

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département des Sciences de la Matière

Filière Physique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي « برج بوعريريج »

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم علوم المادة

فرع فيزياء

# Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLOME LICENCE

Filière : Physique

Option : Physique des Matériaux

THEME

## Transistor bipolaire

**Présenté par :**

- AZZOUG ASMA
- MIHOUBI LAMIA

**Encadreur :** LATRECHE Abdelhakim

**Année Universitaire 2014-2015**

## REMERCIEMENTS

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*Notre plus grande gratitude va à notre encadreur, notre encadreur Mr : Latreche Abdelhakim pour sa disponibilité, pour la confiance qu'il nous a accordée ainsi que pour ses précieux conseils. Et son aide dut toute ce période qui nous a permis de mener à bien ce travail.*

*En fin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## Dédicace

 *Je dédie Ce mémoire à ...* 

*Je remercie mon dieu ALLAH qui est toujours présent avec moi dans le meilleur et dans la pire.*

*À mon cher parent : **Mama** « signe d'amour et de tendresse »*

*À baba **Amar** merci beaucoup.*

*À mes frères et mes sœurs Hayat et Khadidja et les enfants de mes sœurs « mon amour Djaber et Iyad et Mouadh et ma belle Serine »*

*À toute ma famille*

*À mon proche amie **NESRINE** et tous mes amis*

*À mon amie et binôme « **LAMIA MIHOUBI** » chez j'ai trouvée l'entente dont j'avais besoin.*

*À tout la promotion de 3<sup>ème</sup> année physique des matériaux*

*2014/2015.*

***AZZOUG ASMA***

# Dédicace

*Je remercie ALLAH qui est toujours présent avec moi dans le meilleur et dans la pire.*

*À ce qui est toujours mon meilleur exemple dans la vie : mon père Mohamed elhacene, pour les sacrifices qu'il a consentis pour mon éducation et pour l'avenir qu'il n'a cessé d'offrir,*

*À la symbole de douceur, de tendresse, d'amour et affection, et grâce au sens de devoir et aux sacrifices immenses qu'elle a consentis : ma mère soria dahmani j'ai pu arriver à réaliser ce travail.*

*À mes chers sœurs : nouara et mounira , pour les enfant de ma sœur : houda amine et imane .*

*À mes chers frère : Aziz, soufian et farid .*

*À MA VIE, a qui donne à moi l'aide moral et physique, a qui est avec moi dans tous les moment, à mes yeux à mon marié hassen .*

*À celles qui étaient présentes dans mon cœur, malgré les distances qui nous séparent : baya, malika ,siham ,imane, meriame ,samia ,ahlam ,kahina*

*À mon ami et binôme Asma chez j'ai trouvée l'entente dont j'avais besoin.*

*À tous mes collègues de SM, et à tous mes enseignants*

2014/2015

**LAMIA**

## Sommaire

### Introduction générale 1

### Chapitre I : Généralités sur les semi-conducteurs

1. Introduction : .....	2
2. Classification des matériaux : .....	2
2.1. Les isolants.....	2
2.2. Les semi-conducteurs : .....	2
2.3. Les Conducteurs : .....	2
3. Semi-conducteurs intrinsèques:.....	3
3.1. Définition : .....	3
3.2. Génération de pair électron-trou : .....	5
4. Semi-conducteurs extrinsèques:.....	6
4.1. Dopage : .....	6
4.2. Semi-conducteur de type N : .....	7
4.3. Semi-conducteur de type P : .....	8

### Chapitre II : La jonction PN

1. Introduction : .....	10
2. Jonction isolée : Diffusion des majoritaires et zone de transition : .....	10
3. Jonction polarisée : .....	11
3.1. Jonction PN polarisée en direct : .....	11
3.2. Jonction P-N polarisée en inverse : .....	12
4. Caractéristiques courant-tension : .....	12
4.1. Caractéristique directe : .....	12
4.2. Caractéristique inverse : .....	13
5. Phénomène de claquage : .....	13

### Chapitre III : Transistor Bipolaire

1. Introduction : .....	14
2. Structure d'un transistor : .....	14
3. L'effet transistor : .....	14
3.1. Etude le cas d'un transistor NPN : .....	14
3.2. Le transistor non polarisé : .....	16
3.3. Le transistor polarisé : .....	16
3.3.1. Etat bloqué:.....	16
3.3.2. Etat passant : .....	16
3.3.3. Etat saturé:.....	18
4. Schéma equivalent simplifié : .....	19
5. Caractéristiques en fonctionnement normal : .....	20
5.1. Caractéristiques $I_B (V_{BE})$ du transistor NPN : .....	20
5.2. Caractéristiques $I_C (V_{CE})$ du transistor NPN : .....	20
5.3. La droite de charge : .....	21
5.4. Effet Early : .....	22

6. Polarisation d'un transistor:.....	22
6.1. Rôle de la polarisation :.....	22
6.2. Schémas de polarisation:.....	23
6.2.1. Polarisation par deux sources de tensions :.....	23
6.2.2. Polarisation par résistance de base:.....	23
6.2.3. Polarisation par réaction d'émetteur :.....	23
6.2.4. Polarisation par réaction de collecteur :.....	24
6.2.5. Polarisation par pont de base et résistance d'émetteur :.....	24
7. Montage de base :.....	24
7.1. Montage émetteur commun :.....	25
a) Amplification :.....	25
b) Limites d'utilisation d'un transistor :.....	26
c) Tensions de claquage :.....	26
d) Courant maximum :.....	26
7.2. Montage base commune :.....	27
7.3. Montage collecteur commun :.....	27
8. Les applications du transistor bipolaire :.....	28
9. Exemples d'application: .....	28
1. Amplificateur	
2. Feux de carrefour	
<b>Conclusion générale :.....</b>	<b>29</b>

### **Introduction générale**

Le transistor est un dispositif électronique semi-conducteur qui a remplacé avantageusement l'utilisation de la lampe à vide. À la fin des années 60, les compagnies de produits audiovisuels axaient leur publicité sur les télévisions à transistors et les radios transistors. La lampe à vide, encombrante consommant beaucoup d'énergie, avec un coût de production élevé et un délai de réaction trop long, devenait du même coup reléguée aux oubliettes. L'invention du transistor en 1947 a provoqué une révolution dans l'histoire de l'électronique. On n'a qu'à penser aux appareils audio et vidéo, aux électroménagers, à l'informatique, au domaine de l'automobile, aux appareils médicaux, aux télécommunications, à l'aérospatiale, sans compter tout le secteur de l'industrie.

Le principe de fonctionnement du Transistor bipolaire est basé sur deux jonctions PN, l'une en direct et l'autre en inverse. La polarisation de la jonction PN inverse par un faible courant électrique (parfois appelé *effet transistor*) permet de « commander » un courant beaucoup plus important, suivant le principe de l'amplification de courant. Notre travail contient trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons une généralité sur les semiconducteurs. Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude de la jonction PN et son fonctionnement lorsque une tension directe ou inverse est appliquée sur lui. Le troisième chapitre sera consacré à la structure du transistor bipolaire et son principe de fonctionnement, ainsi ses applications. Nous concluons ce travail par une conclusion générale.

## 1. Introduction :

La recherche sur les matériaux semi-conducteurs a commencée au début du 19<sup>ème</sup> siècle. Au fil des années, de nombreux semi-conducteurs ont été étudiés. Parmi les plus célèbres, nous trouvons le silicium (Si) et le germanium (Ge) de la colonne IV du tableau périodique. Ces deux semi-conducteurs sont composés d'atomes identiques, mais d'autres, comme l'arséniure de gallium GaAs (III-V) sont composés d'atome d'éléments différents : Ga (III) et As (V). La Composition de semi-conducteurs permet d'accéder à des propriétés électriques et optiques que n'ont pas les semi-conducteurs purs.

Le germanium est le plus utilisé ; et découvert par le savant allemand Clemens Winkler le 6 février 1886. Cependant il ne peut pas être employé dans les applications nécessitant une faible consommation de courant et/ou soumises à de hautes températures ; le germanium a servi de substrat semi-conducteur jusqu'à ce que le silicium prenne sa place, vers les années 1970. Le silicium fut découvert en 1824 par J.J. Berzelius à Stockholm, en Suède, il occupe une position dominante parmi les semi-conducteur, d'un cout moins élevé et permettant des applications à faibles consommations, sera très utilisé dès 1960.

## 2. Classification des matériaux :

Les matériaux solides peuvent être classés en trois groupes qui sont : les isolants, les semiconducteurs et les métaux.

### 2.1. Les isolants :

Sont Les matériaux dont la bande de conduction supérieure est totalement remplie, avec une bande interdite dont la largeur est bien supérieure à l'énergie d'agitation thermique  $kT = 0,026 \text{ eV}$ . Il n'est pas possible d'accélérer des électrons avec un champ électrique extérieur car il n'est pas d'état d'excitation libre de faible énergie, Figure (1-1b).

### 2.2. Les semi-conducteurs :

Un semi-conducteur est intermédiaire entre un métal et un isolant. À  $T=0 \text{ K}$ , il se comporte comme un isolant mais il conduit l'électricité dès que la température augmente. Sa conductivité augmente avec la température contrairement aux métaux.

La structure de bande est analogue à celle des isolants, avec une zone interdite séparant la bande de valence de celle de conduction ; mais la largeur de celle-ci est plus faible. (Par exemple de 1,12 eV pour le silicium), Figure (1-1c).

À  $T = 0 \text{ K}$ , la bande permise occupée la plus haute est complètement remplie : c'est la bande de valence. La bande permise vide la plus basse est la bande de conduction elle est vide à  $T= 0\text{K}$ . Lorsque la température augmente ; l'énergie d'agitation thermique excite un certain nombre d'électrons de la bande de valence vers la bande de conduction ; comme celle-ci est incomplètement remplie, il y a conduction si l'on applique un champ électrique. A cette conduction d'origine électrique s'ajoute celle des trous qui sont les places vacantes laissées par les électrons dans la bande de valence. Pour un semi-conducteur ; la conductivité est d'autant plus grande que le nombre d'électrons dans la bande de conduction est élevé que la température est plus grande.

### 2.3. Les Conducteurs :

Sont les corps qui n'ont pas de bande interdite, dont la bande supérieure est partiellement remplie. (Li ; Na ; K ; Rb ; Cs...). La bande de valence et la bande de conduction sont jointives. Il existe donc, à toute température des électrons libres dans la bande de conduction. Un champ électrique peut alors déplacer des électrons et ceci explique la grande conductivité électrique de ces électrons, Figure (1-1a).

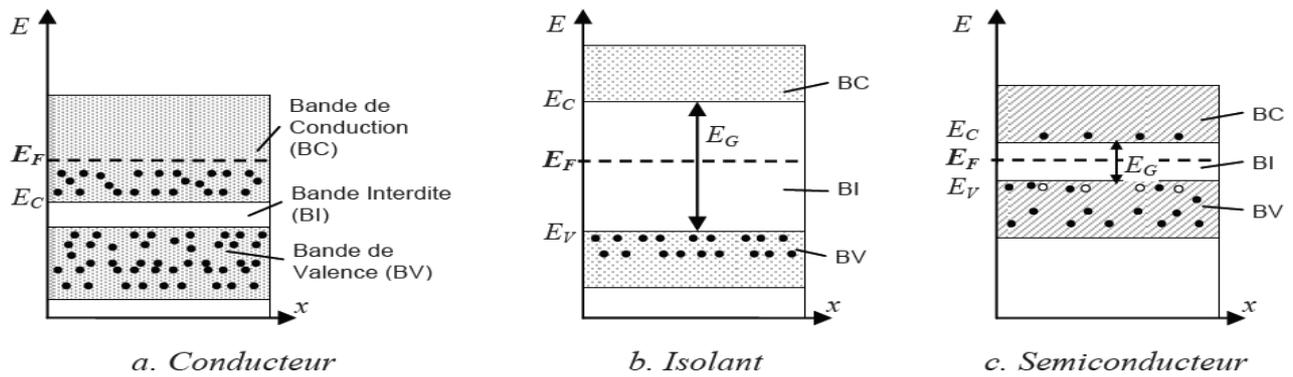


Figure 1-1 : diagramme de bande d'énergie d'un conducteur, d'un isolant et d'un semi-conducteur.

### 3. Semi-conducteurs intrinsèques :

#### 3.1. Définition :

Un semi-conducteur est dit intrinsèque ; s'il est à l'état pur, ne possédant ni défaut physique ni défaut chimique (le cristal de germanium ou de silicium est parfaitement pur) dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité de porteurs. Un tel monocristal possède une structure de type tétraédrique c'est-à-dire que chaque atome est entouré symétriquement de 4 atomes (Figure 1-2). Les électrons de la bande de conduction ne peuvent résulter que de l'excitation thermique d'électrons liés de la bande de valence. Il en résulte que les électrons et les trous existent nécessairement par paires et  $n = p = n_i$ .

$$n = n_c \cdot \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{KT}\right) \tag{1.1}$$

$$P = n_v \cdot \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{KT}\right) \tag{1.2}$$

Sachant que  $np = n_i^2$  et donc

$$n_i^2 = n_c n_v \exp\left(-\frac{E_g}{KT}\right) \tag{1.3}$$

$n_i$  : est appelé densité de porteur intrinsèque.

$p$  : la densité de trous.

$n$  : la densité de l'électrons.

$n_c$  : la densité effective d'états des électron dans la bande de conduction.

$n_v$  : la densité effective d'états des électron dans la bande de valence.

On peut donc exprimer la concentration intrinsèque par :

$$n_i = \sqrt{n_c n_v} e^{(-E_g/2kT)} \tag{1.4}$$

C'est une caractéristique du semi-conducteur à une température donné, ainsi le semi-conducteur "intrinsèque" en tant que mauvais conducteur ou mauvais isolant a lui une conductivité qui augmente avec la température. On représente l'évolution de la concentration des porteurs libres en fonction de la température sur la figure (1-3).

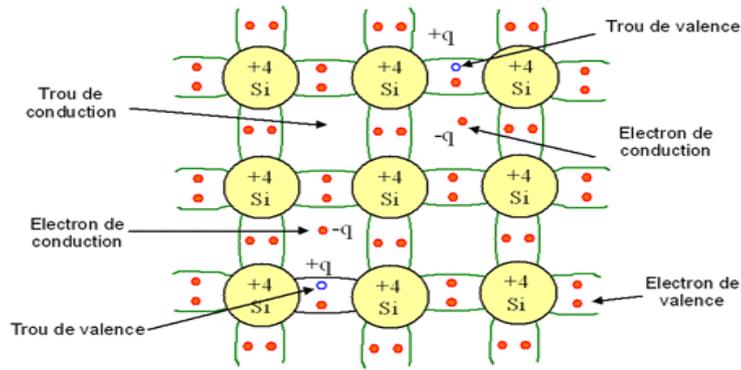


Figure I-2 : semi-conducteur intrinsèque : à chaque électron de la bande de Conduction correspond un trou de la bande de valence.

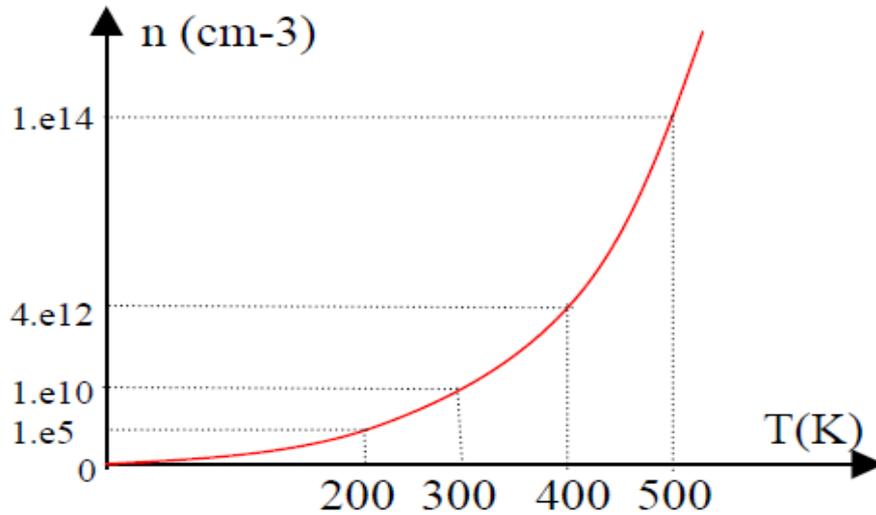


Figure I-3 : Evolution de la concentration des porteurs libres en fonction de la température.

La conductivité du semi-conducteur intrinsèque est donc liée essentiellement au nombre de porteurs libres qui lui varie avec la température.

Le niveau de fermi d'un système intrinsèque est proche du milieu de la bande interdite

$$E_{Fi} = \frac{(E_C + E_V)}{2} + \frac{k_B T}{2} \log \left[ \frac{n_v}{n_c} \right] \tag{1.5}$$

$E_{Fi}$  : position du niveau de fermi dans un semi-conducteur intrinsèque.

Il en résulte que le niveau de Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque est toujours très voisin du milieu du gap à la température ambiante.

$$E_{Fi} = \frac{(E_C + E_V)}{2} \tag{1.6}$$

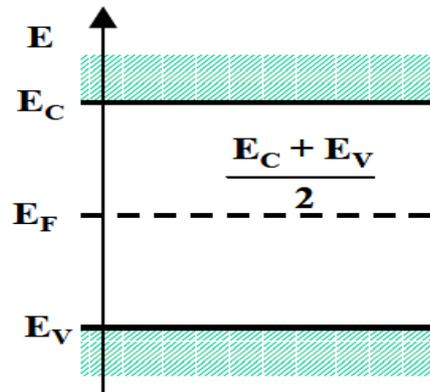


Figure I-4 : Position du niveau de fermi intrinsèque.

Il peut être noté que le niveau de fermi se trouve dans la bande interdite, c'est-à-dire à un niveau énergétique non accessible aux électrons. Le niveau de fermi traduit un niveau statistique et non pas un niveau effectivement occupé.

3.2. Génération de pair électron-trou :

A la température du zéro absolu (0 K) un semi-conducteur intrinsèque serait isolant. Si on augmente sa température les électrons des atomes qui constituent le semi-conducteur le plus particulièrement les électrons de valence vont absorber une partie de cette énergie. Certains électrons vont gagner suffisamment d'énergie pour se libérer de l'attraction des atomes parents et devenir complètement libre de se mouvoir dans le cristal (c'est la rupture des liaisons covalentes). En présence d'un champ électrique externe ces électrons libres peuvent contribuer à la conduction électrique. La rupture des liaisons libère des électrons mais aussi produit des atomes ionisés qui sont à vides d'électrons. Ces atomes ionisés représentent des pièges à électrons ou « trous », (Figure 1-5a). Le trou se comporte comme une charge positive de même grandeur que celle l'électron.

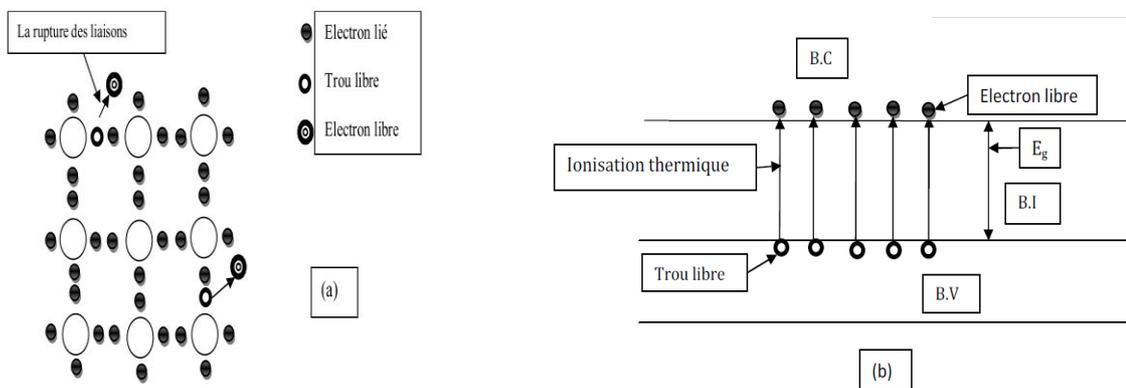


Figure 1-5 : production de paires électrons-trous par ionisation thermique.

- (a) : rupture des liaisons covalentes dans un semi-conducteur.
- (b) : équivalent énergétique.

Sur le plan énergétique la rupture des liaisons est équivalente au passage des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC). Un électron qui quitte la bande de valence (BV) laisse derrière lui un trou (Figure I-5b).

En présence d'un champ externe, le trou se déplace par capture successive d'un électron de l'atome voisin. Ceci est équivalent à une charge positive (+e) qui se déplace. Dans un semi-conducteur

intrinsèque, l'ionisation thermique produit autant d'électron que de trous. La densité de courant totale vaut donc :

$$\vec{j} = \vec{j}_n + \vec{j}_p \tag{I.7}$$

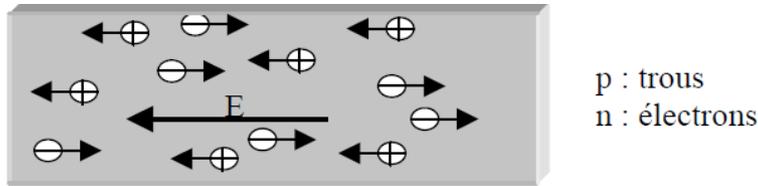


Figure 1-6 : Effet de champ électrique sur les porteurs dans la matière.

La concentration en électron,  $n_i$  est toujours égale à la concentration en trous  $p_i$  :  $n_i = p_i$ .

La concentration dépend également de la largeur de la bande interdite,  $E_g$ . En effet, la concentration sera d'autant plus grande lorsque,  $E_g$  est petite car il sera plus facile de rompre les liaisons c'est-à-dire faire passer les électrons de la BV à la BC. Le tableau (1.1) regroupe les valeurs de  $E_g$  à 0°K pour les plus importants.

Semiconducteur	Si	Ge	Sn	GaAs	PbSe	PbTe	ZnS	GaSb	CdS
$E_g$ en eV à 0°k	1,17	0,74	0,08	1,52	0,27	0,30	3,91	0,78	2,58

Tableau I.1 : Largeur de la bande interdite de quelque semi-conducteur à 0 K.

Dans un semi-conducteur intrinsèque, le processus de génération de pair électron-trou s'oppose un processus de recombinaison des électrons avec les trous. En effet, s'il n'y avait que le processus de génération tout seul, il conduirait à une rupture totale de toute les liaisons atomique et finalement à un état liquide quel que soit la température. C'est pourquoi, pour une température donnée, il y aura toujours un mécanisme de génération et un mécanisme de recombinaison pour réguler le nombre de paires électrons-trous dans un semi-conducteur. Pour chaque température, une situation d'équilibre entre la vitesse de génération,  $V_g$ , et la vitesse de recombinaison,  $V_r$ , est atteinte : c'est l'équilibre thermique ou thermodynamique, on écrit :

$$V_g = V_r = C.n_i.p_i \tag{1.8}$$

C : une constante de proportionnalité qui dépend de la nature de semi-conducteur. Pour un semi-conducteur extrinsèque, le terme dû aux porteurs majoritaires est prépondérant, et l'effet des porteurs minoritaires étant négligeable.

## 4. Semi-conducteurs extrinsèques :

### 4.1. Dopage :

Les propriétés électrique d'un cristal semi-conducteur sont profondément modifiées si l'on remplace certains atomes du réseau par des atomes ayant par rapport à l'atome substitué, un électron en plus ou en moins dans son cortège électronique. On désigne ceci sous le nom de dopage. Ce dernier consiste à introduire des impuretés dans le cristal qui vont avoir pour conséquence de créer des niveaux d'énergie dans la bande interdite. Un semi-conducteur dopé est appelé semi-conducteur extrinsèque. Prenons le cas du silicium situé dans la colonne IV de la classification périodique. On peut introduire

dans son cristal des impuretés (appelé dopants) appartenant à la colonne III (du Bor, par exemple) ou V (du phosphore, par exemple). Ces dopants doivent se placer en position substitutionnelle dans le cristal (ils doivent prendre la place d'un atome de silicium). En effet, les dopants placés en position interstitielle (dans un interstice du réseau) ne conduisent pas à une modification notable des propriétés électriques.

Le semi-conducteur où on a introduit des impuretés de dopage est dit semi-conducteur extrinsèque. Pour un semi-conducteur quadrivalent dopé avec des impuretés trivalentes, est un semi-conducteur extrinsèque de type P. par contre, s'il est dopé avec des impuretés pentavalente son dit qu'il est extrinsèque de type N, On utilise le dopage Pour augmenter la concentration des porteurs libres (conductivité des semi-conducteurs) et On utilise les divers semi-conducteurs dopés au sein de structures de type jonction PN ou de canal P entouré de N et inversement.

**4.2. Semi-conducteur de type N :**

Supposons que nous ayons remplacé, dans un cristal de silicium, un atome de silicium par un atome d'arsenic ; ce dernier possède 5 électrons de valence alors que le silicium n'en possède que 4. Cet électron supplémentaire est sur un niveau d'énergie, situé dans la bande d'interdite, placé à 54 meV en dessous du minimum ;  $E_c$  de la bande de conduction (figure I.7). C'est une orbitale localisée au voisinage de l'atome d'arsenic qui n'est pas délocalisée dans tout le cristal comme c'est le cas des bandes d'énergie mais comme ce niveau d'énergie est situé à 54 meV au-dessous de la bande de conduction par excitation thermique. Il participe donc à la conduction dans le cristal. Le dopage est qualifié pour cette raison de dopage N ; le dopant dans cet exemple l'arsenic, se comporte comme un donneur d'électron de semi-conducteur obtenu est dit de type N.

En conclue que dans un semi-conducteur de type N affirmé :

- les électrons sont majoritaires.
- la concentration en électrons est pratiquement égale à la concentration de dopant.
- les trous sont minoritaires.

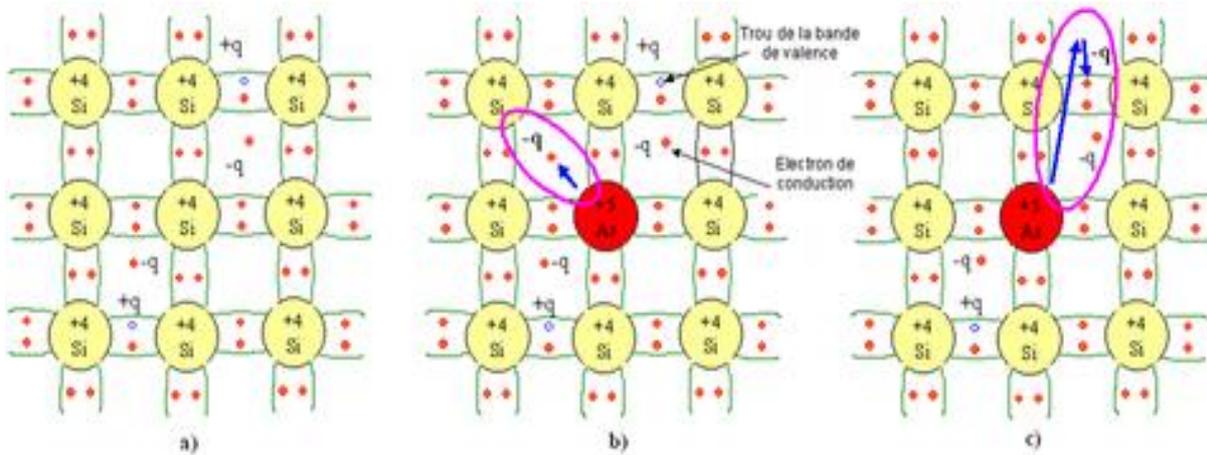


Figure 1-7 : dopage de type N.

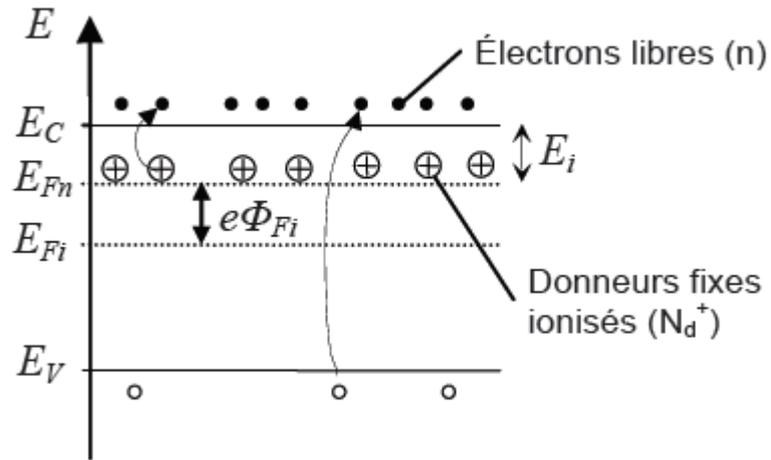


Figure 1-8 : diagramme de bande d'énergie pour un semi-conducteur de type N.

Dans le cas d'un matériau de type N affirmé, à température ambiante :  $n = N_D$   
 $N_D$  : concentration d'atomes donneurs :

$$N_D = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{KT}\right) \tag{1.9}$$

Le niveau de Fermi se décale donc progressivement du milieu de la bande interdite vers la bande de conduction lorsque le dopage de type N augmente :

$$E_F = E_i + KTLn\frac{N_D}{N_i} \tag{1.10}$$

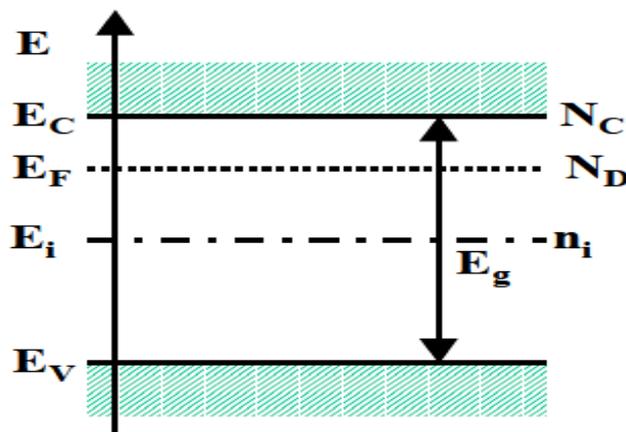


Figure I- 9 : Position du niveau de Fermi d'un semi-conducteur extrinsèque de type N.

**4.3. Semi-conducteur de type P :**

Considérons le silicium et dopant le avec des atomes de bore (élément de la colonne III). Comme le bore a un électron de valence moins que le silicium ; il se comporte comme un accepteur d'électron (Figure 1-10). Un orbital vide localisé au voisinage de l'atome de bore se trouve à environ 50 meV au-dessus du maximum,  $E_V$  de la bande de valence (Figure 1-11). Compte tenu de la proximité de la bande de valence, un électron de celle-ci va très vite occuper ce niveau d'énergie par excitation

thermique, il en résulte un trou dans la bande de valence qui va contribuer au processus de conduction électrique. La création d'un trou laisse un atome d'accepteur négatif, B<sup>-</sup>, de charge (-e), lié au réseau. Le dopage par des atomes accepteurs d'électrons est dit de type P.

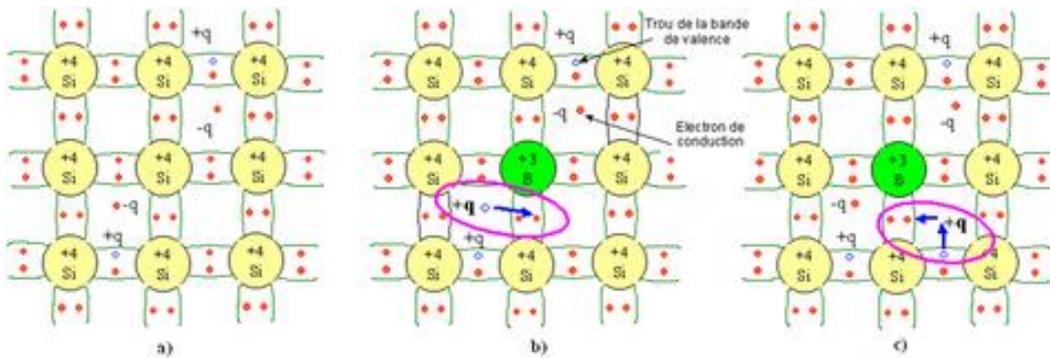


Figure 1-10 : dopage de type p.

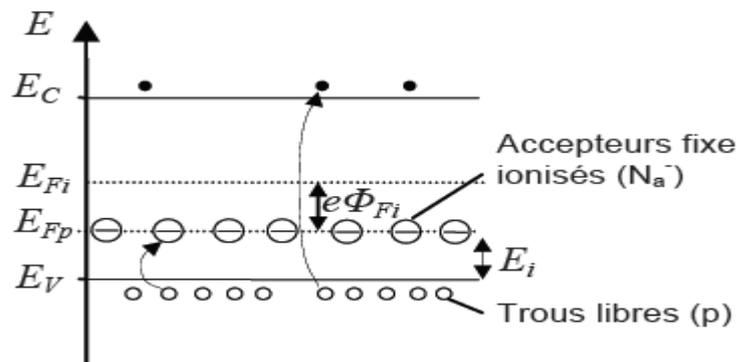


Figure 1-11 : diagramme de bande d'énergie pour un semi-conducteur de type p.

Dans le cas où le matériau est de type p affirmé de concentration de dopant accepteur,  $N_A = p$ .

$$N_A = N_V \exp\left(\frac{E_F - E_V}{KT}\right) \tag{1.11}$$

D'où l'on déduit aisément :

$$E_F = E_V + KTLn \frac{N_V}{N_A} \tag{1.12}$$

Ainsi, dans le cas d'un semi-conducteur dopé de type p, le niveau de Fermi se trouvera d'autant plus près du sommet de la bande de valence (Figure 1-12), que le matériau sera plus dopé.

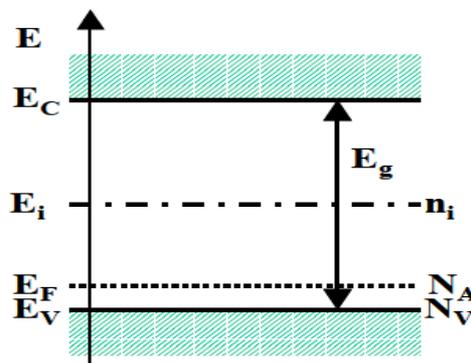


Figure 1-12 : Position du niveau de Fermi des dopants dans un semi-conducteur de type P .

## 1. Introduction :

Une jonction P-N est constituée par la juxtaposition de deux régions de types différents d'un même monocristal de semi-conducteur. La jonction P-N est une structure de base dans les composants (diode ; transistor...), Les composants étant formés de semi-conducteurs dopés de manière différente, les jonctions P-N ou N-P sont présentes aux interfaces. Il est donc indispensable de bien comprendre les phénomènes physiques qui s'y manifestent. La fonction de ce composant est de laisser passer le courant dans un seul sens. Elle permet donc de transformer un signal alternatif en un signal unipolaire. Cette fonction est largement utilisée dans les systèmes électroniques d'alimentation ou de détection radiofréquence.

## 2. Jonction isolée : Diffusion des majoritaires et zone de transition

Les porteurs majoritaires de la zone P diffusent vers la région N, où ils sont beaucoup moins nombreux. De même, les électrons de la région N diffusent vers la zone P. Ce phénomène de diffusion s'arrête avant que la répartition des trous et des électrons dans tout le cristal ne soit homogène. Un autre phénomène intervient. Dans la zone P, au voisinage de la jonction, les trous et les électrons sont en grande quantité. Ces deux types de porteurs ont donc une forte probabilité de recombinaison, si bien que la concentration en porteurs mobiles dans la zone P au voisinage de la jonction est très faible. De même, la zone N au voisinage de la jonction est pratiquement dépourvue de porteurs. Une zone pratiquement dépourvue de porteurs mobiles s'étend donc de part et d'autre de la jonction (sur une épaisseur de l'ordre du micron). On l'appelle zone de transition. Figure (2-1b).

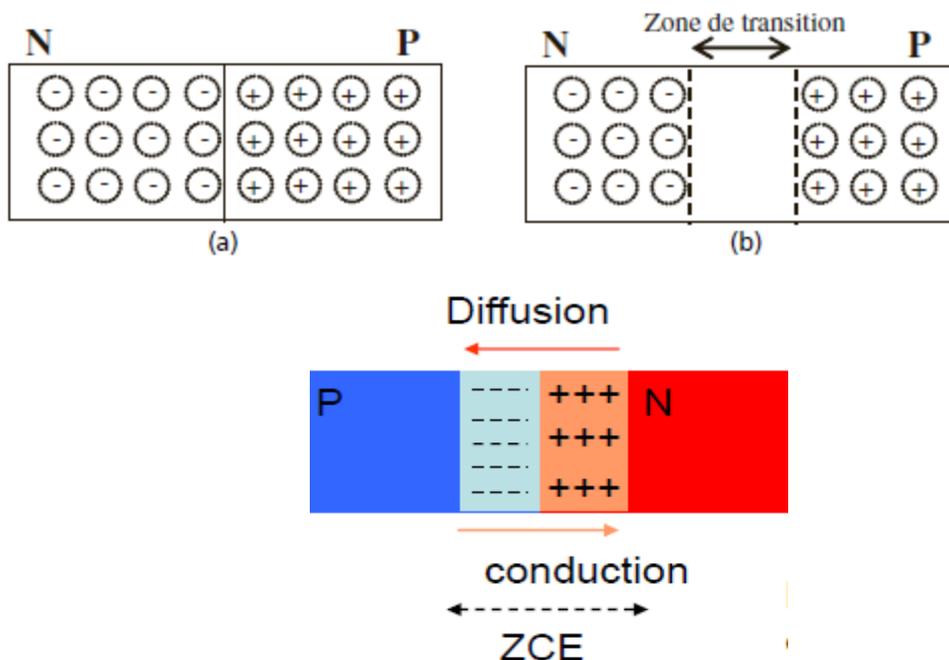


Figure 2-1 : principe de la création d'une zone de transition.

Les charges des porteurs fixes (ions d'impuretés) n'y sont plus compensées par celles des porteurs mobiles. On trouve donc, dans la zone de transition :

- en zone P une région chargée négativement par les atomes accepteurs ionisés.
- en zone N une région chargée positivement par les atomes donneurs ionisés .Il s'établit alors, au voisinage de la jonction métallurgique, un champ électrique qui s'oppose à la diffusion des porteurs majoritaires. De plus, un courant dû aux minoritaires (électrons en zone P, trous en zone N) s'établit, le champ interne ainsi crée favorisant leur passage.

L'équilibre thermodynamique est établi lorsque la force électrique, résultant de l'apparition du champ, équilibre la force de diffusion associée aux gradients de concentration de porteurs libres. La neutralité électrique du cristal étant conservée, le nombre d'ions négatifs en zone de transition P

est donc égal au nombre d'ions positifs en zone de transition coté N. On suppose les densités de charge d'espace constantes en zone de transition, de part et d'autre de la jonction, ce qui représente une bonne approximation de la réalité. On en déduit la relation :

$$qN_A \cdot x_p = qN_D \cdot x_n \tag{2.1}$$

Avec :  $N_A$ : densité d'atomes accepteurs en zone P.

$N_D$ : densité d'atomes donneurs en zone N.

$x_p$  et  $x_n$  profondeur de la zone de transition en zone P et en zone N.

Les caractéristiques du champ et du potentiel internes sont données par l'équation de Poisson :

$$\vec{E}_{int} = -\vec{grad} V \tag{2.2}$$

$V$  : est le potentiel interne.

La barrière de potentiel entre la zone N et la zone P vaut :  $V = 0,6$  à  $0,7$  volt pour le silicium. Cette barrière de potentiel représente l'obstacle à franchir par les porteurs majoritaires diffusant à travers la jonction.

L'existence d'un potentiel interne pour une jonction isolée ne signifie nullement qu'une tension externe est mesurable aux bornes de la jonction P-N.

### 3. Jonction polarisée :

#### 3.1. Jonction PN polarisée en direct :

Soit le dispositif de la figure 2-2, constitué d'une jonction PN aux bornes de laquelle on applique une tension extérieure  $V = V_p - V_n$  positive. Cela revient à faire passer la différence de potentiel entre les extrémités de la zone de transition  $V_b$  à  $V_b - V$ .

Dans cette situation le champ externe créé par le générateur s'oppose au champ interne. Dès que le champ externe dépasse le champ interne, un grand nombre de porteurs traversent la zone de charge d'espace, un courant des majoritaires s'établit à travers la jonction, il existe pour une jonction P-N une **tension de seuil** qui est caractéristique du matériau :

Si :  $V_S \gg 0,55V$ , Ge :  $V_S \gg 0,15V$ .

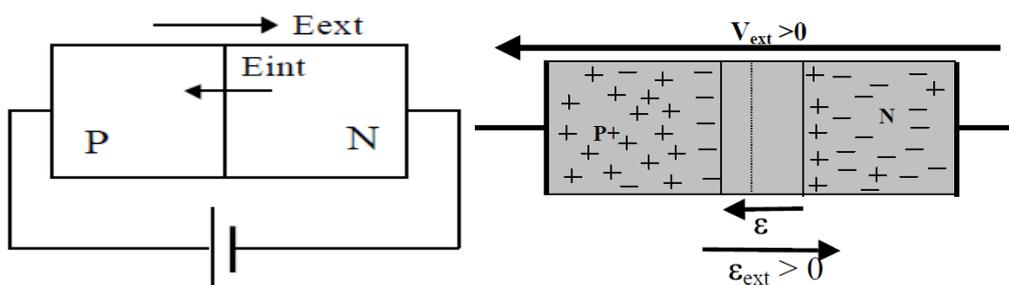


Figure 2-2 : Jonction P-N polarisé en direct.

Cependant, le phénomène de conduction qui conduit au courant est loin d'être aussi simple que dans le cas d'un conducteur classique, en effet, après avoir franchi la zone de charge d'espace, les porteurs arrivent en masse en tant que porteurs minoritaires dans une zone où ils pourront se recombiner. Il faut donc comptabiliser pour chaque type de porteur, ceux qui vont se recombiner et ceux qui arriveront jusqu'à l'électrode opposée.

La conduction par champ électrique est la conduction classique qui implique une chute de tension à l'état passant et donc une perte par effet joule.

La conduction par diffusion est une conduction naturelle qui ne nécessite pas de champ électrique et donc non dissipative et sans chute de tension.

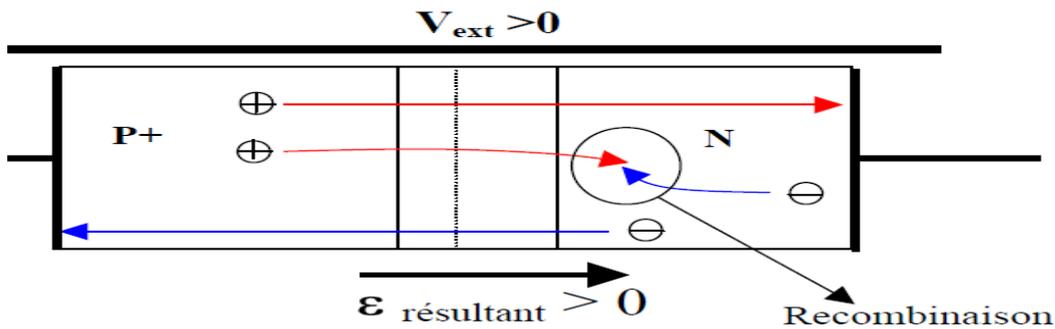


Figure 2-3 : la recombinaison des porteurs de charge.

### 3.2. Jonction P-N polarisée en inverse :

Dans cette situation, le champ électrique externe créé par le générateur  $V_{inv}$  s'ajoute au champ interne de la jonction : la hauteur de la barrière de potentiel augmente. L'épaisseur  $d$  de la zone de transition est proportionnelle à  $V_{inv}$ . Seul un courant de minoritaires est possible à travers la jonction. La ZCE va donc s'étendre jusqu'à un nouvel équilibre diffusion – champ électrique. Ce phénomène va à l'encontre d'un passage de courant : On dit que *la diode est bloquée*. C'est le courant inverse ou courant de fuite. Ce courant inverse est indépendant de la tension appliquée et ne dépend que de la température. Il reste très faible devant les courants directs.

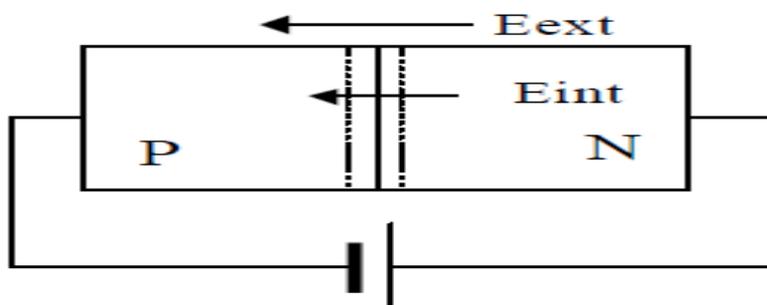


Figure 2-4 : la jonction PN polarisée en inverse.

## 4. Caractéristiques courant-tension :

### 4.1. Caractéristique directe :

En dessous du seuil  $V_S$  le courant est très faible. Au-delà, le courant de diode est lié au courant de saturation par :

$$I_D = I_{sat} \left( e^{eV/kT} - 1 \right) \tag{2.3}$$

Le courant  $I_{sat}$  est appelé courant inverse car si la diode est polarisée en inverse ( $V < 0$ )  $I_D = I_{sat}$ . Ce courant résulte du débit des charges (trous thermo générés et électrons) qui traversent la jonction sous l'action du champ électrique. Pour une jonction de surface  $S$ , le courant de saturation est donné par :

$$I_{sat} = A.S.e^{\left(\frac{-\Delta\omega}{KT}\right)} \quad (2.4)$$

#### 4.2. Caractéristique inverse :

Si la température est faible, la caractéristique est pratiquement confondue avec l'axe  $I = 0$ . Le Courant inverse  $V_{Inv}$  étant un courant de minoritaires croît avec la température. Au-delà d'une certaine valeur de  $V_{Inv}$ , il y a claquage de la jonction par **effet d'avalanche**. L'épaisseur de la jonction étant très faible, même avec des potentiels peu élevés, le champ électrique au niveau de la jonction peut être très grand. Sous l'effet de ces champs intenses ( $E > 10^5 \text{ V.cm}^{-1}$ ), il y a ionisation des atomes et production d'électrons, qui sont eux-mêmes accélérés et qui provoquent de nouvelles ionisations (avalanche) qui rendent la jonction conductrice : si rien ne limite le courant, il y a destruction de la jonction par emballement thermique. La tension inverse admissible varie selon les diodes entre 50 V et 2000 V.

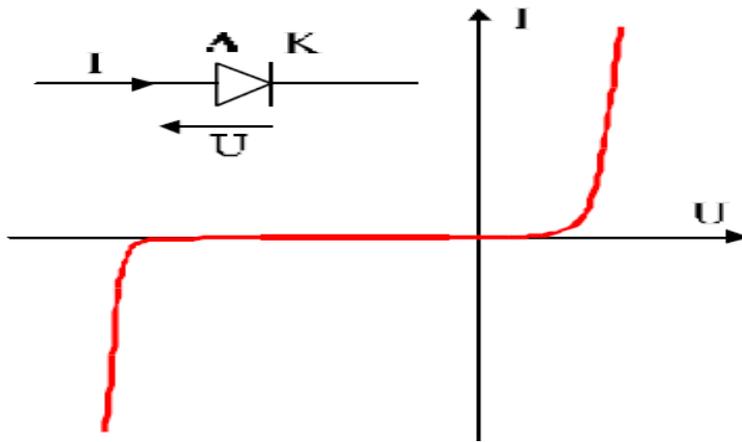


Figure -5 : la caractéristique statique.

#### 5. Phénomène de claquage :

Pour des diodes très fortement dopées et dont la zone de transition est très mince, le champ électrique peut provoquer la rupture directe de liaisons covalentes et le passage d'électrons de la bande de valence dans la bande de conduction. Pour des champs de l'ordre de  $2 \cdot 10^7 \text{ V.cm}^{-1}$ , la tension de claquage est de l'ordre de 6 V pour des diodes très dopées. Le courant inverse croît alors brutalement. L'effet est *réversible et non destructif*. La jonction présente après le claquage une résistance dynamique très faible.

## 1. Introduction :

Avant l'invention du transistor bipolaire en 1947, les semi-conducteurs sont présents dans seulement deux dispositifs électroniques que sont les photodiodes et les redresseurs. Le transistor bipolaire a été inventé par Bardeen et Brattain en 1948, la théorie en a été élaborée par Shockley en 1949, le premier transistor à jonction a été fabriqué en 1951. (Prix Nobel de physique 1956). Le nom transistor est une contraction de «par l'anglais : transfert résistor ». C'est historiquement le premier composant actif à semi-conducteur, son influence dans l'industrie électronique a été considérable. Le transistor bipolaire peut être considéré du point de vue électronique comme une source de courant commandée par une tension. Ce courant peut alors créer une différence de potentiel aux bornes d'une charge (une résistance par exemple) plus importante que la tension de commande. On dit alors que le dispositif a un gain en tension. Il est facile de comprendre alors qu'il est possible de l'utiliser pour réaliser des amplificateurs électroniques. Quand la variation de tension appliquée en entrée permet de faire passer le transistor de l'état non conducteur à l'état conducteur, on peut l'utiliser pour réaliser des fonctions binaires. Il a donc été aussi un composant de base de l'électronique numérique. Les transistors bipolaires ont cependant été de moins en moins utilisés à partir des années 80 pour être remplacés par les transistors de type MOSFET offrant des avantages en terme de consommation électrique. Les transistors bipolaires sont encore utilisés pour des fonctions exigeantes en termes de rapport signal sur bruit ou dans des applications d'électronique de puissance. Le terme bipolaire vient du fait que les deux types de porteurs (électrons et trous) participent à la conduction du dispositif.



Figure 3-1: Le premier transistor.

## 2. Structure d'un transistor :

Le transistor bipolaire à jonction (ou BJT) est un composant électronique actif, c'est-à-dire un composant qui est capable de transformer un signal électrique et d'en amplifier sa puissance. La puissance électrique injectée est délivrée par les sources d'alimentation. Un transistor bipolaire est constitué d'un monocristal de semi-conducteur (principalement Le silicium) dopé pour obtenir deux jonctions, disposées en série et de sens opposé. Il existe donc deux types fondamentaux de transistors bipolaires, dits complémentaires :

- les transistors **NPN** dans lesquels une mince couche de type P est comprise entre deux zones de type N : figure 3-2a.
- les transistors **PNP** dans lesquels une mince couche de type N est comprise entre deux zones de type P : figure 3-2b.

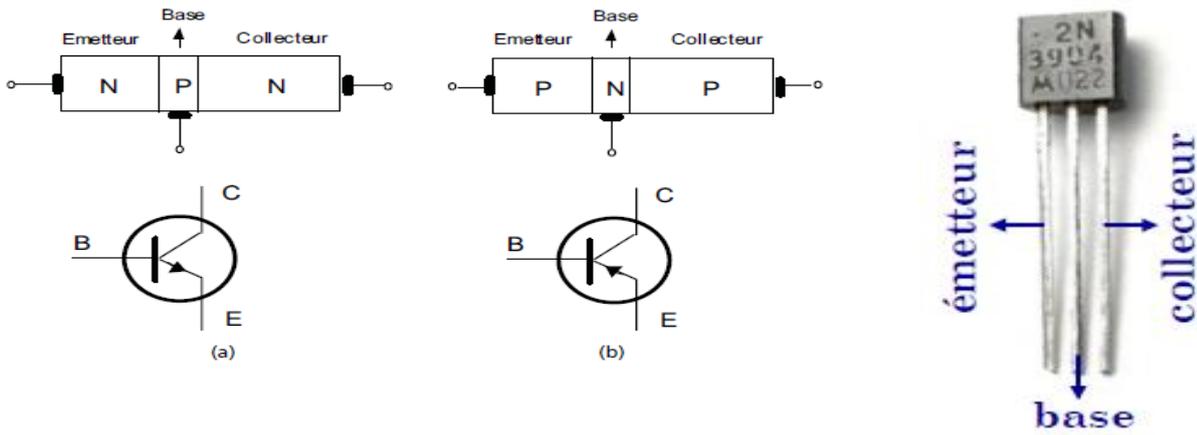


Figure 3-2 : représentations schématiques et symboles des transistors bipolaires.

La couche intermédiaire est appelée base, cette couche est très mince et est légèrement dopée, les porteurs majoritaires sont donc en quantité assez faible, son rôle est de transmettre ou de stopper les porteurs majoritaires venant de l'émetteur et allant vers le collecteur.

L'une des deux autres zones est appelée émetteur, Il s'agit de la zone la plus dopée du transistor, son rôle consiste à injecter des porteurs (électrons dans le cas d'un transistor NPN) dans la base.

La dernière zone qui est de même type que l'émetteur est appelée collecteur, son dopage est plus faible que celui de l'émetteur et sa géométrie est différente, le rôle principal du collecteur est de recueillir les porteurs.

Le transistor est donc un composant à trois bornes (*tripôle*) reliées respectivement à l'émetteur, à la base et au collecteur. Sa représentation schématique, ainsi que les symboles normalisés sont donnés à la figure 3-2 pour les deux types.

Sur le schéma électrique du transistor une flèche marque la jonction base-émetteur. Cette flèche est orientée dans le sens où la jonction base-émetteur est passante.

### 3. L'effet transistor :

#### 3.1. Etude le cas d'un transistor NPN :

L'étude sera menée sur un transistor bipolaire de type NPN qui est le plus utilisé et le plus facile à réaliser. Le fonctionnement d'un transistor de type PNP se déduit en échangeant les rôles des électrons ainsi que des trous et en inversant les signes des tensions d'alimentation et des courants. Sa structure ressemble au schéma ci-dessous sur lequel on fait apparaître les zones de charge d'espace correspondant aux jonctions BE et BC.

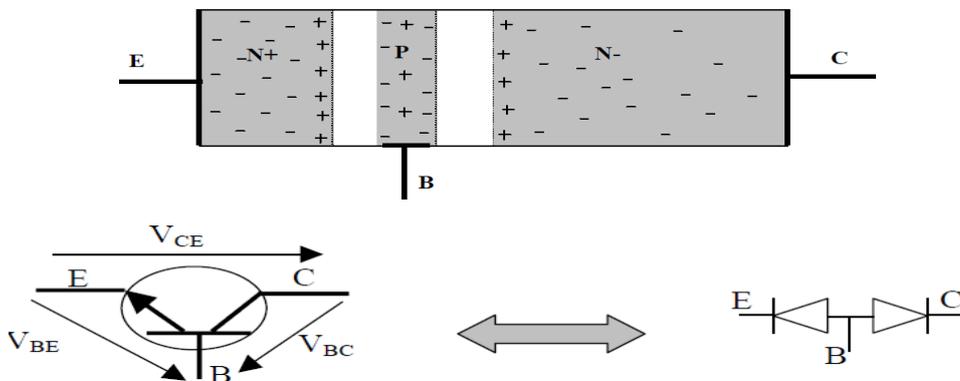


Figure 3-3 : le transistor bipolaire NPN.

### 3.2. Le transistor non polarisé :

Prenons le cas de trois zones NPN mises côte à côte mais électriquement isolées l'une de l'autre, nous aurons la situation de la figure 3-4a. Supposons maintenant que ces zones ne sont plus isolées l'une de l'autre, les électrons libres diffusent à travers les deux jonctions ce qui donne deux zones de déplétion figure 3-4b. Ces zones de transition représentées en hachuré sont dépourvues de porteurs majoritaires et la barrière de potentiel pour chacune d'elles est d'environ 0,6 à 0,7 volt. Or, puisque les trois régions dopées n'ont pas la même concentration, la zone de déplétion pénètre peu dans l'émetteur qui est fortement dopé mais profondément dans la base qui est très peu dopée. Du côté du collecteur, la pénétration de la zone de déplétion sera moyenne.

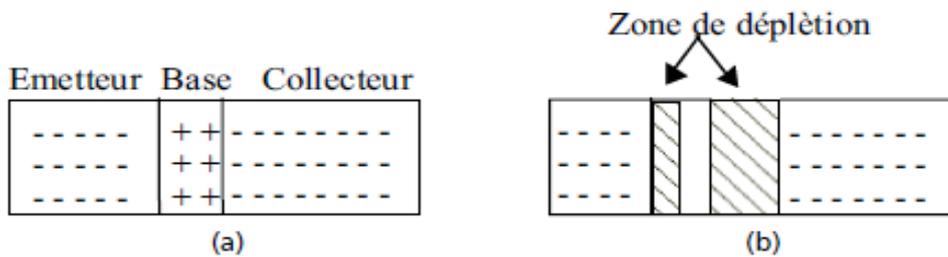


Figure 3-4 : transistor bipolaire NPN non polarisé.

### 3.3. Le transistor polarisé :

#### 3.3.1. Etat bloqué :

Si  $V_{BE} < 0$  et  $V_{CE} > 0$ , alors les deux jonctions sont polarisées en inverse, ainsi, les ZCE s'étendent d'autant plus que les tensions augmentent et le transistor ne permettra le passage d'aucun courant. Le transistor sera équivalent à un **interrupteur ouvert**. La tenue en tension sera assurée principalement par la zone faiblement dopée, tout comme dans une diode.

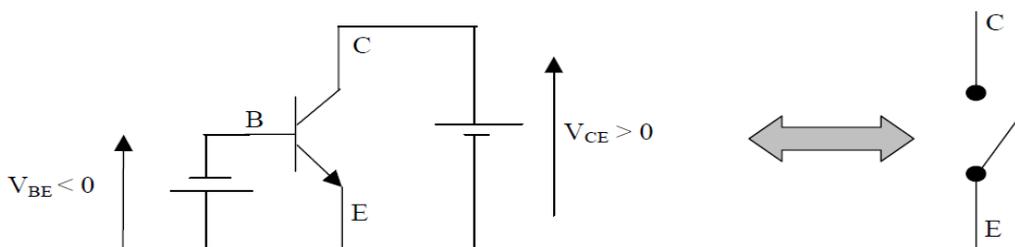


Figure 3-5 : transistor en état bloqué.

#### 3.3.2. Etat passant :

A ce niveau, le champ résultant  $\epsilon_{bc}$  qui est la somme du champ interne et du champ extérieur, va les projeter dans la zone N- (collecteur) où ils retrouvent leur statut de majoritaire, c'est à dire de porteurs parmi les différentes façons de polariser un transistor de type NPN, une seulement présente un intérêt primordial. Le caractère actif du BJT d'écoule de l'effet transistor, qui se manifeste dans le régime de mode actif normal pour lequel la jonction BE est polarisée en direct et la jonction BC est polarisée en inverse figure 3-6.

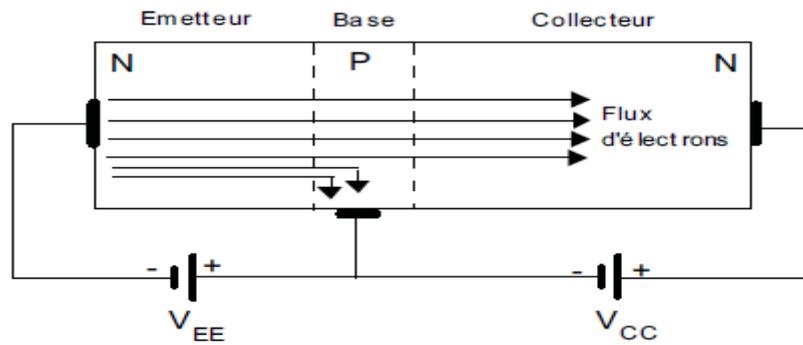
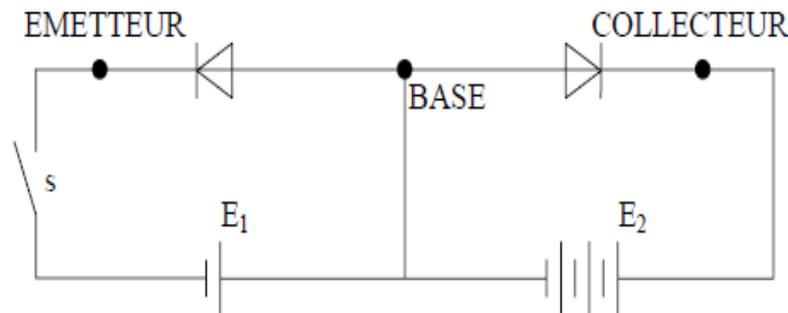


Schéma équivalent :



**Figure 3-6** : polarisation directe et principe de l'effet transistor.

-Si nous polarisons la jonction émetteur-base en direct et la jonction collecteur-base en inverse (augmentation du champ électrique interne) Comme nous allons le voir, le courant inverse de la jonction BC (courant de collecteur) est contrôlé par l'état électrique de la jonction BE. Ainsi, l'accès base-émetteur alimente en "faible puissance", contrôle l'accès collecteur-émetteur, de plus forte puissance.

-Si  $V_{BE} > 0$  et  $V_{CE} > 0$ , alors la jonction BE sera passante, c'est à dire que le champ résultant  $\mathcal{E}_{bE}$  va projeter les porteurs de l'émetteur vers la base ; Par construction la base est très mince et faiblement dopée ; par contre l'émetteur est très dopée contient donc beaucoup des porteurs majoritaires et la jonction BE est polarisée en direct alors il y a une diffusion d'électrons de l'émetteur vers la base et diffusion de trous dans le sens inverse, il y a des recombinaisons électrons-trous dans la base mais comme le nombre d'électrons injectés est très supérieur au nombre de trous comme la base est très mince, beaucoup d'électrons échappent aux recombinaisons, sont accélérés par le champ interne de la jonction base-collecteur et traversent cette jonction.

Nous obtenons la configuration visible sur la figure 3-7.

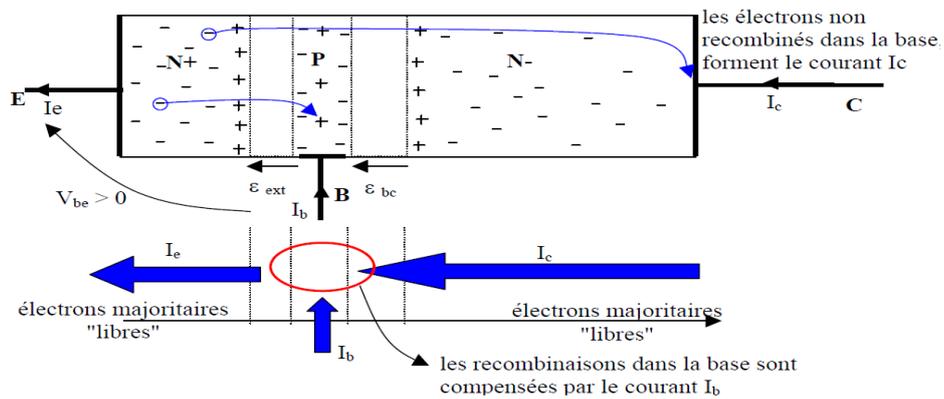


Figure 3-7: l'effet transistor.

À côté des courants majoritaires existe la valeur d'un courant beaucoup plus faible de minoritaires ( $I_{cb0}$ ) qui est en fonction de la température. La largeur de la zone appauvrie au porteur de la jonction BC qui est polarisée en inverse diminue si  $V_{bE}$  restant constant la valeur de  $V_{cE}$  augmente. Les quelques recombinaisons qui vont se produire dans la base vont appeler un courant  $I_b$  nécessaire à la neutralité électrique Figure 3-8 ; Ainsi,  $I_E = I_B + I_C$ .

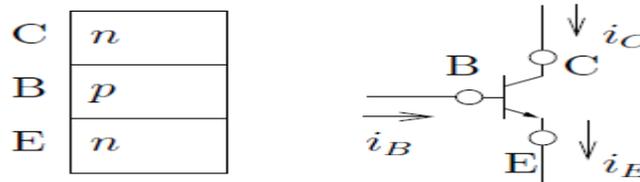


Figure 3-8 : Schéma de principe d'un transistor bipolaire de type NPN, symbole électrique et sens conventionnels des courants.

On appelle  $\alpha$  le rendement de la conduction, c'est à dire  $\alpha = I_c / I_e$

En première approximation, le nombre de trous passant dans le collecteur est proportionnel au nombre d'électrons injectés dans la base. Ce rapport de proportionnalité est un paramètre intrinsèque au transistor et s'appelle le **gain en courant  $\beta$** . On fait apparaître le gain du transistor:

$$\beta = I_c / I_B \text{ et } \beta = \alpha / (1 - \alpha)$$

$\beta$  ne dépend que des caractéristiques physiques du transistor : il ne dépend ni de la tension inverse collecteur-base, ni du courant circulant dans le collecteur. (Ceci n'est qu'une approximation, mais dans les hypothèses de petits signaux, c'est assez bien vérifié).

**3.3.3. Etat saturé:**

Pour que les deux jonctions soient passantes, il faut que  $V_{bE} > 0$  et  $V_{bc} > 0$ , en conduction, on aura  $V_{bE} \approx V_{bc} \approx V_{seuil}$  et donc  $V_{cE} \approx 0$ . (En réalité,  $V_{cE} = R_{eq} \cdot I_c$  où  $R_{eq}$  est la résistance du collecteur) Ceci revient à polariser les deux jonctions comme suit :

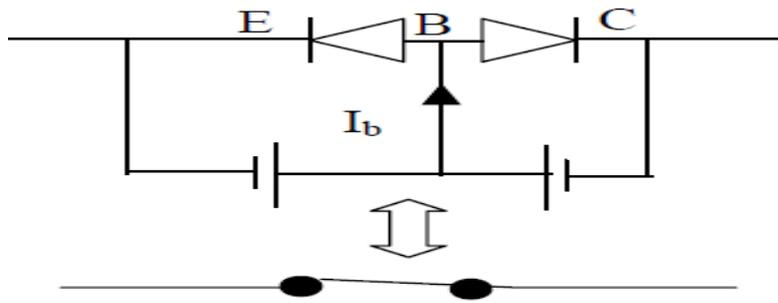


Figure 3-9 : transistor en état saturé.

Dans cette configuration, le courant  $I_b$  sera supérieur à  $I_c/\beta$ , en effet, pour un  $V_{CE}$  faible, on voit sur les caractéristiques que  $I_c < \beta \cdot I_b$ . On déduit alors qu'un fonctionnement en **interrupteur fermé** du transistor bipolaire implique une forte consommation en courant de base, c'est à dire un faible gain  $\beta$  effective.

4. Schéma equivalent simplifié :

En fait ,il existe des capacités entre les électrodes d'un transistor, ces capacités sont faibles et présentent en basse fréquence des impédances si grandes que l'on peut négliger leurs effets, par contre en haute fréquence ,les impédances de ces capacités parasites modifient le fonctionnement du transistor.

Si on néglige les capacités entre les électrodes,on obtient le schéma équivalent suivant, valable uniquement en basse fréquence ,qui est la traduction graphique du modèle hybride du transistor. Il relie donc les variations des grandeurs d'entrée et de sorti

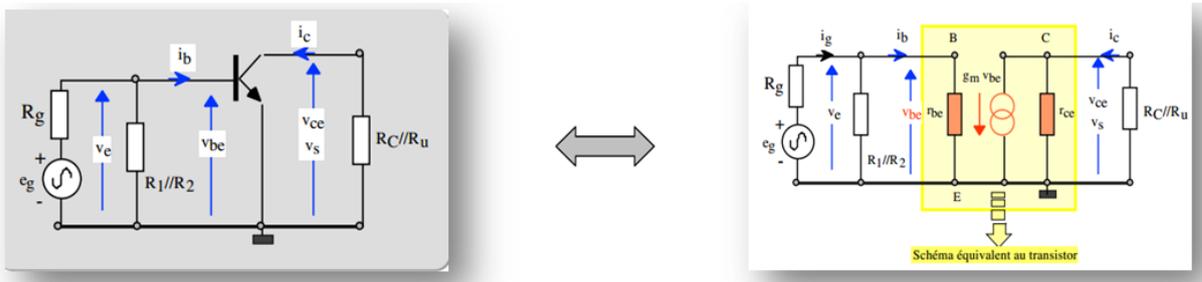


Figure 3- 10 : Schéma équivalent au transistor.

5. Caractéristiques en fonctionnement normal :

5.1. Caractéristiques  $I_B(V_{BE})$  du transistor NPN :

Pour débloquent (rendre passant) le transistor NPN, il faut que la jonction base-émetteur soit polarisée en direct avec une tension supérieure à la tension de seuil,  $V_s$ , de cette diode :  $V_{BE} > V_s$ .  
 - La caractéristique  $I_B(V_{BE})$  est celle de la diode base-émetteur en ne considérant que le courant de trou.  $I_{C1}$  le courant de trous est bien plus faible que le courant d'électrons.

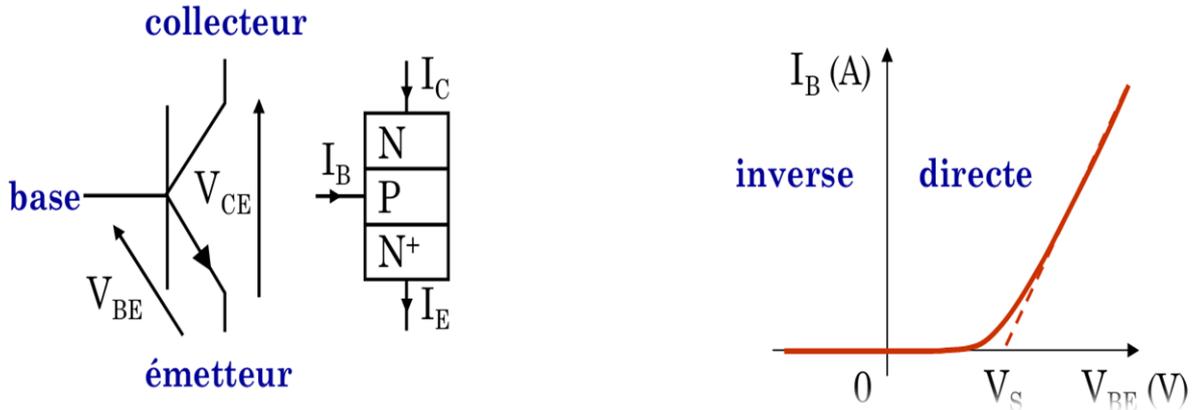


Figure 3- 11 : Caractéristiques  $I_B(V_{BE})$  du transistor NPN.

5.2. Caractéristiques  $I_C(V_{CE})$  du transistor NPN :

Il y a quatre grandeurs qui caractérisent le comportement du transistor :

- Deux grandeurs d'entrée :  $I_B$  et  $V_{BE}$ .
- Deux grandeurs de sortie :  $I_C$  et  $V_{CE}$ .

On relève ci-dessous les caractéristiques de sortie du transistor paramétrées par  $I_B$ :

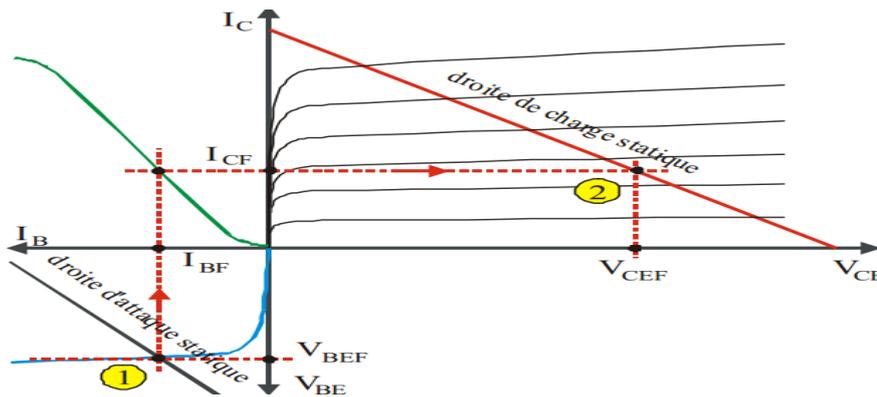
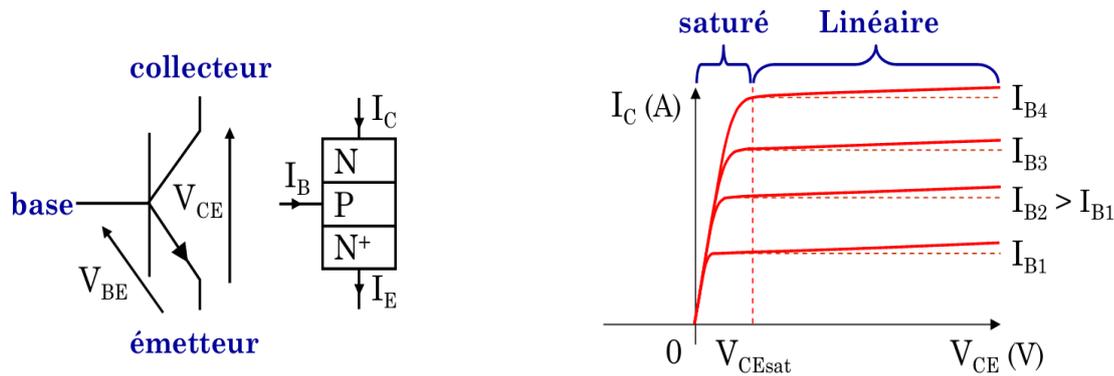


Figure 3-12 : les caractéristiques électriques du transistor bipolaire.

Les caractéristiques  $I_C=f(V_{CE})$  montrent qu'à  $I_b$  fixé,  $I_c$  est pratiquement constant quelle que soit la valeur de  $V_{CE}$ , et ce jusqu'à un phénomène de claquage. En réalité,  $I_c$  croit légèrement à cause de l'effet "Early", c'est à dire à la diminution de la largeur de base due à l'expansion des ZCE pour un fort  $V_{CE}$ . Ceci a pour conséquence d'augmenter le rendement et donc  $I_c$ .

Par ailleurs, il est souhaitable pour assurer un fonctionnement en mode "interrupteur" de placer le transistor dans une zone où  $V_{CE}$  est le plus faible possible. En réalité, pour que  $V_{CE}$  soit le plus faible

possible, il faut que  $V_{bE} \approx V_{seuil} \approx V_{bc}$ , c'est à dire que les deux jonctions soient passantes, ainsi  $V_{CE} = V_{cb} + V_{bE} \approx 0V$ . Cet état s'appelle la saturation du transistor.



**Figure 3-13** : les caractéristiques de sortie du transistor paramétrées par  $I_B$ .

On a  $i_{B4} > i_{B3} > i_{B2} > i_{B1}$

La connaissance du point de repos à l'entrée à permet de déduire, via la caractéristique de transfert. En courant, la valeur du courant de sortie et donc de déterminer le point de repos en sortie (2) -En entrée, le générateur  $U_B$  débite dans la résistance  $R_G$  et dans la jonction base-émetteur du transistor. Comme les caractéristiques d'entrée sont confondues dès que  $V_{CE} > 0,65V$ , le point d'entrée est défini par l'intersection de la caractéristique d'entrée du transistor avec la droite de charge de ce générateur. L'équation de cette droite, dite «droite d'attaque» est :

$$V_{BE} = U_B - R_B \cdot I_B$$

-La connaissance du point d'entrée ( $I_{BF}$ ,  $V_{BEF}$ ) permet la détermination, via le réseau de transfert en courant, du courant de sortie  $I_{CF}$ .

-En sortie, l'équation de la droite de charge du générateur  $U_c$  qui débite dans  $R_C$  et dans l'espace Collecteur émetteur du transistor est :  $V_{CE} = U_C - R_C \cdot I_C$

L'intersection de la caractéristique de sortie du transistor (correspondant au courant  $I_{BF}$  d'entrée) avec la droite de charge de ce générateur définit le point de repos en sortie caractérisé par  $I_{CF}$  et  $V_{CEF}$

### 5.3.La droite de charge :

La droite de charge statique est une droite tracée dans la figure qui donne  $I_C$  en fonction de  $V_{CE}$ , cette droite de charge indique le point de fonctionnement.

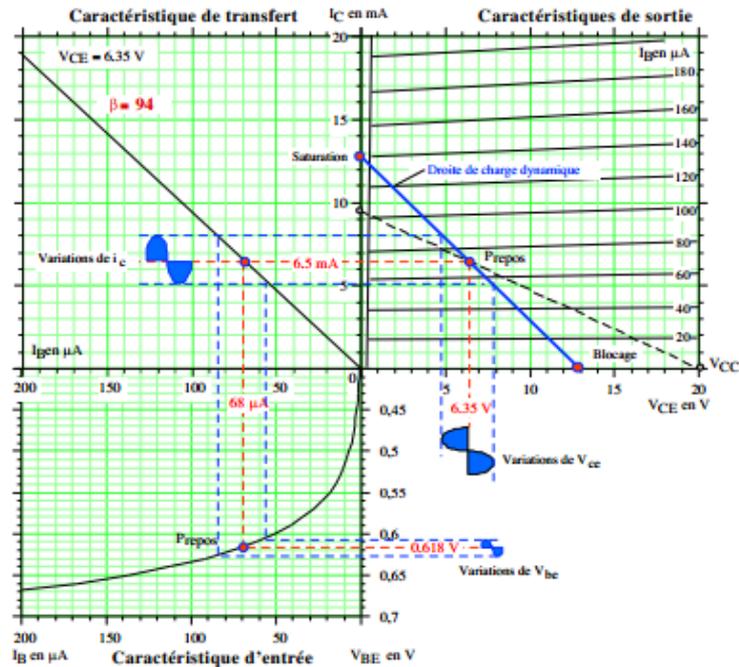


Figure 3-14 : la droite de charge.

### 5.4. Effet Early :

Dans le cas d'un transistor en mode actif normal, le modèle de premier ordre que nous avons exposé nous donne un courant  $I_C$  qui ne dépend pas de la tension  $V_{CE}$ . En pratique cependant, l'effet Early introduit une légère influence de  $V_{CE}$  sur  $I_C$  (à  $I_B$  fixe). En effet, lorsque  $V_{CE}$  augmente, le volume de la région de déplétion de la jonction BC augmente. En particulier, la région de déplétion s'étend dans la base et en diminue la largeur. Par conséquent, les électrons injectés par l'émetteur doivent parcourir une distance plus courte avant d'être collectés, ce qui se traduit par un accroissement du gain  $\beta$ . Ainsi, à  $I_B$  fixe, l'effet Early conduit à une augmentation de  $I_C$  proportionnelle à celle de  $V_{CE}$ .

## 6. Polarisation d'un transistor :

### 6.1. Rôle de la polarisation :

Polariser un transistor correctement consiste donc à choisir les éléments du circuit d'encadrement (les résistances et les sources de tension ou de courant) de telle façon que le transistor fonctionne à tout instant dans le mode actif normal. La polarisation a pour rôle de polariser un transistor, c'est placer les composants nécessaires pour le préparer à amplifier des signaux variables. La polarisation impose au transistor les valeurs de courant et de tension en continu. Pour cela, on applique sur les trois électrodes du transistor des potentiels continus de valeurs convenables.

### 6.2. Schema de polarization :

#### 6.2.1. Polarisation par deux sources de tensions :

Le montage de la figure 3-15 est fonctionnel, mais il nécessite deux sources de tension. En pratique, les montages utilisent un seul générateur continu.

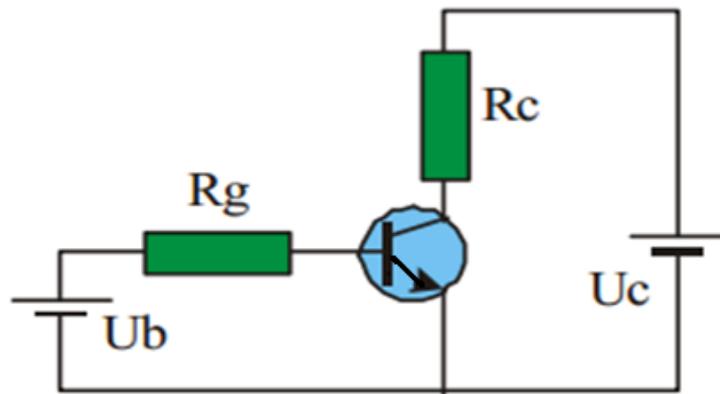


Figure 3-15 : Schéma de polarisation par deux sources de tensions.

### 6.2.2. Polarisation par résistance de base :

Ce montage est très simple au gain  $\beta$ , il est aussi sensible aux variations de la température. Cependant, l'influence de ces variations peut être réduite en choisissant un  $V_{CC}$  suffisamment grand par rapport à  $V_{BE}$ .

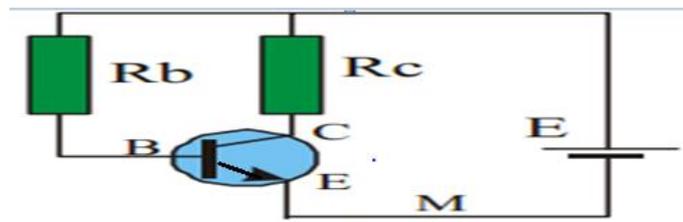


Figure 3-16 : Schéma de polarisation par résistance de base.

Ce type de polarisation ne devrait jamais être employé pour un transistor utilisé en amplificateur.

### 6.2.3. Polarisation par réaction d'émetteur :

L'introduction d'une résistance entre l'émetteur et la masse est une façon de compenser les variations de  $\beta$ . Si le gain augmente,  $I_C$  et donc  $I_E$  augmentent. Le potentiel d'émetteur ( $V_{EM} = R_E \cdot I_C$ ) croît ainsi que le potentiel de base ( $V_{BE} \approx 0,65V$ ) ce qui diminue ainsi le courant base puisque  $I_B = (E - V_{BE}) / R_B$ . Le mot «réaction» signifie qu'une grandeur de sortie ( $I_C$ ) fait varier une grandeur d'entrée ( $I_B$ ). L'élément de réaction (commun à l'entrée et à la sortie) est ici la résistance d'émetteur.

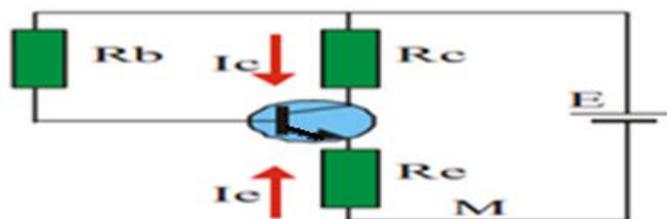


Figure 3-17 : Schéma de polarisation par réaction d'émetteur.

### 6.2.4. Polarisation par réaction de collecteur :

Si le gain augmente,  $I_C$  augmente donc  $V_{CE}$  diminue (en effet  $V_{CE} = E - R_C \cdot I_C$ ) ainsi que la différence de potentiel aux bornes de la résistance de base. Le courant base diminue et contrebalance l'accroissement du gain.

Cette méthode, bien que meilleure que la précédente, n'est pas très satisfaisante.

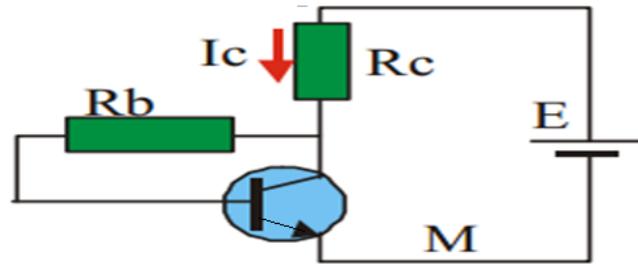


Figure 3-18 : Schéma de polarisation par réaction de collecteur.

### 6.2.5. Polarisation par pont de base et résistance d'émetteur :

Pour rendre indépendant le courant collecteur des variations du gain, on utilise un diviseur de tension nommé «pont de base».

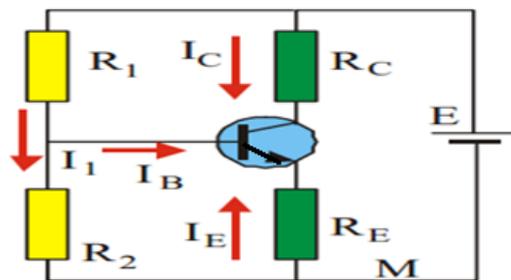


Figure 3-19 : Par pont de base et résistance d'émetteur.

Le pont diviseur maintient constant  $V_{BM}$  à condition que les variations du courant base puissent être négligées devant le courant  $I_1$  qui circule dans les résistances du pont de base.  $V_{BM} = R_2 \cdot I_1$  ;  $V_{BM} = V_{BE} + V_{EM}$  Et  $V_{BE} \approx (0,65v)$

$$I_E = -V_{EM}/R_E = -(R_2 \cdot I_1 - 0,65)/R_E$$

Mais comme  $I_B \ll I_C$  on a:  $I_C \approx -I_E$

La valeur de  $I_C$  est indépendante du gain.

## 7. Montage de base :

Généralement, le transistor qui est un composant à trois bornes est utilisé en tant que quadripôle amplificateur. Dans la plupart des applications, une des bornes est commune à l'entrée et à la sortie. On a donc il y a 3 manières fondamentales de procéder : Montage émetteur commun, le montage base commune et le montage collecteur commun.

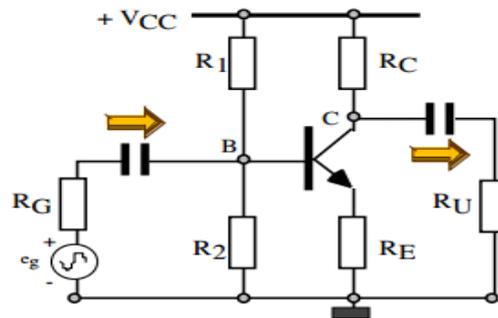
- Montage **émetteur commun** : L'entrée est la base et la sortie le collecteur ; utilisé en amplification et le plus commun.
- Montage **base commune** : L'entrée est l'émetteur et la sortie le collecteur ; utilisé en haute fréquence.
- Montage **collecteur commun** : L'entrée est la base et la sortie l'émetteur ; Utilisé en adaptation d'impédance.

### 7.1. Montage émetteur commun :

Parmi les trois montages fondamentaux, le montage dit en émetteur commun est de loin le plus utilisé. Avec cette configuration, les grandeurs d'entrée sont le courant de base  $I_B$  et le potentiel de celle-ci

par rapport à celui de l'émetteur  $V_{BE}$ . Les variables de sortie sont le courant collecteur  $I_C$  et le potentiel entre le collecteur et l'émetteur  $V_{CE}$ .

Le schéma le plus simple est le suivant :



**Figure 3-20** : Montage de base émetteur commun.

Dans ce schéma, la base est polarisée en direct par la résistance de base  $R_b$  : le potentiel de la base est alors de 0,7V environ, car l'émetteur est à la masse et la jonction base-émetteur est l'équivalent d'une diode passante.

Le collecteur est lui polarisé par la résistance de collecteur  $R_c$  de telle manière que la tension du collecteur soit supérieure à la tension de la base : la jonction base collecteur est alors polarisée en inverse.

On polarise donc convenablement le transistor avec une simple alimentation et deux résistances. Dans ce montage, l'entrée est la base et la sortie est le collecteur. L'entrée est caractérisée par les deux grandeurs  $I_B$  et  $V_{BE}$ , et la sortie par les grandeurs  $I_C$  et  $V_{CE}$ , soit quatre variables

La caractéristique d'entrée du transistor est donnée par la relation  $I_B = f(V_{BE})$  et  $V_{CE} = cte$ .

En fait, le circuit d'entrée est la jonction base émetteur du transistor, soit une jonction diode. Cette caractéristique va dépendre très peu de la tension collecteur-émetteur.

### a) Amplification :

Un signal placé à l'entrée du transistor (base) va se retrouver à la sortie (généralement collecteur) avec une amplitude plus grande mais en conservant sa forme. Si le signal est déformé, on dit qu'il y a distorsion.

L'amplification peut se faire en courant ou en tension

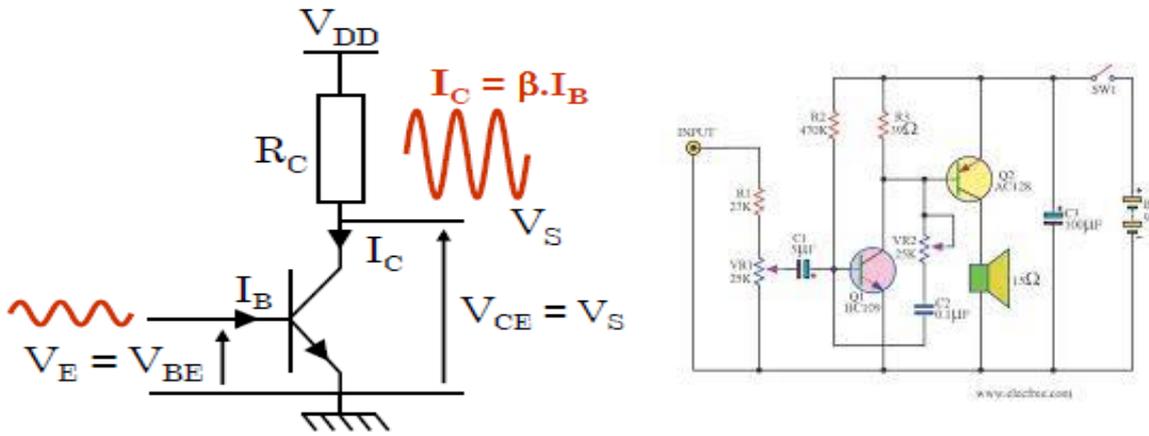


Figure 3-21 : circuit d'amplification.

Le condensateur  $C_C$  ne laisse passer que les variations du collecteur sur la sortie  $U_S$ .

Il est à noter que le signal de sortie est en opposition de phase par rapport au signal d'entrée (déphasage de  $180^\circ$ ).

Ceci est caractéristique à ce montage appelé émetteur commun, car l'émetteur est à la masse et sert de point de référence aux autres bornes du transistor.

**b) Limites d'utilisation d'un transistor :**

Le transistor étant constitué de deux jonctions, il est possible de déterminer les limites d'utilisation de celui-ci à partir de celle de la diode. C'est-à-dire le courant maximum dans une jonction ainsi que la tension inverse maximale qu'on peut utiliser sans avoir de claquage.

**c) Tensions de claquage :**

Nous avons vu l'existence des courants de fuites  $I_{CE0}$  (en base commune et émetteur ouvert) et  $I_{CB0}$  (en émetteur commun et base ouverte). Si on augmente exagérément les tensions, les courants de fuites augmentent par effet avalanche et peuvent être la cause de la destruction de transistor par échauffement. Ces tensions à ne pas dépasser sont données par le constructeur et sont généralement notées  $BV_{CE0}$  et  $BV_{CB0}$  ( $BV$  est l'abréviation de *Breakdown Voltage*).

**d) Courant maximum :**

Le courant maximum du collecteur doit rester inférieur à une certaine valeur  $I_{C\max}$  sous peine de destruction du transistor.

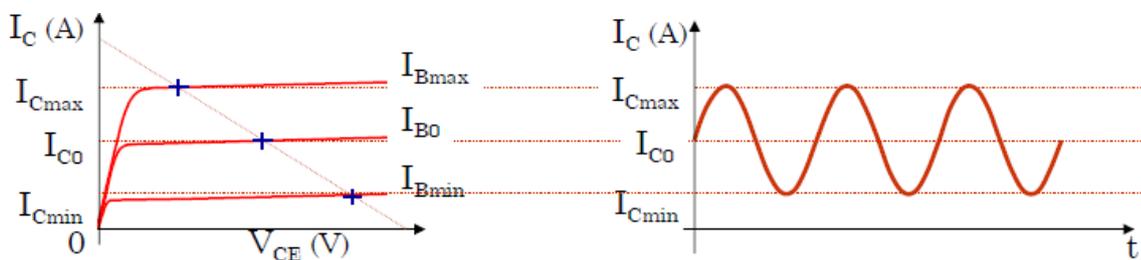


Figure 3-22 : courant max de transistor.

## 7.2. Montage base commune :

Dans le montage base commune (Figure III.23), la tension de base est supposée constante, la variation de cette tension par rapport au référentiel du circuit (la masse) est donc nulle. Les tensions et leurs variations sont alors exprimées par rapport à la tension de la base. Le montage base commune est utilisé pour obtenir une faible impédance d'entrée et une forte impédance de sortie. Le gain en courant est voisin de un. Le transistor est équivalent à une source de courant.

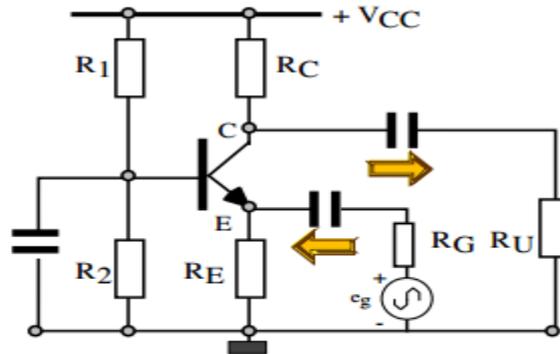


Figure 3-23 : montage de base commune.

## 7.3. Montage collecteur commun :

Dans ce montage, l'entrée est la base et la sortie est l'émetteur. C'est le collecteur qui est le point commun entre l'entrée et la sortie. On notera que c'est faux pour la polarisation, car le collecteur est relié au +E et l'entrée se fait entre base et masse, et la sortie entre émetteur et masse. En fait, le collecteur est bien commun en alternatif, car le générateur de polarisation +E est un court-circuit pour ce régime, et donc, le collecteur va se retrouver à la masse alternative : ce sera donc bien la patte commune entrée sortie.

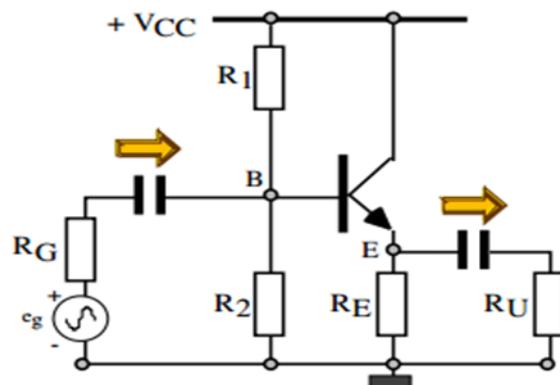


Figure 3-24 : montage collecteur commun.

Le gain en courant est sensiblement égal, et de signe opposé, au gain en courant en montage émetteur commun dans la mesure où  $\alpha \approx 1$ . En outre, le courant d'entrée est faible et par suite l'impédance d'entrée est importante. En résumé, le montage collecteur commun présente une forte impédance d'entrée et une faible impédance de sortie. Le gain en tension est peu différent de un. Ce montage est utilisé comme étage de sortie dans un système électronique pour pouvoir commander d'autres étages.

**8. Les applications du transistor bipolaire :** On utilise le transistor bipolaire dans des plusieurs domaines tels que: Clignotant alternant, Système d'alarme, ventilateur , Thermistance CTN , Porte coulissante , Lampe de poche , Contrôleur de continuité, Éclairage d'un réfrigérateur, Ascenseur 3 étages, radio, télévision, satellite, le Feux rouge

**9. Exemples d'application :**

**1. Amplificateur**

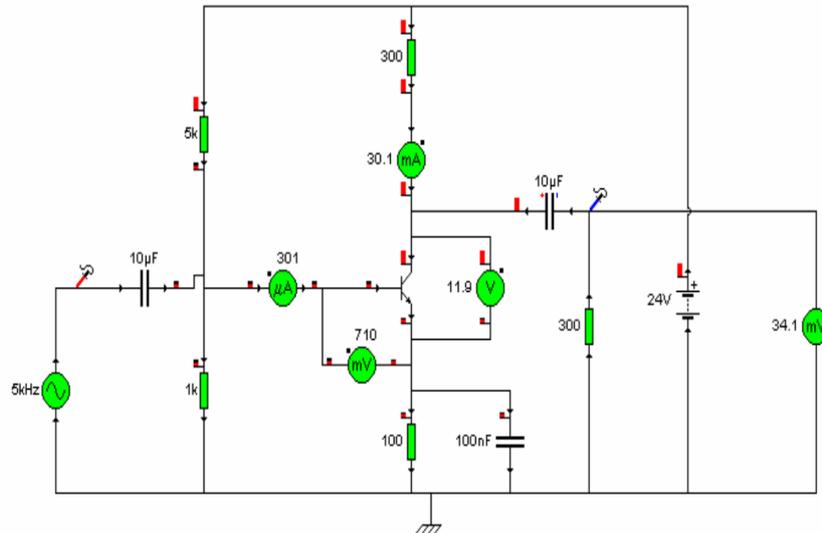


Figure II : amplification.

**2. Feux de carrefour**

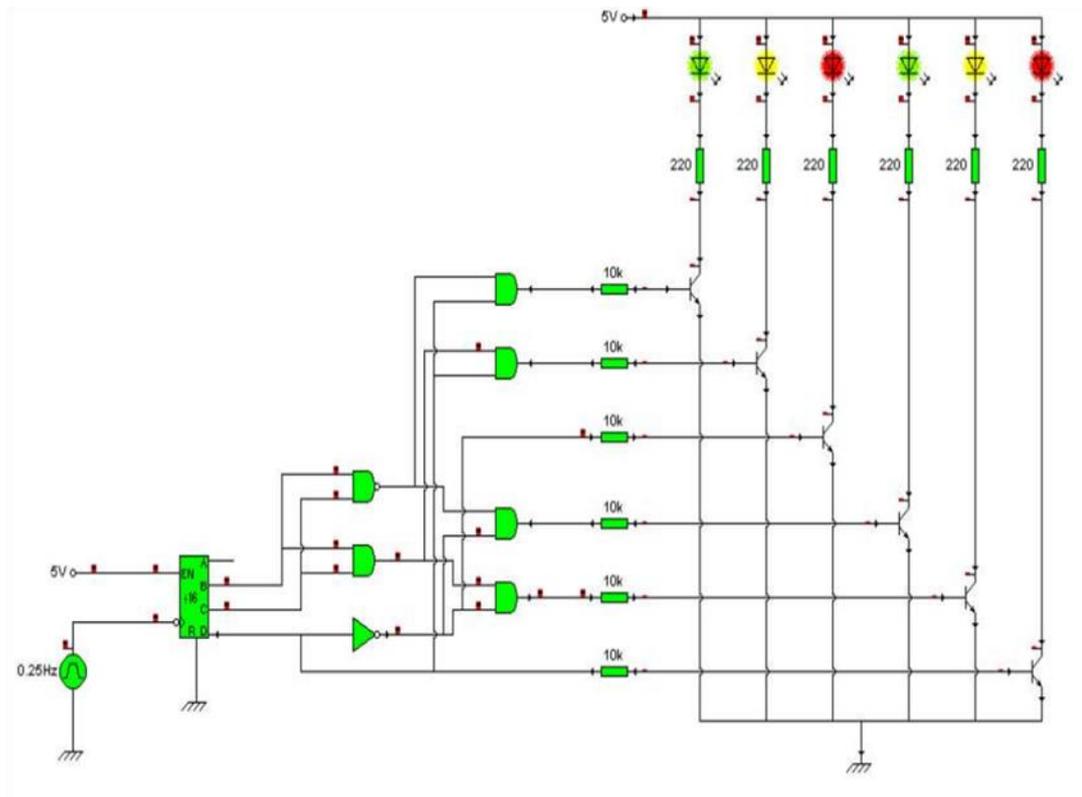


Figure I : Feux de carrefour.

## Conclusion générale

Cette étude bibliographique sur le transistor bipolaire nous permet de comprendre que celui-ci est un dispositif à trois éléments ou trois blocs formé de deux jonctions qui se partagent une couche semi-conductrice commune. Dans le cas du transistor NPN, la région commune de type P est prise en sandwich entre deux couches de type N. Les trois éléments qui correspondent à chacune des bornes d'un transistor bipolaire à jonctions sont l'émetteur, la base et le collecteur. Le niveau de dopage décroît d'un bout à l'autre de la structure. En régime dit "normal" de fonctionnement la jonction émetteur-base est polarisée dans le sens direct et la jonction collecteur-base est polarisée en sens inverse. Selon la polarisation du transistor bipolaire, celui-ci peut être en état bloqué, état saturé ou en état passant. Le transistor bipolaire a trois montages fondamentaux: Montage émetteur commun, le montage base commune et le montage collecteur commun. On a vu que le transistor était un amplificateur de courant dans le cas du montage émetteur commun : on va donc l'utiliser pour amplifier des signaux issus de sources diverses. Grâce au transistor, la technologie a considérablement évolué et ce, dans de très nombreux domaines très différents. Si bien que l'on en trouve de partout.

### Références

- 1- A.saidane , la physique des composant électronique de base , office des publication universitaire , 1993.
- 2- C.Ngo,h.Ngo , les semi-conducteurs de l'électron aux dispositifs, Dunod,paris,2003.
- 3- H.Mathieu, H. Fanet, physique des semi-conducteurs et des composantes électroniques,Dunod , Paris, 2009.
- 4- O. Bonnaud, physique des solides, des semi- conducteurs et dispositifs, 2003.
- 5- N. BENAHMED BENABDALLAH, Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe, thèse de magister, université Abou berk belkaid-tlemcen, 2006.
- 6- O. Fruchier, Étude du comportement de la charge d'espace dans les structures MOS : Vers une analyse du champ électrique interne par la méthode de l'onde thermique, thèse de doctorat, université Montpellier II ,2007 .
- 7- Ph.Roux, Théorie générale simplifiée des semi-conducteurs, jonction P-N, effet transistor bipolaire, 2008.
- 8- T. Neffati, introduction à l'électronique analogique, Dunod, Paris, 2008.