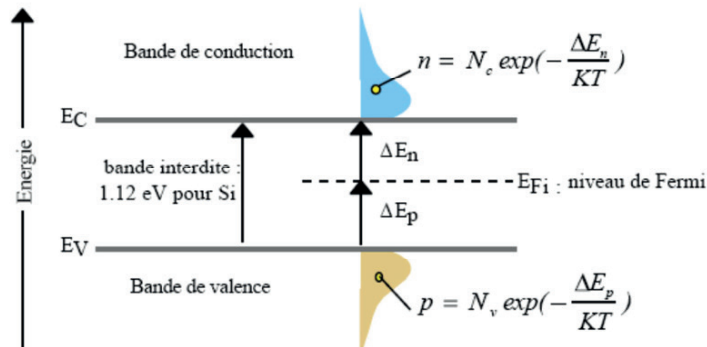
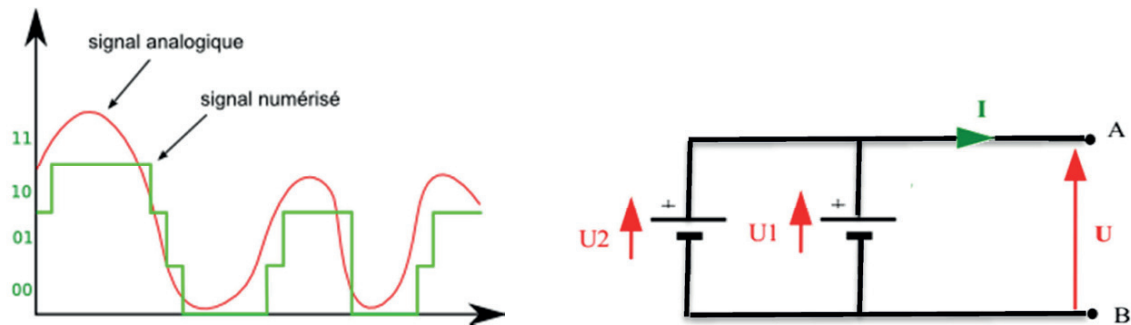


Physique Electronique Appliquée

Cours



Destiné aux :

- 1^{ère} Master en physique énergétique et énergies renouvelable
- 1^{ère} Master Dynamique des fluides et énergétique

Auteur : Dr. Beddiaf ZAIDI

Titre : Physique Electronique Appliquée; cours

ISBN : 978-9931-752-68-4

Dépôt légal : Mars 2022

©Tous droits réservés

El Badr Essatie Impression et Edition

El-Eulma 19600-Algerie

Mob : 0770 31 16 56/0555 71 30 53

Tél/Fax : 036 76 40 08

Email : elbadressatie@gmail.com

elbadr_essatie@yahoo.com

Cours:

Physique Electronique Appliquée

Destiné aux:

1^{ère} Master en physique énergétique et énergies renouvelable

1^{ère} Master Dynamique des fluides et énergétique.

Par

Dr. Beddiaf ZAIDI

Avant-propos

Ce livre est adressé essentiellement aux étudiants de première année Master en physique énergétique et énergies renouvelable et de première année Master Dynamique des fluides et énergétique. Le contenu de ce support de cours concorde au programme officiel. Ce livre est divisé en cinq (05) chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons l'introduction à la physique des composants électroniques. Le second chapitre est consacré essentiellement à la conduction électrique dans les solides. Dans le troisième chapitre, nous décrivons les différents composants passifs. Le quatrième chapitre décrit les composants actifs. Dans le cinquième chapitre, nous présentons les différents composants optoélectroniques.

SOMMAIRE

Chapitre I : Introduction à la physique des composants électroniques

I.1.	Introduction.....	2
I.2.	Représentation des grandeurs.....	2
	I.2.1. La représentation analogique.....	2
	I.2.2. La représentation numérique.....	3
I.3.	Domaines d'application.....	3
I.4.	Matériaux en électricité.....	4
I.5.	Champ électrique et différence de potentiel.....	4
I.6.	Courant électrique.....	4
I.7.	Effet Joule.....	5
I.8.	Lois fondamentales.....	5
	I.8.1. Loi des mailles.....	6
	I.8.2. Loi des noeuds.....	7
I.9.	Générateurs idéaux.....	7
	I.9.1. Générateur de tension idéal.....	7
	I.9.2. Générateur de courant idéal.....	8
	I.9.3. Groupement en série de deux générateurs (réels)	8
	I.9.4. Groupement en parallèle de deux générateurs (réels)	9
	I.9.5. Modélisation d'un dipôle linéaire quelconque.....	9
	I.9.6. Modélisation d'un générateur linéaire.....	10
I.10.	Pont diviseur de courant.....	11
I.11.	Pont Diviseur de Tension.....	11
I.12.	Théorèmes de Thévenin et de Norton.....	12
	I.12.1. Théorème de Thévenin.....	12
	I.12.2. Théorème de Norton.....	12
	I.12.3. Equivalence entre représentations de Thévenin et Norton.....	12
I.13.	Théorème de superposition.....	13
I.14.	Transformation triangle \Leftrightarrow étoile.....	13

I.15.	Classification des dipôles.....	14
I.15.1.	Dipôles actifs et passifs.....	14
I.15.2.	Dipôles symétriques.....	14
I.15.3.	Dipôles linéaires.....	14

Chapitre II : Conduction électrique dans les solides

II.1.	Introduction	16
II.2.	La diffraction des rayons X	16
II.3.	Notions sur la théorie des bandes d'énergie dans les solides.....	17
II.4.	Isolants, Semi-Conducteurs, Conducteurs.....	18
II.5.	Phénomènes de transport de charge dans les semi-conducteurs.....	19
II.5.1.	Rappels sur le phénomène de conduction dans un métal.....	19
II.5.2.	Densité de courant.....	19
II.6.	Interprétation de la conduction électrique dans les métaux.....	20
II.7.	Conduction par électrons et par trous.....	20
II.8.	Différents types de semi-conducteurs.....	21
II.8.1.	Semi-conducteur intrinsèque.....	21
II.8.2.	Semi-conducteur extrinsèque.....	21
II.9.	Conduction dans les semi-conducteurs.....	22
II.9.1.	Mobilité.....	22
II.9.2.	Loi d'Ohm.....	23
II.10.	Jonction PN.....	23
II.10.1.	Jonction PN à l'équilibre thermodynamique.....	23
II.10.2.	Jonction polarisée en direct.....	25
II.10.3.	Jonction polarisée en inverse.....	26

Chapitre III : Composant Passifs

III.1.	Définition des composants passifs.....	28
III.2.	Les types de composants passifs.....	28
III.3.	Résistance.....	29
III.3.1.	Modèle d'une résistance parfaite.....	30

III.3.2.	résistivité (ρ)	30
III.3.3.	Résistance de fils conducteurs.....	31
III.3.4.	Résistances techniques.....	31
III.3.5.	Le marquage des résistances.....	31
III.3.6.	Les résistances variables.....	33
III.4.	Les condensateurs.....	34
III.4.1.	Définition de la capacité.....	34
III.4.2.	Modèle d'un condensateur parfait.....	34
III.4.3.	Relation (V-I) pour un condensateur parfait.....	35
III.4.4.	Charge du condensateur.....	35
III.4.5.	Décharge du condensateur.....	37
III.4.6.	Modèle électrique des condensateurs réels.....	38
III.5.	Les bobines.....	39
III.5.1.	Inductances.....	39
III.5.2.	Réponse d'un dipôle RL à un échelon de tension.....	40
III.5.3.	Filtres passifs.....	41
III.5.4.	Composants de protection contre des surcharges.....	42
III.5.5.	Noyaux de ferrite.....	43
III.5.6.	Encodeurs rotatifs.....	43
III.5.7.	Haut-parleurs.....	43
III.5.8.	Composants de microphone.....	44
III.6.	Les applications nécessitent des composants passifs.....	44

Chapitre IV : Composant actifs

IV.1.	Diode à jonction PN.....	46
IV.1.1.	Constitution – Symbole.....	46
IV.1.2.	Caractéristique statique tension–courant.....	46
IV.1.3.	Association de diode.....	47
IV.1.4.	Redressement.....	48
IV.1.5.	Modèle de la diode Zener.....	51
IV.1.6.	Autres types de diodes.....	52
IV.2.	Les Transistors.....	53

IV.2.1.	Transistor bipolaire.....	54
IV.2.2.	Le Transistor MOS.....	58
IV.2.3.	Transistor à effet de champ (TEC ou FET)	59
IV.2.4.	Le Transistor IGBT.....	59
IV.3.	Circuits intégrés.....	60
IV.3.1.	Définition.....	60
IV.3.2.	Degré d'intégration des circuits intégrés.....	61
IV.3.3.	Boîtiers de circuits intégrés.....	61

Chapitre V : Composant optoélectronique

V.1.	Les diodes LED.....	63
V.1.1.	Electroluminescence.....	63
V.1.2.	Caractéristique.....	64
V.1.3.	Valeurs.....	65
V.1.4.	Utilisations.....	66
V.2.	Diodes Laser.....	66
V.2.1.	Principe de la diode Laser.....	66
V.2.2.	La caractéristique puissance-courant.....	68
V.2.3.	Courant de seuil d'une diode laser.....	69
V.2.4.	Influence de la température.....	69
V.2.5.	Matériaux utilisés pour les diodes laser.....	70
V.2.6.	Utilisation des diodes laser.....	71
V.3.	La fibre optique.....	71
V.3.1.	Présentation et principe.....	71
V.3.2.	La transmission.....	72
V.3.3.	Les différents types de fibre.....	73
V.3.4.	Quelques applications de la fibre optique.....	74
V.4.	Les dispositifs photosensibles.....	75
V.4.1.	Photodiode.....	75
V.4.2.	Schéma équivalent de la photodiode.....	76
V.4.3.	Phototransistor.....	77
V.4.4.	Photo-Thyristor.....	78

V.5.	Photopile.....	78
V.5.1.	Principe de fonctionnement.....	79
V.5.2.	Structure d'une cellule photovoltaïque.....	79
V.5.3.	Caractéristiques électriques.....	81
V.5.4.	Schéma électrique équivalent.....	82
V.5.5.	Architecture de la cellule photovoltaïque.....	84
	Références	

***Chapitre I : Introduction à la physique des composants
électroniques***

I.1. Introduction

L'électricité est l'interaction de particules chargées sous l'action de la force électromagnétique. Délicat d'attribuer la paternité de la découverte de l'électricité à un homme tant l'humanité depuis l'antiquité à observer des phénomènes naturels d'origine magnéto-électrique: triboélectricité, foudre, électricité statique de la laine, aimantation naturelle... S'il fallait se risquer à donner un nom, il faudrait remonter à 600 av. J.-C., chez les Hellènes, et confier à Thalès de Milet la paternité de la réflexion sur l'électricité et le magnétisme, avec une vision animiste de la matière où faute de notions théoriques (les propriétés de l'électricité ont commencé à être comprises au cours du XVIIIe siècle), on octroyait «une âme aux choses qu'on croyait inanimées».

L'électrocinétique est une science de l'ingénieur, étudie la circulation des courants électriques dans les circuits électriques composés d'un ensemble d'éléments appelés composants comme les générateurs (piles, ...), les composants passifs (résistance, bobine d'induction, condensateur) et les composants actifs (transistor, amplificateur opérationnel, ...). Ces éléments sont reliés entre eux par des fils conducteurs.

I.2. Représentation des grandeurs

Nombreux sont les systèmes qui utilisent des grandeurs en entrée, les traitent et délivrent en sortie des commandes ou des informations pour l'utilisateur. Les grandeurs peuvent être représentées de deux façons:

1. Représentation analogique.
2. Représentation numérique.

I.2.1 La représentation analogique

La plupart des capteurs transforment une grandeur physique (température, pression...) en grandeur électrique. De même, le microphone transforme la pression acoustique en grandeur électrique proportionnelle. Ainsi une grandeur analogique peut prendre toutes les valeurs en variant graduellement entre deux limites, par exemple une automobile peut avoir une vitesse variant entre 0 et 220 km/h.

Les systèmes analogiques regroupent donc les montages utilisés pour le contrôle ou pour le réglage de sorte que les composants utilisés fonctionnent de manière linéaire, sans discontinuité.

I.2.2. La représentation numérique

La grandeur mise sous forme numérique n'est plus proportionnelle à la grandeur d'entrée. Elle s'exprime par symboles ou codes (chiffres). Par exemple, le tachymètre d'une automobile s'il est numérique, indique une valeur par pas de 1km/h: la progression est discontinue; s'il est analogique (à aiguille) la progression est continue. La représentation numérique est donc discontinue.

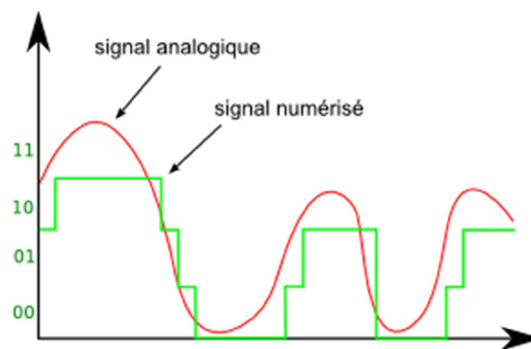


Fig.1.1. Représentations et traitement du signal.

I.3. Domaines d'application

Le champ d'application des dispositifs électroniques est vaste. Nous pouvons citer entre autres:

- **Télécommunications** : Télégraphie, téléphonie, Radiodiffusion, télévision, Télémessure, télécommande.
- **Systèmes de détection** : Radar, sonar, télédétection.
- **Electroacoustique** : Enregistrement et reproduction des sons.
- **Traitement de l'information** : Ordinateurs, calculatrices.
- **Industrie** : Commandes et réglages automatiques installations de surveillance.
- **Instruments de mesures** : Equipements industriels, scientifiques.
- **Biomédical** : automate de biochimie, électrocardiographe, incubateur.
- **Electroménager** : téléviseur, machine à laver.

I.4. Matériaux en électricité

Les électrons se déplacent dans les solides plus ou moins facilement selon le matériau. La charge d'un électron est égale à $1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb. On distingue 3 types de matériaux:

- **Les conducteurs:** matériaux dans lesquels un champ très faible suffit à fournir une énergie permettant le déplacement des électrons libres (porteurs de charges arrachés à chaque atome). On a un à deux électrons libres en moyenne par atome. La concentration en électrons dépend du matériau ; par exemple pour le cuivre, on a 10^{28} électrons par m^3 .
- **Les isolants:** pas d'électron libre. La qualité de l'isolant dépend de la pureté du matériau.
- **Les semi-conducteurs:** la concentration en électrons dépend du matériau et de la température. Les électrons sont disposés dans des bandes permises séparées par des bandes dites interdites. Une certaine quantité d'énergie permet de faire passer des électrons d'une bande permise pleine (bande de valence) vers la bande vide (bande de conduction) générant ainsi des trous électriquement équivalents à des charges positives dans la bande de valence. Les semi-conducteurs sont utilisés dans la plupart des circuits actifs.

I.5. Champ électrique et différence de potentiel

Si on applique une différence de potentiel $V_{AB} = V_A - V_B$ entre deux points A et B, les charges se déplacent à cause du champ électrique \vec{E} . Le champ est dirigé vers les potentiels décroissants (potentiel élevé vers potentiel faible). On a la relation:

$$V_{AB} = V_A - V_B = \int_A^B \vec{E} d\vec{r} \quad (I.1)$$

I.6. Courant électrique

Le débit de charge ou courant électrique est donné par la relation:

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (I.2)$$

I: s'exprime en ampère. Les lois du courant électrique ont été étudiées par Ampère (1755-1836) au début du 19^{ème} siècle. Par convention le sens du courant est le sens contraire du déplacement des électrons.

I.7. Effet Joule

Un phénomène important dans une résistance est l'effet Joule (du nom du physicien anglais James-Prescott Joule qui a étudié les lois de la chaleur). Une résistance parcourue par un courant reçoit un travail électrique et le transforme en transfert thermique. Quand le courant est périodique, la puissance électrique P reçue (on parle de puissance dissipée par effet Joule) s'exprime en fonction de la tension efficace U , de l'intensité efficace I du courant et de la résistance R par l'une des trois formules, équivalentes grâce à la loi d'Ohm: $\mathbf{P = UI = RI^2}$

L'unité de puissance est le watt (symbole W), du nom de l'ingénieur écossais James Watt. On emploie assez souvent en électronique son sous-multiple, le milliwatt (mW) qui vaut $10^{-3} W$.

Dans tous les cas, même si le courant n'est pas périodique, le travail électrique W_e reçu entre deux instants t_1 et t_2 par un conducteur ohmique de résistance R traversé par un courant d'intensité i s'écrit:

$$W = R \int_{t_1}^{t_2} i^2 dt \quad (I.3)$$

L'unité de travail électrique est le joule (J). La puissance dissipée par effet Joule dans un composant est un problème important en électronique. Tout d'abord, il s'agit d'une puissance perdue pour le circuit électrique et qui doit donc lui être fournie (en général par une source de tension continue), et ensuite, il se pose souvent un problème d'évacuation de la chaleur créée car les petites dimensions des montages compliquent les échanges thermiques. Ces questions se posent essentiellement d'une part, pour les montages qui traitent des courants assez élevés comme les amplificateurs de puissance ou les alimentations et d'autre part, pour les circuits de taille très réduite.

I.8. Lois fondamentales

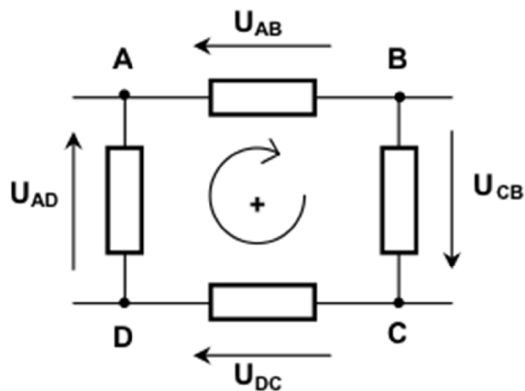
Un réseau ou circuit électrique est un ensemble de conducteurs reliant entre eux des éléments appelés composants : résistance, condensateur, bobine de self-induction, diode, transistor, ...

Dans un réseau électrique, on distingue:

- le noeud : point de raccordement entre au moins deux conducteurs.
- la branche : portion du réseau compris entre deux nœuds.
- la maille : partie du réseau qui se referme sur elle-même.

I.8.1. Loi des mailles

Une maille est constituée de plusieurs branches qui forment un circuit fermé. On choisit un sens arbitraire de parcours:



On peut énoncer la loi ainsi : la somme des tensions qui indiquent un sens est égale à la somme des tensions qui indiquent l'autre sens. Pour notre exemple, on a la relation:

$$U_{AD} + U_{CB} + U_{DC} = U_{AB} \quad (\text{I.4})$$

Règle d'écriture de la loi des mailles:

- On choisit un sens de parcours arbitraire pour la maille.
- On décrit la maille dans le sens choisi et on écrit que la somme algébrique des tensions est nulle en respectant la convention suivante:

nulle en respectant la convention suivante:

- si la flèche-tension est rencontrée par la pointe, la tension est affectée du signe (+);
- si la flèche-tension est rencontrée par le talon, la tension est affectée du signe (-).

Définition: La somme des différences de potentiel le long d'une maille est nulle. Cette loi est baptisée loi des mailles ou première loi de Kirschhoff.

I.8.2. Loi des noeuds

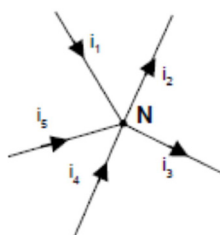
Le mouvement des charges, créant le courant est soumis aux lois de la physique: conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement et de la charge (de la matière).

On choisit un sens arbitraire pour chaque courant. Par convention, les courants i se dirigeant dans le même sens que les flèches seront comptés positivement.

Soit le noeud N un point de raccordement de plusieurs conducteurs traversés par des courants.

En un noeud, il ne peut y avoir accumulation de charges.

On a donc ici : $i_1 + i_4 + i_5 = i_2 + i_3$



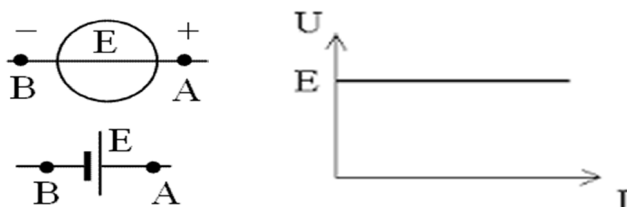
Définition: La somme des courants entrant est égale à la somme des courants sortant. Cette loi est baptisée loi des noeuds ou seconde loi de Kirschhoff.

I.9. Générateurs idéaux

I.9.1. Générateur de tension idéal

La tension U entre ses bornes, égale à E (force électromotrice du générateur), est indépendante du courant qu'elle délivre. Pour les sources réelles, la tension de sortie diminue si le courant débité augmente. Les accumulateurs au plomb, les alimentations stabilisées de laboratoire sont de bonnes approximations des sources de tension idéales. Une pile électrochimique usagée présente une forte résistance interne : sa tension diminue dès qu'elle débite dans une charge.

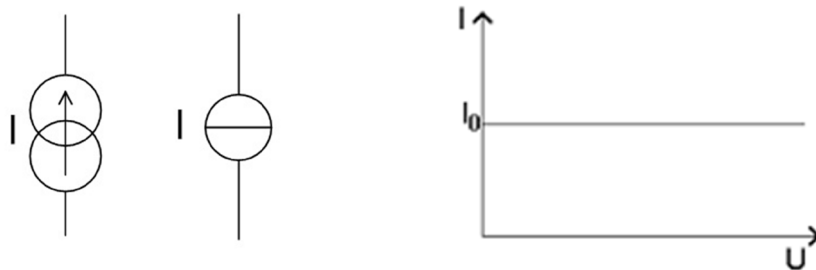
On représente ce générateur par les symboles suivants:



Ce générateur de tension n'existe pas et en pratique, la différence de potentiel en sortie d'un générateur de tension décroît en fonction du courant de sortie.

I.9.2. Générateur de courant idéal

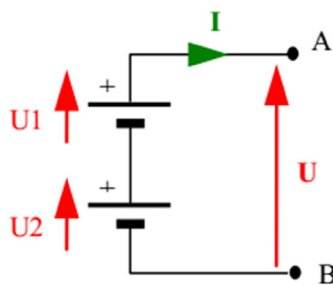
Le courant de sortie I , égal à J le courant électromoteur du générateur, est indépendant de la tension entre les bornes de la source. La résistance interne est infinie. Il n'existe pas dans la vie courante de modèle de source de courant. Il est possible de simuler une source de courant en plaçant en série une source de tension et une résistance beaucoup plus grande que la charge. Des circuits électroniques simples permettent de réaliser des sources de courant qui débitent un courant pratiquement indépendant de la charge. On représente ce générateur par les symboles suivants:



- Un générateur idéal doit se comporter comme un récepteur idéal quand on inverse le sens du courant qui le traverse. Les générateurs réels ne sont en général pas réversibles.

I.9.3. Groupement en série de deux générateurs (réels)

Les générateurs sont en série, lorsque la borne (-) de l'un des générateurs est reliée à la borne (+) du générateur suivant:



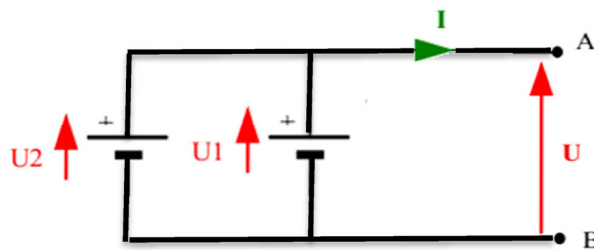
Le groupement peut être remplacé par un seul générateur:

- Les tensions des sources de tensions s'additionnent: $U_{eq} = U_1 + U_2$
- les résistors en série s'additionnent: $R_{eq} = R_1 + R_2$
- le courant totale est égal au courant d'une seul source: $I_{eq} = I_1 = I_2$

Note: on peut toujours câbler en série des générateurs de tension

I.9.4. Groupement en parallèle de deux générateurs (réels)

- Les tensions est égal à la tension d'une seul source: $U_{eq} = U_1 = U_2$
- la résistance interne de l'ensemble est égale a la résistance interne d'une branche divisé par le nombre de branches.
- le courant totale est égal a la somme des courants de chaque branche: $I_{eq} = I_1 + I_2$



I.9.5. Modélisation d'un dipôle linéaire quelconque

La modélisation d'un dipôle consiste à le remplacer par un circuit équivalent (répondant aux mêmes équations) constitué de dipôles idéaux. L'équation de la caractéristique d'un dipôle linéaire est de la forme: $U = a.I + b$ ou $I = a'.U + b'$

Cette caractéristique coupe les axes aux points : $(U_0, 0)$ et $(0, I_0)$. Si le dipôle est passif alors U_0 et I_0 sont nuls. Pour un générateur, U_0 est la tension à vide (courant débité nul) et I_0 est le courant de court-circuit.

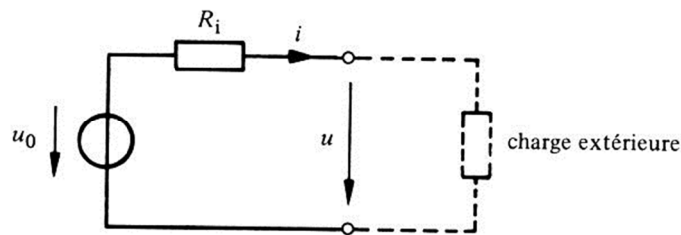
I.9.6. Modélisation d'un générateur linéaire

On peut utiliser les deux modèles équivalents suivants:

Modèle source de tension:

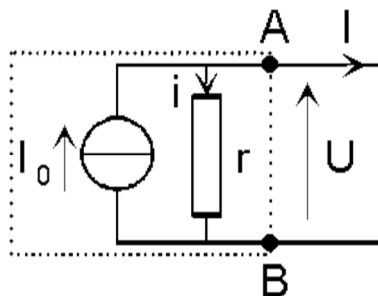
On pose $E = U_0$ et $R = U_0/I_0$ et donc: $U = E - R.I$

On peut remplacer le dipôle par une source de tension idéale de f.e.m. E en *série* avec une résistance R .



Modèle source de courant:

On peut remplacer le dipôle par une source de courant idéale d'intensité J en parallèle avec une résistance R .



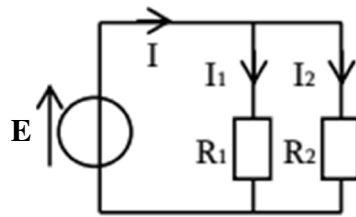
où : $I_0 = \frac{E}{r}$ est le courant que débiterait le générateur dans un court circuit, qui est la valeur théorique maximale de l'intensité que peut débiter le générateur. D'après ce schéma: $I_0 = i + I \Leftrightarrow I = I_0 - i$; comme: $U = r.i$ alors $i = G.U$; donc: $I = I_0 - G.U$

Si les dipôles ainsi modélisés sont des générateurs purs, la résistance R se nomme la **résistance interne** du générateur. Elle est nulle pour un générateur de tension idéal et infinie pour un générateur de courant idéal. E est la force électromotrice (f.e.m.) à vide c'est-à-dire sans charge

entre A et B. En électronique de nombreux dispositifs se comportent comme des générateurs de courant, on privilégie alors la représentation $I = g(U)$.

I.10. Pont diviseur de courant

Un diviseur de courant, c'est un montage très simple d'électronique. Il permet d'obtenir un courant d'une valeur proportionnelle à un autre courant. Lorsque l'on a 2 résistances en parallèle, qui sont donc soumises à la même tension, il est possible de calculer le courant qui parcourt une des deux résistances.

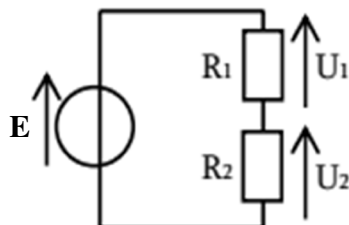


Pour calculer un de ces deux courants (dans notre cas I_1 ou I_2), vous devez cependant connaître le courant total (ici c'est le courant I) qui circule dans ces résistances et connaître la valeur des résistances (c'est-à-dire connaître la valeur de R_1 et de R_2). La formule du pont diviseur de courant est:

$$I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot I \quad (I.5)$$

I.11. Pont Diviseur de Tension

Le pont diviseur de tension est un montage électrique simple. Il permet de déterminer une tension proportionnellement à une autre tension. Ce type de montage est utilisé couramment pour créer une tension de référence dans un circuit électrique.



La plus simple représentation du diviseur de tension consiste à placer deux résistances électriques en série (voir le schéma de droite). Ce type d'association de résistances étant omniprésent dans les montages électriques, le pont diviseur en devient une des notions fondamentales en électronique. Il est possible de calculer facilement la valeur de U_1 dans le montage de droite, à la condition de connaître les valeurs des résistances et la valeur de la tension E . La première formule à utiliser est celle de la loi d'Ohm qui permet de citer cette équation:

$$U_1 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \cdot E \quad (\text{I.6})$$

I.12. Théorèmes de Thévenin et de Norton

I.12.1. Théorème de Thévenin

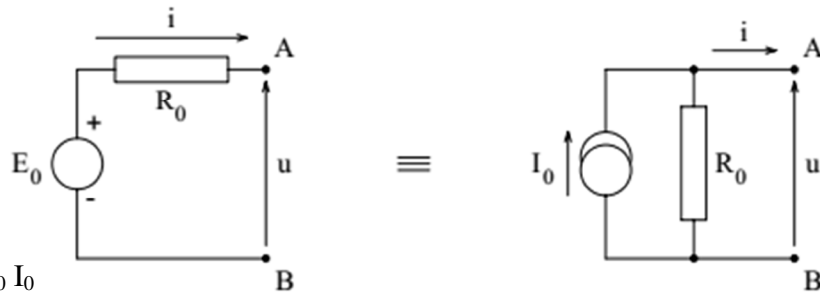
Un réseau linéaire, ne comprenant que des sources indépendantes de tension, de courant et des résistances, pris entre deux bornes se comporte comme un générateur de tension E_0 en série avec une résistance R_0 . La f.e.m. E_0 du générateur équivalent est égale à la tension existant entre les deux bornes considérées lorsque le réseau est en circuit ouvert. La résistance R_0 est celle du circuit vu des deux bornes lorsque toutes les sources sont éteintes.

I.12.2. Théorème de Norton

De même on peut remplacer tout réseau linéaire, ne comportant pas de sources commandées, pris entre deux de ses bornes par une source de courant I_0 en parallèle avec une résistance R_0 . L'intensité I_0 est égale au courant de court-circuit, les deux bornes étant reliées par un conducteur parfait. La résistance R_0 est celle du circuit vu des deux bornes lorsque toutes les sources sont éteintes.

I.12.3. Equivalence entre représentations de Thévenin et Norton

L'application respective des théorèmes de Thévenin et Norton permet de montrer l'équivalence de deux circuits suivants:



Avec: $E_0 = R_0 I_0$

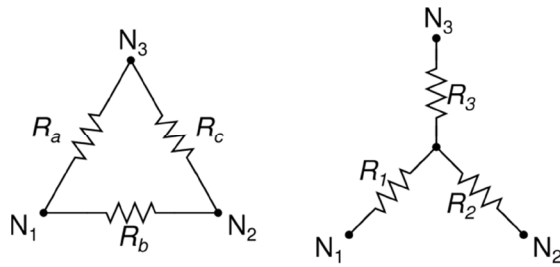
I.13. Théorème de superposition

Dans un réseau électrique linéaire, le courant (ou la tension) dans une branche quelconque est égal à la somme algébrique des courants (ou des tensions) obtenus dans cette branche sous l'effet de chacune des sources indépendantes prise isolément, toutes les autres sources indépendantes ayant été remplacées par leur résistance interne.

Le théorème de superposition permet d'étudier un réseau électrique compliqué en remplaçant par une somme de réseaux électriques plus simples.

I.14. Transformation triangle \Leftrightarrow étoile

Un circuit composé de trois résistances montées en triangle peut être transformé en un circuit équivalent dans lequel les trois résistances sont montées en étoile.



- Transformation « triangle \rightarrow étoile »:

$$R_1 = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b + R_c} \quad (I.7)$$

- Transformation « étoile → triangle »:

$$R_a = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_2} \quad (\text{I.8})$$

I.15. Classification des dipôles

I.15.1. Dipôles actifs et passifs

Un dipôle passif consomme de l'énergie. Sa caractéristique passe par l'origine. ($I = 0$ si $U = 0$).

Un dipôle actif fournit de l'énergie au circuit dans lequel il est connecté. Le dipôle 1 est actif, 2 et 3 sont passifs.

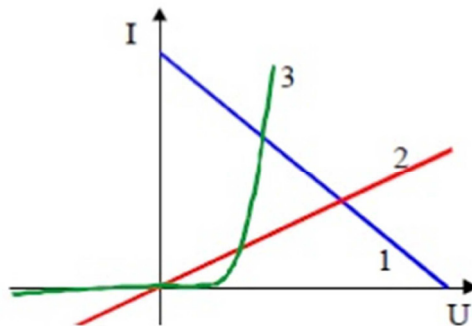
I.15.2. Dipôles symétriques

La caractéristique est symétrique par rapport à l'origine. Un dipôle symétrique est toujours passif. Son fonctionnement n'est pas modifié si on inverse le sens du courant : il n'est pas polarisé. Sur la figure, le dipôle n°2 est symétrique.

I.15.3. Dipôles linéaires

La caractéristique est une droite d'équation: $U = a.I + b$ ou $I = p.U + q$

En électronique, on utilise de nombreux dipôles non linéaires. Les circuits qui contiennent ces dipôles ne peuvent, en général, pas être étudiés avec des méthodes analytiques rigoureuses. La connaissance des caractéristiques permet alors l'analyse de ces circuits avec des méthodes graphiques.



Chapitre II : Conduction électrique dans les solides

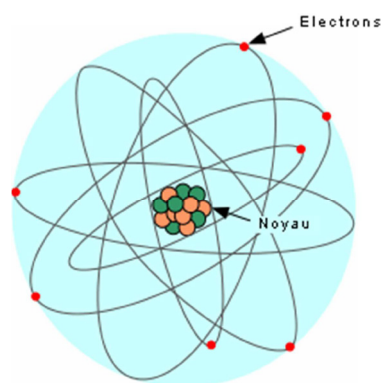
II.1. Rappel sur la structure atomique des isolants et des conducteurs

Pendant très longtemps les scientifiques croyaient que vis-à-vis de la conduction électrique, les matériaux se subdivisaient en deux classes: conducteurs et diélectriques (isolants). Cependant, vers 1830 on a découvert des matériaux dont les propriétés ne permettaient de les classer dans aucune de ces catégories. A l'état pur, ces matériaux étaient à la fois de mauvais conducteurs et de mauvais isolants: or leurs propriétés électriques, notamment la résistivité, variaient très sensiblement sous influence des facteurs extérieurs de l'environnement (température, pression...), de la présence des impuretés, de la lumière, etc... En occupant une place intermédiaire entre les conducteurs et les isolants, ces matériaux ont été appelés « semi-conducteurs ». Pour comprendre la nature et les propriétés des semi-conducteurs, il conviendrait de présenter un cycle de conférences sur la physique quantique et sur la physique des solides. Ici nous nous limitons par introduire, d'une manière très sommaire et simplifiée, quelques clés de compréhension du phénomène semi-conducteur.

II.2. La structure de l'atome

Nous savons tous que les matériaux de notre planète sont constitués d'éléments chimiques, comme l'hydrogène, l'oxygène, le fer, le nickel, etc.... Il y en a 106 dans le tableau périodique des éléments de Mendeleef.

Ces éléments sont formés par des atomes, l'unité de base de la matière. Voici un modèle simplifié de l'atome:



L'atome consiste en un noyau central composé de protons (charges positives) et de neutrons (aucune charge), entouré d'électrons (charge négative) qui gravitent autour du noyau. Toute la masse est concentrée dans le noyau, les électrons ayant une masse négligeable. La masse atomique d'un atome est donc donnée par la masse du noyau, soit le nombre de protons + le nombre de neutrons. Chaque atome possède un numéro atomique qui est donné par le nombre de protons.

Si on monte d'un cran dans l'organisation de la matière, il y a les molécules qui sont formées d'un assemblage d'atomes qui sont liés entre eux par deux principaux types de liens: les liens ioniques et les liens covalents.

II.3. Notions sur la théorie des bandes d'énergie dans les solides

Les semi-conducteurs et les métaux ont une structure cristalline, c'est-à-dire que les atomes ou molécules sont groupés en réseaux régulièrement disposés dans l'espace. Dans ces réseaux la distance inter atomique étant faible (de l'ordre de quelques Å) les atomes ne peuvent plus être considérés comme isolés et il en résulte des interactions (de nature électrostatique entre les divers atomes). Considérons un cristal constitué de N atomes du groupe IV a (C, Ge, Si, Sn) et supposons que l'on puisse faire décroître la distance inter-atomique.

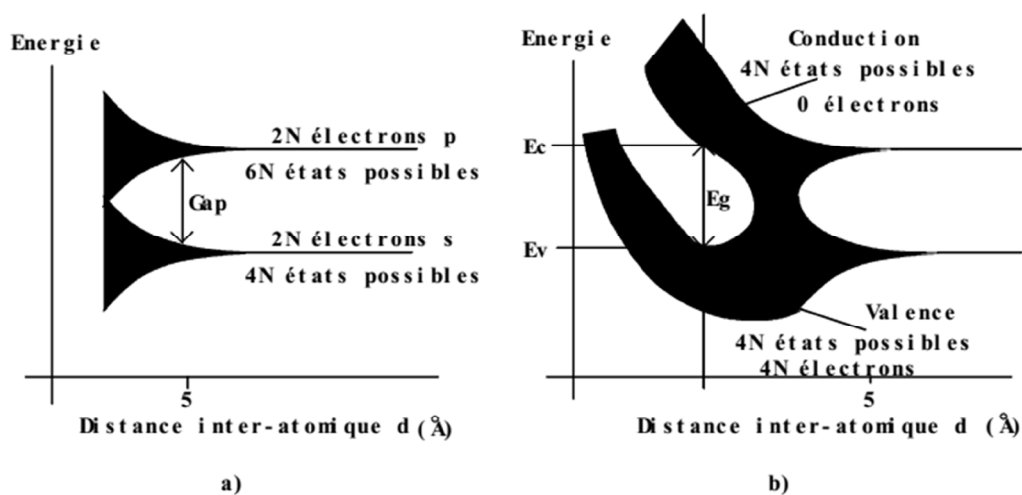


Fig.2.1. Diagrammes d'énergie des éléments du groupe IV lorsque la distance inter-atomique décroît: apparition des bandes d'énergie.

Lorsque les distances inter-atomiques deviennent suffisamment faibles l'ensemble du cristal devient un système électronique qui obéit au principe d'exclusion de Pauli. On a donc, une dégénérescence des états d'énergie. Cette dégénérescence se traduit par la démultiplication des niveaux d'énergie correspondants aux sous couches s et p en N sous niveaux qui constituent autant d'états d'énergie possible pour les électrons. Ces N états distincts constituent une bande d'énergie. On a donc 2 états ----> 2 N états.

On note l'existence d'une bande d'énergie appelée bande interdite qui ne comprend aucun état possible. Lorsque la distance inter-atomique décroît encore, on a affaire à ce que l'on appelle des interactions fortes et l'on obtient la structure représentée à la figure (b).

II.4. Isolants, Semi-Conducteurs, Conducteurs

Rappelons-nous que la couche de valence d'un atome représente une bande d'un certain niveau énergétique et que les électrons de valence sont confinés à cette bande. Lorsqu'un électron acquiert assez d'énergie additionnelle d'une source externe, il peut quitter la couche de valence, devenir un électron libre et exister dans ce que l'on désigne comme étant la *bande de conduction*. En terme d'énergie, la différence entre la bande de valence et la bande de conduction est appelée un écart énergétique. Il s'agit en fait de la quantité d'énergie que doit avoir un électron pour sauter de la bande de valence vers la bande de conduction. Une fois dans la bande de conduction, l'électron est libre de se déplacer à travers le matériau et n'est plus lié à aucun atome particulier.

On distingue isolants semi-conducteurs et conducteurs à partir de leur structure de bande d'énergie (**Fig.2.2**). Notez à la partie (a) le vaste écart énergétique entre les bandes. Les électrons de valence ne peuvent sauter vers la bande de conduction sauf lors d'une détérioration provoquée par des tensions extrêmement élevées appliquées au matériau. À la partie (b), on remarque qu'un semi-conducteur possède un écart énergétique plus restreint, permettant à quelques électrons de sauter vers la bande de conduction et de devenir des électrons libres. Par contraste, la partie (c) illustre les bandes énergétiques se chevauchant dans un conducteur. Dans un matériau conducteur, il existe toujours un grand nombre d'électrons libres.

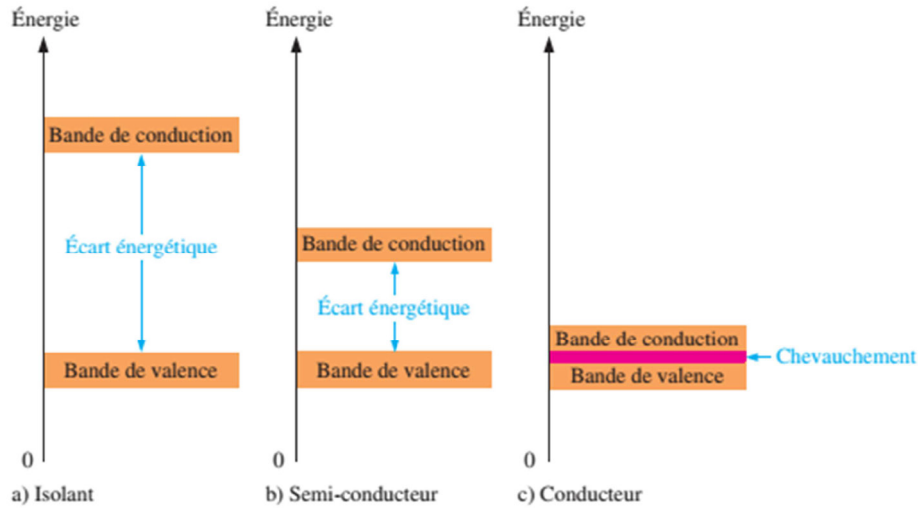


Fig.2.2. Diagrammes énergétiques pour les trois types de matériaux.

II.5. Phénomènes de transport de charge dans les semi-conducteurs

II.5.1. Rappels sur le phénomène de conduction dans un métal

Dans un métal chaque atome est susceptible de fournir un voire 2 ou 3 électrons à la bande de conduction. Ces électrons ne peuvent être rattachés à aucun atome particulier et sont donc libres de se mouvoir à l'intérieur du cristal; ce sont les électrons libres. A la température ambiante et en l'absence de champ électrique les électrons sont animés de mouvement aléatoire dus aux collisions avec les atomes. Le déplacement moyen de l'ensemble des électrons est nul dans ce cas. Si l'on applique un champ électrique E à l'intérieur du métal la vitesse moyenne des électrons sera non nulle et sera proportionnelle au champ électrique pour de faibles valeurs de celui-ci; on a alors:

$$\vec{v} = \mu \vec{E} \quad (\text{II.1})$$

μ : est appelée la mobilité des électrons et s'exprime en $\text{m}^2 / \text{V.S}$. Ce déplacement d'électrons va engendrer un courant dit courant d'entraînement

II.5.2. Densité de courant

Considérons un barreau de longueur L de section S contenant n électrons/ m^3 .

La densité de courant J est:

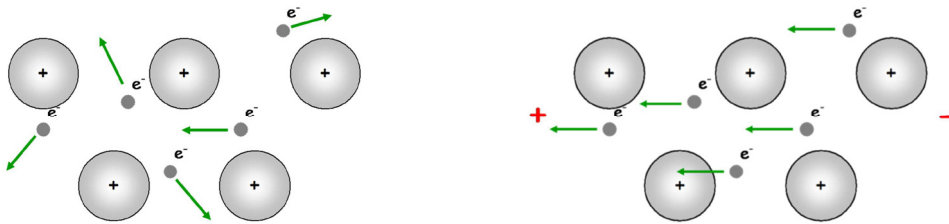
$$J = n q v \quad \text{on a:} \quad J = n q \mu E = \sigma E \quad (\text{II.2})$$

σ : est la conductivité du métal et la résistivité: $\rho = \frac{1}{\sigma}$ **et** $\sigma = nq \mu$

$n \sim 10^{28}/\text{m}^3$ pour un conducteur **et** $n \sim 10^7/\text{m}^3$ pour un isolant

II.6. Interprétation de la conduction électrique dans les métaux

Dans un métal certains électrons peu liés au noyau se déplacent d'un atome à l'autre : on les appelle les électrons libres. Dans un circuit électrique ouvert les électrons libres présents dans le métal se déplacent de manière désordonnée : il n'y a pas de courant électrique. Dans un circuit électrique fermé, les électrons libres acquièrent un mouvement d'ensemble de la borne (-) à la borne (+) du générateur. Le sens de déplacement des électrons est donc opposé au sens conventionnel du courant électrique.



En l'absence de tension électrique

On applique une tension aux extrémités

- Dans les matériaux isolants, il y a aussi des électrons mais ils ne peuvent pas se déplacer ; ils ne peuvent donc pas conduire le courant.

II.7. Conduction par électrons et par trous

Dans les semi-conducteurs, il existe deux types de conduction: la conduction par électrons et la conduction par trous. Dans un cristal semi-conducteur intrinsèque, certaines liaisons entre atomes se cassent. L'électron est alors libre de se déplacer dans le cristal. Sur l'emplacement de la liaison rompue on dit qu'il y a un trou. Pour chaque liaison rompue, il y a formation d'une paire électron-trou. Sous l'effet du champ électrique les électrons (charge -e) se déplacent dans le sens inverse du champ, les trous (charge +e) se déplacent dans le sens du champ.

II.8. Différents types de semi-conducteurs

II.8.1. Semi-conducteur intrinsèque

Dans un semi-conducteur intrinsèque, les électrons de la bande de conduction proviennent uniquement de la bande de valence et laissent derrière eux des états vacants, appelés trous. Les niveaux du bas de la bande de conduction sont donc peuplés par des électrons, alors que les niveaux du haut de la bande de valence sont peuplés par des trous (**Fig.2.3**).

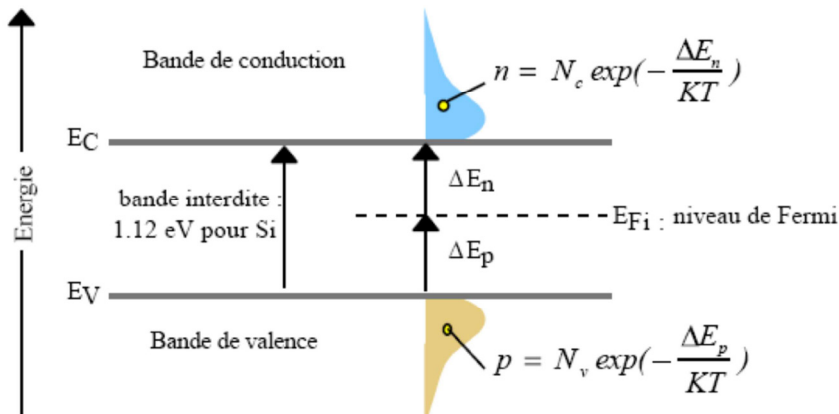


Fig.2.3. Population des porteurs dans un semi-conducteur intrinsèque.

II.8.2. Semi-conducteur extrinsèque

L'utilisation du semi-conducteur pur présente assez peu d'intérêt. L'utilisation de semi-conducteur dans la plupart des composants électroniques se fait dans un état dit dopé (semi-conducteur extrinsèque), par opposition avec le semi-conducteur pur, ou intrinsèque. Lorsqu'on dope un semi-conducteur avec des atomes de dopant convenablement choisis, on modifie de façon remarquable les propriétés de conductivité. Si les atomes du dopant sont pentavalents (*Semi-conducteur de type N*), les niveaux du bas de la bande de conduction sont de plus en plus remplis par des électrons qui proviennent des atomes de dopant (**Fig.2.4**).

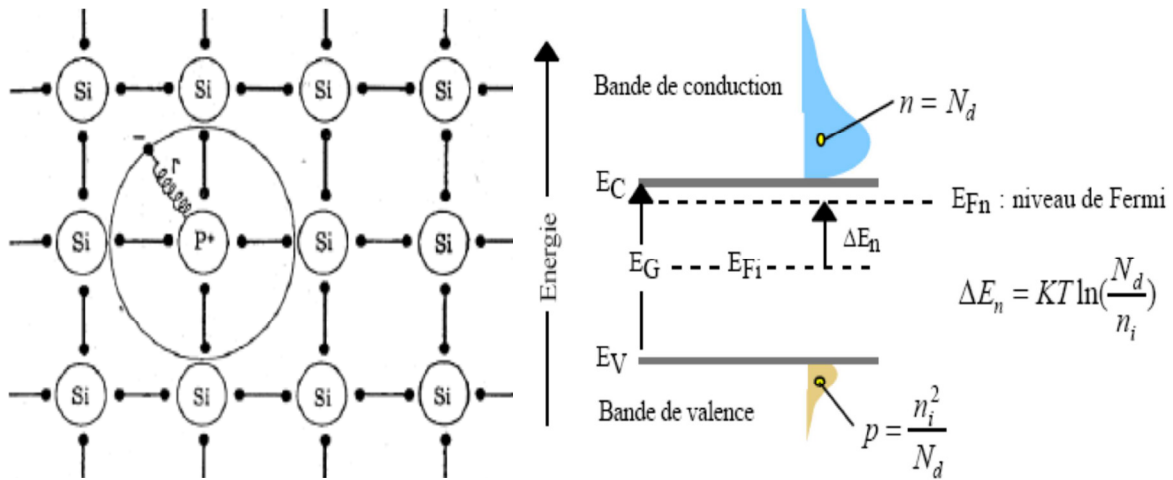


Fig.2.4. Libération des électrons par des atomes de phosphore.

Par contre, si les atomes de dopant sont trivalents (*Semi-conducteur de type P*), les niveaux du haut de la bande de valence sont de plus en plus remplis par des trous qui proviennent des atomes de dopant (*Fig.2.5*).

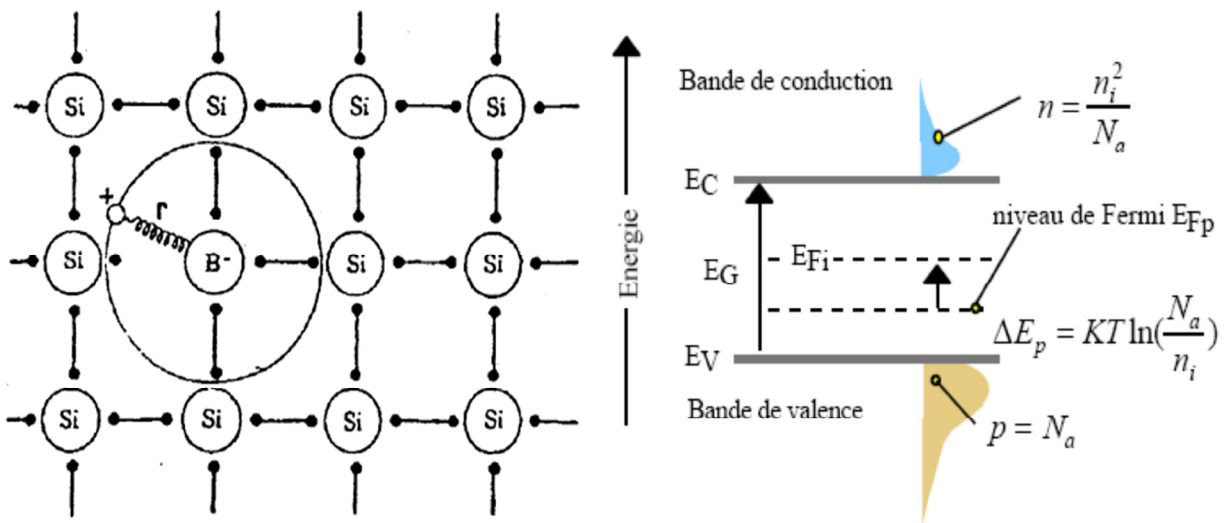


Fig.2.5. Libération des trous par des atomes de bore.

II.9. Conduction dans les semi-conducteurs

II.9.1. Mobilité

En l'absence d'un champ électrique, le mouvement des porteurs de charge (électrons et trous) dans le semi-conducteur est erratique. En présence d'un champ électrique \vec{E} , à ce

mouvement désordonné s'ajoute une vitesse moyenne proportionnelle au champ.

Pour les électrons on a: $\vec{v}_n = \mu_n \vec{E}$ et pour les trous on a: $\vec{v}_p = \mu_p \vec{E}$

μ : est la mobilité des porteurs de charges, plus faible pour les trous que pour les électrons.

Valeurs numériques: Pour le silicium: $\mu_n = 0,14$ et $\mu_p = 0,05$ en m^2/Vs

Pour le germanium: $\mu_n = 0,38$ et $\mu_p = 0,17$ en m^2/Vs

II.9.2. Loi d'Ohm

La densité de courant due à n électrons ou pour p trous par unité de volume:

$$\begin{aligned} \vec{j}_n &= -qn\vec{v}_n = qn \mu_n \vec{E} = \sigma_n \vec{E} \\ \vec{j}_p &= +qn\vec{v}_p = qn \mu_p \vec{E} = \sigma_p \vec{E} \end{aligned} \quad (II.3)$$

σ_n et σ_p sont les conductivités dues respectivement aux électrons et aux trous.

La densité de courant totale vaut donc:

$$\vec{j} = \vec{j}_n + \vec{j}_p = (\sigma_n + \sigma_p) \vec{E} = \sigma \vec{E} \quad (II.4)$$

Cette expression représente la loi d'Ohm généralisé. La quantité σ est la conductivité du semi-conducteur.

$$\sigma = (\sigma_n + \sigma_p) \quad (II.5)$$

Pour un semi-conducteur extrinsèque, le terme dû aux porteurs majoritaires est prépondérant, et l'effet des porteurs minoritaires étant négligeable.

II.10. Jonction PN

II.10.1. Jonction PN à l'équilibre thermodynamique

Elle résulte de la juxtaposition dans un même matériau semi-conducteur de deux zones:

- l'une de type P (majoritaire en trous $p_p = N_a$, minoritaire en électrons $n_p = \frac{n_i^2}{N_a}$);
- et l'autre de type N (majoritaire en électrons $n_n = N_d$, minoritaire en trous $p_n = \frac{n_i^2}{N_d}$).

Dès la juxtaposition, des courants de diffusion de trous et d'électrons se développent autour de la jonction, et créent au voisinage immédiat de celle-ci une barrière de potentiel, qui s'oppose aux

courants de diffusion des porteurs majoritaires de chaque zone. Lorsque l'équilibre est atteint, le champ électrique créé par la barrière de potentiel est suffisant pour équilibrer les courants de diffusion des porteurs majoritaires et des porteurs minoritaires, d'où un courant global de diffusion nul. Les niveaux d'énergie au voisinage de la jonction sont alors donnés par la (**Fig.2.6**).

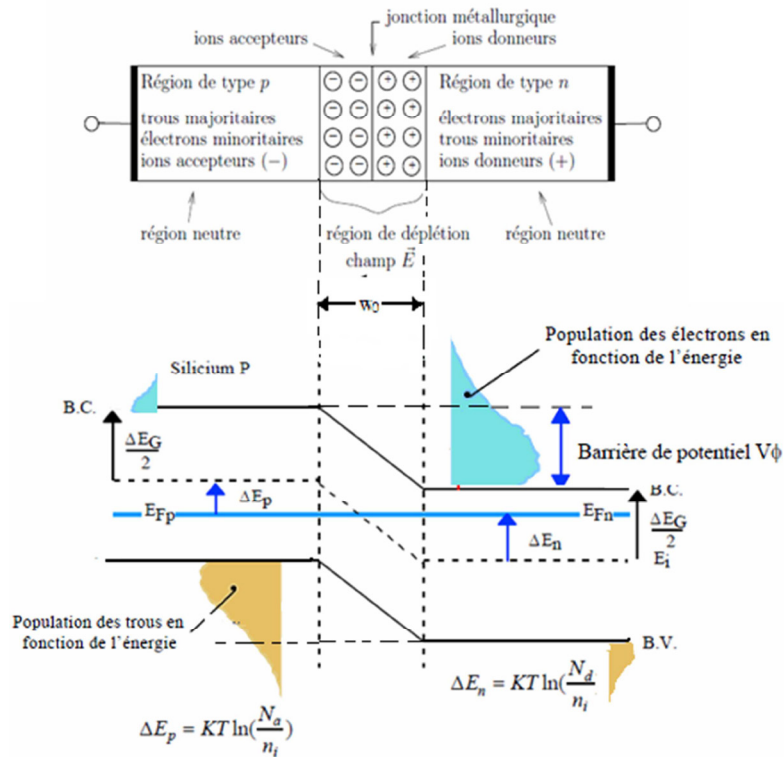


Fig.2.6. Jonction PN à l'équilibre thermodynamique.

On sait que la variation d'énergie potentielle ΔE d'un électron soumis à une différence de potentiel ΔV est telle que : $\Delta E = -q \Delta V$. Dans ces conditions, à la différence d'énergie ΔE entre les bandes, on fait correspondre une différence de potentiel interne appelée hauteur de barrière de potentiel ΔV_ϕ telle que:

$$V_\phi = \frac{KT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \quad (\text{II.6})$$

II.10.2. Jonction polarisée en direct

Le fait de polariser la jonction sous une tension V_{direct} réduit la hauteur de barrière qui devient : $V_{\phi} - V_{\text{direct}}$, entraînant une diminution de l'épaisseur de la zone de charges d'espace (Z.C.E).

De nombreux électrons de la région N et de trous de la région P peuvent alors franchir cette barrière de potentiel, pour passer dans la zone opposée où ils se recombinent (**Fig.2.7**). Cette recombinaison consomme près de la Z.C.E, des trous dans la région P et des électrons dans la région N. Pour rétablir l'équilibre, les trous de la région neutre P se mettent en mouvement vers la zone où se produit la recombinaison (déficit en trous). Les électrons de la région neutre N sont soumis à un phénomène analogue. C'est ce phénomène de recombinaison locale qui explique la circulation du courant direct I_A dans la jonction. Ce courant s'écrit:

$$I_0 \exp\left(-\frac{V_{\phi} - V_{\text{direct}}}{U_T}\right) \quad (\text{II.7})$$

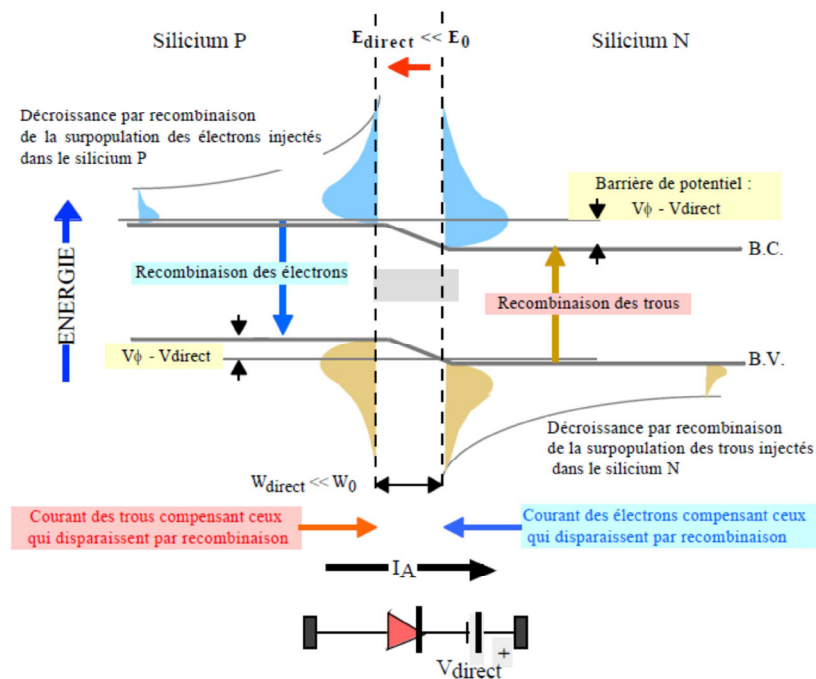


Fig.2.7. Jonction PN polarisée dans le sens passant.

II.10.3. Jonction polarisée en inverse

Lorsque la jonction est polarisée en inverse, la hauteur de barrière entre les régions P et N devient renforcée par la tension extérieure appliquée V_{inv} , et devient $V_{\phi} + V_{inv}$ (**Fig.2.8**).

Le champ électrique dans la Z.C.E augmente ainsi que son étendue. Les porteurs majoritaires des régions N et P n'ont pas l'énergie nécessaire pour sauter cette barrière de potentiel.

La jonction est alors traversée par le très faible courant de saturation I_S . Ce courant issu du phénomène d'ionisation thermique du silicium, dépend uniquement de la température.

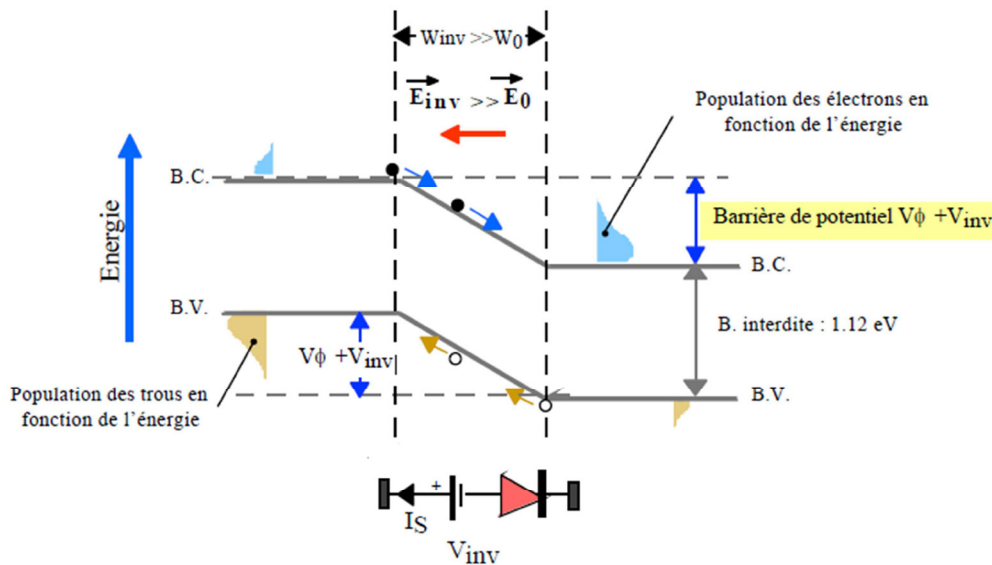


Fig.2.8. Jonction PN polarisée en inverse.

La jonction PN est constituée de deux charges opposées immobiles. Elle se comporte donc comme un condensateur, dont la Z.C.E est le diélectrique, et les régions N et P les électrodes.

Chapitre III : Composant passifs

III.1. Définition des composants passifs

Un composant électronique est un élément destiné à être assemblé avec d'autres afin de réaliser une ou plusieurs fonctions électroniques. Les composants forment de très nombreux types et catégories, ils répondent à divers standards de l'industrie aussi bien pour leurs caractéristiques électriques que pour leurs caractéristiques géométriques. Leur assemblage est préalablement défini par un schéma d'implantation. En effet, si quelques composants peuvent fonctionner seuls, c'est très rare, et bien souvent, différents composants sont associés pour répondre aux besoins de l'électronicien. Les composants électroniques passifs sont des composants qui, dans un système électrique ou informatique, n'ont pas besoin d'une source d'énergie pour fonctionner. Ils ne peuvent pas gagner en puissance. Les composants passifs incluent les condensateurs, les résistances fixes, les inductances, les composants de protection contre des surcharges.

Les composants passifs ne peuvent pas amplifier ou augmenter la puissance du signal. Cependant, ils peuvent augmenter la tension ou le courant par l'intermédiaire d'un circuit LC qui conserve l'énergie électrique. En général, les passifs se rangent en deux catégories : dissipatif et sans perte.

- **Dissipatif**: ces composants ne peuvent pas absorber l'énergie d'un circuit externe. Le plus souvent, le terme passif dissipatif renvoie aux résistances.
- **Sans perte**: ces composants n'ont pas de flux d'énergie net entrant ou sortant. Ils incluent les oscillateurs, transformateurs, condensateurs et inductances.

La plupart des composants ont deux terminaisons reliées par un réseau électronique (aussi appelés paramètres à deux ports). Ils incluent les transistors et les filtres électroniques. D'autres composants passifs utilisent une architecture de circuit, tels que les condensateurs et les transformateurs.

III.2. Les types de composants passifs

Dans les modèles de circuit, on considère chaque composant électronique passif comme un composant parfait. Il existe trois sortes de composants parfaits et leurs caractéristiques dépendent de la manière dont ils traitent l'énergie qu'ils reçoivent.

- **Résistance idéale:** L'énergie fournie à une résistance est consommée et dissipée sous forme de chaleur. Une résistance agit toujours comme un récepteur (puissance absorbée).
- **Bobine idéale:** L'énergie absorbée par une bobine est stockée sous la forme d'énergie magnétique. Elle agit alors comme un récepteur (puissance absorbée). La bobine peut ensuite rendre cette énergie stockée au circuit électrique en transformant l'énergie magnétique en énergie électrique. Elle agit alors comme un générateur (puissance fournie).
- **Condensateur idéal:** L'énergie absorbée par un condensateur est stockée sous la forme d'énergie électrique. Il agit alors comme un récepteur (puissance absorbée). Le condensateur peut ensuite rendre cette énergie stockée au circuit électrique. Il agit alors comme un générateur (puissance fournie).

Cependant, en pratique, la technologie ne permet pas de fabriquer des composants parfaits. Ainsi une résistance est légèrement inductive (résistance bobinée) ou capacitive suivant les cas. Il en va de même des inductances ou des capacités qui présentent aussi des caractéristiques parasites. Suivant les conditions d'utilisation, ces caractéristiques parasites peuvent être négligeables ou au contraire devenir prépondérantes.

Les formes et les fonctions des composants passifs créent une multitude de types utilisés dans de très nombreux dispositifs. La liste suivante réunit certains des types les plus communs, avec des informations spécifiques.

III.3. Résistance

La résistance électrique d'un conducteur est le quotient de la tension appliquée à ses bornes par l'intensité du courant qui le traverse.

- Symbole de la résistance électrique: R
- Et par formule : $R = \frac{U}{I}$

Unité (SI) de la résistance: Ω (Ohm). Comme l'unité SI de la tension est le Volt (V), celle de l'intensité du courant l'Ampère (A),

On a: $1\Omega = 1 \frac{V}{A}$

Si un courant de 1 Ampère circule à travers un conducteur lors qu'on applique une tension de 1 Volt à ses bornes, la résistance de ce conducteur 1Ω.

III.3.1. Modèle d'une résistance parfaite

Le symbole utilisé pour représenter une résistance parfaite dans les schémas de circuit est le suivant. On utilise généralement une convention réceptrice pour caractériser une résistance (le courant va dans le sens des potentiels décroissants comme indiqué sur (Fig.3.1.). Avec cette convention, la puissance absorbée a une valeur positive.

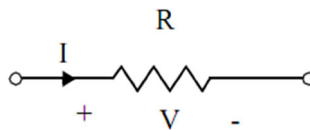


Fig.3.1. Symbole d'une résistance parfaite

III.3.2. résistivité (ρ)

La résistivité (ρ) est l'unité qui mesure la propriété d'un corps à avoir des électrons libres dans la bande de conduction. Elle s'exprime en ohm-mètre. Elle est variable en fonction de la température. La résistivité à la température T (°C) par rapport à 0 °C se déduit de la relation suivante:

$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha T) \tag{III.1}$$

Avec:

Substance	ρ [n Ω .m] à 0 °C	α [1/°C]
Argent	15.0	0.00411
Cuivre	15.9	0.00427
Aluminium	26.0	0.00439

α : est le coefficient de température qui peut être positif (la plus part de conducteurs) ou négatif (un grand nombre de semi-conducteurs, isolants et quelques alliages). L'ordre de grandeur des résistivités pour les conducteurs correspond à quelques n .m et pour les isolants,

il atteint $10^{18} \Omega.m$. Pour une tension donnée, la résistance est d' autant plus élevée que l'intensité du courant est faible. A une température donnée, la résistance R d'un conducteur est:

- inversement proportionnelle à l'aire S de la section du conducteur (si l'aire de la section est grande, les électrons peuvent plus facilement passer à travers les obstacles formés par les noyaux atomiques).
- proportionnelle à la longueur l du conducteur (si le conducteur est plus long, les électrons rencontreront plus d'obstacles sur leur chemin).

$$\text{Ou encore: } R = \rho \frac{L}{S} \quad (\text{III.2})$$

R: résistance en ohm [Ω], L: longueur en mètre [m], S: section en mètre carré [m^2], ρ : résistivité en ohm-mètre [$\Omega .m$]

III.3.3. Résistance de fils conducteurs

Pour éviter une perte importante d'énergie électrique (en chaleur) dans les fils conducteurs, on a intérêt à choisir des conducteurs à faible résistance électrique. Si on veut cependant utiliser l'effet électrique du courant (dans les chauffages électriques, les sèche-cheveux, ...), il faut utiliser des fils à résistance élevée.

III.3.4. Résistances techniques

Dans les circuits électriques et électroniques, il faut parfois limiter l'intensité du courant afin d'éviter l'endommagement de certaines composantes. On utilise à ces fins des «résistances techniques» : ce sont des composantes électriques/électroniques dont la résistance a une valeur bien déterminée. Usuellement, elles sont de forme cylindrique et sont constituées d'un support en porcelaine, autour duquel on a enroulé une couche hélicoïdale en carbone. L'ensemble est recouvert d'une couche de vernis protecteur.

III.3.5. Le marquage des résistances

Il s'effectue soit en clair, soit selon le code des couleurs normalisé.

- **En clair**: Pour les résistances de puissance, de précision, à haute stabilité et les modèles spéciaux.

- **Code des couleurs:** Pour les résistances agglomérées ou à couche d'usage courant. Le code de couleur est indiqué sur (**Fig.3.2.**).

Si la résistance est trop petite pour recevoir toutes les indications normalisées, elles sont portées sur l'emballage. Les résistances marquées selon le code des couleurs sont petites et ne peuvent recevoir sur le corps que leur valeur ohmique et la tolérance au moyen des anneaux colorés.

Couleurs	Chiffres significatifs	Coefficient de multiplication	Tolérance
Argent		0.01	10 %
Or		0.1	5 %
Noir	0	1	
Brun	1	10	1 %
Rouge	2	10 ²	2 %
Orange	3	10 ³	
Jaune	4	10 ⁴	
Vert	5	10 ⁵	
Bleu	6	10 ⁶	
Violet	7		
Gris	8		
Blanc	9		

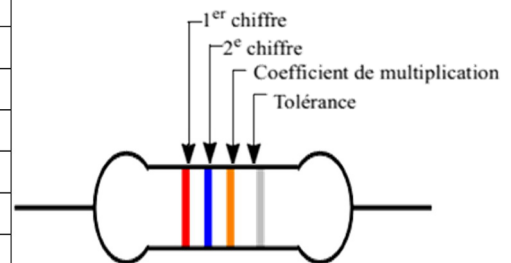


Fig.3.2. Code international des couleurs

On peut voir sur une résistance des *anneaux de couleur*. Chaque couleur correspond à un chiffre (tableau au-dessus). La correspondance entre les chiffres et les couleurs des anneaux constitue ce qu'on appelle le **code des couleurs** et permet de déterminer la valeur en Ohm d'une résistance. Pour lire cette valeur, il faut d'abord placer la résistance dans le bon sens. En général, la résistance a un anneau doré ou argenté, qu'il faut placer à droite. Dans d'autres cas, c'est l'anneau le plus large qu'il faut placer à droite. Les deux premiers anneaux sont les chiffres significatifs et le troisième est le multiplicateur (la puissance de 10 avec laquelle il faut multiplier les chiffres significatifs). Le 4^{ème} anneau correspond à la tolérance.

$$\underline{\underline{Valeur\ de\ la\ résistance = [chiffre\ 1^{er}\ anneau][chiffre\ 2^{ème}\ anneau] \cdot 10^{[chiffre\ 3^{ème}\ anneau]}}}$$

Exemple : La résistance de la **Fig.3.2.** est caractérisée par les anneaux

rouge bleu orange argent

On a donc : $R = 26 \cdot 10^3 \Omega \pm 10\%$

$R = 26 \text{ k}\Omega = 26.000 \Omega$

III.3.6. Les résistances variables

Les résistances variables fonctionnent principalement en continu et sont communément appelées:

- **Potentiomètres:** On utilise les trois bornes de la résistance variable séparément pour régler la tension aux bornes de la charge (montage parallèle).

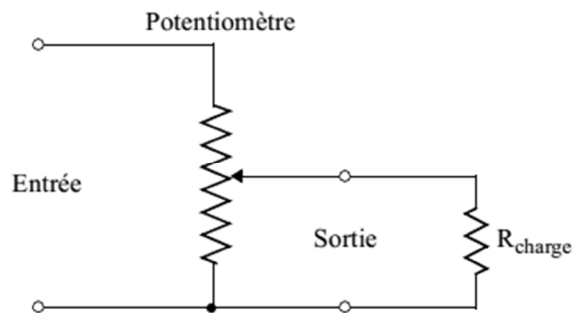


Fig.3.3. Résistance variable montée en potentiomètre.

- **Rhéostats:** On utilise deux bornes de la résistance variable pour régler l'intensité du courant dans la charge (montage série).

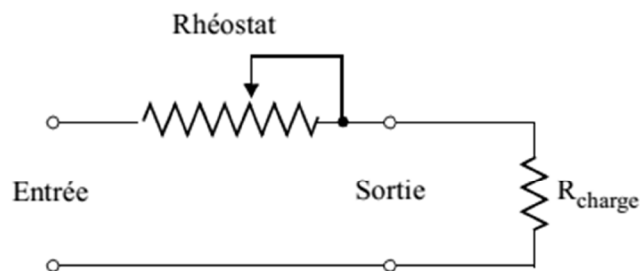


Fig.3.4. Résistance variable montée en rhéostat

III.4. Les condensateurs

III.4.1. Définition de la capacité

Deux corps conducteurs, séparés par un isolant, constituent un **condensateur**. Donc, tout conducteur isolé possède une capacité par rapport aux autres conducteurs et par rapport à la masse. La valeur de cette capacité est:

$$C = 8,85 \cdot 10^{-12} \epsilon_0 \frac{S}{e}$$

C: Capacité en farad [F], **S**: Surface des conducteurs traversés par le champ et placés en regard [m^2], **e** : Épaisseur du diélectrique qui sépare les deux conducteurs [m], **ϵ_0** : Constante diélectrique ou permittivité relative du diélectrique par rapport au vide (dans le vide = 1).

- **Le farad**: est une unité beaucoup trop grande pour les applications pratiques. On utilise couramment:

Microfarad (**μF**) = 10^{-6} F; Nanofarad (**nF**) = 10^{-9} F; Picofarad (**pF**) = 10^{-12} F

III.4.2. Modelé d'un condensateur parfait

Le symbole utilisé pour représenter un condensateur parfait dans les schémas de circuit est montré dans la Figure 6. Le condensateur est un élément de stockage d'énergie (il peut absorber ou fournir de la puissance). On utilise généralement une convention réceptrice pour caractériser un condensateur (le courant va dans le sens des potentiels décroissants comme indiqué sur la (**Fig.3.5.**)). Avec cette convention, la puissance absorbée a une valeur positive.

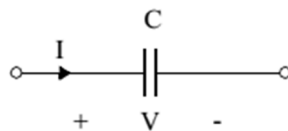


Fig.3.5. Symbole d'un condensateur parfait.

III.4.3. Relation (V-I) pour un condensateur parfait

Le condensateur idéal est un élément de circuit (dipôle) qui laisse passer un courant proportionnellement aux taux de changement de la tension appliquée entre ses bornes. En convention récepteur, on a:

$$i = C \cdot \frac{dV}{dt} \quad (\text{III.3})$$

La constante de proportionnalité (**C**) est appelée **la capacitance** (ou capacité) de l'élément.

- **La quantité de charge électrique:** emmagasinée par un condensateur est:

$$Q = C \cdot V \quad (\text{III.4})$$

Q: Charge électrique en coulomb [C]; **C:** Capacité en farad [F]; **V:** tension en volt [V].

La quantité d'énergie emmagasinée par un condensateur dépend directement de la tension à ses bornes et de la valeur de la capacitance. La tension est limitée par la nature et par l'épaisseur du diélectrique. Lorsqu'elle dépasse une certaine valeur, un arc prend naissance entre les armatures et détruit l'isolant.

$$W = \frac{Q \cdot V}{2} = \frac{C \cdot V^2}{2} \quad (\text{III.5})$$

W: Energie en joule [J]; **C:** Capacité en farad [F]; **V:** tension en volt [V].

III.4.4. Charge du condensateur

Supposons qu'au temps $t = 0$ le condensateur est déchargé (pas d'excès de charge (+) ou (-) sur ses plaques) et que l'on ferme l'interrupteur sur le schéma de la (**Fig.3.6.**) (Interrupteur en position 1).

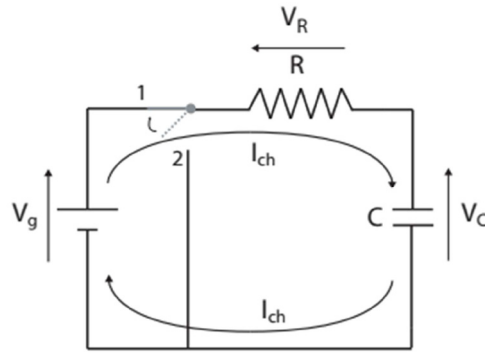


Fig.3.6. Charge du condensateur à travers la résistance R

Les charges positives du générateur 1 sont alors attirées par le condensateur à un potentiel inférieur et viennent s'accumuler sur sa plaque (+). Cet excès de charges (+) repousse les charges (+) présentes sur la plaque opposée où apparaît alors un excès de charges (-). Ces charges (+) repoussées vont rejoindre la borne - du générateur. Donc, même si des charges ne traversent pas l'espace entre les plaques du condensateur, un courant I_{ch} s'installe dans le circuit RC. Au fur et à mesure que le condensateur se charge, la tension à ses bornes augmente et la différence de potentiel entre la borne + du générateur et celle du condensateur diminue. Les charges sont donc de moins en moins attirées et la charge ralentit. Lorsque ces deux tensions finissent par devenir égales, le mouvement des charges s'arrête : le condensateur est chargé. La différence de potentiel aux bornes du condensateur vaut alors $V_C = V_g = V_0$ et le courant dans le circuit est nul. Intuitivement, on s'attend donc à une augmentation de la différence de potentiel aux bornes de C très rapide au début puis de plus en plus lente. Graphiquement, on doit s'attendre à une évolution de la tension aux bornes du condensateur telle que celle esquissée à la (**Fig.3.7.**).

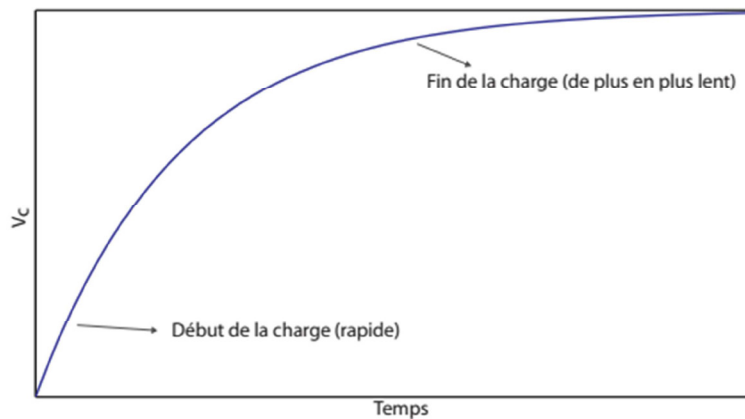


Fig.3.7. Esquisse du graphe de la charge d'un condensateur.

La différence de potentiel aux bornes du générateur correspond à la somme des chutes de potentiel entre les bornes de la résistance et entre les armatures du condensateur. Les équations de la charge pour la tension aux bornes du condensateur:

$$V_C(t) = V_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (\text{III.6})$$

On définit le temps de demi-vie de la charge $T_{1/2}$ comme le temps nécessaire pour que la tension aux bornes du condensateur atteigne la moitié de sa valeur maximale.

III.4.5. Décharge du condensateur

Supposons maintenant qu'au temps $t = 0$ le condensateur est chargé (une tension $V_C = V_0$ est donc appliquée à ses bornes) et que l'on modifie la position de l'interrupteur, comme sur le schéma de la (**Fig.3.8.**) (Interrupteur en position 2). Le générateur n'intervient plus car la branche du circuit dans laquelle il se trouve est ouverte. Les charges + de la plaque supérieure vont traverser la résistance R et aller neutraliser une charge - de l'autre plaque jusqu'à ce que le condensateur soit complètement déchargé (plus de charge nette sur les plaques).

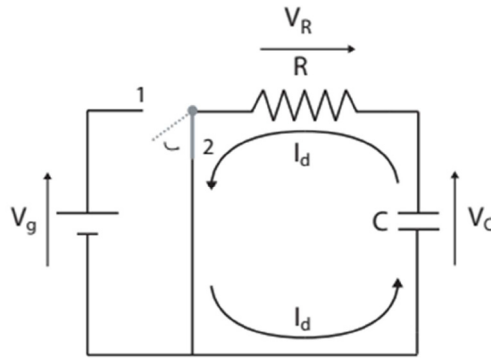


Fig.3.8. Décharge du condensateur à travers la résistance R

On peut à nouveau analyser le phénomène à partir de l'équation pour le potentiel dans le circuit de droite de la (**Fig.3.8.**) et on obtient finalement.

$$V_C(t) = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{et} \quad I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (\text{III.7})$$

On définit le temps de demi-vie de la décharge $T_{1/2}$ comme le temps nécessaire pour que la tension aux bornes du condensateur diminue de moitié.

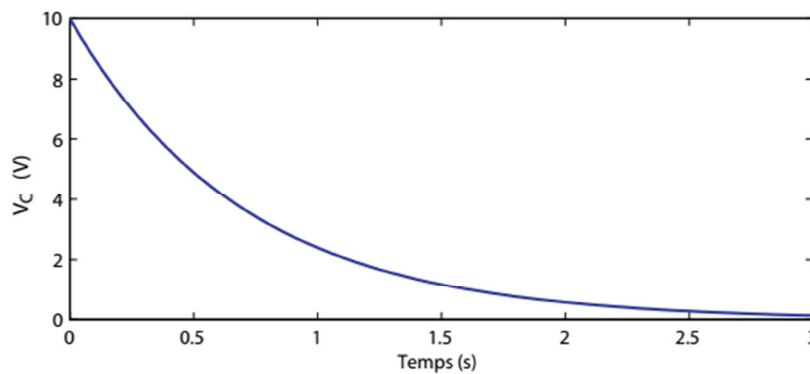


Fig.3.9. Décharge du condensateur.

III.4.6. Modèle électrique des condensateurs réels

Il n'existe pas de technologies qui permettent de réaliser un condensateur parfait. Un condensateur consomme toujours une partie de puissance qui est dissipée sous la forme de chaleur (résistance parasite). Le modèle d'un condensateur réel établi avec des composants parfaits est montré dans (**Fig.3.10.**).

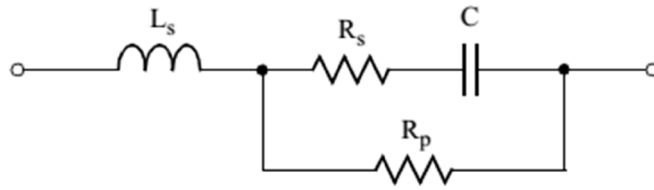


Fig.3.10. Modèle d'un condensateur réel.

R_s : Résistance série qui est fonction de la résistance des connexions des armatures et des caractéristiques du diélectrique; R_p : Résistance parallèle qui représente les défauts d'isolement entre les armatures; L_s : Inductance qui dépend de la technologie de fabrication.

- **L'impédance du condensateur** en régime sinusoïdal est donnée par la relation suivante:

$$Z = \sqrt{R_s^2 + \left(L_s\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2} \quad (\text{III.8})$$

L'utilisation d'un condensateur est donc limitée par sa fréquence de résonance au-delà de laquelle il a le même comportement qu'une inductance.

III.5. Les bobines

III.5.1. Inductances

Ces composants passifs conservent l'énergie dans un champ magnétique et délivrent cette même énergie selon les besoins. Ils incluent un noyau cylindrique qui contient plusieurs bobinages de fil conducteur. Ils sont différents des condensateurs, qui stockent l'énergie dans un champ électrique, alors que les inductances la conservent dans un champ magnétique. Les inductances servent à maintenir un courant constant.

Selon le théorème d'Ampère tout courant parcourant un circuit crée un champ magnétique à travers la section qu'il entoure, c'est le phénomène d'induction électromagnétique. L'inductance de ce circuit est le quotient du flux de ce champ magnétique par l'intensité du

courant traversant le circuit. L'unité de l'inductance est le henry (H). En toute rigueur ce terme n'a d'intérêt que pour les situations dans lesquelles le flux est proportionnel au courant.

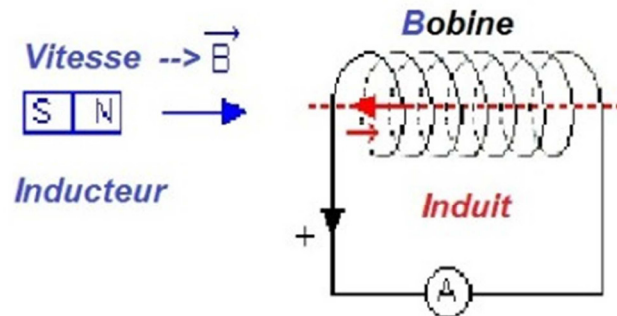


Fig.3.11. Principe de base de fonctionnement d'une inductance

Le bobinage plonge alors dans son propre champ magnétique. Son comportement électrique s'oppose aux variations de courant le traversant. Lorsque le courant qui traverse l'inductance varie, il apparaît une tension u à ses bornes:

$$U = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (\text{III.9})$$

$\frac{di}{dt}$: est la dérivée du courant dans le temps, L : est l'inductance (mesurée en Henry, de symbole H), U : est la tension instantanée aux bornes de l'inductance.

La présence d'un courant électrique crée alors un champ magnétique dans l'espace, dont la configuration exacte peut être complexe, fonction du tracé du circuit lui-même potentiellement complexe.

III.5.2. Réponse d'un dipôle RL à un échelon de tension

Un dipôle RL est l'association en série d'un résistor de résistance R et d'une bobine d'inductance L . On dispose d'un générateur de tension continue, d'un résistor de résistance R , d'une inductance L et d'un interrupteur K . La diode permet d'avoir un courant d'intensité $i > 0$ après l'ouverture de K .

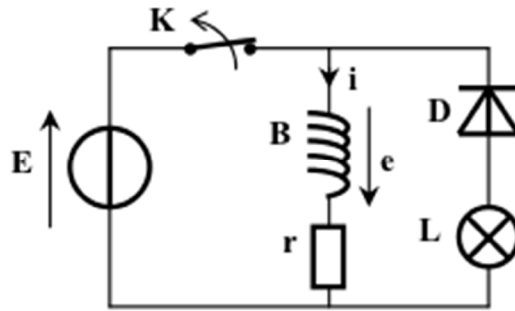
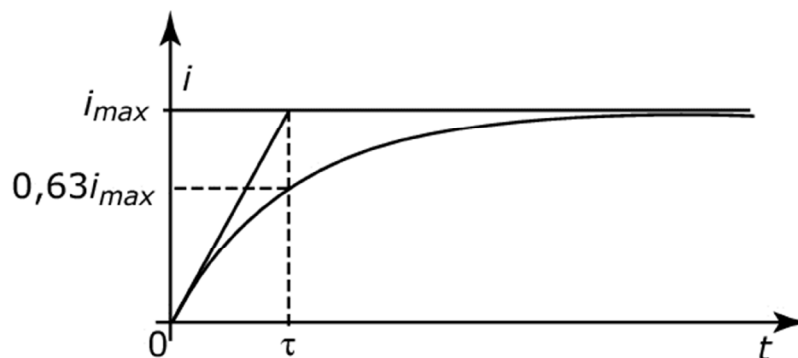


Fig.3.12. Circuit RL

Le rapport: $\tau = \frac{L}{R}$ est homogène à un temps, mesuré en seconde, et appelé constant de temps du dipôle RL. On réécrit l'équation différentielle du premier ordre sous une forme canonique :

$$\frac{di}{dt} + \frac{i}{\tau} = \frac{E}{L} \quad (\text{III.10})$$

La constante de temps τ , en seconde (s), représente le temps nécessaire pour que l'intensité du circuit atteigne 63 % de sa valeur maximale.



On la détermine graphiquement à partir de la courbe $i(t)$.

III.5.3. Filtres passifs

Un filtre en électronique est un circuit qui réalise une opération volontaire de mise en forme d'une grandeur électrique (courant ou tension). Le filtre transforme l'histoire de cette grandeur d'entrée (c'est-à-dire ses valeurs successives sur une période de temps Δt) en une grandeur de sortie. Un filtre passif se caractérise par l'usage exclusif de composants passifs (résistances, condensateurs,

bobines couplées ou non). Par conséquent, leur gain (rapport de puissance entre la sortie et l'entrée) ne peut excéder 1. Autrement dit, ils atténuent le signal, différemment selon la fréquence. Les filtres les plus simples sont basés sur des circuits **RC**, **RL** définissant une constante de temps et une fonction de transfert du premier ordre. Les circuits **LC** ou Circuit **RLC** permettent des filtres du second ordre, passe-bande ou coupe-bande et des résonateurs (circuits accordés). Des configurations plus complexes peuvent être nécessaires. Des logiciels de conception assistée par ordinateur permettent de les déterminer à partir de la réponse en fréquence et en phase ou de la réponse impulsionnelle.

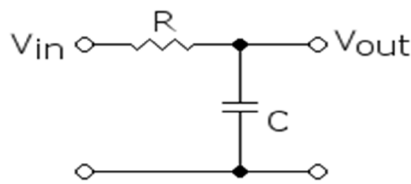


Fig.3.13. Schéma d'un filtre passe-haut.

Les filtres passifs peuvent traiter des courants importants. Ils sont rarement sujets à des phénomènes de saturation, sauf s'ils comportent des bobines avec noyau. Les filtres passifs apportent les caractéristiques exactes des fréquences requises pour le fonctionnement du circuit. Les exemples les plus courants de ce type de filtres incluent les filtres passe-bas, qui éliminent les fréquences hautes, et les filtres passe-haut qui éliminent les fréquences basses. Ils sont souvent utilisés dans les amplificateurs. D'autres types incluent les filtres passe-bande, les filtres coupe-bande, les filtres céramiques.

III.5.4. Composants de protection contre des surcharges

Les supresseurs de surcharge sont maintenant présents dans la plupart des foyers et des bureaux. Ils apportent à des dispositifs électroniques coûteux une protection supplémentaire, qui leur évite de recevoir des surcharges électriques, susceptibles de les endommager/ détruire. Les principaux composants d'une protection contre les surcharges peuvent inclure un varistor à oxyde métallique, une diode à suppression de transitoires, un dispositif de protection thyristor, un tube à décharge gazeuse, un supresseur de tension au sélénium, un supresseur de surtension à anode de carbone, un supresseur de tension coaxial à quart d'onde, et des supresseurs à mode sériel. Il

est toujours conseillé de protéger contre les surcharges électriques tous les dispositifs électroniques utilisés, au travail comme dans le privé, avec un système de qualité suffisante.

III.5.5. Noyaux de ferrite

Ces noyaux sont fabriqués en ferrite, un composé céramique qui combine du fer et un autre métal. La ferrite est très courante dans de nombreux types de composants électriques, incluant les antennes, par exemple. Ce noyau magnétique se caractérise par des éléments de bobinage, tels que les bobinages de transformateurs et d'inductances. Son utilité est basée sur sa faible conductivité électrique et sa haute perméabilité magnétique. Les utilisations les plus courantes des noyaux de ferrite incluent les transformateurs de signal et les transformateurs de puissance. Ils sont utilisés dans un grand nombre de dispositifs électroniques de toutes tailles. Les transformateurs de signal qui utilisent ces noyaux sont généralement petits et ont des fréquences élevées. Les transformateurs de puissance sont plus grands et ont des fréquences plus basses. Les noyaux de ferrite sont disponibles dans différentes formes, cylindriques, toroïdaux et autres.

III.5.6. Encodeurs rotatifs

Ces composants sont aussi appelés roues codeuses. Ces dispositifs changent ou convertissent le mouvement ou la position d'un axe en fonction d'un code analogique ou numérique. Les deux principaux types d'encodeurs rotatifs sont incrémentiels et absolus. Ils sont très utilisés dans de nombreux domaines, tels que la robotique, les dispositifs de saisie informatique, les plateformes de radar rotatives, et les contrôles industriels.

III.5.7. Haut-parleurs

Les haut-parleurs, aussi appelés timbres électriques, utilisent des électroaimants et du courant électrique. Il sert à générer un signal audio. Ils sont très utiles pour les alarmes, les compteurs et autres dispositifs similaires. Ils peuvent confirmer des frappes de clavier, ou des clics sur une souris. Les dispositifs peuvent être mécaniques, électromécaniques ou piézoélectriques. Ils fonctionnent souvent en conjonction avec des composants passifs dans des systèmes et des dispositifs électroniques.

III.5.8. Composants de microphone

Les composants d'un circuit de microphone traitent ensemble un son acoustique pour créer un signal électrique. Ils incluent des transducteurs et des capteurs qui convertissent les sons reçus en signaux électriques. Les microphones qui utilisent ce système simple sont présents dans un grand nombre de dispositifs très courants actuellement, et pas seulement dans des microphones d'audio public. D'autres types d'applications incluent les téléphones, les prothèses auditives, les radios.

III.6. Les applications nécessitent des composants passifs

Les composants passifs sont nécessaires pour garantir le fonctionnement d'une multitude d'applications. Parmi elles, les applications de filtrage. Elles ont besoin de résistances et de condensateurs. En outre, des solutions sont créées pour fournir les performances et les fréquences spécifiquement requises. Les filtres incluent par exemple les filtres passe-haut, les filtres passe-bas, les filtres passe-bande, les filtres coupe-bande, les filtres passent tout, les filtres coupe-bande à flancs raides, les filtres d'égalisation.

Les composants passifs jouent un rôle important dans l'électronique numérique parce qu'ils contribuent à maintenir la stabilité opérationnelle. Ils protègent les puces intégrées dans ces systèmes pour qu'elles ne reçoivent pas un niveau de bruit excessif avec le signal de puissance. Sans les composants passifs, un bruit excessif peut causer des comportements étranges et imprévisibles dans les dispositifs.

Les applications de détection capacitive sont de plus en plus courantes dans variété accrue de dispositifs, incluant l'électronique grand public. Les condensateurs sont très utiles dans ce domaine et ils jouent un rôle essentiel pour garantir le bon fonctionnement des applications. Les applications de détection mesurent différents facteurs tels que l'accélération d'un objet, le niveau d'un fluide, la position et l'humidité. Elles peuvent aussi mesurer des changements dans le condensateur. Souvent, les condensateurs sont installés dans des dispositifs qui ont besoin de laisser passer le courant alternatif et de bloquer le courant continu.

Chapitre IV : Composant actifs

IV.1. Diode à jonction PN

IV.1.1. Constitution – Symbole

Une diode à jonction est un composant constitué d'une jonction PN (*Fig.4.1.*) rendue accessible par deux contacts électriques (obtenus par métallisation). Son symbole et les notations sont représentés à la (*Fig.4.2.*) (pour le retenir, noter que le sens du courant est celui du triangle).

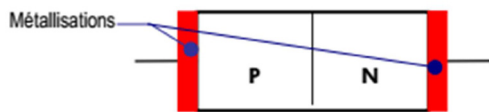


Fig.4.1. Constitution d'une diode à jonction

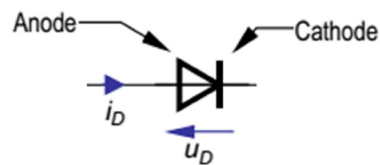


Fig.4.2. Symbole de la diode

IV.1.2. Caractéristique statique tension–courant

Le fonctionnement est traduit par le lien entre la tension et le courant : la caractéristique tension–courant. Elle est relevée dans les quatre quadrants en polarisant la diode en suivant le schéma de la (*Fig.4.3.*). Le résultat est décrit à la (*Fig.4.4.*).

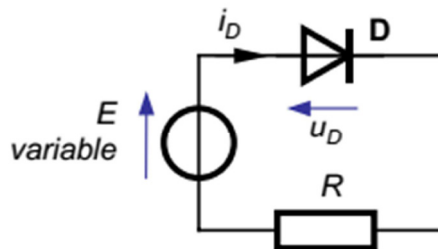


Fig.4.3. Polarisation de la diode

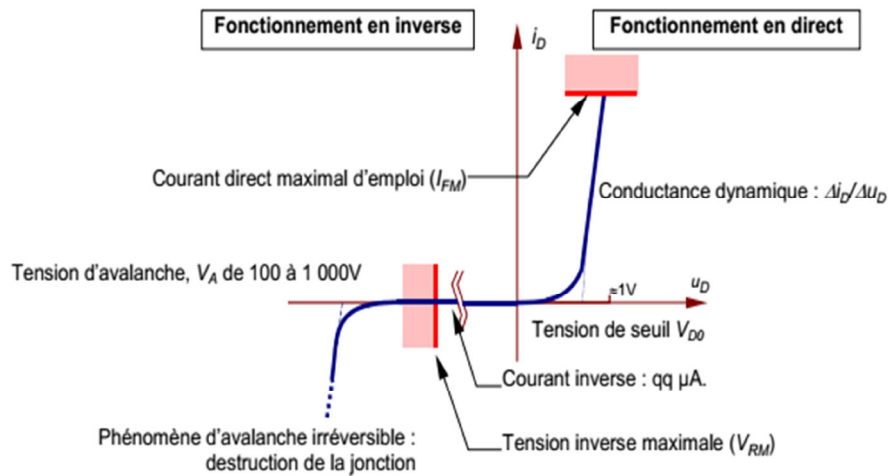


Fig.4.4. Caractéristique tension–courant d'une diode.

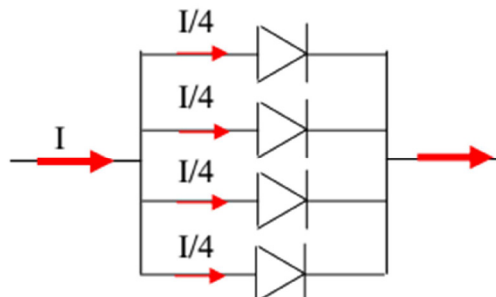
L'observation de cette caractéristique permet de distinguer deux régimes de fonctionnement :

- Dans le sens direct (i_D et u_D positifs), la diode est passante; la tension u_D est faible ($\approx 1V$) et le courant croît très rapidement avec la tension ;
- Dans le sens inverse (i_D et u_D négatifs), la diode est bloquée; le courant est faible quelque soit la tension (courant de saturation).

IV.1.3. Association de diode

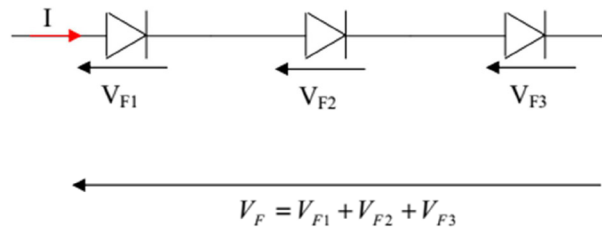
a) Parallèle

Montées en parallèles permet de diviser le courant I dans chaque diode:



Toutefois ce type de montage comporte un risque. En effet les diodes ne sont pas parfaites. Une diode peut laisser plus courant qu'une autre. De ce fait elle chauffera plus que les autres et risque de se détruire rapidement.

b) Série



Mettre des diodes en série peut être intéressant pour certaines applications, si on cherche à obtenir une tension constante quelque soit le courant qui passe.

IV.1.4. Redressement

IV.1.4.1. Définition

Le redressement consiste à transformer une tension bidirectionnelle en une tension unidirectionnelle appelée tension redressée.

IV.1.4.2. Redressement simple alternance

Schéma de montage:

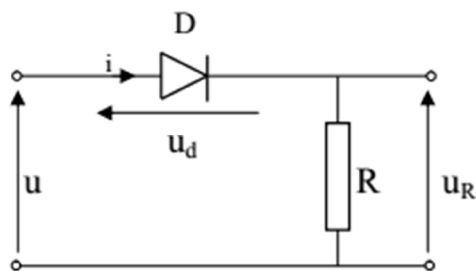


Fig.4.5. Redresseur simple alternance

avec : $u = U_M \sin \omega t$ et $\omega = 2\pi f$

- **Principe de fonctionnement :**

Hypothèse : On suppose que la diode est idéale.

Pendant l'alternance positive de la tension u ($u > 0$), la diode D est polarisée en direct donc elle est passante ($i > 0$ et $u_d = 0$) donc $u_R = u - u_d = u$. Pendant l'alternance négative de la tension u ($u < 0$), la diode D est polarisée en inverse donc elle est bloquée ($i = 0$ et $u_d < 0$) donc $u_R = 0$.

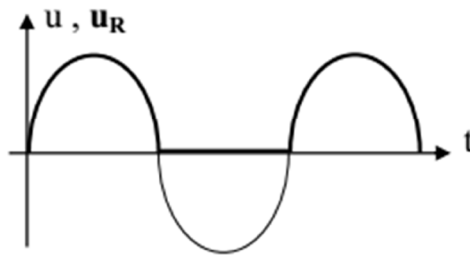


Fig.4.6. Allures des tensions u et u_R

IV.1.4.3. Redressement double alternance à deux diodes et transformateur à point milieu

Schéma de montage:

$$u = u_1 - u_2 = U_M \sin \omega t \text{ avec } \omega = 2\pi f; \quad u_1 = \frac{u}{2} \text{ et } u_2 = -\frac{u}{2}$$

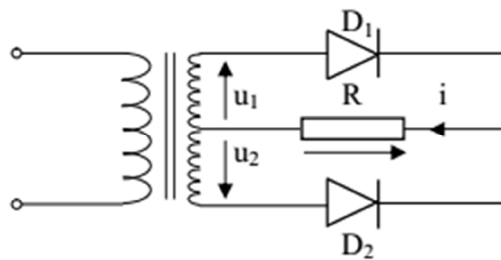


Fig.4.7. Redresseur double alternance à deux diodes et transformateur à point milieu

- **Principe de fonctionnement:**

Hypothèse : les diodes sont supposées idéales.

Pendant l'alternance positive de u :

- u_1 est positive, D_1 conduit donc $u_R = u_1 = \frac{u}{2}$.

- u_2 est négative, D_2 bloquée.

Pendant l'alternance négative de u :

- u_2 est positive, D_2 conduit donc $u_R = u_2 = -\frac{u}{2}$.

- u_1 est négative, D_1 bloquée.

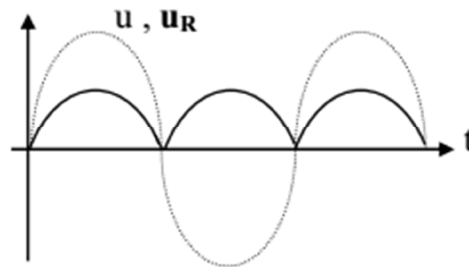


Fig.4.8. Allures des tensions u et u_R

IV.1.4.4. Redressement double alternance à pont de Graetz

Schéma de montage :

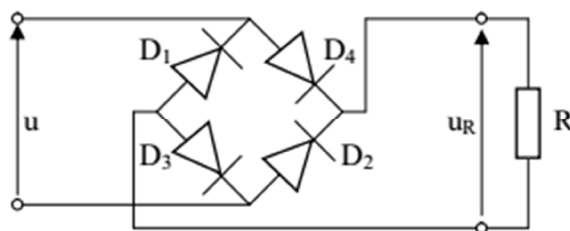


Fig.4.9. Redresseur double alternance à pont de Graetz

- Principe de fonctionnement:

Hypothèse : les diodes sont supposées idéales.

Pendant l'alternance positive de u :

- D_1 et D_3 conduisent, D_2 et D_4 bloquées donc $u_R = u$.

Pendant l'alternance négative de u .

- D_2 et D_4 conduisent, D_1 et D_3 bloquées donc $u_R = -u$.

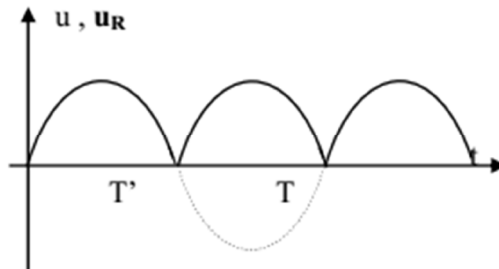


Fig.4.10. Allures des tensions u et u_R

La période d'une tension redressée double alternance est $T' = \frac{T}{2}$.

IV.1.5. Modèle de la diode Zener

Dans le sens direct, cette diode se comporte comme une diode normale, dans le sens inverse la diode zener est équivalente à une source de tension de f.e.m V_z et de résistance interne r_z (**Fig.4.11.**):

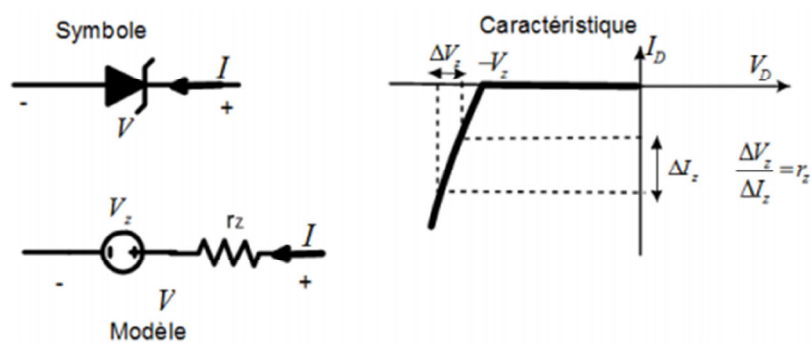


Fig.4.11. Modèle, symbole et caractéristique de la diode Zener

- *En polarisation directe*, une diode Zener est équivalente à une diode normale.
- *En polarisation inverse*, la diode conduit lorsque la tension inverse U_i devient supérieure à la tension Zener U_z . La caractéristique linéarisée conduit à l'équation : $U_i = U_z + R_z \cdot I_i$ où R_z est la résistance dynamique inverse. Dans ce cas La diode Zener est équivalente au modèle suivant :

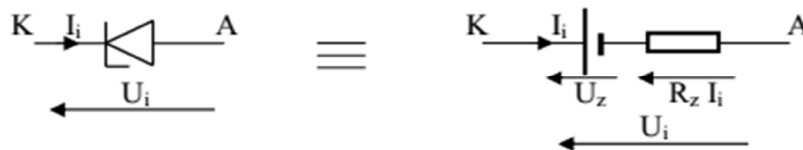


Fig.4.12. Schéma équivalent à une diode Zener polarisée en inverse

Si la résistance dynamique R_z est négligée, la tension aux bornes de la diode lorsqu'elle conduit en inverse est constante quelque soit le courant qui la traverse. La diode Zener est **idéale**.



Fig.4.13. Schéma équivalent d'une diode Zener idéale passante en inverse

IV.1.6. Autres types de diodes

IV.1.6.1. Diode Tunnel

C'est une diode dont la caractéristique présente localement une pente négative lorsqu'elle est polarisée dans une zone médiane de sa caractéristique directe. Cette propriété est utilisée pour la réalisation d'oscillateur LC, la résistance dynamique négative étant ajustée pour annuler les pertes du réseaux LC parallèle et garantir l'existence d'une oscillation d'amplitude constante.

Symbole:



IV.1.6.2. Diode Varicap

Lors de l'étude du fonctionnement interne de la diode à vide, on a fait apparaître le champ électrostatique de la barrière de potentiel. A l'origine de ce champ, il y avait une répartition de charges, des ions de signes opposés, de part et d'autre de la jonction ce qui constitue une capacité (on peut électivement voir ce phénomène comme 2 plaques recouvertes de charges opposées et séparées par un diélectrique). D'une façon générale, les différentes accumulations de charges dans la jonction d'une diode font apparaître un comportement dynamique capacitif de la diode.

Symbole:



IV.1.6.3. Diode Schottky

C'est une diode de redressement réalisée sous la forme d'une jonction métal/semi-conducteur et dont la barrière de potentiel est plus faible que celle d'une diode usuelle (de 0,2V à 0,4V). Son utilisation est intéressante dans les applications en basse tension car sa faible barrière de potentiel limite les pertes en conduction et favorise le rendement.

Symbole:



IV.2. Les Transistors :

Deux transistors sont principalement utilisés en électronique : le transistor bipolaire et le transistor MOS. Dans une proportion moindre, on trouvera également des transistors à effet de champ.

IV.2.1. Transistor bipolaire

Le transistor (inventé en 1948 par les physiciens américains John Bardeen, Walter Houser Brattain et William Shockley) a remplacé, pratiquement partout, le tube électronique. C'est celui dont les processus de fabrication ont été les premiers à être dominés industriellement. Il a pour inconvénient majeur une consommation relativement importante, ce qui limite la densité d'intégration. Formé par l'association de deux jonctions P-N placées en opposition (transistor N-P-N ou P-N-P), il contrôle le déplacement de charges électriques à travers les jonctions, entre un émetteur et un collecteur, le contrôle étant assuré par une troisième électrode appelée base.

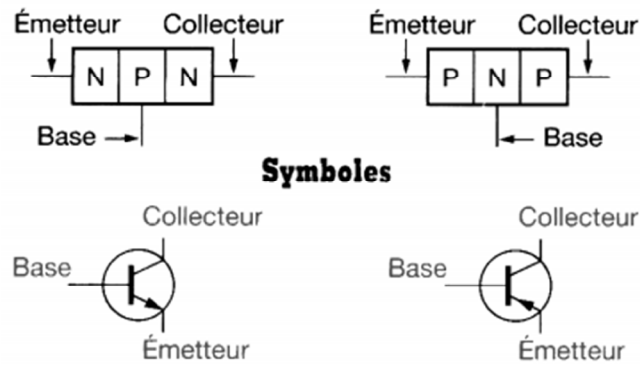
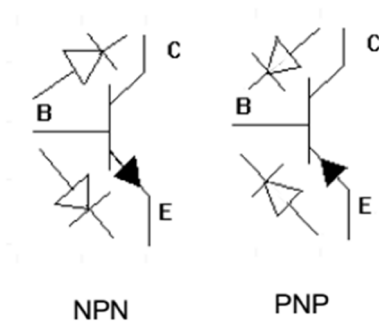


Fig.4.14. Schéma d'un transistor de type npn et pnp

L'émetteur est toujours repéré par une flèche qui indique le sens du courant dans la jonction entre base et émetteur. C'est l'effet transistor qui permet à la diode qui est en inverse de conduire quand une tension est appliquée sur la base. On peut considérer le transistor comme l'association de deux diodes dont la représentation ci-dessus peut aider.



Le transistor NPN est constitué d'une jonction NP (Collecteur-Base) et d'une jonction PN (Base-Emetteur). Suivant le mode de polarisation de ces deux jonctions (bloquée = inverse ou passante = directe), quatre modes de fonctionnement du transistor peuvent apparaître:

Jonction collecteur-base	Jonction base-émetteur	Mode de fonctionnement
Inverse	Directe	Normal
Bloquée	Bloquée	Bloqué
Directe	Directe	Saturé
Directe	Inverse	Inverse

IV.2.1.1. Mode de fonctionnement

On peut voir le transistor bipolaire comme la juxtaposition de deux jonctions PN:

- la jonction Base-Emetteur (tension directe V_{BE}).
- la jonction Base-Collecteur (tension inverse V_{BC}).

Chacune de ces jonctions pouvant avoir 2 états:

- bloqué ($V_{BE} < 0$, $V_{CB} > 0$).
- saturé ($V_{BE} > 0$, $V_{CB} < 0$).

Il existe donc 4 configurations possibles pour l'état de ces 2 jonctions.

a) Commutation : mode saturé, mode bloqué

Dans ce mode, les jonctions sont soit passantes, soit bloquées:

- jonctions bloquées ($V_{BE} < 0$, $V_{CB} > 0$) : le transistor est dit bloqué et aucun courant ne circule dans le transistor. Si la Base est vue comme la broche de commande, le transistor se présente alors côté Collecteur-Emetteur comme un interrupteur ouvert.
- jonctions saturées ($V_{BE} > 0$, $V_{CB} < 0$) : le transistor est dit saturé. Il se comporte comme un interrupteur fermé vu de sa sortie (connexion Collecteur-Emetteur).

b) Effet transistor : zone de fonctionnement linéaire - Approche physique qualitative

Les lois de la physique permettent une étude analytique complète du fonctionnement de la jonction PN et par extension du transistor bipolaire. Dans le cadre de ce cours, nous nous limitons à une compréhension du phénomène de fonctionnement dans la zone linéaire par une approche totalement qualitative. La figure suivante illustre ce mode de fonctionnement :

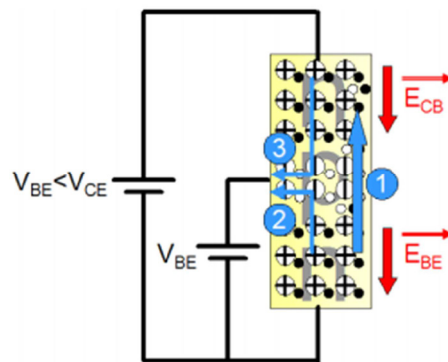


Fig.4.15. transistor bipolaire NPN en fonctionnement linéaire

La jonction $V_{BE} > 0$ impose un champ électrostatique \vec{E}_{BE} orienté positivement vers le bas dans la jonction Base-Emetteur. Les électrons majoritaires de la jonction Base-Emetteur sont donc propulsés vers la base (flèches 1 et 2). Par ailleurs, la tension $V_{CB} > 0$ provoque l'apparition d'un champ électrostatique \vec{E}_{CB} orienté également vers le bas (la jonction Collecteur-Base est ainsi polarisée en inverse). Les électrons de l'émetteur lorsqu'ils arrivent dans la base (flèche 1) alors qu'une faible portion de ces électrons se recombinent dans la base (flèche 2). La jonction Collecteur-Base étant polarisée en inverse, on assiste à un mouvement des porteurs minoritaires, les trous des paires de thermo-génération du collecteur qui se recombinent dans la base (flèche 3). En sens inverse du déplacement des électrons, on peut visualiser les courants mis en jeu dans le fonctionnement du transistor.

Le courant I_E est celui qui circule dans l'émetteur. Il a pour origine les courants de base I_B et de collecteur I_C . La majeure partie des électrons de l'émetteur circulant vers le collecteur, on a donc un courant de base I_B petit devant le courant dans le collecteur I_C .

IV.2.1.2. Effet Transistor

C'est le fait de véhiculer un fort courant collecteur à partir d'un faible courant de base ($I_C \gg I_B$).

On définit l'amplification statique en courant:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (IV.1)$$

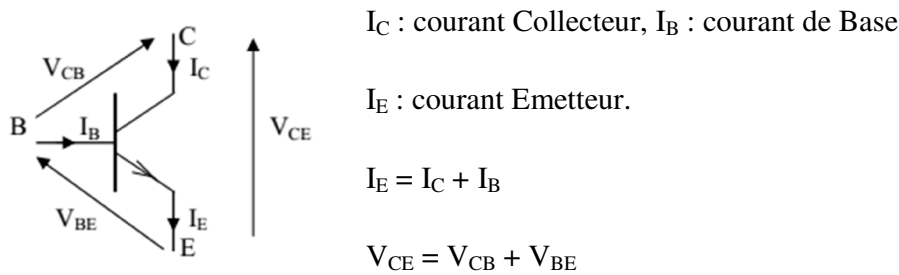


Fig.4.16. Transistor NPN et ses grandeurs électriques

IV.2.1.3. Transistor monté en Emetteur commun

Soit le schéma du transistor et de ses grandeurs électriques principales.

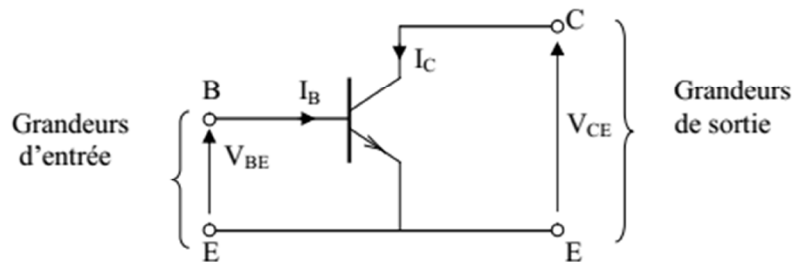


Fig.4.17. Schéma du transistor et de ses grandeurs électriques principaux

En fonction des grandeurs électriques principales du transistor, on peut établir les caractéristiques statiques suivantes:

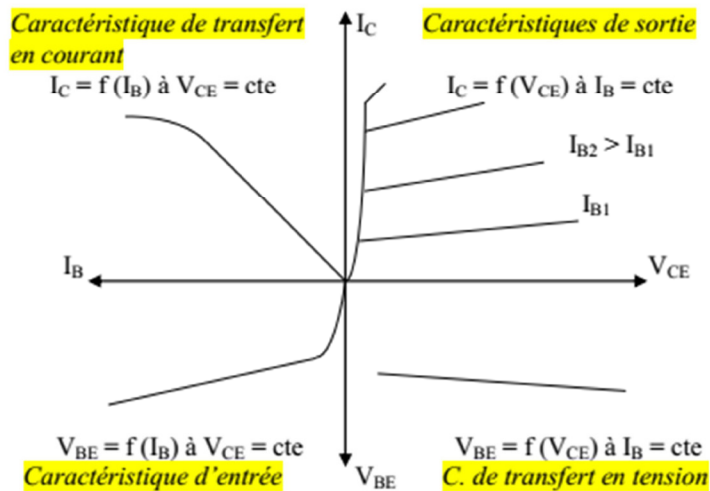
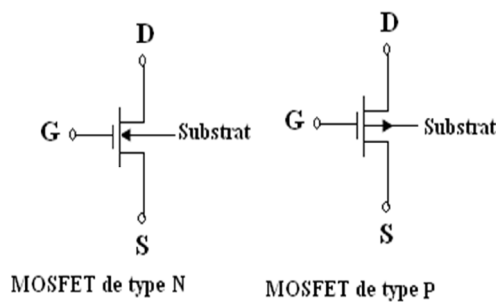


Fig.4.18. Caractéristiques statiques du transistor

IV.2.2. Le Transistor MOS

Un transistor à effet de champ à grille isolée MOSFET (Metal Oxide Semiconductor field Transistor) est un FET qui module le courant qui le traverse à l'aide d'un signal appliqué à sa grille qui est isolé du canal par une couche de dioxyde de silicium (SiO_2). Il y a MOSFET de type P et des MOSFET de type N.

Pour le MOS de type N, le transistor est constitué d'un substrat de P faiblement dopé, dans lequel on diffuse deux zones de N+ fortement dopés. Pour la MOSFET de P, c'est tout à fait l'inverse.

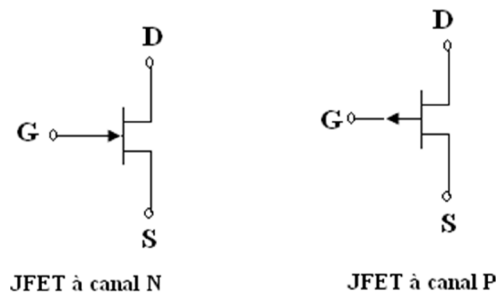


IV.2.3. Transistor à effet de champ (TEC ou FET)

On trouvera aussi la dénomination anglo-saxonne FET (Field Effect Transistor) ou encore JFET (Jonction FET). A l'instar du transistor MOS, ce transistor est composé de trois électrodes :

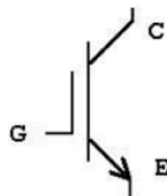
- une grille G de commande (l'équivalent de la base d'un transistor bipolaire);
- deux électrodes de « puissance » dites drain D et source S (respectivement l'équivalent sur le transistor bipolaire du collecteur et de l'émetteur). Comme pour le transistor bipolaire, le circuit de commande grille source est composé d'une diode, mais celle-ci sera polarisée à l'état bloqué. Ce transistor n'absorbe donc pas (ou peu) de courant du côté de la commande.

Deux types de transistors existent, le canal N et le canal P, sachant que comme pour les transistors bipolaires et MOS, on passe de l'un à l'autre en inversant le signe des grandeurs. Sur les symboles, la flèche indique le sens passant de la jonction grille source.



IV.2.4. Le Transistor IGBT

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) : Le transistor bipolaire à grille isolée (IGBT) est un dispositif semi-conducteur de la famille des transistors qui est utilisé comme interrupteur électronique, principalement dans les montages de l'électronique de puissance.



Les transistors IGBT ont permis d'envisager des développements jusqu'alors non viables en particulier dans la vitesse variable ainsi que dans les applications des machines électriques et des convertisseurs de puissance qui nous accompagnent chaque jour et partout, sans que nous en soyons particulièrement conscients: automobiles, trains, métros, bus, avions, bateaux, ascenseurs, électroménager, télévision, domotique, etc. Ils sont utilisés comme un transistor bipolaire à porte isolée.

IV.3. Circuits intégrés

IV.3.1. Définition

Un Circuit Intégré **CI** désigne un bloc constitué par un monocristal de silicium (Puce) à l'intérieur duquel se trouve inscrit en nombre variable des composants électroniques élémentaires (Transistors, diodes, résistances, condensateurs,...). Les circuits intégrés sont classés selon leurs caractéristiques et leur domaine d'emploi. Le classement est montré dans la figure suivante:

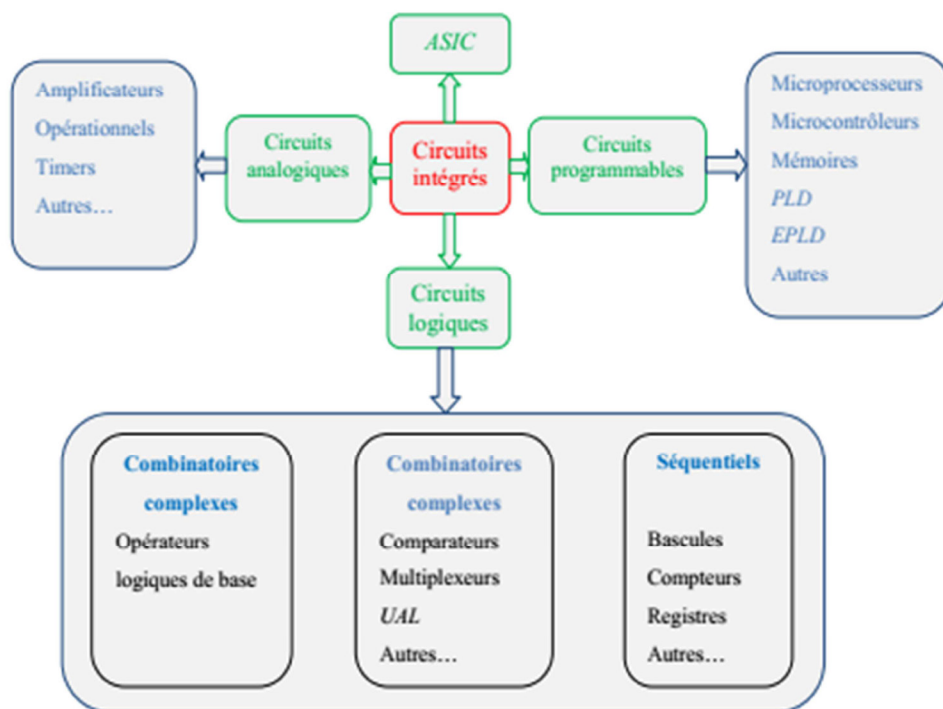


Fig.4.19. Différentes circuits intégrés

- **ASIC**: Ce sont des circuits intégrés fabriqués à la demande. Ils peuvent intégrer des structures analogiques et logiques.
- **Circuits analogiques**: ce sont des circuits intégrés qui mettent en forme des informations analogiques.
- **Circuits programmables**: ils nécessitent des informations virtuelles (un programme)
- **Circuits logiques**: regroupent les structures logiques intégrées non programmées.

IV.3.2. Degré d'intégration des circuits intégrés

Le tableau suivant résume les cinq degrés d'intégration des circuits intégrés.

Degré d'intégration	Nombre de portes
Intégration à petite échelle (<i>SSI</i>)	<i>Moins de 12</i>
Intégration à moyenne échelle (<i>MSI</i>)	<i>12 à 99</i>
Intégration à grande échelle (<i>LSI</i>)	<i>100 à 9999</i>
Intégration à très grande échelle (<i>VLSI</i>)	<i>10 000 à 99 999</i>
Intégration à ultra grande échelle (<i>ULSI</i>)	<i>100 000 et plus</i>

IV.3.3. Boîtiers de circuits intégrés

Les circuits intégrés sont encapsulés dans plusieurs types de boîtiers. Ces boîtiers se distinguent par le nombre de broches externes, les conditions ambiantes de fonctionnement et la méthode de montage sur la plaquette de circuits. Les boîtiers illustrés à la (**Fig.4.20.**) sont *des* composants *DIP* (double rangée en ligne) à 14 broches.

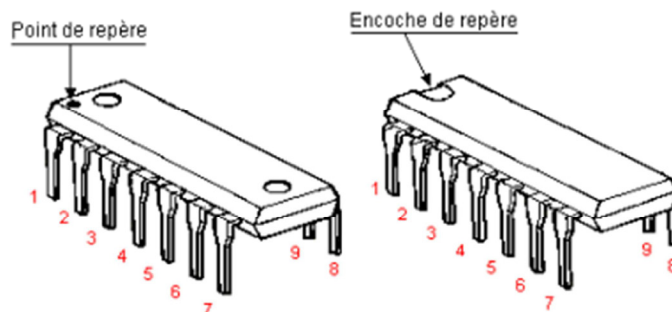


Fig.4.20. Boîtiers de CI à 14 broches

Chapitre V : Composant optoélectronique

L'Optoélectronique est l'étude des composants qui interagissent avec de la lumière. Elle est généralement considérée comme une sous branche de la photonique. Les interactions rayonnement électromagnétique – semi-conducteurs sont le principe des composants optoélectroniques dont le rôle est la conversion d'un signal optique en un signal électrique ou réciproquement. Ce sont donc des transducteurs électronique vers optique ou optique vers électrique.

V.1. Les diodes LED

Les D.E.L (**D**iode **E**lectro **L**uminescente) ou en Anglais: L.E.D (**L**ight **E**mitting **D**iode) éclairent lorsqu' elles sont parcourues par un courant de l'anode vers la cathode. Cette diode émet de la lumière quand elle polarisée en direct. Elle est maintenant très utilisée pour l'éclairage des habitations et depuis 1975 comme voyants lumineux dans les appareils électroniques.

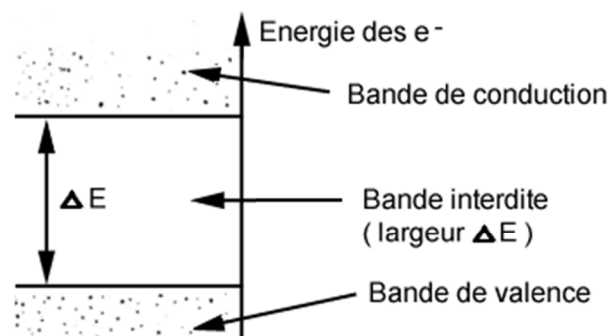


Fig.5.1. Symbole de la LED

V.1.1. Electroluminescence

La physique des semi-conducteurs nous enseigne que les électrons dans les solides cristallins se situent à des niveaux d'énergie spécifiques. Ces niveaux très proches les uns des autres, sont regroupés en "bandes d'énergie".

Un électron de la bande de valence peut passer dans la bande de conduction à condition d'acquérir une énergie supplémentaire au moins égale à ΔE . C'est l'**effet photoélectrique**.



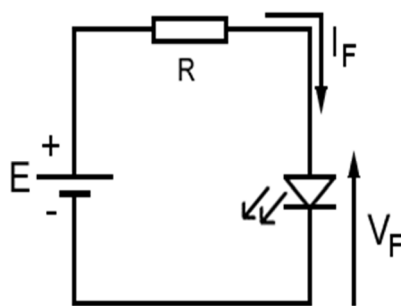
Un électron de la bande de conduction peut passer dans une bande de valence. Dans ce cas il libère une énergie au moins égale à ΔE . Cette énergie peut être:

- Dissipée sous forme de chaleur (phonons),
- émise sous forme de lumière (photons).

C'est l'effet électroluminescence (visible ou non).

V.1.2. Caractéristique

Une LED se comporte électriquement comme une diode. Pour émettre elle doit être **polarisée en direct**.



La tension de seuil dépend de la couleur et donc de la composition chimique du dopage

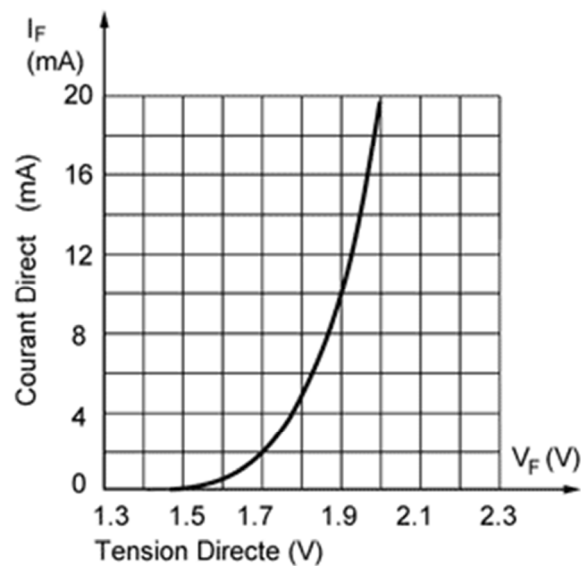


Fig.5.2. Caractéristiques $I_F=f(V_F)$ d'une diode LED

La tension de seuil dépend de la couleur et donc de la composition chimique du dopage.

Couleurs	Tension de seuil V_F (V)	I_F (mA)	Longueur d'onde (nm)
Rouge	1,6 à 2	6 à 20	650 à 660
Jaune	1,8 à 2	6 à 20	565 à 570
Vert	1,8 à 2	6 à 20	585 à 590
Bleu	2,7 à 3,2	6 à 20	470 nm
blanc	3,5 à 3,8	30	

Il existe actuellement plusieurs types de LED donnant chacun des spectres différents. Cela est obtenu par la variété des semi-conducteurs utilisés pour fabriquer les jonctions PN.

Exemples dans le tableau suivant pour l'obtention de certaines longueurs d'onde:

Matériaux	Rayonnement	Longueur d'onde
InAs	ultra-violet	315 nm
InP	infra-rouge	910 nm
GaAsP4	rouge	660 nm
GaP	vert	560 nm

Dans certains cas, on peut avoir besoin de polariser en inverse la LED. La diode est alors éteinte: elle n'émet plus d'intensité lumineuse. Mais attention, la diode LED ne peut pas supporter des tensions inverses trop importantes comme une diode de redressement par exemple. Les valeurs courantes se situent telles que $V_{R\ max} = \pm 3\ V$ à $5\ V$ (reverse voltage) ; au de la de ces valeurs il y a endommagement ou destruction du composant. En cas de besoin nous plaçons une diode normale en série avec la LED.

V.1.3. Valeurs

V.1.3.1. LED standard

LEDs rondes de diamètre 3 mm ou 5 mm comportent un plat sur la base pour repérer la **cathode** (ou lorsqu' elles sont neuves la patte la plus courte). La consommation moyenne est d'environ 20 mA.

V.1.3.2. Les LEDs miniatures

LED de diamètre 1,9 au pas de 2,54 mm pour implantation directe sur un circuit ayant une consommation de 20 mA.

V.1.3.3. Les LEDs faible consommation

Elles consomment de 2 mA à 6 mA.

V.1.3.4. Les LEDs avec résistance interne

Avec ces LEDs vous n'avez pas besoin d'utiliser de résistance extérieure, elles peuvent fonctionner directement sur une tension de 5V ou 12V.

V.1.3.5. Les LEDs clignotantes

Ces LEDs ont un circuit électronique permettant le clignotement avec une fréquence de 1 à 2,5 Hz/seconde. La plage d'alimentation est de 3,5V à 5V et pour une utilisation avec des tensions supérieures il faut ajouter une résistance. Il y a maintenant aussi des LEDs avec résistance intégrée pour une utilisation en 12 V.

V.1.4. Utilisations

L'avantage d'utiliser des LEDs est qu'elles ne s'usent pas. Elles sont moins chères que des voyants. Elles consomment moins d'énergie. L'inconvénient est qu'elles ne peuvent fonctionner qu'avec une faible tension, et qu'elles n'éclairent pas beaucoup par rapport aux ampoules classiques. Il faut donc ajouter une résistance en série pour utiliser un LED.

V.2. Diodes Laser

Les diodes Laser reposent sur des technologies bien différentes en fonction de la couleur émise. En fonction de la couleur du Laser, le principe sera différent: diode laser simple ou diode laser de pompage et cristaux spécifiques.

V.2.1. Principe de la diode Laser

Une diode Laser a la forme d'un parallélépipède rectangle dont les deux faces clivées perpendiculairement au plan d'une jonction de semi-conducteurs émettrice, constituent un

résonateur Fabry-Pérot. Ce résonateur est à l'origine de l'émission stimulée de photons caractéristique de l'émission Laser.

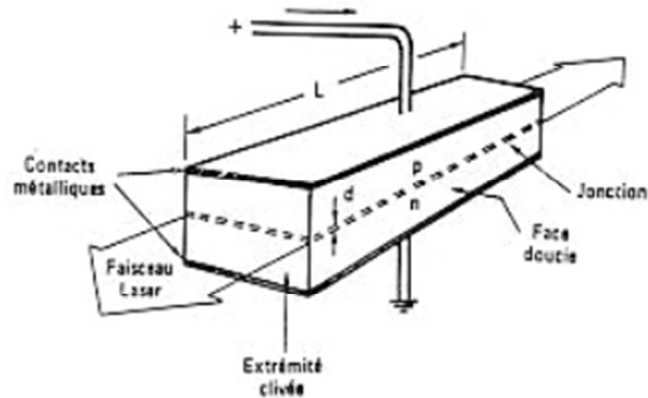


Fig.5.3. schéma d'une diode dont la largeur est d'un demi-millimètre environ

Afin d'obtenir une émission Laser continue et puissante à température ambiante, la jonction de semi-conducteurs sera une structure complexe telle que la double hétérojonction (DH) de la figure précédente. Cette dernière présente l'avantage de confiner les porteurs par une barrière de potentiel électrostatique dans un volume très réduit appelé zone active. Ce confinement permet d'obtenir pour un faible courant d'injection, une densité de porteurs élevée et par conséquent un gain élevé. Pour fixer l'échelle de taille de la zone active, sachez que $L \sim 100$ à $500 \mu\text{m}$, $d \sim 0,1$ à $0,5 \mu\text{m}$, $s \sim 2$ à $5 \mu\text{m}$.

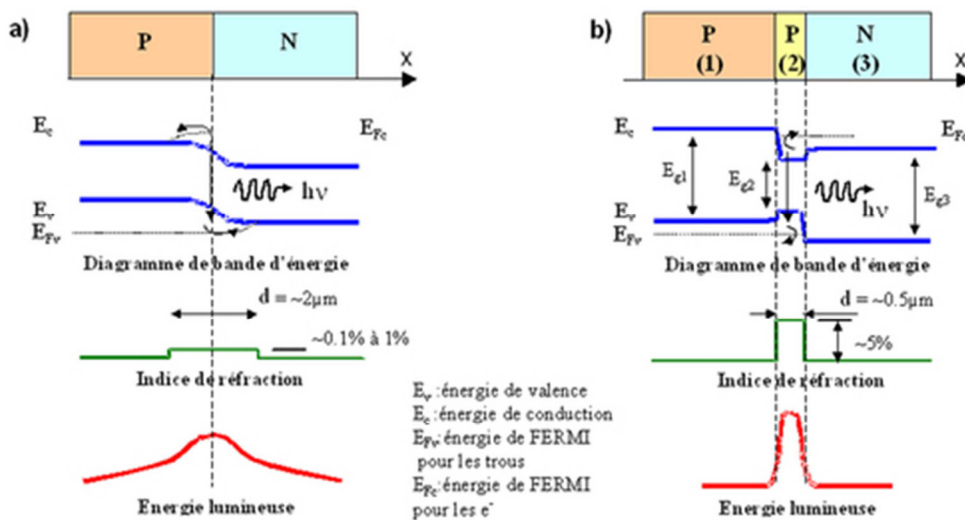


Fig.5.4. Jonctions émettrices. a) Homojonction. b) Double-hétérojonction

Retenons qu'une diode Laser monomode est un émetteur de lumière intense ~ 100 mW, quasi monochromatique (une seule longueur d'onde) et de grande cohérence temporelle (interférences avec différence de chemin optique de plusieurs mètres).

V.2.2. La caractéristique puissance-courant

Elle représente la variation de la puissance émise par la diode laser en fonction de son courant de polarisation. Cette caractéristique dépend fortement du courant de seuil qui correspond au seuil de l'émission laser et de la température de fonctionnement du composant.

- Lorsqu'un faible courant lui est appliqué, l'émission stimulée ainsi que les recombinaisons Auger sont négligeables, une diode laser émet de la même manière qu'une LED. La puissance rayonnement émis est proportionnelle au courant de polarisation. L'inversion de population n'a encore pas lieu (*Fig.5.6.*).
- Lorsque le courant qui traverse la jonction devient supérieur au courant seuil, l'inversion de population a lieu. Les photons émis vont générer des photons cohérents qui vont atteindre les faces clivées du laser en se multipliant par émissions stimulées.
- Les courants seuils typiques varient de 1 à 25 mA et les puissances émises sont de l'ordre de 15 à 25 mW pour un courant de 100 mA.
- En régime laser la caractéristique $\Phi(I)$ est quasiment droite.
- A fort courant, la courbe s'éloigne de la droite à cause de l'échauffement du composant.

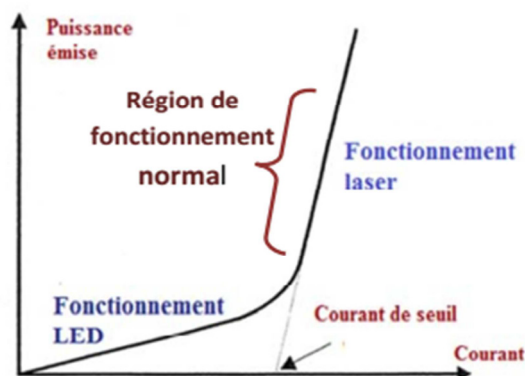


Fig.5.6. Caractéristique puissance-courant de la diode laser.

V.2.3. Courant de seuil d'une diode laser

La lumière "LASER" ne commence à être émise qu'à partir d'un certain courant (10 à 25% du courant maximum). Par exemple, il faut au moins 80mA pour commencer à voir le faisceau laser rouge pour la diode laser 300mW. Ce phénomène n'existe pas sur les LED.

V.2.4. Influence de la température

La longueur d'onde d'émission d'une diode laser augmente avec la température du semi-conducteur. Cela est dû au fait qu'en augmentant la température l'indice de réfraction et la longueur de la zone active (et donc celle du résonateur) augmentent à leur tour. Au-dessus d'une certaine température il devient difficile à un mode donné d'osciller dans le résonateur. Pourra osciller un mode différent pour lequel les conditions sont plus favorables. Parce que l'intervalle de mode du très court résonateur (300 μm) est très grand, le saut de mode est d'environ 0,3 nm. Si on réduit ensuite la température, le laser tend à retourner vers sa longueur d'onde initiale. Le saut de retour ne se fait pas selon le mode initial (c'est l'analogie d'un phénomène d'hystérésis). Les applications qui nécessitent une variation parfaite de longueur d'onde de la diode laser devront être menées dans les régions des courbes (voir figure I-4) qui sont en dehors des sauts.

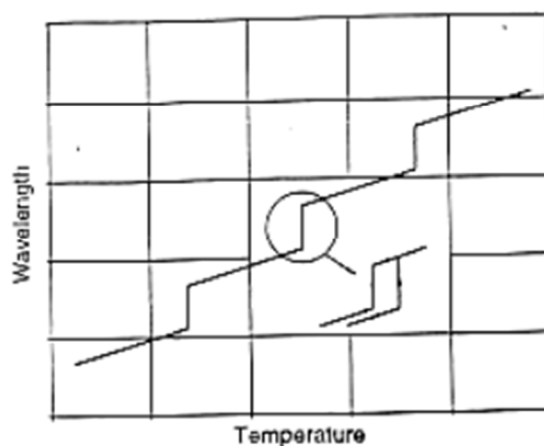


Fig.5.7. Variation de la longueur d'onde avec la température

➤ le courant seuil varie, avec la température, suivant la loi :

$$I_s(T) = I_{s0} \cdot \text{Exp} \frac{T}{T_0} \quad (\text{V.1})$$

Où T_0 est la température caractéristique de la diode. Sa valeur varie de 120 à 230 K Pour les diodes laser à base de GaAlAs et de 60 à 80 K pour les lasers à base de GaInAsP. Iso est le courant de seuil caractéristique.

- L'expression montre que la réaction de la diode laser aux changements de température est d'autant plus importante que la température caractéristique T_0 est faible.
- Pour une bonne fiabilité avec conservation d'une puissance lumineuse optimale, il est nécessaire de réguler en température la diode.

V.2.5. Matériaux utilisés pour les diodes laser

La longueur d'onde de la lumière émise d'une diode laser est directement liée au matériau de la région active, région où a lieu le maximum d'émissions stimulées. Elle est une fonction de la largeur de la bande interdite et est déterminée par la concentration de dopants et la configuration de la zone active. Ainsi, Les mêmes types de matériaux et alliages utilisés pour les LED sont aussi utilisés pour les diodes laser.

- Les premières diodes laser étaient réalisées à base d'homojonction **GaAs** en 1962 sans confinement latéral. Elles sont utilisées en régime pulsé à cause des fortes densités de courant d'injection qu'elles nécessitaient pour leur fonctionnement.
- Les diodes Laser actuelles sont à hétérojonctions et à base d'alliages ternaires (exemple : **GaAlAs**) et quaternaires (exemple : **GaInAsP**) et peuvent fonctionner en régimes continus et pulsés.
- Ainsi en variant la fraction x d'aluminium dans le mélange **Ga_{1-x}Al_xAs**, une jonction PN au **GaAlAs** peut émettre de 750 nm à 900 nm et couvrir entièrement la gamme de la première fenêtre optique (cf. chapitre fibres optiques): $\lambda = 850 \text{ nm} \Rightarrow \text{Ga}_{0,9}\text{Al}_{0,1}\text{As}$
- L'**InGaAsP** est principalement utilisé pour la fabrication de composants qui émettent vers 1300 nm et 1550 nm.
- L'**InGaAlP** est utilisé pour les lasers à semi-conducteurs dans la plage visible à partir de 630 nm. Ces lasers sont adaptés pour la transmission de données avec des fibres plastiques synthétiques. Dans de nombreuses applications Ils remplacent le laser HeNe, par exemple pour les scanners de codes à barres.

V.2.6. Utilisation des diodes laser

Les diodes laser sont utilisées dans de nombreuses applications, d'une part comme substitut des lasers à gaz car elles présentent sous un volume réduit sans haute tension et à moindre prix une puissance équivalente, d'autre part comme laser pompe pour le laser à cristaux. Mais leur utilisation principale concerne les télécommunications où elles permettent grâce à leurs fréquences de modulation élevées d'alimenter les réseaux de transmission à fibres optiques. Les imprimantes laser en font également usage.

V.3. La fibre optique

En communication, et plus particulièrement au niveau des télécommunications, l'homme a toujours recherché et recherche encore la perfection. Du télégraphe de Chappe, vu précédemment, l'homme a su évoluer et concevoir un moyen de télécommunication révolutionnaire : la fibre optique. En effet, nous savons que la lumière a une certaine tendance à se propager en ligne droite, ainsi pour transporter de l'information d'un point quelconque vers un autre point quelconque ce n'est pas très pratique... La fibre optique, elle permet cette circulation de l'information et donne encore d'autres avantages.

V.3.1. Présentation et principe

La fibre optique est une fibre ou une fine tige de verre ou d'un autre matériau transparent, possédant un indice de réfraction élevé, permettant la propagation guidée de la lumière.

Grossièrement, la fibre optique est composée:

- d'un fil de verre très fin, le cœur (quelques microns), d'un seul tenant, parfois très long (jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres),
- d'une gaine qui emprisonne la lumière dans le cœur en la réfléchissant pratiquement sans perte (généralement, une enveloppe transparente d'un indice de réfraction inférieur (certains se rappelleront leur cours de physique),
- d'un revêtement de protection qui peut réunir plusieurs dizaines à plusieurs centaines de fibres,
- d'un système de connexion très spécifique (sinon la lumière butte aux extrémités et ne sort pas).

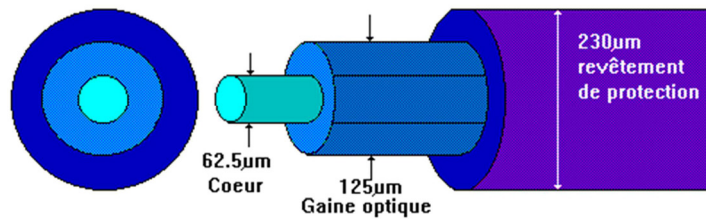


Fig.5.8. Principe fibre optique

Le type de propagation des fibres optiques repose sur le principe de la réflexion totale. Les rayons lumineux qui se propagent le long du cœur de la fibre heurtent sa surface avec un angle d'incidence supérieur à l'angle critique : la totalité de la lumière est alors réfléchi dans la fibre. La lumière peut ainsi se propager sur de longues distances, en se réfléchissant des milliers de fois. Afin d'éviter les pertes de lumière liées à son absorption par les impuretés à la surface de la fibre optique, le cœur de celle-ci est revêtu d'une gaine en verre d'indice de réfraction beaucoup plus faible ; les réflexions se produisent alors à l'interface cœur-gaine.

V.3.2. La transmission

Pour une conversation téléphonique, la voix est traduite en un signal électrique. Ce signal est transmis jusqu'au récepteur par un câble de cuivre. Le signal électrique est alors décodé pour reproduire le message de départ. La fibre optique transporte l'information sous forme de lumière, pour réaliser cette même conversation téléphonique, un dispositif doit être mis en place : l'IOE (interface optique d'émission) appelé aussi « transceiver » transforme le signal électrique de départ en signal optique; il s'agit essentiellement d'une diode électroluminescente (DEL) ou d'une diode laser. L'IOR (interface optique de réception) aussi appelé « détecteur », qui contient une photodiode, transforme le signal optique à la sortie du système en signal électrique, puis, finalement, en son.

L'information est généralement transmise en code binaire, soit sous forme de 0 et de 1. Le signal qui est transporté dans la fibre est alors formé d'impulsions lumineuses. Le défi des compagnies de télécommunications est d'arriver à transmettre un maximum de données en un temps record tout en minimisant les pertes de signal. Pour augmenter le débit de transmission, on réduit la largeur des impulsions, ce qui correspond à une augmentation de la fréquence de transmission. Les télécommunications par fibres optiques ont été rendues possibles grâce à

l'invention du laser au début des années 1960. Sans cette source lumineuse très intense, le signal lumineux ne se rendrait que difficilement à destination.

V.3.3. Les différents types de fibre

V.3.3.1. La fibre multimode

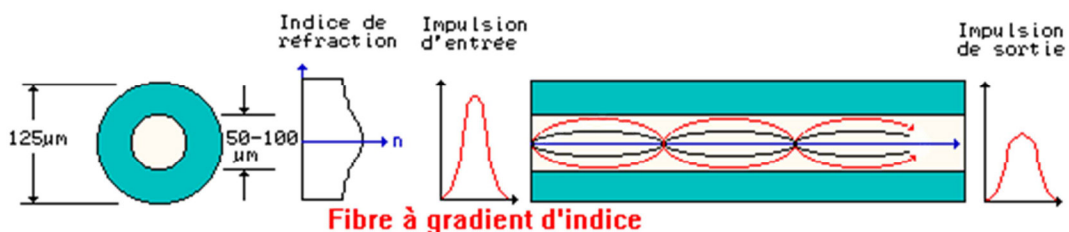
Dans cette famille, nous trouvons deux sous catégories:

- La fibre à saut d'indice



C'est le type de fibre le plus simple, directement issue des applications optiques traditionnelles. Le cœur a un relatif gros diamètre, par rapport à la longueur d'onde de la lumière (de l'ordre du μm dans l'infrarouge). La gaine optique joue un rôle actif dans la propagation, et ne doit pas être confondue avec les revêtements de protection déposés sur la fibre. Le rayon est dans ce cas guidé par réflexion totale au niveau de l'interface cœur-gaine, sinon il est réfracté dans la gaine. Ceci reste vrai si la fibre cesse d'être rectiligne, à condition que le rayon de courbure reste grand devant son diamètre. Tous les inconvénients vus plus haut se manifestent ici. Observez l'allure de l'impulsion de sortie, comparée à celle de l'impulsion d'entrée. Ce sont bien entendu des informations non quantitatives, un aperçu.

- La fibre à gradient d'indice



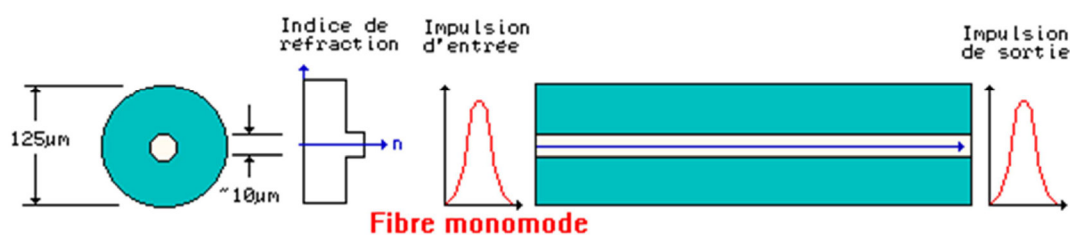
Ces fibres sont spécialement conçues pour les télécommunications. Le guidage est cette fois dû à l'effet du gradient d'indice. Les rayons guidés suivent une trajectoire d'allure sinusoïdale. La gaine n'intervient pas directement, mais élimine les rayons trop inclinés.

Ici, deux améliorations sont apportées:

- Le diamètre du cœur est de deux à quatre fois plus petit.
- Le cœur est constitué de couches successives, à indice de réfraction de plus en plus grand. Ainsi, un rayon lumineux qui ne suit pas l'axe central de la fibre est ramené "en douceur" dans le droit chemin.

L'avantage essentiel de ce type de fibre est de minimiser la dispersion du temps de propagation entre les rayons.

V.3.3.2. La fibre mono mode



C'est le "top". Le diamètre du cœur est très petit, les angles d'incidence le sont donc aussi. Les résultats sont excellents, mais, compte tenu de la faible section de cette fibre, seul la lumière laser est ici exploitable. Il n'y a pas de miracle, c'est la solution la meilleure, mais aussi la plus onéreuse.

V.3.4. Quelques applications de la fibre optique

De nos jours, les stations de travail sont connectées entre elles à l'aide de réseaux utilisant la fibre optique car son utilisation permet des débits d'informations plus rapides et une plus grande sûreté lors des transmissions.

En téléphonie, les câbles coaxiaux sont remplacés peu à peu par des fibres optiques. En effet, elle est plus économique sur longues et courtes distances et le nombre de composants nécessaires est moins important. Son utilisation est particulièrement intéressante pour les militaires car elle leur apporte certains avantages: faible poids, taille de la fibre, insensibilité au brouillage et à la détection. On se sert aussi de la fibre optique pour examiner des petits objets d'habitude inaccessibles. Au niveau médical pour les endoscopies, pour la recherche sur le cerveau et le cœur en utilisant des filaments de fibres sans revêtement, l'image est alors visualisée sur un écran de télévision.

V.4. Les dispositifs photosensibles

Le fonctionnement des différents éléments photosensibles à semi-conducteur est basé sur le même principe physique. Lorsqu'un cristal semi-conducteur absorbe un photon d'énergie ($E = h\nu$), supérieure à la largeur de sa bande interdite, il y a création d'une paire électron-trou ; un électron passant de la bande de valence à la bande de conduction laissant à sa place un trou.

V.4.1. Photodiode

Considérons une jonction P-N polarisée en inverse (**Fig.5.9.**). Lorsque cette jonction est dans l'obscurité, elle est le siège d'un courant de fuite que l'on appelle courant d'obscurité. Si l'on illumine cette jonction avec une radiation de longueur d'onde (λ) suffisamment faible, il y a création de paires électron-trou au sein du cristal.

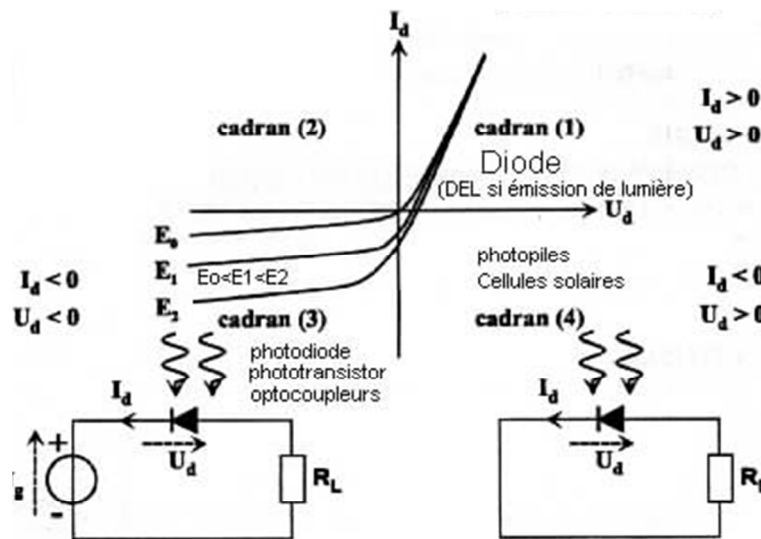


Fig.5.9. Photodiode à jonction PN

Les porteurs ainsi générés sont balayés par le champ électrique présent dans la zone de déplétion. Il en résulte un courant électrique proportionnel à la densité du flux de photons incident. En fait, le circuit se comporte comme un générateur de courant commandé par la lumière. Le coefficient de température est faible et le temps de réponse très court (inférieur à la microseconde). L'absorption de la lumière dans le silicium décroît lorsque la longueur d'onde (λ) augmente. Cependant, lorsque la longueur d'onde de la radiation incidente décroît, une plus grande quantité de paires électron-trou est générée près de la surface. De ces deux

phénomènes contradictoires, il résulte une sensibilité maximale de la photodiode pour une certaine longueur d'onde (*Fig.5.10.*).

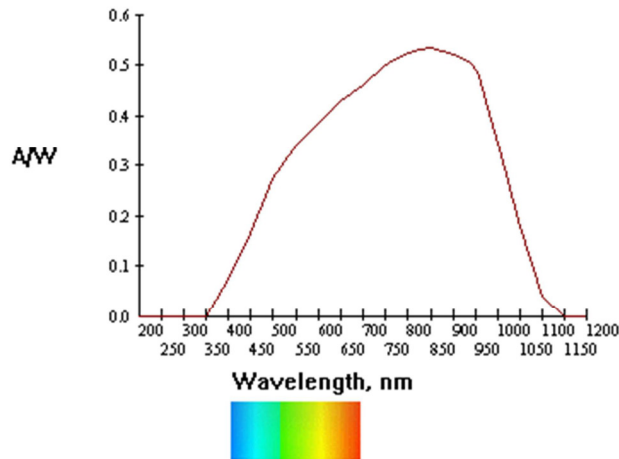


Fig.5.10. Réponse spectrale d'une photo diode au silicium

Dans la pratique les photodiodes ne sont jamais utilisées seules du fait de la faiblesse du courant qu'elles peuvent délivrer. Elles sont donc généralement associées à un amplificateur qui est souvent intégré à la même puce. Les caractéristiques du composant ainsi formé deviennent alors celles de l'ensemble photodiode (+) amplificateur.

V.4.2. Schéma équivalent de la photodiode

La photodiode étant habituellement polarisée en inverse, son schéma équivalent est celui d'une diode en inverse en parallèle avec un générateur de courant (I_p). Ceci se traduit par le circuit de la (*Fig.5.11.*):

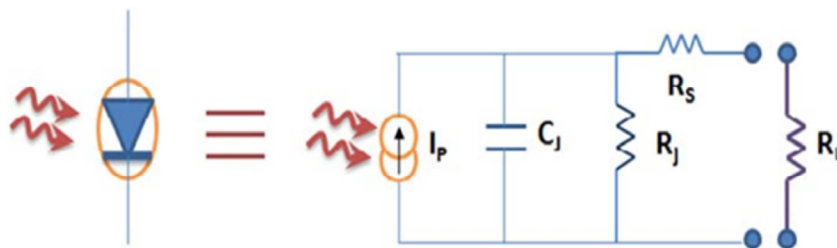


Fig.5.11. Schéma équivalent de la photodiode

R_j est la résistance dynamique de la jonction polarisée en inverse, sa valeur est très élevée, elle est de l'ordre de $10^{10} \Omega$.

R_s est la résistance série: c'est la résistance d'accès, elle est essentiellement due à la résistance du substrat et à la résistance des contacts. R_s est très faible, elle est de l'ordre de 10Ω .

C_j est la capacité de jonction: c'est la capacité de la zone de charge d'espace. Elle est inversement proportionnelle à la largeur de la zone de charge d'espace W :

$$C_j = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{W} \quad (V.2)$$

Où A est la surface de la photodiode.

L'épaisseur de la zone de charge d'espace W étant proportionnelle à la polarisation inverse, Cette capacité oscille autour de 100 pF pour les faibles polarisations à quelques dizaines de pF pour les polarisations élevées.

V.4.3. Phototransistor

Le phototransistor est la combinaison la plus simple d'une photodiode et de son amplificateur. En dirigeant la lumière sur la jonction collecteur-base (qui est polarisée en inverse) on génère un courant base d'origine photonique qui est amplifié par le gain en courant β du transistor (*Fig.5.12.*). Si la base est accessible de l'extérieur une polarisation du transistor est possible,

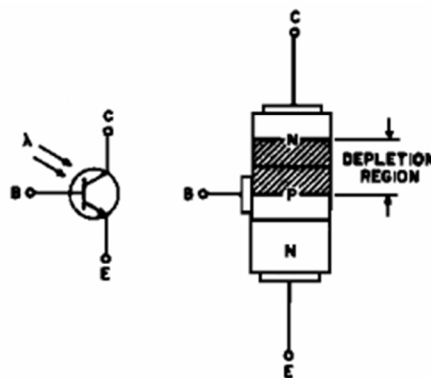


Fig.5.12. Fonctionnement d'un phototransistor

On remarque que la sensibilité et la réponse du phototransistor varient avec le gain du transistor, c'est-à-dire avec le niveau de courant, la polarisation éventuelle et la température. La vitesse de réponse du phototransistor est très inférieure à celle d'un transistor équivalent.

V.4.4. Photo-Thyristor

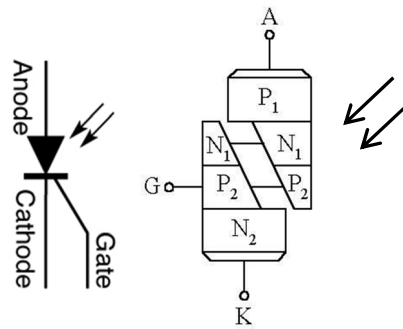


Fig.5.13. Photo thyristor et son schéma équivalent

La (Fig.5.13.) Illustre le fonctionnement de ce dispositif. Le schéma équivalent du thyristor à l'aide de deux transistors NPN et PNP permet de mieux saisir le mécanisme d'amorçage. Le courant d'origine photonique généré dans la jonction collecteur-base du transistor NPN provoque la conduction de celui-ci entraînant l'amorçage du thyristor de manière identique à un courant injecté dans la gâchette.

V.5. Photopile

Une cellule solaire photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer la lumière qu'il reçoit en énergie électrique. Les matériaux de base utilisés pour fabriquer des cellules photovoltaïques sont les semi-conducteurs qui possèdent un gap suffisamment faible pour absorber le maximum du spectre solaire, qui se situe principalement entre 1eV et 5eV. De tous les semi-conducteurs qui possèdent un tel gap (Ge, Si, GaAs, InP, ...), le silicium est le plus prometteur, car il est non-toxique et très abondant sur la terre. De plus, ce matériau étant déjà à la base de toute la technologie de l'électronique, son utilisation est relativement mieux maîtriser.

Les premiers prototypes de cellules solaires développés en laboratoire utilisaient du silicium monocristallin, c'est-à-dire du cristal de silicium pur. En laboratoire, une simple jonction PN de silicium monocristallin suffit pour atteindre des rendements de plus de 20%. Depuis, beaucoup de types de silicium différents, moins coûteux à la fabrication, ont été étudiés afin d'aborder le point crucial des coûts de production. Ainsi, on produit actuellement beaucoup de panneaux solaires en silicium poly-cristallin.

V.5.1. Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique utilisable de type continu.

A chaque photon, on associe une énergie $E_{ph} = hv$, où v est la fréquence associée à la longueur d'onde du photon ($\lambda = c / v$, avec c la célérité de la lumière dans le vide).

Pour passer de l'énergie du photon E_{ph} à la longueur d'onde, on utilise la relation suivante:

$$E_{ph} \text{ (eV)} = \frac{1.24}{\lambda(\mu\text{m})} \quad \text{Où } \lambda \text{ est en } \mu\text{m}. \quad (\text{V.3})$$

La cellule solaire n'est sensible que dans un domaine de longueur d'onde particulier, et seul un matériau semi-conducteur dispose de la structure de bande nécessaire à la génération, à partir du rayonnement solaire, de paires électron-trou utilisables.

Dans un semi-conducteur, la structure des bandes de conduction et de valence définissent un gap plus faible que dans le cas des isolants : de 0,3 à 3 eV. Si le minimum de la bande de conduction coïncide avec le maximum de celle de valence, le gap est dit direct, les transitions sont donc directes et radiatives.

V.5.2. Structure d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants:

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur ;
- collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie, et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant: d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons-trous créées est nécessaire. Pour cela, on utilise le plus souvent une jonction PN. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les schottky peuvent également être

utilisées. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est illustré sur la (Fig.5.14.).

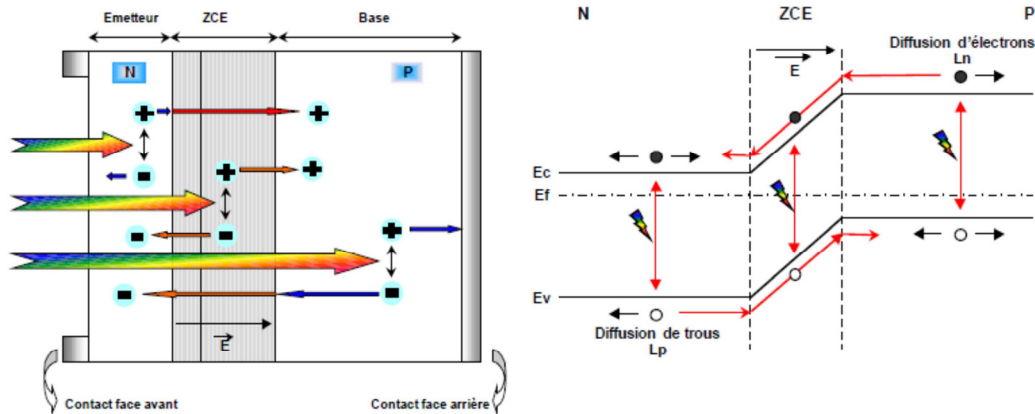


Fig.5.14. Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P, et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région:

- Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace, sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons), où ils seront majoritaires. On aura un photo-courant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura un photo-courant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photo-courant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse. Comme la longueur de diffusion des électrons photo-générés (L_n) est supérieure à celle des trous photo-générés (L_p), on dope préférentiellement la base de type P. De plus, elle est faiblement dopée (10^{15} à 10^{16} at/cm³) afin de limiter les recombinaisons. Le fort dopage de la zone de type N, appelée émetteur, assure l'existence d'un champ électrique suffisant dans la Z.C.E et minimise la résistance série au niveau du contact métallique.

V.5.3. Caractéristiques électriques

Sous l'obscurité, le courant dans une telle structure de type jonction PN est appelé courant d'obscurité et a la forme suivante:

$$I_{\text{abs}} = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{gKT}\right) - 1 \right) \quad (\text{V.4})$$

Avec: **q**: charge élémentaire; **V**: tension aux bornes de la jonction; **T**: température; **k**: constante de Boltzmann; **I_s**: courant de saturation inverse de la jonction PN; **g**: coefficient d'idéalité de la jonction

Le courant d'obscurité correspond au courant de diode (**I_d**) ; il résulte de la polarisation de la jonction. Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit alors:

$$I(V) = I_{\text{ph}} - I_{\text{abs}}(V) \quad \underline{\text{Soit:}} \quad I(V) = I_{\text{ph}} - I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{gKT}\right) - 1 \right) \quad (\text{V.5})$$

Ainsi, dans une cellule photovoltaïque deux courants s'opposent: le courant d'éclairement et le courant d'obscurité. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode, sous éclairement la caractéristique à l'allure présentée sur la (**Fig.5.15.**).

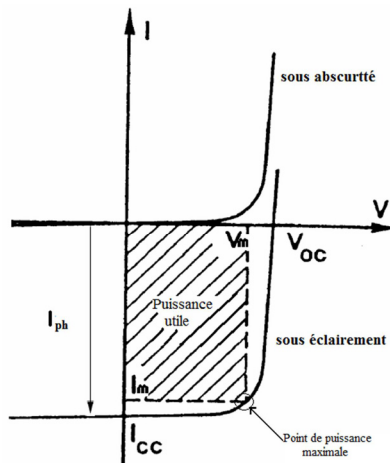


Fig.5.15. Caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclairement.

Les grandeurs caractéristiques suivantes peuvent être extraites de ce graphique:

- V_{co} : tension de circuit ouvert : elle représente la tension aux bornes de la cellule sous éclairement sans circuit de charge. V_{co} est donnée par la relation :

$$V = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} - 1 \right) \quad (V.6)$$

- I_{cc} : courant de court-circuit correspondant à $V=0$;
- V_m : tension correspondant à la puissance maximale fournie ;
- I_m : courant correspondant à la puissance maximale fournie.

Le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale, soit:

$$P_m = V_m \cdot I_m \quad (V.7)$$

On définit les deux autres paramètres suivants :

- **FF** : facteur de forme, il détermine la qualité électrique de la cellule.

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (V.8)$$

Dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme FF ne peut pas être supérieur à 0,89 du fait de la relation exponentielle liant courant et tension.

- η : rendement : le rendement est le rapport entre la puissance électrique fournie par la cellule et la puissance incidente.

$$\eta = \frac{V_m \times I_m}{E \times S} \quad (V.9)$$

Avec, **E**: Eclairement énergétique en $W.m$; **S**: Surface de la cellule en m .

V.5.4. Schéma électrique équivalent

L'analogie entre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque sous éclairement, et celui d'un générateur de courant produisant un courant I_{ph} auquel se soustrait le courant de la diode en polarisation directe, n'est qu'une représentation simplifiée du fonctionnement réel de la

cellule. Pour tenir compte des différentes limitations de la cellule photovoltaïque, on introduit le modèle à deux diodes représenté sur la (Fig.5.16).

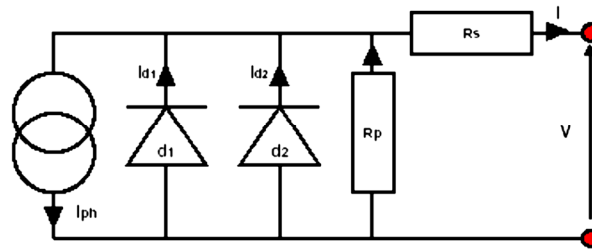


Fig.5.16. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque.

Les différents paramètres de ce modèle sont:

- **La générateur de courant:** il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photo-généré.
- **La résistance série R_s :** elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et les contacts métalliques.
- **La résistance parallèle R_p :** également connue sous le nom de résistance de court-circuit. Elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur.
- **La diode d_1 :** elle modélise la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur. Son influence sera d'autant plus grande que le matériau présentera une bonne longueur de diffusion.
- **La diode d_2 :** elle modélise la génération-recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace.

Le courant au sein de la cellule photovoltaïque est donné par la relation:

$$I = I_{S1} \left(\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{g_1 KT}\right) - 1 \right) + I_{S2} \left(\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{g_2 KT}\right) - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (V.10)$$

Le terme en I_{S1} correspond au courant de diffusion dans la base et l'émetteur ; I_{S1} à proprement parler est le courant de saturation de ce phénomène. Le paramètre g_1 est le facteur d'idéalité de la diode d_1 , et doit être proche de 1 dans ce cas.

Le terme en I_{S2} traduit la recombinaison de porteurs au sein de la zone de charge d'espace. I_{S2} est le courant de saturation, et g_2 est le facteur d'idéalité de la diode d_2 , qui doit être ≥ 2 .

V.5.5. Architecture de la cellule photovoltaïque

L'architecture des dispositifs photovoltaïques modernes se révélant particulièrement complexe, nous allons nous limiter à une description simplifiée de la cellule. Comme nous l'avons vu précédemment, la jonction PN constitue le cœur de la cellule photovoltaïque. Les porteurs vont être photo-générés, soit dans les zones N ou P, soit dans la zone de charges d'espace. Les contacts métalliques, en face avant et en face arrière, constituent la structure de collecte, permettant de récupérer les porteurs photo-générés. La quantité de photons pénétrant la cellule photovoltaïque dépend de la réflectivité de sa surface. La réflectivité caractérise la quantité de photons réfléchi par la surface, soit une perte du rayonnement incident. Pour minimiser la réflexion de la lumière en surface, cette dernière est recouverte d'une couche anti-reflet (CAR). Le rôle de la couche anti-reflet est d'adapter l'indice optique entre le milieu extérieur et la cellule, pour minimiser la réflexion du flux de photons incident.

La texturisation de la surface peut également être utilisée pour limiter la réflectivité de la surface. La texturisation consiste à modifier la planéité de la surface en introduisant un relief bien déterminé. Ce dernier, tout en augmentant la surface, induit des réflexions multiples sur les facettes le constituant, piégeant ainsi un maximum de lumière. Une importante source de perte des porteurs est la recombinaison de ces derniers en face avant et arrière. La (Fig.5.17.) représente une cellule photovoltaïque au silicium poly-cristallin.

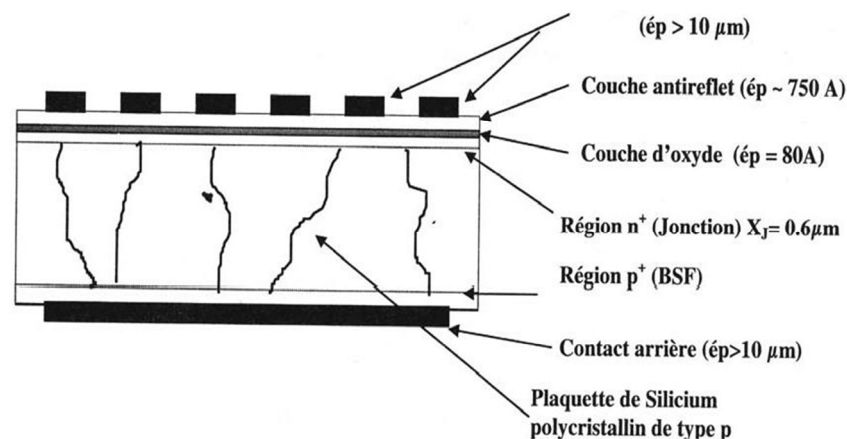


Fig.5.17. Cellule solaire au silicium polycristallin.

Les rendements et les domaines d'application des cellules solaires fabriquées à base de différents types de silicium sont rassemblés dans le tableau suivant:

Type de silicium	Rendement théorique	Rendement en laboratoire	Rendement Commercial	Domaine d'application
Silicium monocristallin	27,0%	24,7%	4,0 – 16,0%	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium Polycristallin	27,0%	19,8%	2.0 – 14,0%	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (relies réseau ou sites isolés)
Silicium amorphe	25,0%	13,0%	6,0 – 8,0%	Appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice montres...), modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
GaAs	29.0%	27.5%	18.0-20.0%	Systèmes de concentrateur, espace (satellites).

Références

- [1] T. Neffati, "*Introduction à l'électronique analogique*", Dunod, Paris, (2008).
- [2] H. Mathieu, H. Fanet, "*Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques*", Edition Masson, Paris, (2009).
- [3] E. Amzallag, J. Cipriani, J. Ben Aïm, N. Piccioli, "*Electrostatique et électrocinétique*", Dunod, Paris, (2006).
- [4] S. M. Sze, "*Semiconductor devices: Physics and Technology*", 2nd Ed., J. Wiley (2002).
- [5] R. Breahna, "*Les composants électroniques passifs*", Les Presses de l'Université Laval.
- [6] S. Rebiai, "*Composants optoelectroniques*", Esience
- [7] B. Amana, C. Richter, O. Heckmann, "*LASER à Semi-Conducteur (Diode LASER)*", Les Presses de l'Université de Cergy-Pontoise, Master 1 Physique.
- [8] A. Ricaud, "*Photodiode à semi-conducteur dans : Photopiles solaires - De la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés*", Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, (1997).
- [9] P. Maye, "*Aide-mémoire: Composants électroniques*", Dunod, Paris, (2015).
- [10] T. Neffati, "*L'électronique de A à Z*", Dunod, Paris, (2006).
- [11] A. Ghatak, K. Thyagaraja, "*Introduction to fiber optics*", Cambridge University press, (1997).
- [12] B. Zaidi, "*Cellules solaires*", Éditions Universitaire Européennes, (2016).
- [13] T. Zéno, "*Optoélectronique, composants photoniques et fibres optiques*", Edition Ellipse, (2001).
- [14] B. Zaidi, I. Saouane, C. Shekhar, "*Simulation of Single-Diode Equivalent Model of Polycrystalline Silicon Solar Cells*" International Journal of Materials Science and Applications, Vol 7, (2018).
- [15] E. F. Schubert, "*Light-Emitting diodes*", Cambridge University Press, (2003).
- [16] B. Zaidi, I. Saouane, M. V. Madhava Rao, R. Li, B. Hadjoudja, S. Gagui, B. Chouial, A. Chibani, "*Matlab / Simulink Based Simulation of Monocrystalline Silicon Solar Cells*" International Journal of Materials Science and Applications, Vol 5, (2016).

Physique Electronique Appliquée

Dr. Beddiaf ZAIDI



Dr. Zaidi

is an associate professor in the Department of Physics, University of Batna 1, Algeria. He obtained a Ph.D. in Physics at the University of Annaba, Algeria, in 2014. He has published several research papers in reputed journals and written three books. He was editor in chief of the International Journal of Materials Science and Applications (IJMSA) as well as an editorial board member for numerous other journals and lead guest editor of many special issues. He is also a journal peer reviewer. Dr. Zaidi has participated in many international conferences.



ISBN : 978- 9931- 752- 68- 4



9 789931 752684

البدر الساطع للطباعة والنشر

العلمة -19600-الجزائر

هاتف/فاكس : 036 76 40 08

النتقال : 05 55 71 30 53 /07 70 31 16 56

البريد الإلكتروني : elbadr_essatie@yahoo.com