

LE TRANSISTOR

1. Introduction.

Le transistor est né en 1948, ses auteurs ont reçu le prix Nobel. On comprend donc quelle révolution il a représenté en électronique. En effet c'est le premier composant électronique réalisé à l'aide d'un semi-conducteur. Leurs prédécesseurs, les tubes à vide, encombrants et mal commodes étaient désormais remplacés par un petit objet à trois pattes. La taille et le poids des appareils ont considérablement diminué, ils devenaient portables.

Les progrès de la technique ont permis de procéder à l'intégration de plusieurs centaines de transistors sur un même support. On arrive à l'électronique que l'on connaît actuellement.

Le transistor est le point de départ de toute l'électronique moderne.

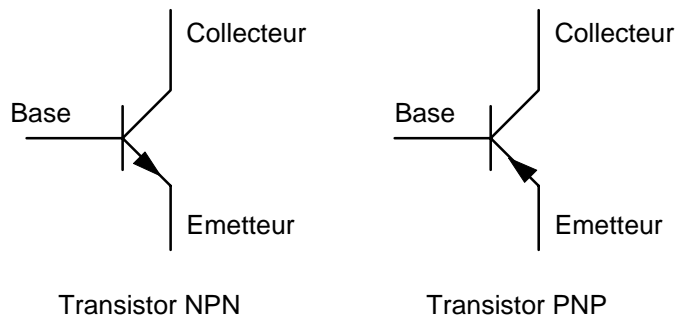
2. Présentation.

Le transistor est un composant à semi-conducteur qui comporte trois électrodes : la base, le collecteur, l'émetteur.

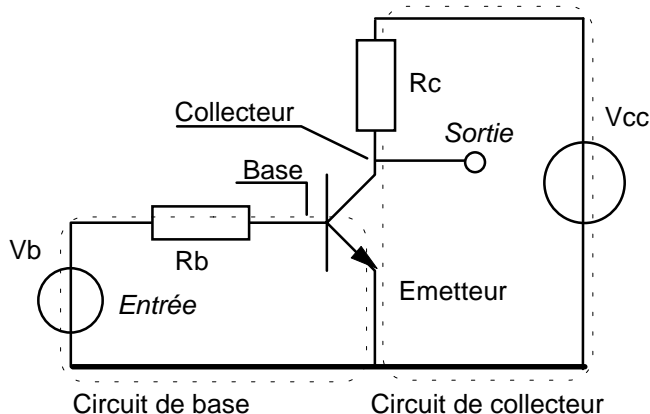
Le collecteur et l'émetteur constituent le circuit principal, la base et l'émetteur constituent le circuit de commande.

Il existe deux sortes de transistors : le transistor PNP et le transistor NPN. Ces deux types de transistors fonctionnent de façon similaire, seules les polarités des courants et des tensions diffèrent.

2.1. Symboles



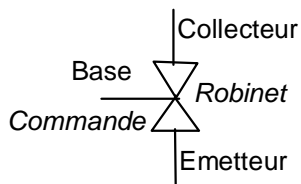
2.2. Principe de connexion



Le transistor est toujours alimenté par deux sources. V_{cc} est toujours un générateur de tension continue, V_b peut être une tension continue, une tension sinusoïdale avec valeur moyenne non nulle etc.

3. Étude simplifiée du fonctionnement.

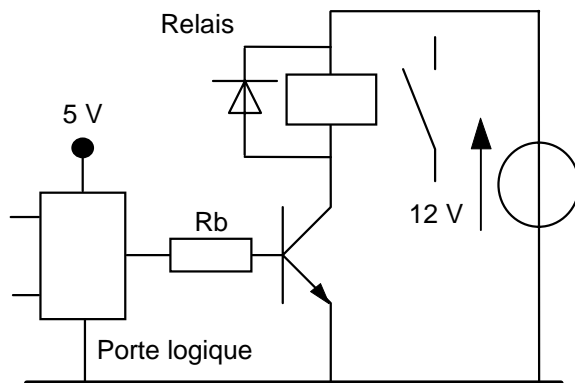
3.1. Le robinet de courant.



On peut considérer le transistor comme un robinet¹ capable de régler un courant. Ce réglage est commandé par un courant. Grâce à cette modélisation, nous pouvons expliquer, de manière simplifiée, le fonctionnement des divers montages utilisant des transistors.

3.2. Le robinet est complètement ouvert ou complètement fermé

Cette utilisation porte le nom **d'interface**. Le transistor est employé dans son mode de **commutation**



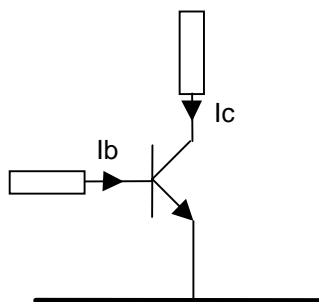
Ce schéma montre une utilisation classique d'un transistor. Le problème à résoudre est le suivant :

La porte logique² doit commander un relais mais elle n'en est pas capable. En effet le relais a besoin d'une tension de 12 V pour fonctionner. La porte, elle, ne peut délivrer que 5V. Casse-tête.

La solution est d'employer un transistor utilisé comme un robinet complètement ouvert ou complètement fermé. La porte logique commande l'ouverture ou la fermeture du robinet.

Dans ce cas le transistor peut être modélisé par un simple interrupteur commandé par un courant. L'interrupteur équivalent prend place entre le collecteur et l'émetteur. La commande est dissociée de l'interrupteur, il faut consulter le paragraphe "Calcul de la résistance R_b

3.3. Qu'est-ce qui fait fermer l'interrupteur équivalent ?



La présence d'un courant I_b **d'intensité suffisante** ferme l'interrupteur équivalent. Tout le problème consiste à savoir quelle est la valeur suffisante de l'intensité I_b .

3.4. Calcul de la résistance R_b

Le gros intérêt du transistor est que le **courant de base**, I_b , est beaucoup **plus petit** que le **courant de collecteur**. Le rapport entre les deux intensités est compris entre 100 et 300 pour les transistors que nous utilisons. Pour simplifier nous prendrons la valeur **150** dans tous les cas.

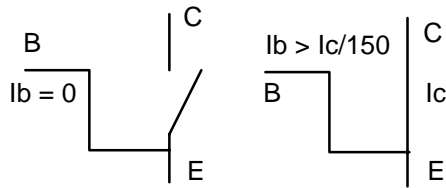
Nous allons considérer que la portion de transistor comprise entre la base et l'émetteur est équivalente à un fil pour l'instant.

¹ Ce modèle est utilisé par l'école Sup. Elec

² La sortie de la porte logique est assimilé à un générateur

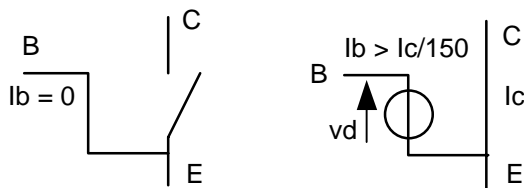
3.5. Premier modèle du transistor utilisé comme interface

Voici le plus simple des modèles, il peut être utilisé pour analyser un montage existant ou pour concevoir rapidement un montage de TP.



Le modèle est volontairement très simplifié. La seule chose sûre dans le calcul du courant I_b c'est qu'il doit être supérieur à $I_c/150$. Le concepteur doit faire intervenir son expérience.

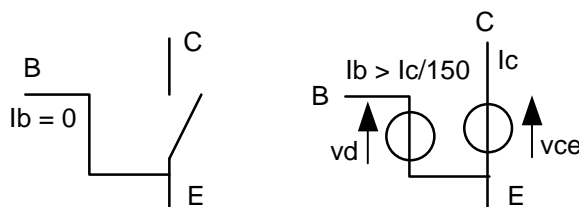
3.6. Deuxième modèle du transistor utilisé comme interface



pour un transistor PNP

ce modèle, qui peut être utilisé dans la plupart des cas, fait intervenir un générateur de tension dans le circuit entre la base et l'émetteur. Ce générateur de tension n'existe que lorsque le courant de base est présent. Le calcul du courant de base se fait de la même manière que précédemment. La tension v_d est égale à 0,7 V pour un transistor NPN et égale à -0,7 V

3.7. Troisième modèle du transistor utilisé comme interface



cette fois on voit apparaître une tension entre le collecteur et l'émetteur. Cette tension est à peu près constante tant que le transistor est équivalent à un interrupteur.

Dans ce cas on parle de $v_{ce_{sat}}$ c'est à dire valeur de saturation

3.8. Vocabulaire

Lorsque le transistor est assimilable à un interrupteur on dit qu'il fonctionne en **commutation**.

Si l'interrupteur est **fermé**, on dit que le transistor est **saturé**. Lorsque l'interrupteur **ouvert** on dit que le transistor est **bloqué**. Ce vocabulaire est consacré par l'usage mais il est maladroit. En effet, on peut penser que le caractère saturé est intrinsèque au transistor sans que n'intervienne le reste du circuit. Le TP suivant essaie de remettre de l'ordre dans le vocabulaire.

3.8.1. TP

- Pour réaliser la manipulation ci-après, vous emploierez les valeurs suivantes qui "marchent" bien. Le schéma est celui du paragraphe 2.2. Résistance de collecteur = 1 k Ω puis 500 Ω , R_b = 33 k Ω . La tension d'alimentation 15 V, la tension de base 5 V.
- Vérifiez qu'on peut assimiler le transistor, entre le collecteur et l'émetteur, à un interrupteur³ ouvert ou fermé. *Si ce n'est pas le cas, il faut me le signaler*
- Mesurez l'intensité du courant qui traverse R_b .
- Avec $R_c = 1$ k Ω , le transistor est équivalent à un interrupteur. Que se passe-t-il avec $R_c = 500$ Ω ? On peut l'expliquer en employant la modélisation par le robinet de courant. Faites-le.
- Vérifiez que le modèle, un conducteur, utilisé pour le calcul de R_b est bon. Vous devez vous demander comment vérifier ce modèle, trouver le nouveau modèle.

³ Voir les feuilles sur la modélisation

3.9. Le régime de commutation (ou régime tout ou rien)

C'est le fonctionnement décrit dans les paragraphes précédents. Il conduit à un modèle équivalent très simple. La difficulté étant de reconnaître, dans un montage, un tel régime de fonctionnement du transistor.

Les composants qui entourent le transistor peuvent donner une indication.

Le transistor associé à un relais ou à une LED fonctionne en tout ou rien. C'est également le cas d'un transistor destiné à produire un niveau logique.

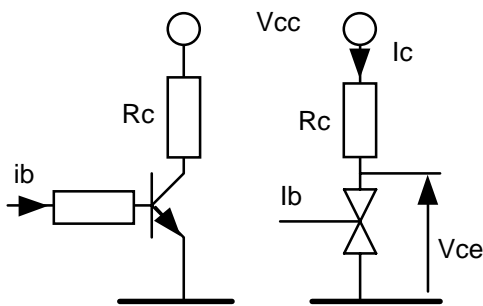
Si les calculs sont possibles, la présence d'une tension nulle⁴ aux bornes d'un transistor traversé par un courant indique de façon indéniable le fonctionnement tout ou rien.

4. Le régime linéaire

4.1. Le transistor : un robinet de courant unidirectionnel

Nous avons vu que le transistor peut être assimilé par un robinet de courant. Il faut ajouter que ce robinet est unidirectionnel. Cela amène une difficulté lorsqu'il s'agit de réaliser un amplificateur de signaux alternatifs. Nous allons voir les modélisations et les montages classiques.

4.2. Étude qualitative par le modèle du robinet



Les courants **Ic** et **Ib** ont même allure car ils sont proportionnels.

Nous allons considérer des courants **Ic** et **Ib** de forme sinusoïdale sans être négatifs.

Questions :

Donnez la relation exprimant la valeur instantanée de **Vce** en fonction de **Vcc**, **Rc** et **Ic**.

Tracez, dans un repère (**Ic**, **t**), l'allure de **Ic**

Tracez, dans repère (**Vce**, **t**), l'allure de **Vce**

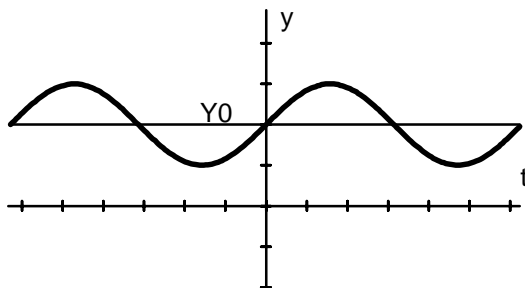
Que se passerait-il si **Ic** était négatif par instants ?

4.3. La polarisation

L'exercice précédent montre que le transistor peut travailler avec des grandeurs variables à conditions qu'elles ne soient pas négatives.

Considérons une grandeur sinusoïdale toujours positive. L'équation d'une telle grandeur est de la forme :

$$y = Y_0 + a \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad \text{avec } Y_0 > a$$



La grandeur Y_0 porte le nom de valeur moyenne ou de composante continue.

Questions :

Pour comprendre le rôle de la valeur moyenne dans le fonctionnement du transistor, nous allons faire en sorte que le courant **Ic** soit de la forme :

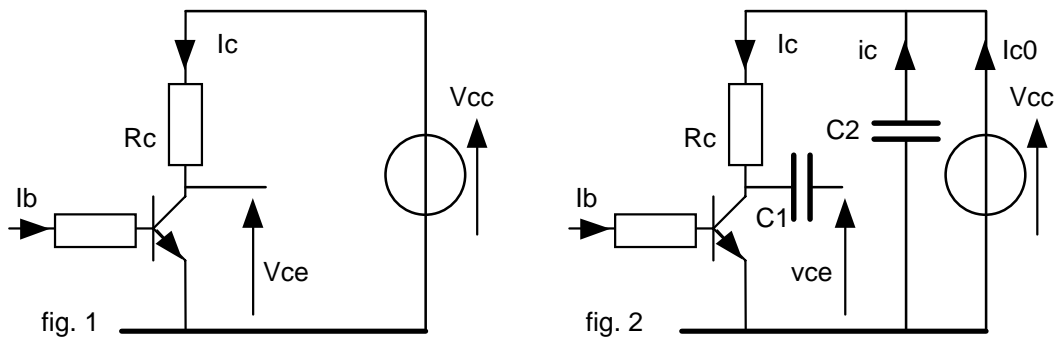
$$I_c = I_{c0} + i \sin(\omega \cdot t)$$

le courant **Ib** est de même forme

- Avec le schéma précédent, donnez l'expression de **Vce** en mettant en lumière les deux composantes, celle due à la partie sinusoïdale et celle due à la valeur moyenne. La partie due à la valeur moyenne porte le nom de polarisation.
- Quel inconvénient majeur la polarisation évite-t-elle ?
- En calculant la puissance dissipée par le transistor à cause de la valeur moyenne, exprimez le revers de la médaille de la polarisation.

⁴ ou très faible

4.4. Les condensateurs de découplage



Remarquez la convention d'écriture : la polarisation est marquée par l'indice 0 et le signal à traiter par une minuscule. La réunion des deux parties est indiquée par une majuscule.

La figure 1 montre le circuit que nous avons étudié dans les paragraphes précédents. Le courant I_b est constitué de deux composantes, la polarisation et le signal à traiter. De même pour le courant I_c . On remarque que le signal i_c doit traverser le générateur de tension continue. Or ce signal est plus faible que la polarisation, il serait annihilé par le générateur. Il faut offrir, à i_c , un chemin qui évite le générateur. C'est le rôle du condensateur C_2 .

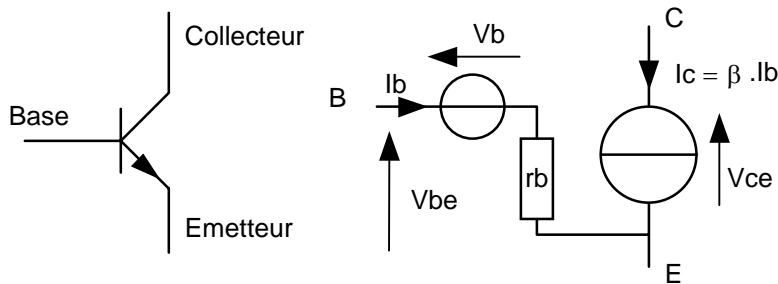
Dans l'exercice du paragraphe 4.2 vous avez pu voir que la tension V_{ce} est sinusoïdale mais pas alternative. Le condensateur C_1 en association avec le circuit aval, non représenté ici, constitue un filtre qui élimine la composante continue.

Nous aurons l'occasion de parler de la génération du courant I_b . Ici, au contraire, il faut mélanger le signal à la polarisation.

5. Les modèles équivalents habituels

Rappelons-nous qu'un modèle équivalent ne traduit jamais la réalité mais est limité à un domaine de validité. Nous trouverons donc de nombreux modèles selon le degré de fidélité que nous souhaitons. Voyons le modèle habituel.

5.1. Le modèle pour le transistor NPN



Transistor NPN $V_b = 0,7 \text{ V}$

On remarque que l'espace Base Émetteur est équivalent à une diode, la résistance r_b est souvent négligée. Entre le collecteur et l'émetteur on trouve un générateur de courant commandé par un courant. Le courant I_c est considéré comme proportionnel au courant I_b . Bien entendu cette proportionnalité est limitée au domaine de validité.

J'attire votre attention sur le fait que la tension V_{ce} est fixée par le reste du circuit et non pas par le transistor.

On trouve l'origine de terme linéaire pour qualifier ce régime de fonctionnement. Le transistor est régi par des équations linéaires.

5.2. Domaine de validité

Ce modèle est invalide en régime tout ou rien. De plus, le passage du régime tout ou rien au régime linéaire ne se fait pas franchement. Ce modèle devient valable lorsque V_{ce} dépasse quelques dixièmes de volts.

Malheureusement le coefficient β n'est pas constant, il évolue en fonction de I_c . En toute rigueur il faudrait limiter le domaine de validité à une plage déterminée de I_c .

Si on trouve une différence entre des calculs et une expérimentation, il faut penser à incriminer le modèle.

5.3. Le générateur commandé

Nous venons de voir que le transistor, en régime linéaire, est équivalent à un générateur de courant commandé par un courant.

On peut inventer d'autres types de générateurs commandés :

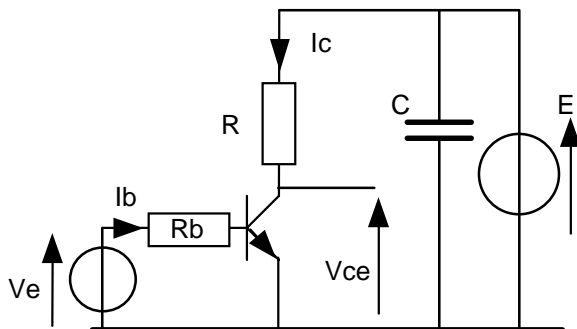
- Générateur de tension commandé par une tension
- Générateur de tension commandé par un courant
- Générateur de courant commandé par une tension

Ces générateurs sont utilisés pour la modélisation de divers composants électroniques.

Les générateurs commandés bénéficient d'un traitement spécial dans l'application des théorèmes généraux de l'électricité. Il **ne faut pas éteindre** un tel générateur lors de l'application du théorème de Thévenin ou du théorème de Norton.

5.4. Exercice d'application

Dans cet exercice, vous allez voir le travail avec le générateur commandé, l'incidence de la polarisation et l'amplification en tension du signal alternatif.



l'équation du signal à traiter est :

$$V_e = V_{e0} + v \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Nous cherchons l'expression de la tension V_{ce} en faisant apparaître ses deux composantes.

Questions :

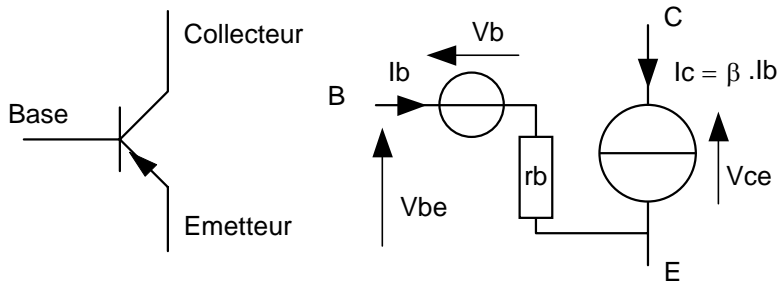
- Par quel moyen réalise-t-on la polarisation ?
- À quoi sert le condensateur ?
- Dessinez un schéma dans lequel le transistor est remplacé par son modèle équivalent. ($r = 0$)
- Retrouvez l'expression de la tension V_{ce} , séparez la polarisation du signal amplifié.
- Quel est le coefficient d'amplification de l'amplificateur ainsi réalisé ?
- Interprétez le caractère négatif de ce coefficient.
- Dessinez l'allure du signal à traiter et, en correspondance, le signal alternatif de sortie.

Aide :

$$\text{Le point de départ } V_{ce} = E - R \cdot \beta \cdot I_b$$

Le point d'arrivée $V_{ce} = E - V_{be} - \beta \frac{R}{R_b} V_{e_0} - \beta \frac{R}{B_b} .v. \sin(\omega.t)$

5.5. Le modèle pour le transistor PNP

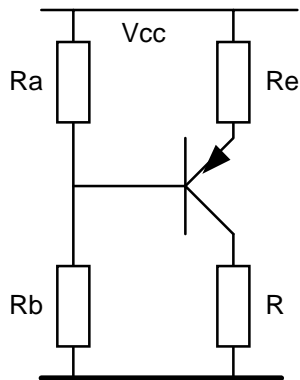


Vous pouvez constater que ce modèle est identique⁵ à celui du transistor NPN. La seule différence visible est le signe de V_b .

Il suffit de se rappeler un seul modèle pour les deux types de transistors et le signe de V_b pour chacun d'eux.

Transistor PNP $V_b = -0,7 \text{ V}$

5.6. Application



Montrez que ce montage est un générateur de courant constant. Le résistor R, quelle que soit sa résistance, est traversé par un courant d'intensité constante.

On peut négliger r_b devant les autres résistances

Y a-t-il une limite supérieure à la résistance R ?

Aide : cet exercice peut se résoudre de deux façons

En appliquant le théorème de Thévenin au diviseur de potentiel formé par V_{cc} , R_a , R_b , c'est la méthode rigoureuse

En négligeant le courant I_b devant le courant qui passe dans R_b , c'est la méthode pratique.

Ce montage est classique, parfois R_a est remplacée par une diode Zéner ce qui apporte une plus grande stabilité au courant.

⁵ vous connaissez peut-être un autre modèle dans lequel les flèches sont inversées. Je préfère celui-ci. Bien sûr les deux modèles conduisent au même résultat.