déterminé les paramètres suivants pour le point d'exploitation à température ambiante ($T=20^\circ\text{C}$).

$$\begin{cases} I_C = 212,5\text{mA} \\ U_{\text{out}} = 2,3\text{V} \\ I_B = 4,0\text{mA} \\ U_{BE} = 0,86\text{V} \end{cases} \quad (5.9)$$

Pour réaliser ce point d'exploitation dans le nouveau circuit, nous avons besoin des chutes de tension sur R_1 et R_2 suivantes :

$$\begin{cases} U_{R_2} = U_{BE} + U_{RE} = 0,86\text{V} + (I_C + I_B) \cdot R_E \approx 1,08\text{V} \\ U_{R_1} = V_{cc} - U_{R_2} = 4\text{V} - 1,08\text{V} = 2,92\text{V} \end{cases} \quad (5.10)$$

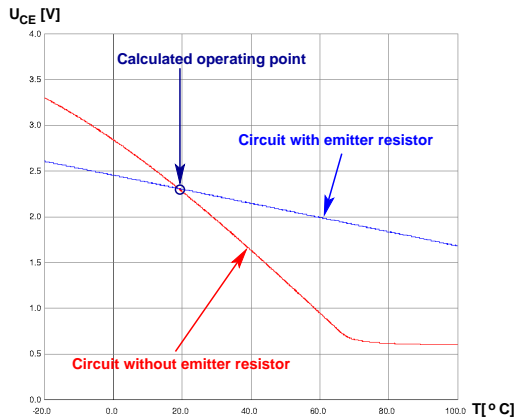
Par conséquent, nous trouvons pour R_1 et R_2 (étant donnée que $I_{R_2} = 100 \cdot I_B$) :

$$\begin{cases} R_1 \approx \frac{U_{R_1}}{100 \cdot I_B} = \frac{2,92\text{V}}{400\text{mA}} = 7,3\Omega \\ R_2 = \frac{U_{R_2}}{100 \cdot I_B} = \frac{1,08\text{V}}{400\text{mA}} = 2,7\Omega \end{cases} \quad (5.11)$$

L'influence de la résistance R_E peut maintenant être expliqué comme suit : Par le pont diviseur, réalisé avec R_1 et R_2 , la chute de tension sur la résistance R_2 est fixé sur $U_{R_2} = 1,08\text{V}$, quelle que soit la température et presque indépendante de courant de base I_B (depuis $I_{R_2} = 100 \cdot I_B$). Par conséquent, nous trouvons pour la tension base-émetteur :

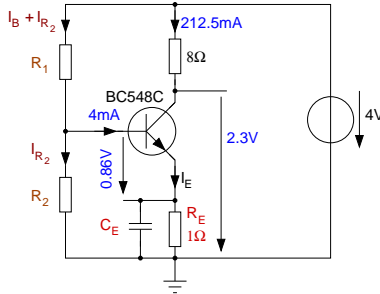
$$\begin{aligned} U_{BE} &= U_{R_2} - U_{RE} \\ &= U_{R_2} - I_E \cdot R_E \\ &= U_{R_2} - (I_C + I_B) \cdot R_E \\ &= 1,08\text{V} - (B + 1) \cdot I_B \cdot R_E \end{aligned} \quad (5.12)$$

Comme montré ci-dessus, le courant de base augmente quand la température augmente. Comme conséquence, la chute de tension sur la résistance d'émetteur s'élève. Dû au fait que la chute de tension sur R_2 est constante, la tension base-émetteur doit descendre. Ce changement de la tension base-émetteur diminue le courant de base, et donc, agit contre l'effet de la température (un nouvel équilibre est formé dans lequel il n'y a pratiquement pas d'influence sur le point d'exploitation). La position du point d'exploitation dans la dépendance de la température est montré ci-dessous. La caractéristique en rouge représente le circuit sans résistance d'émetteur, la caractéristique en bleu représente le même circuit avec la résistance d'émetteur.



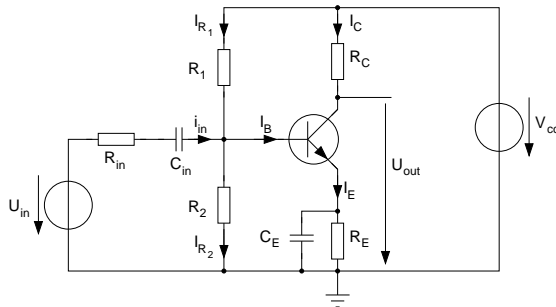
La résistance d'émetteur a comme fonction de stabiliser thermiquement le point d'exploitation. Toutefois, la résistance d'émetteur ne doit pas avoir des influences sur le fonctionnement "normal" de l'amplificateur. L'amplificateur est utilisé (comme nous le verrons plus tard) pour amplifier des signaux d'entrée à changement "rapide". Ces signaux changent le courant de base, et, comme conséquence, la chute de tension sur la résistance de collecteur (U_{RC}) et la chute de tension sur la résistance d'émetteur (U_{RE}) ! Le changement de la tension U_{RC} est voulue ; le changement de la tension U_{RE} , d'autre part, déforme la fonctionnalité voulue et doit être aussi réduite autant que possible. Pour réduire l'influence de la tension U_{RE} , on peut observer la chose suivante : la température du transistor ne change que lentement (elle augmente lentement). Si la tension U_{RE} ne peut que suivre les signaux à variation lente, nous obtenons la fonctionnalité voulue, c'est à dire : (1) la résistance d'émetteur compense l'influence de la température qui

change “lentement”, et (2) la résistance d’émetteur ne réagit pas aux signaux qui changent “rapidement”. Pour fournir cette fonctionnalité, un condensateur est connecté en parallèle à la résistance d’émetteur :



5.5 La commande d’un transistor

Le point d’exploitation de notre transistor est maintenant fixé et l’on peut maintenant superposer notre petit signal à amplifier. Considérons le circuit ci-dessous :



Fonctionnement :

La tension d’entrée ($U_{in}(t)$) se compose d’une tension continue (U_{in} , peut être égale à 0V) et d’une tension alternative ($\hat{u}_{in}(t)$) :

$$U_{in}(t) = U_{in} + \hat{u}_{in}(t) \quad (5.13)$$

Le condensateur d’entrée (le *condensateur de couplage*) C_{in} ainsi que les résistances R_1 et R_2 forment un filtre passe-haut. En d’autres termes : Si la tension alternative

$\hat{u}_{in}(t)=0V$, le condensateur se chargerait jusqu'à une chute de tension $U_{R_2} - U_{in}$, après quoi rien ne se passerait. Ce chargement du condensateur de couplage se présente comme un signal sonore "floc" dans des amplificateurs à bas prix. Si la tension $\hat{u}_{in}(t) \neq 0V$ et qu'elle change assez vite, le condensateur n'a plus la capacité de se charger et de se décharger, le condensateur ressemble à un court-circuit pour une tension alternative.

Donc, le condensateur de couplage est seulement passant pour la partie alternative de la tension d'entrée $U_{in}(t)$ et bloque la partie continue. Comme nous l'avons déjà vu, la chute de la tension sur la résistance R_2 est égal à la tension d'exploitation $U_{R_2,A}$. A cause de la tension d'entrée alternative, la chute de tension sur la résistance R_2 devient :

$$U_{R_2}(t) = U_{R_2,A} + \alpha \cdot \hat{u}_{in}(t) \quad (5.14)$$

Le facteur α dépend de la résistance d'entrée R_{in} . Il est inférieur ou égal à 1 ($\alpha = 1$ à condition que $R_{in} = 0\Omega$). Si $U_{R_2}(t)$ change, la chute de tension sur la jonction base-émetteur doit aussi changer. C'est la conséquence directe de l'équation 5.12 et de l'ajout de la capacité C_E (Autrement dit : la tension U_{RE} ne peut pas suivre des changements rapides et est donc constante). Donc, la chute de la tension de la jonction base-émetteur se compose d'une tension d'exploitation $U_{BE,A}$ et d'une tension d'entrée alternative :

$$U_{BE}(t) = U_{BE,A} + \alpha \cdot \hat{u}_{in}(t) \quad (5.15)$$

Un changement de la tension de la jonction base-émetteur cause un changement du courant de la base (montré dans la caractéristique de transfert) comme :

$$\begin{aligned} I_B(t) &= \gamma \cdot U_{BE}(t) \\ &= \gamma \cdot (U_{BE,A} + \alpha \cdot \hat{u}_{in}(t)) \\ &= I_{B,A} + \gamma \cdot \alpha \cdot \hat{u}_{in}(t) \\ &= I_{B,A} + \hat{I}_B(t) \end{aligned} \quad (5.16)$$

Dû à l'amplification de courant, le courant du collecteur va changer :

$$\begin{aligned} I_C(t) &= B \cdot I_B(t) \\ &= B \cdot (I_{B,A} + \gamma \cdot \alpha \cdot \hat{u}_{in}(t)) \\ &= I_{C,A} + B \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot \hat{u}_{in}(t) \\ &= I_{C,A} + \hat{I}_C(t) \end{aligned} \quad (5.17)$$

Et enfin il en résulte une variation de la tension de sortie :

$$\begin{aligned}U_{\text{out}}(t) &= V_{\text{cc}} - I_{\text{C}}(t) \cdot R_{\text{C}} \\&= V_{\text{cc}} - (I_{\text{C,A}} + B \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot \hat{u}_{\text{in}}(t)) \cdot R_{\text{C}} \\&= (V_{\text{cc}} - R_{\text{C}} \cdot I_{\text{C,A}}) - R_{\text{C}} \cdot B \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot \hat{u}_{\text{in}}(t) \\&= U_{\text{out,A}} - R_{\text{C}} \cdot B \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot \hat{u}_{\text{in}}(t) \\&= U_{\text{out,A}} + \hat{u}_{\text{out}}(t)\end{aligned}\tag{5.18}$$

On remarquera que le signe de la composante alternative de la tension de sortie est négatif, ce qui indique un décalage de phase de 180° . Le tout est également représenté dans le graphique quatre quadrants suivant.

Un étage d'amplificateur peut être caractérisé par les grandeurs suivantes :

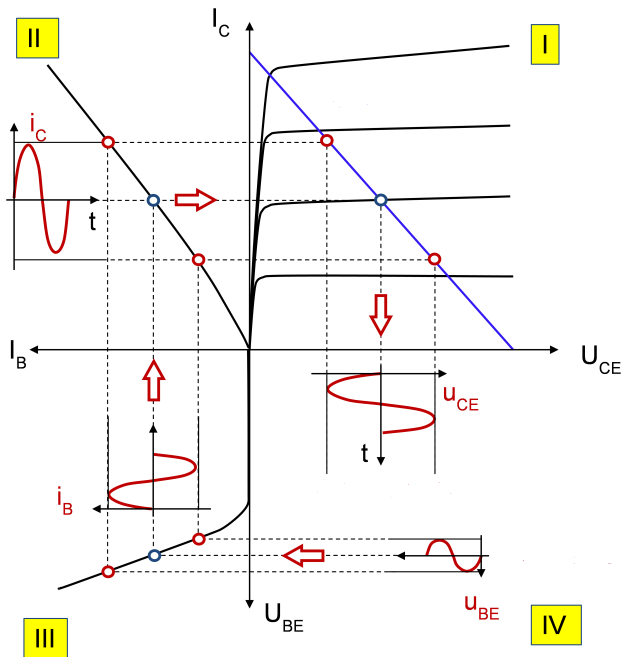
- **Amplification en tension.** L'amplification en tension v_u est défini par :

$$v_u = \left| \frac{\hat{u}_{\text{out}}(t)}{\hat{u}_{\text{in}}(t)} \right|\tag{5.19}$$

- **Amplification en courant.** L'amplification en courant v_i est défini par :

$$v_i = \frac{\hat{i}_{\text{C}}(t)}{\hat{i}_{\text{B}}(t)} = \beta\tag{5.20}$$

Comme le facteur β n'est pas connu très précisément, il est difficile de déterminer précisément le facteur d'amplification. Si on désire un facteur d'amplification indice précis, le circuit d'amplification doit être conçu différemment (contre-réaction), des précisions seraient apportées par la suite.



Questions de répétition :

1. À quoi sert le point d'exploitation ?
2. Par où commence-t-on à choisir le point d'exploitation ?
3. À quoi faut-il faire attention en choisissant les résistances de la base ?
4. À quoi sert le condensateur à l'entrée ?
5. Comment fonctionne l'amplification de la tension du signal ?
6. Comment peut-t-on minimiser l'influence de la température sur le point d'exploitation ?