

Rapport de Projet P6 Le transistor

Grégoire BISSON, Théo LARCHER, Thibault SAURON et Adrien VASON

18 juin 2017

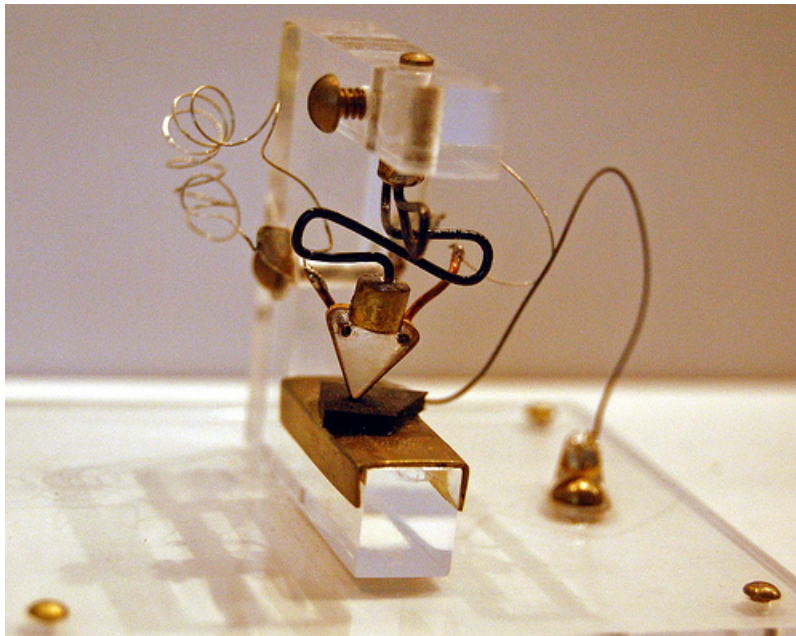


Table des matières

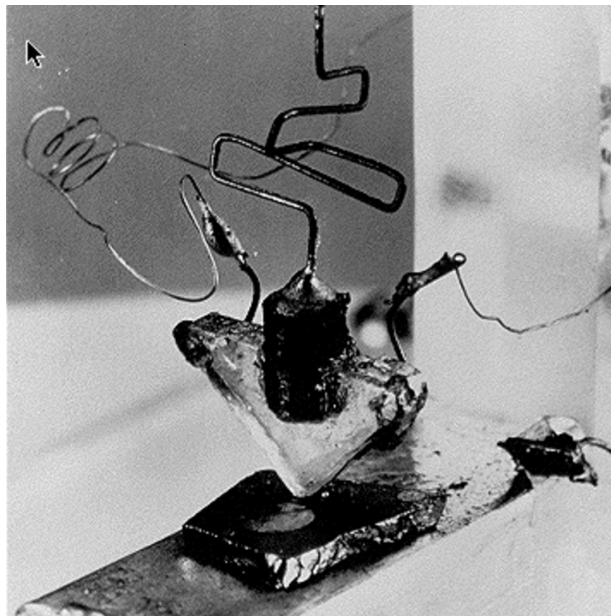
1	Le transistor	3
1.1	L'histoire du transistor	3
1.1.1	Invention	3
1.2	Le fonctionnement	4
1.2.1	Semi-conducteurs et dopage	4
1.2.2	La jonction PN	6
2	Les différents transistors	7
2.1	Le transistor bipolaire	7
2.1.1	La géométrie du transistor NPN	7
2.2	Les transistors à effet de champ	8
2.2.1	Transistor JFET (Junction Field Effect Transistor)	8
2.2.2	Transistor MOSFET (Metal Oxide Semiconductor)	9
3	Les caractéristiques du transistor	10
4	Les expériences réalisées	12
4.1	Réalisation d'un TP : Montages à transistors	12
4.1.1	Montage avec transistor NPN simple	12
4.1.2	Montage émetteur commun	15

1 Le transistor

1.1 L'histoire du transistor

1.1.1 Invention

Le transistor bipolaire a été inventé en deux temps : L'histoire retient que J. Bardeen et WH. Brattain des Bell's lab ont inventé le transistor à pointes. Ce dispositif a fonctionné pour la première fois le 23 décembre 1947. Il s'agissait d'un dispositif assez rustique, lent et instable qui n'a jamais été produit en série. Il dérive directement des diodes à pointes au germanium qui ont longtemps été utilisées pour détecter les signaux RADAR. L'histoire dit que ces chercheurs effectuaient une mesure du champ de potentiel dans un semi-conducteur autour d'une pointe (certainement pour comprendre le comportement des diodes à pointes) lorsqu'un effet amplificateur est apparu lorsque la distance entre les deux pointes de mesure devenait très faible (une fraction de mm). En fait, la pointe produisait l'équivalent d'une petite zone dopée variable entourant sa zone de contact. Après diverses manipulations pour mettre en évidence cet effet, ils en sont arrivés à réaliser le premier transistor en utilisant du germanium monocristallin. Ses pointes étaient en or distantes de 5/100 mm. Les Bell's lab n'ont rendu public la découverte qu'en juin 1948.



Les transistors représentaient une énorme évolution face aux tubes électroniques : ils étaient plus petits, plus légers et plus solides et leur fonctionnement était instantané avec des tensions faibles. Ils pouvaient donc être alimentés par des piles contrairement aux tubes électroniques qui nécessitaient une tension élevée de l'ordre de plusieurs centaines de volts. L'évolution des transistors touche le grand public vers les années 50 avec les premiers postes de radio à transistors. Avec la guerre froide et la conquête spatiale, les recherches ont beaucoup fait progresser l'efficacité des transistors.

Ces pièces électroniques furent essentielles pour l'invention des premiers ordinateurs, et donc toute la technologie moderne (chaque processeur d'ordinateur étant constitué de milliard de transistors).

1.2 Le fonctionnement

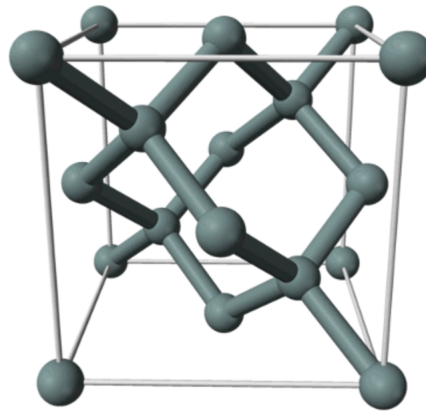
1.2.1 Semi-conducteurs et dopage

Le dopage consiste à créer un surplus ou un manque d'électrons dans un cristal (semi-conducteur) en ajoutant des atomes.

On distingue deux types d'atomes à insérer :

trivalents		pentavalents
Bore	Silicium	Arsenic
Gallium	Germanium	Antimoine
		Phosphore

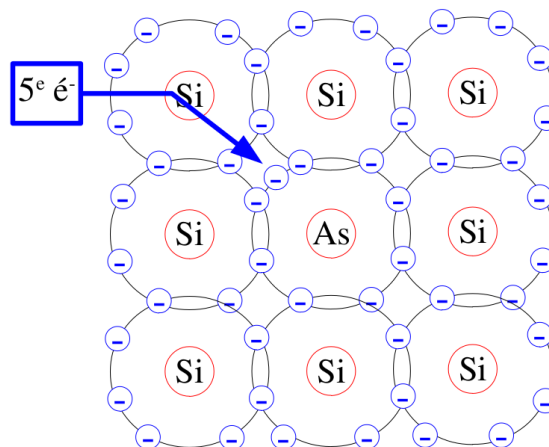
Le silicium est souvent utilisé comme semi-conducteur. Il possède 4 électrons de valence (comme le carbone) : dans un cristal, il se lie donc de façon tétraédrique à 4 autres atomes de Silicium :



Structure cristalline du silicium (source)

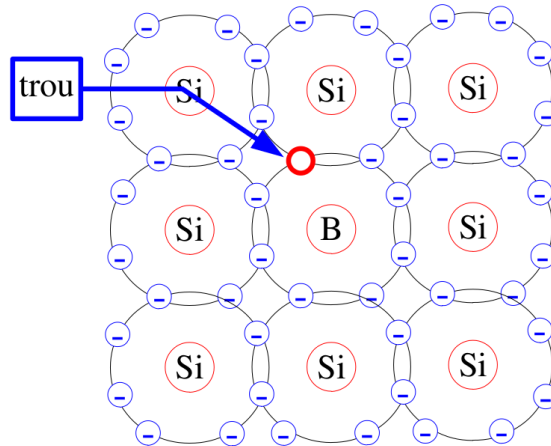
L'ajout d'électrons dans le Silicium va alors modifier la structure des bandes de conduction.

L'atome de silicium possédant 4 électrons de valence, on peut injecter un atome avec 5 électrons de valence : l'atome sera alors dans le cristal avec 4 liaisons mais possédera un électron supplémentaire.



Les électrons sont des porteurs majoritaires et les trous des porteurs minoritaires. Il s'agit alors d'une zone N.

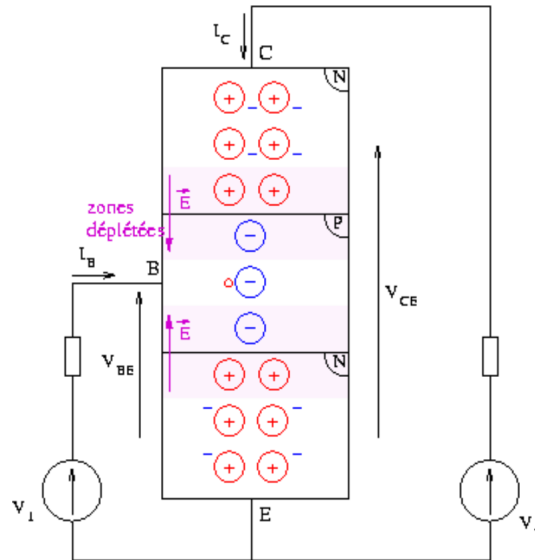
Lorsque le semi-conducteur est dopé par un trivalent, on obtient un trou créé par un manque d'électron :



Les trous sont alors des porteurs majoritaires et les électrons des porteurs minoritaires. Il s'agit alors d'une zone P.

On peut ensuite créer une jonction PN en regroupant les deux zones précédentes. Les électrons libres de la zone N sont alors piégés par les trous de la zone P. Dans la zone de séparation des deux zones N et P, on a une zone dite de déplétion dans laquelle le « chassé-croisé » des électrons rend la zone neutre. Les ions fixes de cette zone génèrent alors un champ électrique dont la norme est proportionnelle à la taille de la jonction.

On peut alors créer par exemple des transistors dits NPN ou PNP :



Les électrons arrivant dans la base peuvent rester libres longtemps avant d'être piégés. La base étant fine, ils arrivent à la 2ème jonction et passent dans le collecteur.

La majorité des électrons injectés par l'émetteur traversent la base et se retrouvent dans le collecteur. Il en résulte un courant positif I_C de valeur bien supérieure à I_B .

1.2.2 La jonction PN

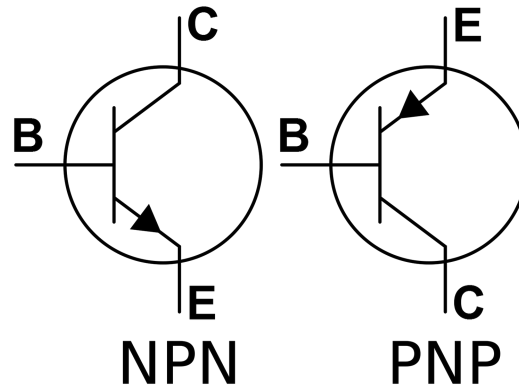
La jonction PN est réalisée dans un cristal semiconducteur unique qui est divisé en deux zones dopées, l'une par des atomes trivalents, l'autre par des atomes pentavalents. A la frontière de ces deux zones, se produisent des modifications dans une région de faible épaisseur ($10^{-6}m$). Les électrons libres de la zone N sont alors piégés par les trous de la zone P. Il en résulte une zone déplétée en porteurs : la zone de déplétion. Dans cette zone de déplétion (neutre électriquement), les ions fixes génèrent un champ électrique E. Ce champ électrique empêche la circulation d'électrons à travers la jonction.

2 Les différents transistors

2.1 Le transistor bipolaire

De façon simple, un transistor permet d'amplifier une tension : il génère un courant élevé (par E) par un courant faible (par C).

Il y a deux types de transistors bipolaire : NPN et PNP.



La distinction NPN et PNP se fait par le sens dans lequel le courant traverse le transistor. Le transistor bipolaire possède trois états de fonctionnement :

- Etat passant : le transistor laisse passer plus ou moins de courant de C à E.
- Etat de saturation maximale : quand le courant est trop élevé à travers le transistor, ce dernier agit comme un simple interrupteur.
- Etat bloqué : aucun courant ne passe, le transistor agit comme un interrupteur ouvert.

2.1.1 La géométrie du transistor NPN

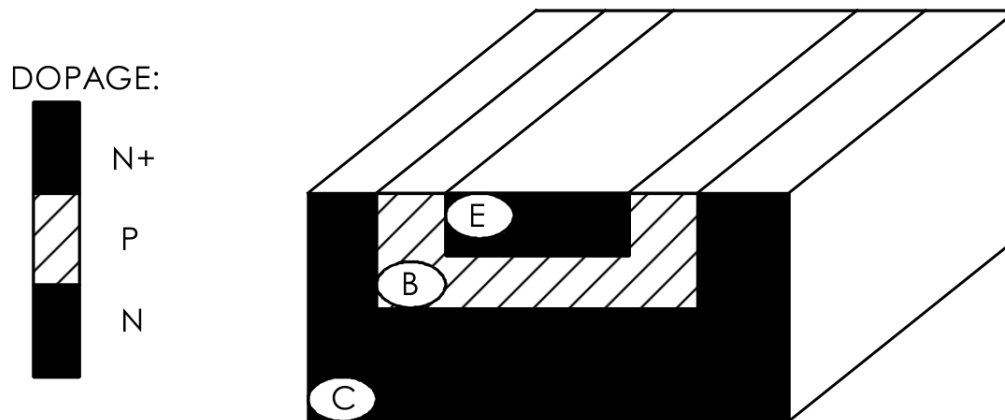


Figure 2 géométrie d'un transistor NPN

2.2 Les transistors à effet de champ

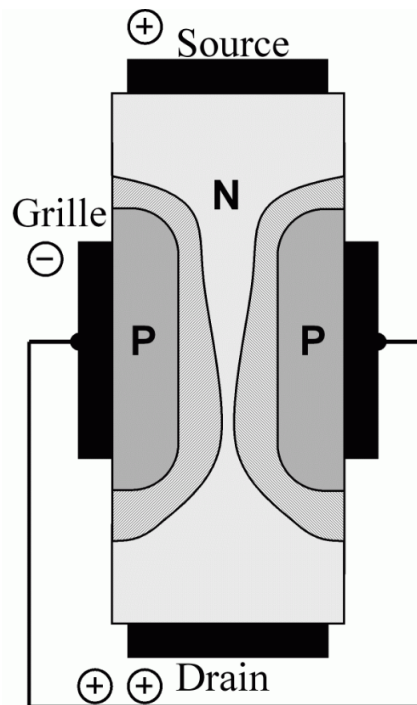
2.2.1 Transistor JFET (Junction Field Effect Transistor)

De la même façon qu'il existe deux types de transistors bipolaires (NPN et PNP), le transistor à effet de champ est décliné en deux versions : le canal N et le canal P .

On peut voir le lien avec le transistor bipolaire grâce au tableau suivant :

Transistor bipolaire	Transistor à effet de champ
Emetteur - (E)	Source - (S)
Base - (B)	Grille - (G)
Collecteur - (C)	Drain - (D)

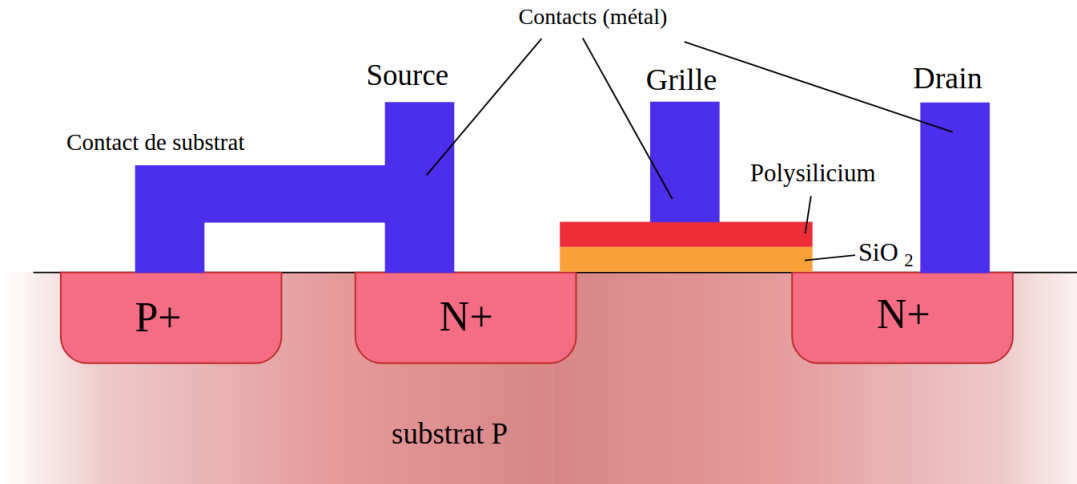
Le transistor à effet de champs est constitué d'une couche de semi-conducteur peu dopée : le canal (P ou N) aux extrémités duquel sont reliés la source et le drain. Ce canal est entouré par une couche de semi conducteur de dopage opposé, relié à la grille. Le courant circulant par le canal est contrôlé par la tension appliquée à la grille : plus la tension est forte plus le courant sera faible pour les transistors à appauvrissement, et c'est le contraire pour les transistors à enrichissement.



Sur ce schéma en gris est représentée une zone neutre, où les électrons se sont reconstitués (les charges d'une zone ont complété les trous de l'autre). Une tension aux bornes de la grille permet donc ou d'augmenter la taille de cette zone, et donc de réduire le courant passant par le canal, ou de la diminuer, et donc d'augmenter le courant passant par le canal. Par rapport à un transistor bipolaire (NPN ou PNP), il présente l'intérêt d'avoir une grande impédance d'entrée.

2.2.2 Transistor MOSFET (Metal Oxyde Semiconductor)

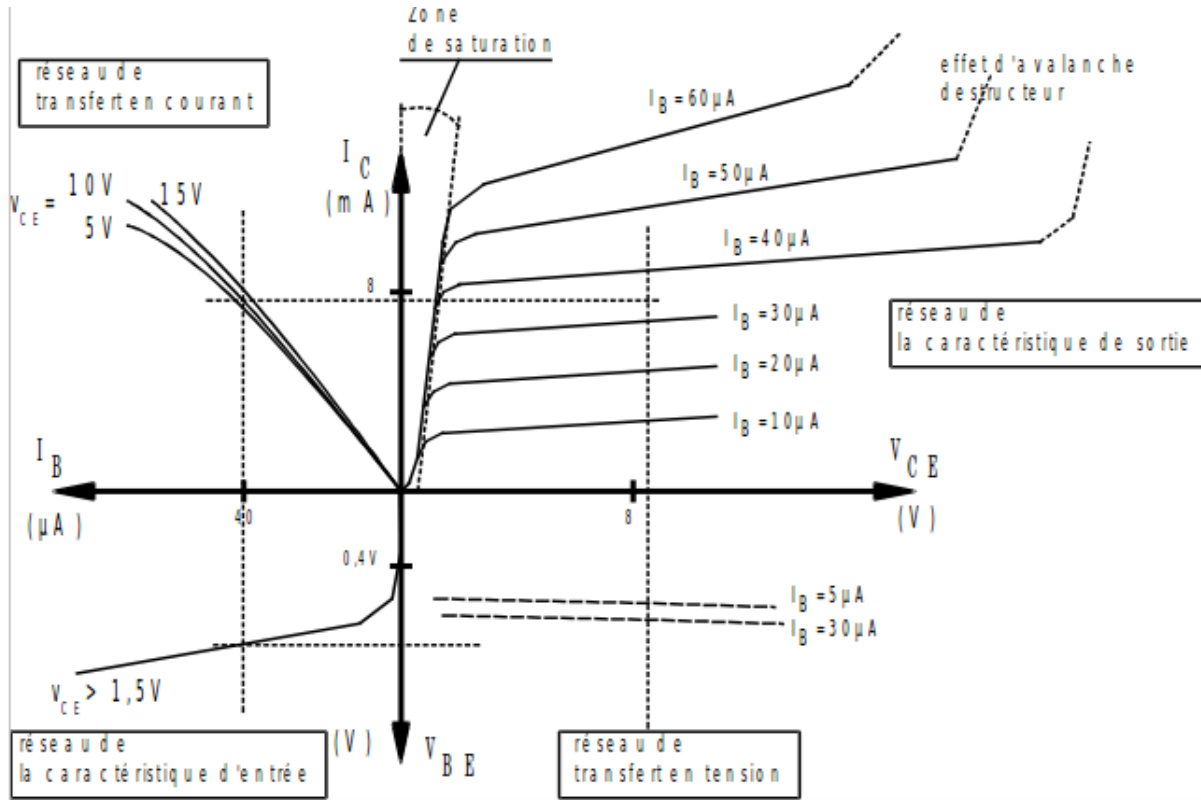
Comme les transistors bipolaires ou à effet de champs il en existe deux sortes : les NFET et les PFET, l'un est à enrichissement, l'autre à appauvrissement. Il est composé d'un corps dopé et de deux bandes de dopage opposé séparées d'une distance assez petite et d'un isolant qui fait la jonction entre les deux bandes. Les deux bandes sont la source et le drain, l'isolant constitue la grille.



Le principe est le même que celui du JFET, la tension aux bornes de la grille permet ou non le passage des électrons de la source au drain suivant si le transistor est à enrichissement ou à appauvrissement. Ce sont actuellement les plus utilisés pour plusieurs raisons : leur fabrication est plus rapide, plus simple et moins coûteuse et ils ont une consommation assez faible.

3 Les caractéristiques du transistor

Pour comprendre les caractéristiques du transistor, il faut comprendre le document suivant :



Le cadran en bas à gauche montre la tension d'entrée en fonction du courant d'entrée. On peut voir que pour une tension de sortie V_{CE} suffisante, on obtient une caractéristique de DIODE pratiquement indépendante de V_{CE} . Ce cadran nous permet de calculer la résistance d'entrée.

Le graphe V_{CE} en fonction de I_C montre que lorsque la tension V_{CE} est suffisante, l'effet transistor apparaît : le collecteur se comporte comme un générateur de courant commandé par le courant de base. Le courant I_C est alors pratiquement indépendant de la tension V_{CE} . Ce graphe nous permet de calculer la résistance de sortie.

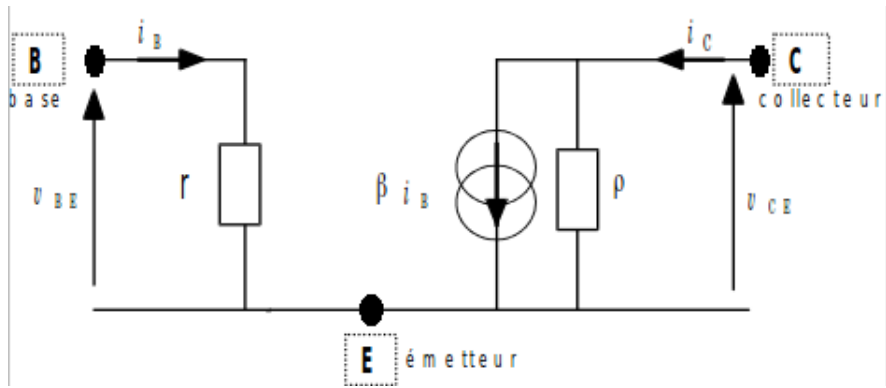
Le cadran en haut à gauche représente I_C en fonction de I_B : C'est pratiquement une droite très peu dépendante de V_{CE} . Ce cadran permet de calculer le gain en courant.

De ces cadrants, on peut également en déduire les équations ci-dessous, de ces équations, on déduira le comportement en régime variable du transistor ainsi que son schéma hybride.

$$dI_B = \frac{\partial I_C}{\partial I_B} dI_B + \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} dV_{CE} \text{ or } \frac{\partial I_C}{\partial I_B} = \beta = h_{21} \text{ et } \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} = \rho = \frac{1}{h_{22}}$$

$$dV_{BE} = \frac{\partial V_{BE}}{\partial I_B} dI_B + \frac{\partial V_{BE}}{\partial V_{CE}} dV_{CE} \text{ or } \frac{\partial V_{BE}}{\partial I_B} = r = h_{11} \text{ et } \frac{\partial V_{BE}}{\partial V_{CE}} = 0 \text{ car on suppose que } V_{BE} \text{ ne dépend pas de la sortie } (V_{CE} = 0).$$

Grâce à ces équations, on peut tracer le schéma hybride suivant :



4 Les expériences réalisées

4.1 Réalisation d'un TP : Montages à transistors

4.1.1 Montage avec transistor NPN simple

Nous avons réalisé un TP pour constater l'amplification de tension d'un transistor NPN. On a commencé par calculer les différentes grandeurs caractéristiques dont nous avons parlé auparavant. On rappelle ces grandeurs :

Le gain en courant :

$$\beta = \frac{\partial I_C}{\partial I_B}$$

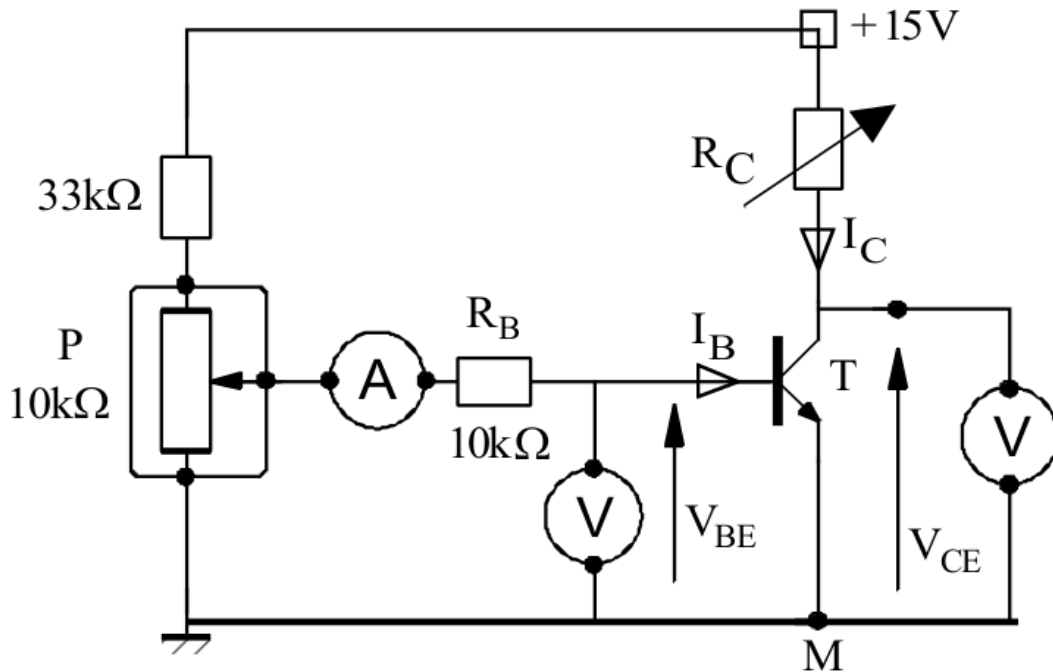
La résistance d'entrée :

$$r = \frac{\partial V_{BE}}{\partial I_B}$$

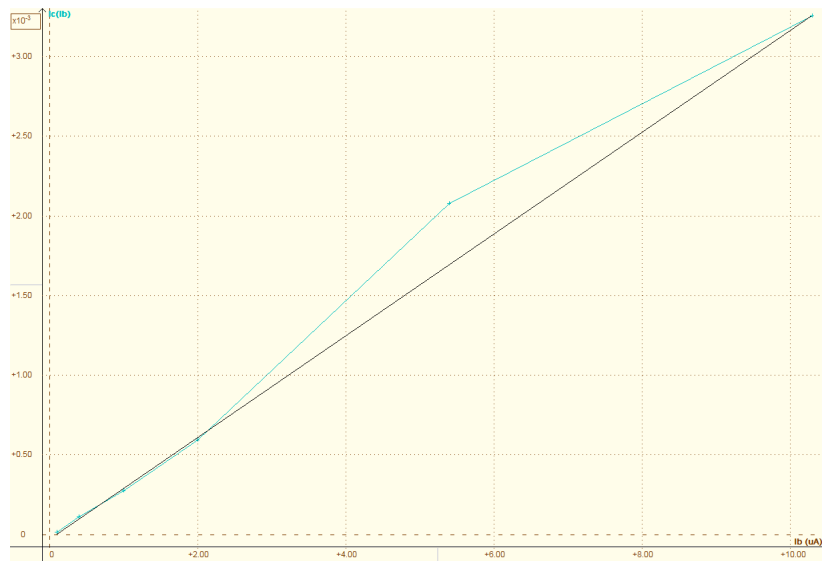
La résistance de sortie :

$$\rho = \frac{\partial V_{CE}}{\partial I_C}$$

Avec le schéma suivant :

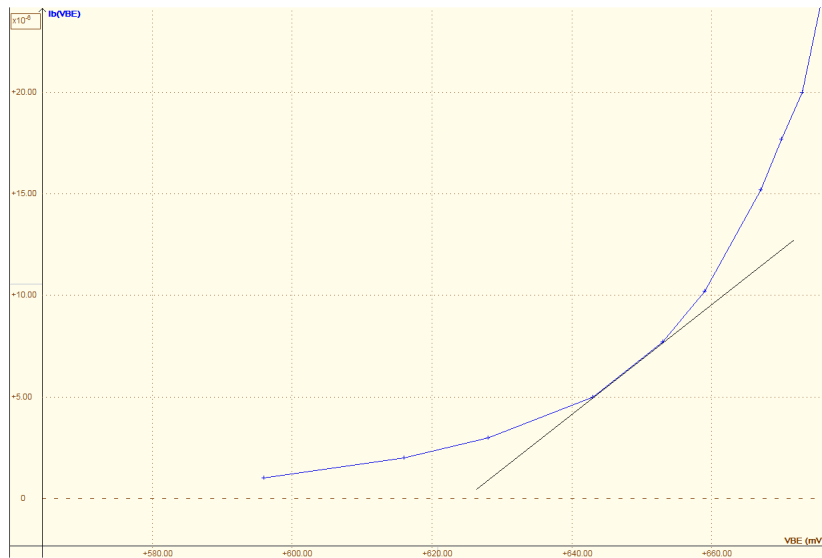


Grâce à Synchronie, nous avons pu tracer différentes courbes et calculer les grandeurs mentionnées ci-dessus.



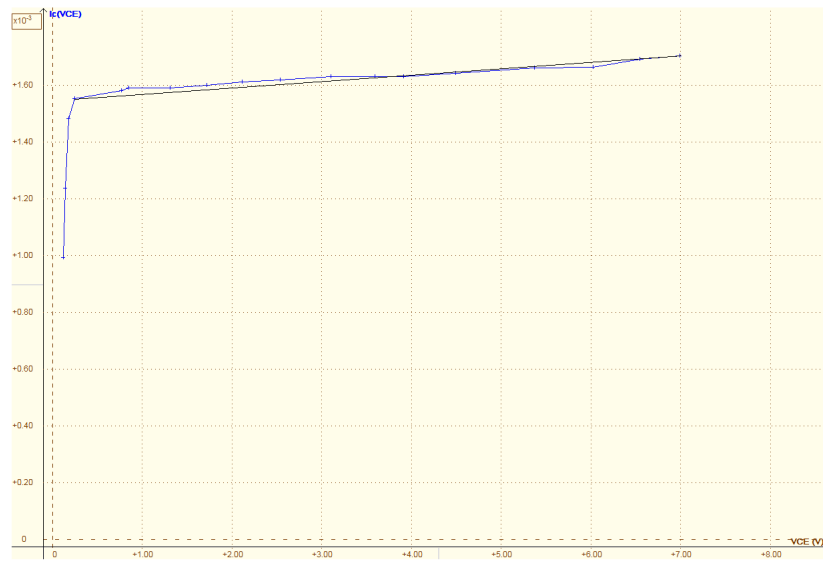
Cette courbe mesure l'intensité I_C en fonction de I_B . On calcule ensuite $\beta = \frac{\partial I_C}{\partial I_B} = 320$. Le courant est donc multiplié par 320.

On a pratiquement une droite peu dépendante de V_{CE} .



Cette courbe mesure l'intensité I_B en fonction de V_{BE} . On calcule ensuite la résistance dynamique d'entrée $r = \frac{\partial V_{BE}}{\partial I_B} = 2704$.

Dès que V_{CE} est suffisante, nous obtenons une caractéristique de DIODE indépendante de V_{CE} .



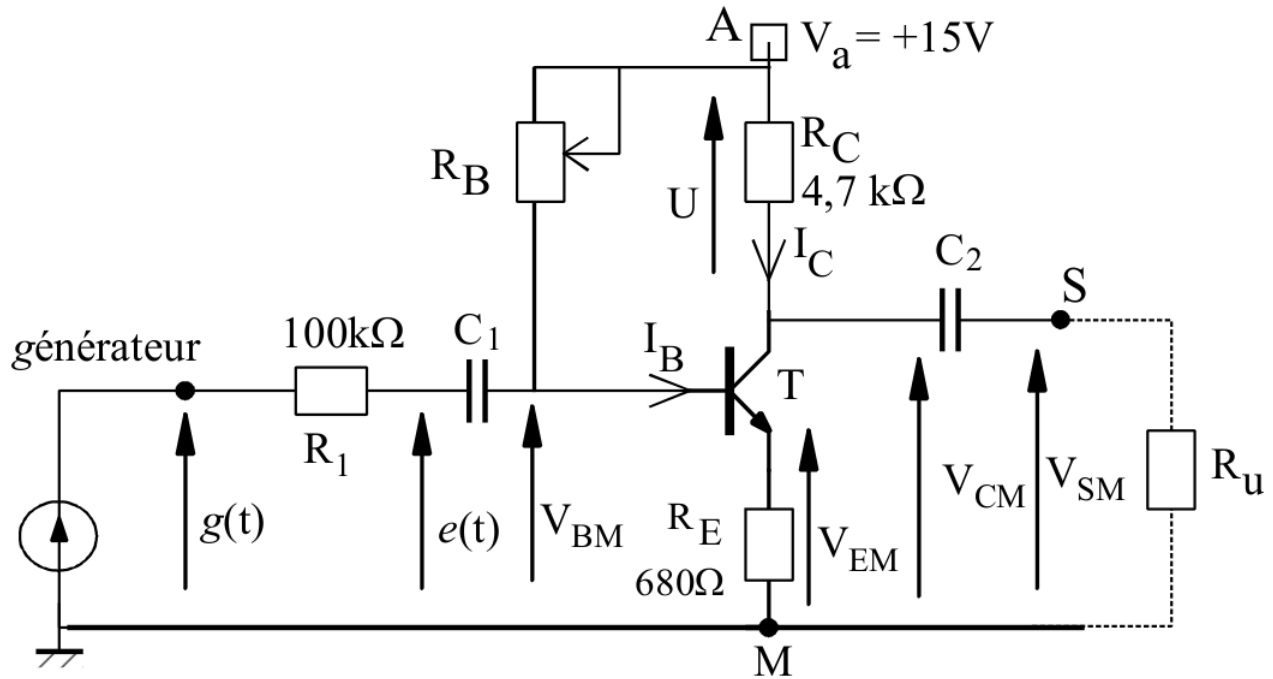
Cette courbe mesure l'intensité I_C en fonction de V_{CE} . On calcule ensuite $\rho = \frac{\partial V_{CE}}{\partial I_C} = 44130$.

Dès que V_{CE} est suffisante, l'effet transistor apparaît : le collecteur se comporte comme un générateur de courant commandé par le courant de base. Le courant I_C est pratiquement indépendant de la tension V_{CE} .

Remarque : Si V_{CE} est trop importante, il peut se produire un effet d'avalanche. Cela est dû au flux d'électrons dans le collecteur. Il s'agit en fait d'une réaction en chaîne due aux collisions qui libèrent des électrons de conduction.

4.1.2 Montage émetteur commun

On a ensuite réalisé le montage émetteur commun suivant :



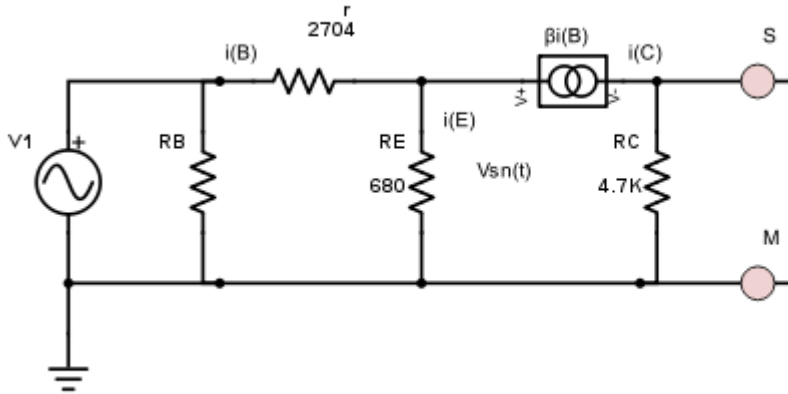
On réglera le générateur sur une fréquence de 10 kHz . On rappelle que le générateur est muni de deux atténuateurs par 10 (-20dB) .

Les buts principaux d'un montage émetteur commun est d'amplifier la tension ou le courant. On veut d'abord régler RB pour polariser le transistor pour avoir : Les condensateurs équivalent à des circuits ouverts. Les générateurs indépendants fournissant des grandeurs variables négligeables, on cherche la valeur de RB de sorte que l'écrêtage soit symétrique, on trouve $R_B = 2.07M\Omega$.

On cherche ensuite la valeur de l'amplication à vide qu'on nomme A_{V0} .

Expérimentalement, on trouve : $A_{V0} = \frac{V_{SM}}{V_{BM}} = \frac{5}{0.86} = 5.8$.

Théoriquement, on supprime les sources constantes et les condensateurs sont considérés comme des courts-circuits.



Sur ce schéma équivalent, on remplace le transistor par son schéma équivalent en négligeant certaines caractéristiques dues au montage.

Grâce aux schémas des variations, on a :

$$e(t) = rI_B - R_e(\beta + 1)I_B$$

$$V_{SM}(t) = -R_c \times I_c = -R_c\beta I_B$$

On a donc :

$$|A_{V0}| = \frac{R_c\beta}{r + R_e(\beta + 1)} = \frac{4700 \times 320}{270 + 680 \times 321} = 6.8.$$

On a une erreur de 15% liée à la lecture de $e(t)$.

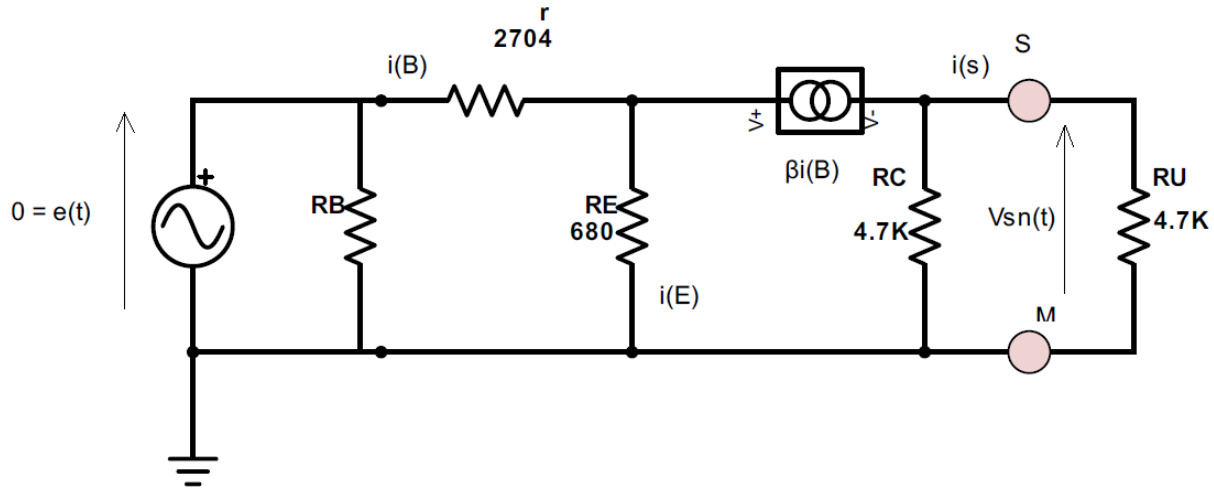
On cherche ensuite la valeur de la résistance de sortie R_S , pour cela on fait le rapport de l'amplitude de V_{SM} avec et sans R_U .

$$\frac{V_{SM2}}{V_{SM1}} = \frac{3.96}{1.98} = 2 \text{ or } V_{SM2} = R_s I_s \text{ (Sans } R_U)$$

$$\text{et } V_{SM1} = \frac{-R_U R_S I_s}{R_U + R_S} \text{ donc :}$$

$$\frac{V_{SM2}}{V_{SM1}} = \frac{R_S I_s (R_U + R_S)}{-R_U R_S I_s} = 2 \iff \frac{R_U + R_S}{R_U} = 2 \iff R_U = R_S = 4.7k\Omega.$$

Théoriquement, on reprend le schéma des variations, on en déduit que :



$$e(t) = 0 \implies I_B = 0 \implies \beta I_B = 0$$

d'où

$$I_S = \frac{V_{SM}}{R_c} \text{ or } R_s = \frac{V_{SM}}{I_S} \text{ donc } R_c = R_s = 4.7k\Omega.$$

Ainsi, la résistance de sortie est égale à la résistance d'entrée du montage qui suit.

On cherche maintenant la valeur de la résistance d'entrée R_e .

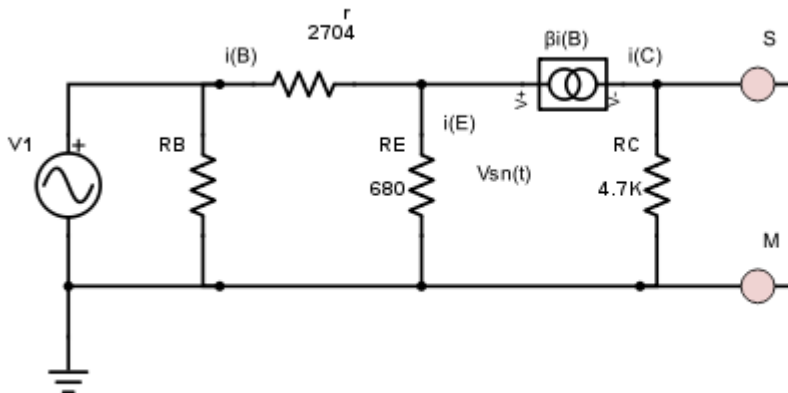
Expérimentalement, on a : $g(t) = 1.2V$ et $e(t) = 0.8V$.

A l'aide du montage équivalent, on a :

$$e(t) = \frac{R_e}{R_1 + R_e} \times g(t) \text{ (Pont diviseur de tension)}$$

$$\text{d'où } R_1 e(t) = R_e (g(t) - e(t)) \iff R_e = \frac{R_1 e(t)}{g(t) - e(t)} = \frac{100000 \times 0.8}{1.2 - 0.8} = 200k\Omega$$

Théoriquement, on reprend le schéma des variations, on a :



$$R_e = \frac{e(t)}{I_e} \text{ or } e(t) = rI_B + (\beta + 1)R_e I_B \text{ et } I_e = I_1 + I_B = \frac{e(t)}{R_B} + \frac{e(t)}{r + (\beta + 1)R_E} \implies R_e = \frac{(r + R_E(\beta + 1))R_B}{r + R_E(\beta + 1) + R_B} = \frac{(2704 + 321 \times 680) \times 2070000}{2704 + 321 \times 680 + 2070000} = 200k\Omega.$$

On a 0% d'erreur, ce qui est un « coup de chance ».

On a un effet passe-haut dû à la résistance d'entrée du montage. La fréquence de coupure est à 0.5Hz à -3dB.