

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE & POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
& DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF

FACULTE DES SCIENCES EXACTES
ET INFORMATIQUE



Polycopié de cours

ELECTRONIQUE DES COMPOSANTS

Elaboré par :

Mme BOUCHENAFHA Halima

Maître de Conférences Classe A

Département de Physique

Faculté des Sciences Exactes et

Informatique

&

Mr BENICHOU Boucif

Maître de Conférences Classe A

Département d'Electronique

Faculté de Technologie

Année Universitaire : 2021-2022

Préface

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 leurs caractéristiques géométriques. Leur assemblage est préalablement défini par un schéma d'implantation. Les composants électroniques se divisent en deux grandes familles : des composants à semi-conducteurs et des composants non à semi-conducteurs.

Le présent polycopié de cours que je présente, conforme aux programmes du LMD, est destiné essentiellement aux étudiants de troisième année en physique des Matériaux dans le domaine des sciences de la matière.

L'objectif de ce cours est de faire acquérir à l'étudiant les principales notions de base permettant de comprendre et de connaître les semi-conducteurs, et de permettre de connaître les principaux composants électroniques passifs et actifs en examinant brièvement leurs propriétés technologiques, connaître plus spécifiquement leurs aspects physiques, leurs symboles ainsi que leurs applications.

Ce polycopié de cours est composé de 5 chapitres repartis comme suit :

Le premier chapitre est une brève Introduction à la physique des composants électroniques, le deuxième chapitre fait découvrir à l'étudiant la Conduction électrique dans les solides.

Les composants passifs et les composants actifs sont présentés dans les chapitres III et IV respectivement. Le cinquième chapitre est consacré pour présenter les composants optoélectroniques.

J'espère que ce modeste travail sera utile et bénéfique à tous ceux qui ont à apprendre où à enseigner le module Electronique des Composants.

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA PHYSIQUE DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES

I-1.	Matériaux en électronique	1
I-2.	Champ électrique et différence de potentiel.....	1
I-3.	Courant électrique.....	2
I-5.	Association de dipôles.....	5
I-6.	Conventions de signe	5
I-7.	Dipôles élémentaires actifs.....	6

CHAPITRE II : CONDUCTION ELECTRIQUE DANS LES SOLIDES

II-1.	Rappels sur les conducteurs, isolants et semi-conducteurs.....	9
II-2.	Structure de bande dans les solides.....	9
II-3.	Définition d'un semi-conducteur.....	11
II-4.	Différents types de semi-conducteurs.....	12
II-5.	Les porteurs de charge électrique et leur déplacement	14
II-6.	Densité de courant.....	15
II-7.	Définition de quelques paramètres.....	17
II-8.	Paramètres influant.....	17
II-9.	Jonction <i>PN</i>	18

CHAPITRE III : LES COMPOSANTS PASSIFS

III-1.	Introduction.....	22
III-2.	Les résistances.....	22
III-3.	Les condensateurs.....	30
III-4.	Les bobines.....	37

CHAPITRE IV : LES COMPOSANTS ACTIFS

IV -1.	Notions sur les semi-conducteurs.....	41
IV-2.	La diode à jonction.....	42
IV-3.	La diode Zener.....	48
IV-4.	Diodes Schottky (Schottky barrier diodes).....	50
IV-5.	Transistors	51

CHAPITRE V : LES COMPOSANTS OPTOELECTRONIQUES

V-1.	Introduction	62
V-2.	Diodes électroluminescentes (Light-Emitting Diodes ou LED)	63
V-3.	Diodes Lasers	68
V-4.	Photodiodes	77
V-5.	Cellule solaire Photovoltaïque	84
Bibliographies		91

CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA PHYSIQUE DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES

I-1. Matériaux en électronique

De point de vue de leur conductivité électrique, les corps se subdivisent essentiellement en 3 groupes :

- **Les conducteurs** : Matériaux dans lesquels un champ électrique 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 électron dépend du matériau : par exemple pour le cuivre on a 10^{28} électron/m³.
- **Les isolants** : Pas d'électron libre. La qualité de l'isolant dépend de la pureté du matériau.
- **Les semi-conducteurs** : La concentration en électron dépend du matériau et de la température. Les électrons sont disposés dans les bandes permises séparées par des bandes dites interdites. Les semi-conducteurs sont des matériaux qui ont une conductivité électrique intermédiaire entre celle des isolants et celle des conducteurs.

I-2. Champ électrique et différence de potentiel

Si on applique une différence de potentiel $V_{AB} = V_A - V_B$ entre deux point 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 :

$$V_{AB} = V_A - V_B = \int_A^B \vec{E} \cdot \vec{dr} \quad (\text{I-1})$$

V s'exprime en volt et le champ électrique $\|\vec{E}\|$ en V/m .

I-3. Courant électrique

Un courant électrique est un déplacement d'ensemble donné de charges électriques dans un conducteur. On le caractérise par une grandeur, l'intensité définie comme étant le débit de charges électriques dans le conducteur est donnée par la relation :

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

I s'exprime en Ampère.

Par convention le sens du courant est le sens contraire du déplacement des électrons.

I-4. Lois fondamentales

Un réseau ou circuit électrique est un ensemble de conducteurs reliant entre eux des éléments appelés composants : résistance, condensateurs, bobines,....etc.

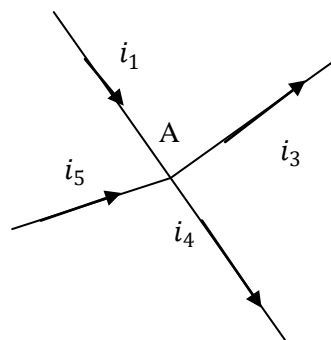
Dans un réseau électrique, on distingue :

- Le nœud : point de raccordement entre au moins 3 conducteurs.
- La branche : portion du réseau compris entre deux nœuds.
- La maille : partie du réseau qui se ferme sur elle-même.

1-4-1. Loi des nœuds

En tout nœud d'un circuit, et à tout instant, la somme algébrique des courants est nulle :

$$\sum_k i_k = 0 \quad (\text{I-3})$$



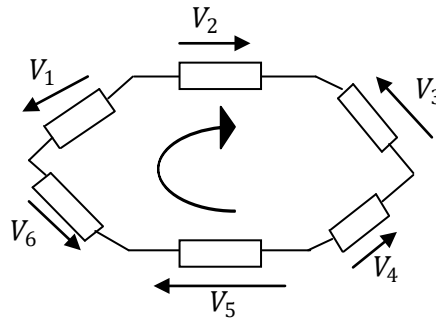
$$i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0$$

1-4-2. La loi des mailles

La somme algébrique des chutes de tension instantanée le long d'un circuit fermé est nulle.

On choisit un sens de parcours dans la maille :

$$\sum V = 0 \quad (\text{I-4})$$

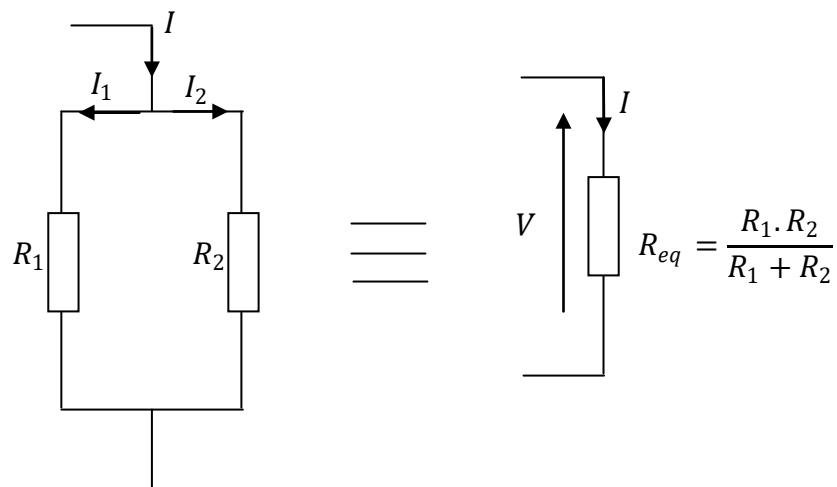


$$-V_1 + V_2 - V_3 - V_4 + V_5 - V_6 = 0$$

Remarque : En général, on prend comme référence le sens de parcours du courant.

I-4-3. 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 deux impédances en parallèle, qui sont donc soumises à la même tension, il est possible de calculer le courant qui parcourt une des deux impédances.



$$I = I_1 + I_2$$

$$V = R_1 \cdot I_1 = R_2 \cdot I_2 = R_{eq} \cdot I = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot I$$

On déduit :

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I \quad (\text{I-5a})$$

et

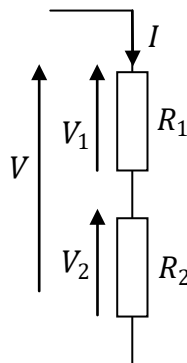
$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I \quad (\text{I-5b})$$

Remarque :

Le diviseur de courant n'est appliqué que sur des composants passifs (résistance, inductance et condensateur).

I-4-4. Diviseur de tension

On aura un montage série



$$V = (R_1 + R_2) \cdot I \Rightarrow I = \frac{V}{R_1 + R_2}$$

$$V_2 = R_2 \cdot I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V$$

Alors

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V \quad (\text{I-6a})$$

et

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V \quad (\text{I-6b})$$

I-5. Association de dipôles

On distingue deux types d'associations de dipôles. Les dipôles peuvent être connectés en série, ils sont alors tous traversés par la même intensité. Ils peuvent être connectés en parallèle, ils sont alors tous soumis à la même tension.

- **Association en série**

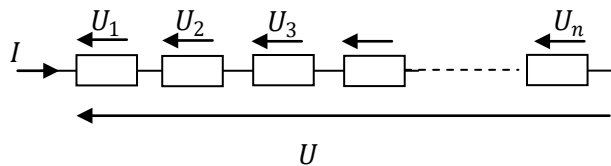


Fig I-1. Association en série des dipôles

Chaque dipôle est traversé par la même intensité aux bornes du dipôle équivalent est égale à la somme des tensions partielles :

$$U(t) = \sum_{k=1}^n U_k \quad (\text{I-7})$$

- **Association en parallèle**

Les dipôles sont soumis à la même tension. Le courant total qui traverse l'ensemble des dipôles est égal à la somme des courants individuels.

$$I(t) = \sum_{k=1}^n I_k \quad (\text{I-8})$$

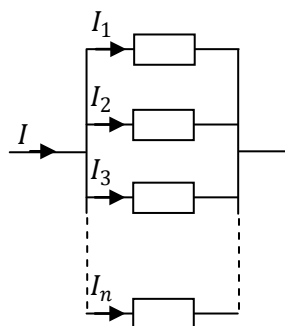


Fig I-2. Association en parallèle des dipôles

I-6. Conventions de signe

Les conventions de signe admises pour représenter la tension aux bornes d'un dipôle et le courant y circulant font la différence entre un générateur et récepteur.

- **Convention générateur**

Un dipôle générateur lorsqu'il fournit de l'énergie au circuit sur lequel est connecté.

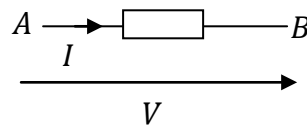


Fig I-3. Dipôle générateur

- **Convention récepteur**

Un dipôle est un récepteur quand il consomme de l'énergie (fourni par le circuit sur lequel il est connecté). Dans ce cas, le courant et la tension sont orientés en sens inverse.

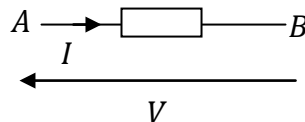


Fig I-4. Dipôle récepteur

I-7. Dipôles élémentaires actifs

Un dipôle actif est un dipôle qui contient au moins une source

- ❖ **La source de tension idéale :** Un générateur (source) de tension continue supposé idéal est un générateur qui fournit entre ses bornes, une différence de potentiel constante quelle que soit l'intensité du courant qui le traverse, où en d'autre terme quelle que soit la charge à ses bornes, à condition que cette charge ne soit pas nulle.

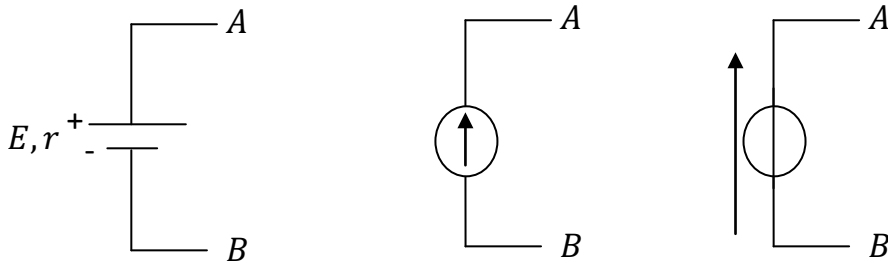
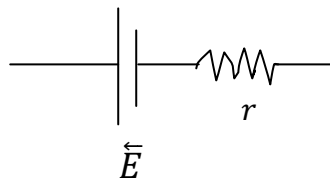


Fig I-5. Différents symboles pour une source de tension

Par convention, le courant circule de + vers - à l'extérieur de la source et de - vers + à l'intérieur de la source.

E : force électromotrice et r : la résistance interne.



Remarques

- E : f.e.m est dirigé du + vers - pour le générateur.
- Un générateur de tension ne peut maintenir une tension constante sans dissiper d'énergie.
- Une source de tension peut fonctionner en générateur comme elle fonctionne en récepteur.

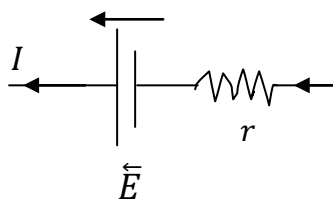


Fig I-6a. Générateur réel

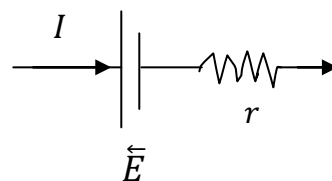


Fig I-6b. Récepteur réel

❖ Source de courant idéale

Un générateur (source) de courant continu supposé idéal est un générateur fixant l'intensité du courant électrique I_g qui le traverse quelle que soit la différence de potentiel U à ses bornes, autrement dit quelle que soit la charge à ses bornes, à condition que cette charge ne soit pas infinie.

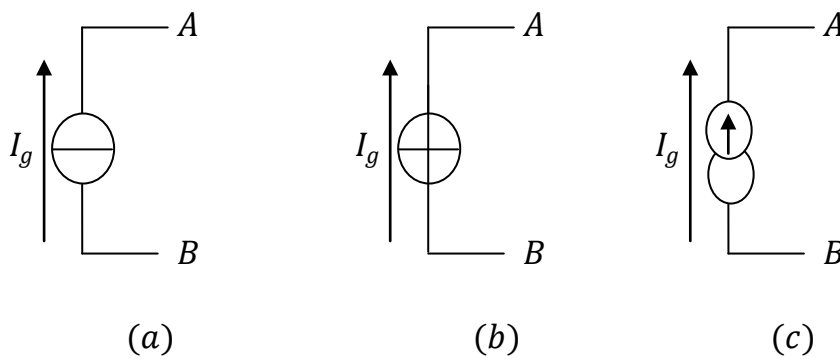
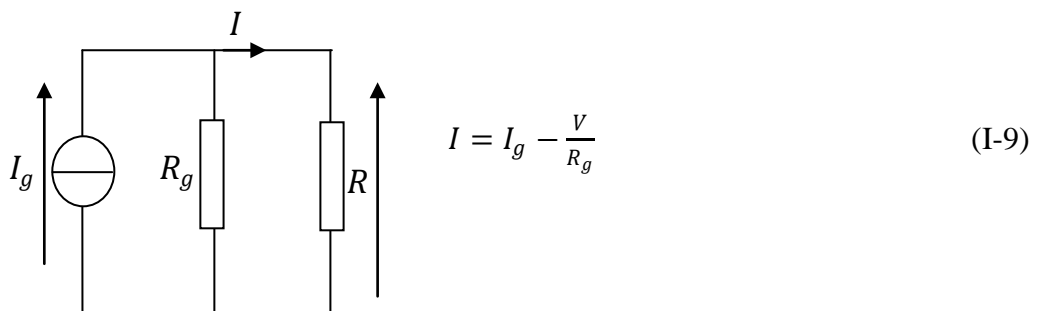


Fig I-7. Différents symboles pour une source de courant

Remarque

Un générateur de courant réel présente toujours une résistance de fuite de courant. Cette résistance R_g est montée en parallèle avec le générateur idéal. Le courant total I qui traverse le dipôle est égal à la somme algébrique du courant dans la résistance interne R_g et du courant I_g fourni par le générateur.



CHAPITRE II : CONDUCTION ELECTRIQUE DANS LES SOLIDES

II-1. Rappels sur les conducteurs, isolants et semi-conducteurs

- ✓ Certains corps possèdent la propriété de permettre le passage de charges électriques, ce sont les conducteurs, alors que d'autres l'interdisent, ce sont les isolants. La notion de conducteurs a déjà été donnée : un conducteur est un corps à l'intérieur duquel des charges électriques peuvent se déplacer librement sous l'action d'une force aussi petite soit-elle. On dit encore qu'un conducteur contient des porteurs de charge, c'est à dire des particules ou groupements de particules chargées, susceptibles de se déplacer en transportant de l'électricité.
- ✓ Dans les solides, l'échelle des conductivités permet de classer les différents matériaux. Les meilleurs conducteurs sont les métaux dans lesquels σ est supérieur à $10^4 S.m^{-1}$, à température ambiante. Les semi-conducteurs, comme le germanium ou le silicium, sont des matériaux de conductivité plus faible : $10^{-6} < \sigma < 10^4 S.m^{-1}$. En les meilleurs isolants sont certains verres ou matières plastiques pour lesquels la conductivité est inférieure à $10^{-6} S.m^{-1}$.

Remarque

Si cette classification des matériaux est établie sur la base des valeurs de la conductivité (résistivité), il est nécessaire de donner une explication physique des différences de conductivité entre les différents types de matériaux. Ceci n'est réalisable qu'à l'aide de la théorie des bandes d'énergie (structure des bandes).

II-2. Structure de bande dans les solides

Un solide peut être décrit comme un ensemble rigide d'atomes, dont la stabilité est assurée par des liaisons. Si les matériaux sont constitués d'un seul élément chimique, comme le cuivre ou le silicium, ces liaisons sont soit métalliques soit covalentes. Ces deux types de liaisons correspondent aux deux catégories principales de solides, relativement à la conduction électrique : les conducteurs et les isolants.

Dans un isolant, tous les électrons des couches atomiques externes sont liés. Dans un métal, certains électrons sont libres d'évoluer dans le réseau, assurant ainsi la conduction électrique. L'énergie des électrons d'un atome est quantifiée. Dans un solide, les interactions entre les atomes font que les niveaux d'énergie se rassemblent et forment des bandes d'énergie : la différence entre les niveaux est si faible que l'on peut considérer que l'énergie évolue de façon continue. Mais, entre différentes bandes d'énergie existe un large domaine d'énergies interdites appelé gap (saut en anglais).

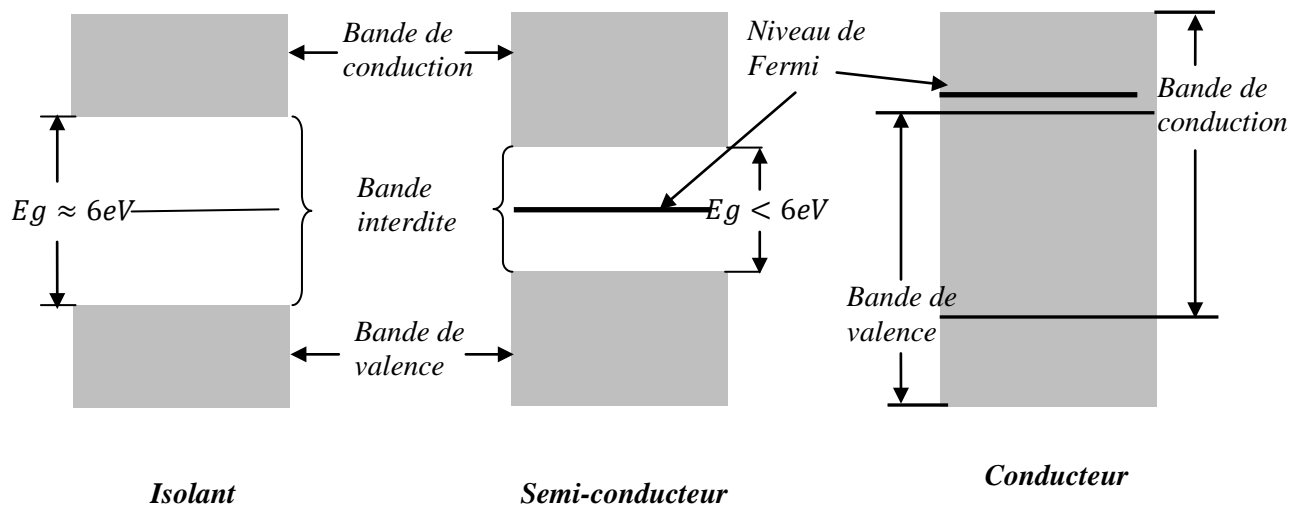


Fig II-1. Diagramme de bandes d'énergie des matériaux : Isolant, Semi-conducteur et Conducteur

La répartition des électrons sur les niveaux d'énergie satisfait au principe d'exclusion de Pauli et suit une loi de répartition statistique. A basse température (proche de 0 K), seuls les niveaux d'énergie inférieure à une certaine valeur E_F appelée énergie de Fermi sont occupés. La distinction entre isolant et conducteur n'est finalement liée qu'à la position du niveau de Fermi dans le diagramme énergétique des bandes (Fig II-1).

Le semi conducteur ne se distingue de l'isolant que par la largeur réduite de sa bande interdite.

	Ge	Si	GaAs	Diamant	Silice
$E_g(\text{eV})$	0.67	1.14	1.43	5.4	10

Dans un métal, l'influence de la température sur la répartition des électrons reste faible, alors qu'elle est spectaculaire, pour un semi conducteur : d'isolant parfait à 0K il devient conducteur à température ambiante. L'énergie nécessaire pour casser la liaison et crée de paire électron-trou et franchir le gap est fournie par l'agitation thermique. L'énergie d'agitation thermique étant de quelques dizaines de meV, à température ambiante, les propriétés semi-conductrices ne sont observées que pour des matériaux dont la largeur de bande interdite est faible (autour de 1 eV). Pour de plus grandes largeurs de bande interdite (plusieurs eV), le matériau reste isolant à température ambiante.

Pour les métaux, l'agitation thermique désordonnée va contrarier le déplacement d'ensemble des électrons sous l'effet du champ électrique appliqué, donc la résistivité croît en conséquence.

II-3. Définition d'un semi-conducteur

Les semi-conducteurs utilisés dans la fabrication des diodes et transistors sont des corps solides qui ont des propriétés intermédiaires entre celles des conducteurs et celles des isolants à la température ordinaire (25°C). Aux très basses fréquences se comportent comme des isolants et aux températures élevées comme des conducteurs.

Etudions la structure d'un semi-conducteur : Silicium

L'atome Si a quatre électrons sur la couche externe et pour se mettre à l'état stable ; il forme quatre liens covalents avec les 04 atomes qui l'entourent.

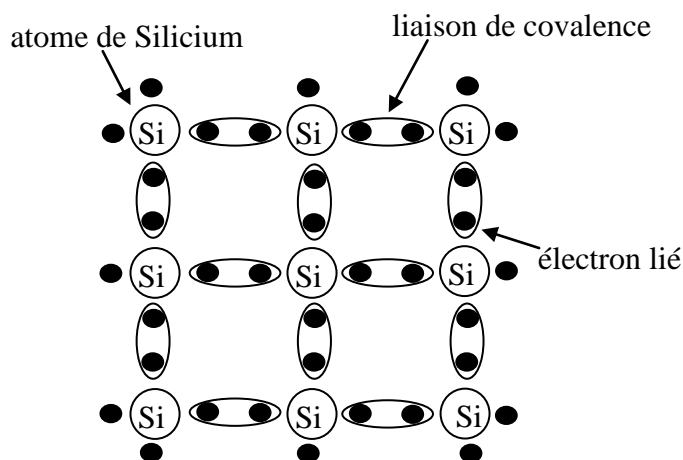


Fig II-2. Cristal de Silicium à $T=0^{\circ}\text{K}$.

II-4. Différents types de semi-conducteurs

II-4-1. Semi-conducteur intrinsèque (purs)

- Les semi-conducteurs purs sont des solides cristallisés : les atomes sont régulièrement disposés dans l'espace, ils forment un cristal. Dans le cas du Silicium (Si), chaque atome possède quatre électrons de valence qu'il met en commun avec les quatre atomes voisins → Liaisons entre atomes assurant la rigidité du cristal.
- 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 II-3.).

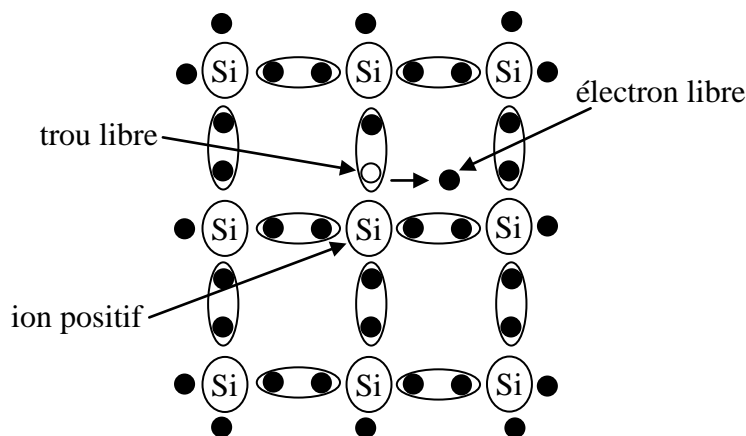


Fig II-3. Création d'une paire électron-trou par rupture d'une liaison de covalence sous l'effet de la température.

II-4-2. Semi-conducteurs de type N et P

- Dopage :** Les conductibilités du silicium et du germanium peuvent être augmentées de façon sévère et contrôlées par l'addition d'impuretés dans le semi-conducteur intrinsèque (pur). Ce procédé, appelé dopage, augmente le nombre de porteurs de courant (électrons et trous). Les catégories d'impuretés sont de type N et de P.

b. Semi-conducteurs de type N

Pour augmenter le nombre d'électrons de la bande de conduction dans un silicium intrinsèque, on ajoute des atomes d'impureté pentavalents. Ce sont des atomes avec cinq électrons de valence, tels l'arsenic (As), le phosphore (P), le bismuth (Bi) et l'antimoine (Sb). Dans un semi-conducteur de type N, les électrons libres sont majoritaires alors que les trous sont minoritaires.

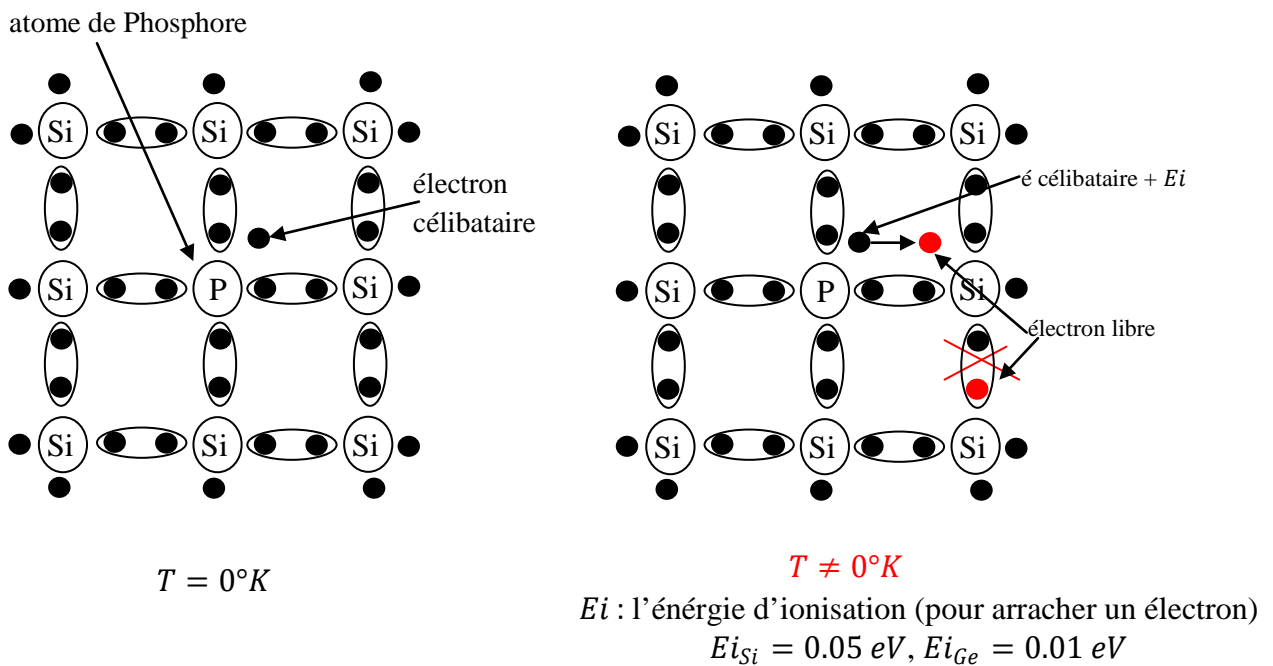


Fig II-4. Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de Phosphore

c. Semi-conducteur de type P

Pour augmenter le nombre de trous dans un silicium intrinsèque, on ajoute des atomes d'impureté trivalents. Ce sont des atomes avec trois électrons de valence, tels que l'aluminium (Al), le bore (B) et le gallium (Ga). Le nombre de trou peut être contrôlé par la quantité d'impureté trivalente ajoutée au silicium. Un trou créé par cette méthode de dopage n'est pas accompagné d'un électron de conduction (libre). Dans un semi-conducteur de types P, les trous sont majoritaires et les électrons sont minoritaires.

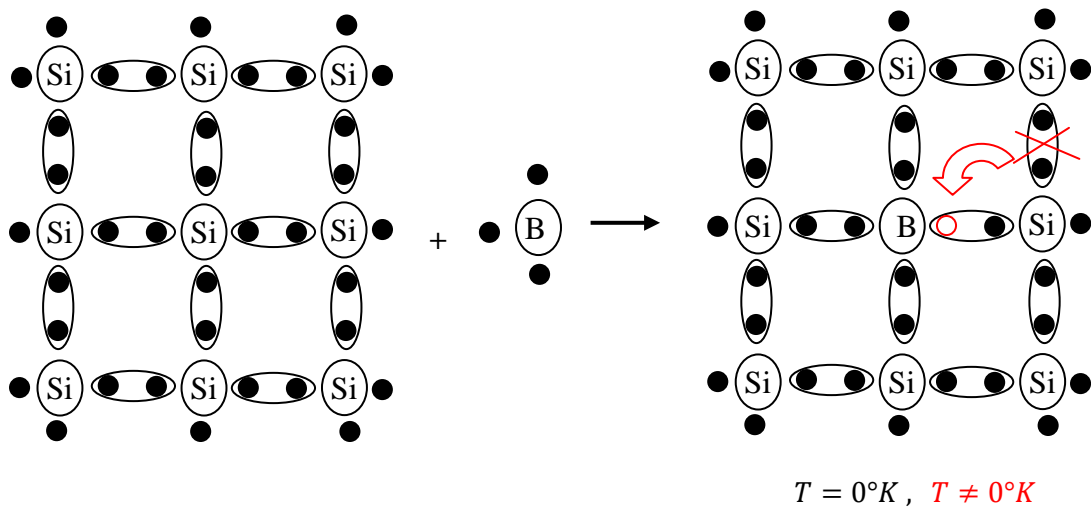


Fig II-5. Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de Bore.

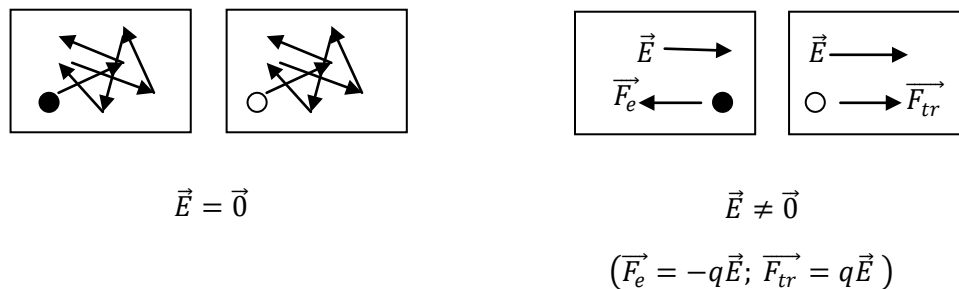
II-5. Les porteurs de charge électrique et leur déplacement (mécanisme de conduction)

Dans les métaux, la conduction est assurée par les électrons, porteurs dotés d'une charge négative : $q_e = -1,6 \cdot 10^{19} C$

Dans les semi-conducteurs existent d'autres porteurs de charges, appelées « trous », dotés d'une charge positive : $q_{tr} = +1,6 \cdot 10^{19} C$

On note n la densité d'électrons (nombre d'électrons de conduction par unité de volume) et p la densité de trous.

Lorsque un champ électrique existe est établi dans un cristal semi-conducteur où conducteur, au mouvement désordonné d'agitation thermique des porteurs mobiles se superpose un mouvement de dérive dans le sens du champ pour les trous et dans le sens contraire pour les électrons.



En présence d'un champ électrique, le « gaz d'électron libres » (trous) acquiert une vitesse moyenne d'entraînement (appelée parfois de dérive). v_n (v_p) c'est la valeur moyenne de la composante de vitesse acquise par les électrons libres dans la direction opposée au champ électrique E (dans la même direction de E pour les trous).

Ceci est exprimé dans un semi-conducteur par les relations suivantes :

$$v_n = -\mu_n \cdot E \quad (\text{II-1a})$$

$$v_p = \mu_p \cdot E \quad (\text{II-2a})$$

On appelle mobilité μ_n pour les électrons et μ_p pour les trous le rapport des vitesses moyennes par rapport à l'intensité du champ électrique.

Remarque

$\mu_p > 0$ pour un trou, $\mu_n < 0$ pour un électron et $\mu_p < -\mu_n$.

Dans le cuivre : $-\mu_n = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}$

Dans le germanium : $-\mu_n = 0,39 \text{ m}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}$ et $\mu_p = 0,19 \text{ m}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}$

II-6. Densité de courant

II-6-1. Dans un métal

Soit dQ la charge qui traverse une section droite du conducteur pendant un intervalle de temps dt infiniment petit.

$$dQ = qnsvdt \quad (\text{II-2})$$

q : charge de l'électron

n : la concentration en électrons par unité de volume

s : section du conducteur

v : vitesse d'écoulement

Par définition l'intensité de courant est donnée par :

$$\vec{I} = \frac{dQ}{dt} = qns\vec{v} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \vec{I} = \frac{dQ}{dt} = qns\vec{v} \\ \vec{v} = \mu\vec{E} \end{cases} \Rightarrow \vec{I} = qns\mu\vec{E} \quad (\text{II-3})$$

Si on définit la densité de courant dans le conducteur par la relation :

$$\vec{J} = \frac{\vec{I}}{s} \Rightarrow \vec{J} = qn\mu\vec{E} \quad (\text{II-4})$$

Et on tire que : $\vec{J} = \sigma\vec{E}$

Le coefficient σ dépend de n et μ du matériau, est appelé conductivité s'exprime en $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$, en inverse ρ est appelé résistivité du conducteur s'exprime en $\Omega \cdot m$

II-6-2. Dans un semi-conducteur

Les densités de courant de conduction J_{nc} d'électrons et J_{pc} des trous :

$$\vec{J}_{nc} = -qn\vec{v}_n = qn\mu_n\vec{E} \quad (\text{II-5a})$$

(A/cm^2)

$$\vec{J}_{pc} = qp\vec{v}_p = qp\mu_p\vec{E} \quad (\text{II-5b})$$

La densité de courant totale de conduction dans un semi-conducteur $\vec{J}_c = \vec{J}_n + \vec{J}_p$

$$\vec{J}_c = q \underbrace{(n\mu_n + p\mu_p)}_{\sigma} \vec{E} \Rightarrow \vec{J}_c = \sigma\vec{E} \quad (\text{II-6a})$$

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (\text{II-6b})$$

$$[\sigma] = \Omega^{-1}m^{-1}$$

II-7. Définition de quelques paramètres

❖ Conductivité

La conductivité est un paramètre qui indique la faculté de conduction de courant électrique d'un matériau, plus elle est grande plus le matériau est un bon conducteur de courant, est noté par σ .

❖ Résistivité

La résistivité est l'inverse de la conductivité, c'est un paramètre qui indique le pouvoir isolant du matériau. Plus la résistivité est élevée plus le matériau est isolant.

❖ Mobilité

La mobilité est un paramètre qui rend compte de l'inertie du réseau cristallin ou des frottements qu'exerce ce réseau sur les électrons et sur les trous. C'est une constante pour un matériau donné à une température donnée. Elle est noté par μ .

II-8. Paramètres influant

Les paramètres influant sur la conductivité d'un matériau peuvent être :

- La température : Pour un conducteur, lorsque T augmente, les vibrations du réseau augmentent, les collisions électrons-phonons augmentent, la vitesse des porteurs v diminue et au final, σ diminue. Pour un semi-conducteur, lorsque T augmente, la vitesse des porteurs v diminue aussi, mais surtout n augmente (franchissement du gap par les e⁻) et au final, σ augmente.
- Les impuretés : la présence d'atomes étrangers dans le réseau d'un semi-conducteur rompt la symétrie de translation du cristal et donc diminue la mobilité des porteurs : v et σ diminuent pour un porteur. Pour un semi-conducteur, certains types d'impuretés permettent d'augmenter n : c'est le dopage.

II-9. Jonction PN

II-9-1. Définition

La jonction PN est physiquement la juxtaposition de deux régions dopées différemment dans un même cristal semi-conducteur. La zone frontière de passage de la région de type N à la région de type P s'appelle la jonction métallurgique.

II-9-2. Jonction PN à l'équilibre

On faisant la jonction entre les deux semi-conducteurs :

- Les électrons libres beaucoup plus nombreux du côté *N* diffusent vers la région *P* laissant les atomes donneurs ionisés positivement et les trous majoritaires du côté *P* diffusent vers la région *N* laissant les atomes accepteurs ionisés négativement.
- La région *N* se charge donc positivement et la région *P* négativement, il apparait donc dans la jonction une différence de potentiel de contacte et un champ électrique élevé ne laissant passer que les porteurs d'énergie suffisante.
- Les électrons libres arrivent dans la région *P* se recombinent avec les trous et disparaissent les deux (é et trous), il apparait au niveau de la jonction une zone dépeuplée de porteurs appelée **zone de transition** ou **ZCE**.
- Le champ électrique élevé régnant dans la ZCE s'oppose au passage des majoritaires de la région *N* vers *P* pour les électrons et de la région *P* vers *N* pour les trous, seul les électrons et les trous qui ont une énergie suffisante parviennent à surmonter la barrière de potentiel.
- La jonction PN exerce sur un électron qu'il aborde une force dirigée de *P* vers *N*.
Si cet électron provient :
 - Du semi-conducteur de type *N* où il est majoritaire, il sera donc renvoyé et ne pourra pas franchir la barrière sauf si son énergie est suffisante.

- Du semi-conducteur de type P où il est minoritaire, il sera propulsé dans le semi-conducteur de type N , de même la jonction PN s'oppose au passage des trous qui tendent à remonter la barrière de potentiel.
- Toute fois un équilibre s'établit le niveau de Fermi des deux semi-conducteurs devient identique.
- Si aucune tension extérieure, ni perturbation appliquée à la jonction, le courant total est nul.

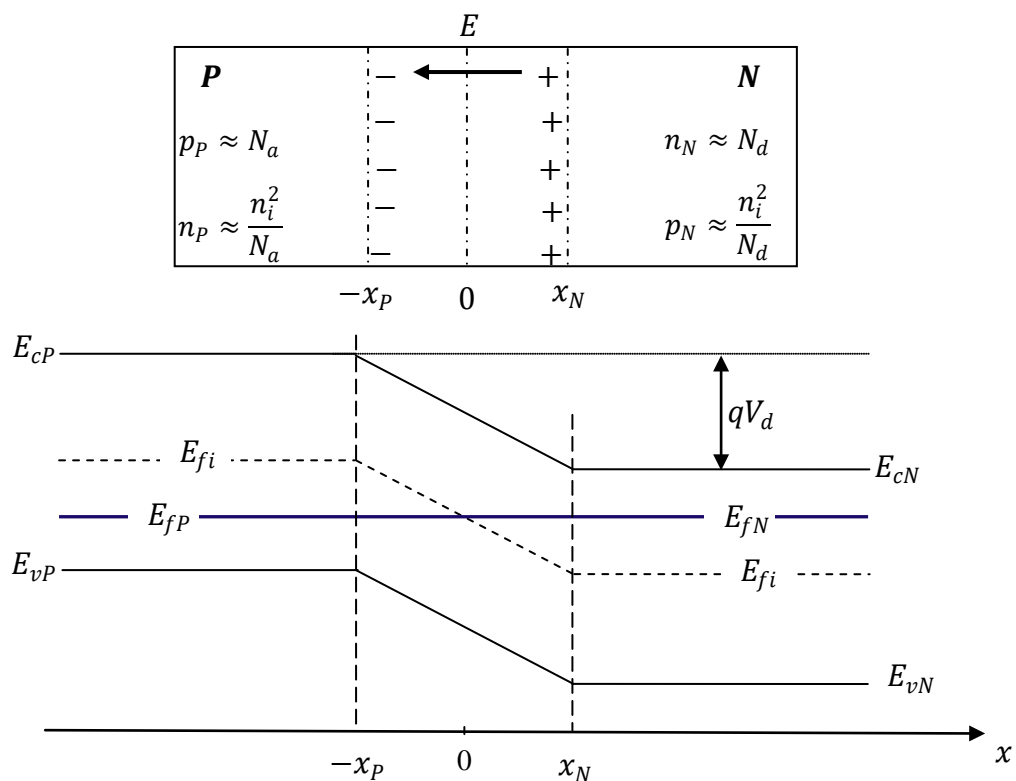


Fig II-6. Jonction PN à l'équilibre thermodynamique.

II-9-3. Jonction PN polarisée

Appliquons entre les extrémités de la jonction PN en équilibre une différence de potentiel.

II-9-3-1. Jonction PN polarisée en direct

Considérons le diagramme énergétique d'une jonction PN à l'équilibre thermique et lorsqu'on polarise la région P positivement par rapport à la région N sous une tension V .

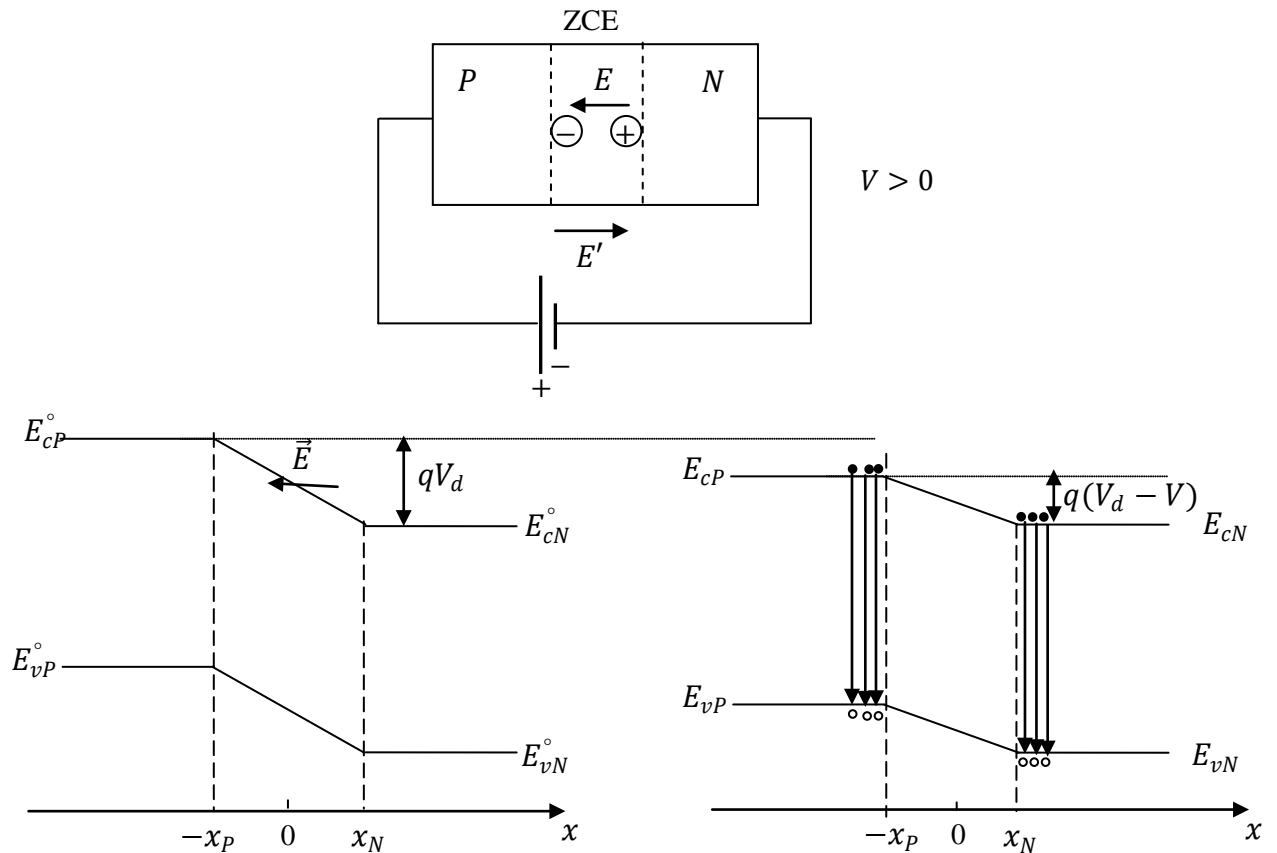


Fig II-7. Jonction PN polarisée en direct.

Le fait de polariser la jonction sous une tension V_{direct} réduit la hauteur de barrière qui devient $V_d - V_{direct}$ entraînant une diminution de l'épaisseur de la ZCE et le champ électrique. Ce champ est maintenant incapable de s'opposer aux tendances à la diffusion des électrons de N vers P et de trous de P vers N .

De nombreux électrons de la région N et de trous de la région P peuvent franchir cette barrière de potentiel. Il y a injection d'électrons de N vers P . Les électrons injectés diffusent dans P où ils se recombinent avec les nombreux trous qu'y sont présents. Cette recombinaison consomme près de la ZCE des trous dans la région P (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 dans la jonction.

II-9-3-2. Jonction PN polarisée en inverse

Considérons le diagramme énergétique d'une jonction PN à l'équilibre thermique et lorsqu'on polarise la région P négativement par rapport à la région N .

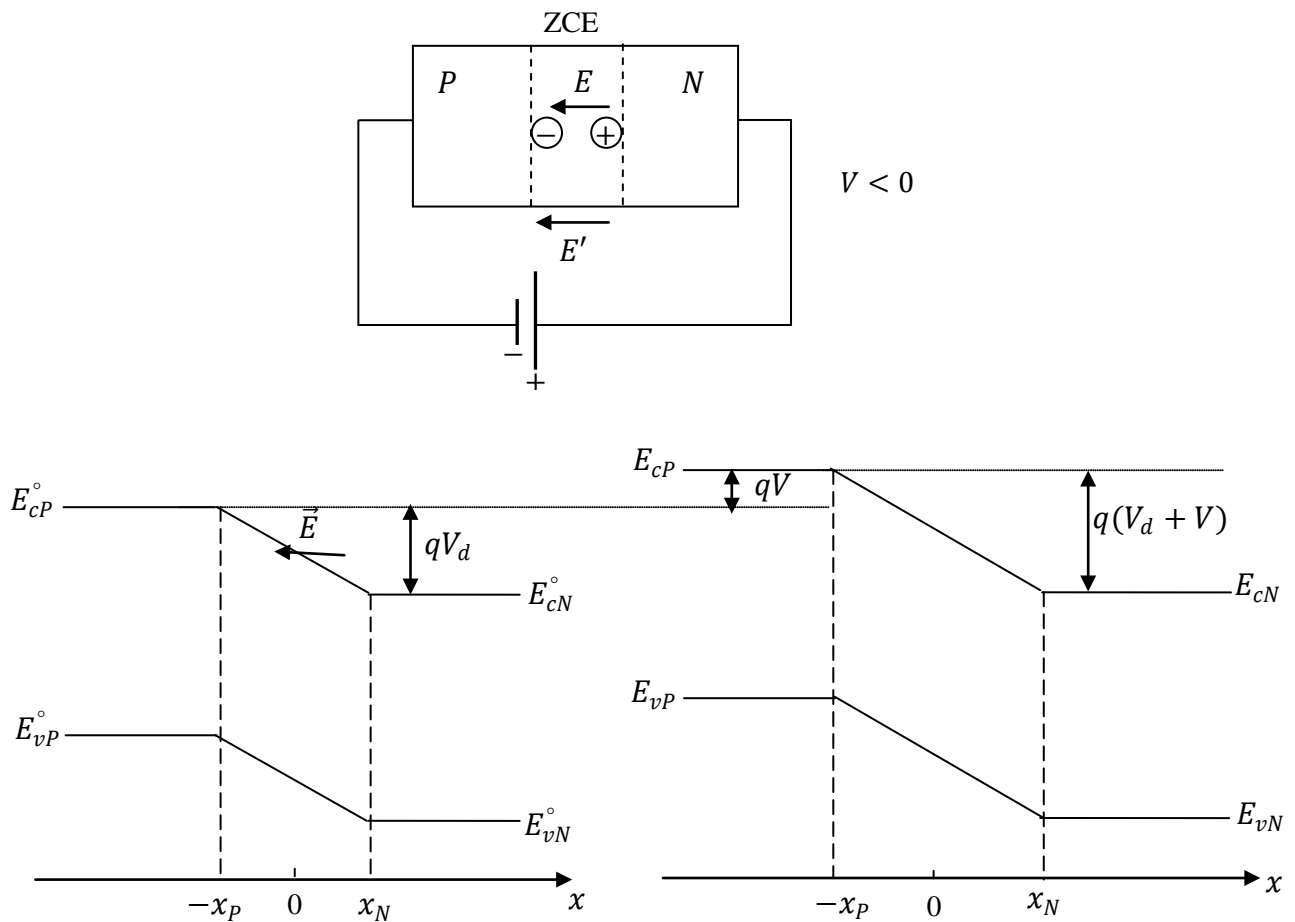


Fig II-8. Jonction PN polarisée en inverse.

La hauteur de barrière entre la région P et N est renforcée par la tension extérieure appliquée et devient $V_d + V_{inv}$. Le champ électrique interdit maintenant toute diffusion d'électrons de N vers P où de trous de P vers N .

CHAPITRE III : LES COMPOSANTS PASSIFS

III-1. Introduction

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.
- ✓ **Bobine idéale** : L'énergie absorbée par une bobine est stockée sous la forme d'énergie magnétique.
- ✓ **Condensateur idéal** : L'énergie absorbée par un condensateur est stockée sous forme d'énergie électrique.

Cependant, en pratique, la technologie ne permet pas de fabriquer des composants parfaits. C'est pour ça, qu'il est essentiel de bien connaître la technologie des composants électroniques passifs et leurs modèles pour les utiliser à bon escient.

III-2. Les résistances

Une résistance est constituée de matériau ayant une forte résistivité. Elle s'oppose au passage du courant dans un circuit électrique.

On l'utilisera en général pour limiter le courant dans un circuit. Le passage de ce courant provoque un échauffement de la résistance. Sa caractéristique est nommée **la résistance (R)**. Elle s'exprime en **Ohms** et se mesure soit avec un **ohmmètre** soit à l'aide du **code couleur**.

III-2-1. Résistance d'un conducteur

A une température donnée, la résistance d'un conducteur dépend de sa résistivité et de ses dimensions.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad (\text{III-1})$$

R : résistance du conducteur en Ω

L : la longueur du conducteur en mètre

S : section en m^2 et ρ : résistivité en $\Omega \cdot m$

Le facteur ρ qu'on appelle résistivité est précisément ce qui caractérise l'opposition plus ou moins grande qu'offre un conducteur au passage du courant.

III-2-2. Variation de la résistivité avec la température

Lorsque la température d'un conducteur augmente l'agitation de ses atomes s'accroît. L'opposition au déplacement des électrons (courant) augmente parce que les collisions entre les électrons entre les électrons et les atomes se multiplient. C'est ce qu'explique l'augmentation de la résistivité des métaux conducteurs avec la température.

Cette variation obéit à la formule suivante :

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t) \quad (\text{III-2})$$

ρ_t : la résistivité à une température t ($\Omega \cdot m$)

ρ_0 : la résistivité à $T = 0^\circ C$

α : coefficient de température en $1/^\circ C$

t : température $^\circ C$

Conducteur	Résistivité à $0^\circ C$ ($n\Omega \cdot m$)	Coefficient de température ($1/^\circ C$)
Argent	15.0	0.00411
Cuivre	15.9	0.00427
Aluminium	26.0	0.00439

Tableau III-1. Résistivité des conducteurs

Puisque la résistivité varie avec la température, il s'ensuit que la résistance varie en proportion.

On peut donc exprimer la variation de la résistance par la formule :

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (\text{III-3})$$

R_t : la résistivité à une température t ($\Omega \cdot m$)

R_0 : la résistivité à $T = 0^\circ C$

α : coefficient de température en $1/^\circ C$, t : température $^\circ C$

III-2-3. 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 récepteur pour caractériser une résistance (le courant va dans le sens des potentiels décroissants).

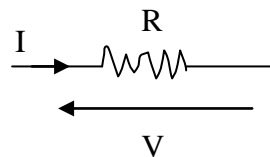


Fig III-1. Symbolisation d'une résistance

III-2-4. La loi d'Ohm (caractérise une résistance parfaite) :

Il s'agit d'une relation entre la tension et le courant qui caractérise le comportement d'une résistance.

La loi d'Ohm s'écrit :

$$V = R \cdot I \quad (\text{III-4})$$

On a aussi : $R = \frac{V}{I}$ et $G = \frac{1}{R}$

R : résistance en Ohm [Ω]

I : courant en Ampère [A]

V : tension en Volt [V]

G : conductance en Siemens [S ou $1/\Omega$]

III-2-5. La puissance dissipée dans une résistance parfaite

Les chocs des électrons dans le conducteur, libèrent une énergie qui est transformée en chaleur.

La puissance dissipée sous forme de chaleur est :

$$P = V \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{V^2}{R} \quad (\text{III-5})$$

P : puissance en watt [W]

Par conséquent, l'énergie dissipée est donnée par :

$$W = P \cdot t \quad (\text{III-6})$$

W : exprimé en joule.

Les dimensions des résistances sont déterminées par la puissance qu'elles doivent dissiper.

C'est ainsi qu'on classe les résistances :

- Les résistances de faible puissance vont de 0.1 à 1W, les plus courants sont de 1/2W.
- Les résistances de puissance vont 1W à 100W (au dessus, ce sont des résistances de grande puissance).

III-2-6. Modèle électrique des résistances réelles

Il n'existe pas de technologie qui permettant de réaliser une résistance parfaite. Le modèle équivalent d'une résistance réelle est le suivant :

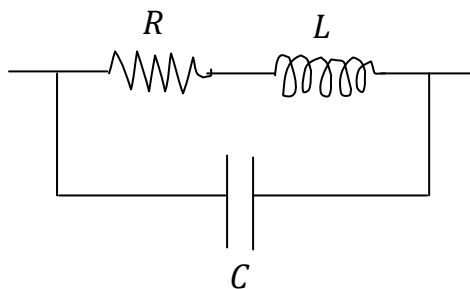
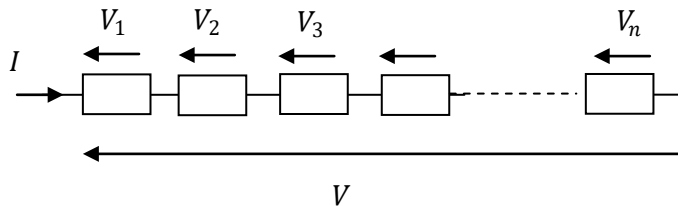


Fig III-2. Modèle d'une résistance réelle

III-2-7. Associations des résistances

a) Association en série

Dans un circuit électrique, deux dipôles sont dits montés en série s'ils sont traversés par le même courant.

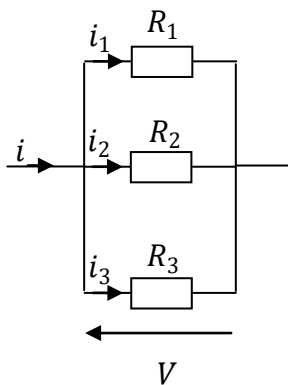


$$V = V_1 + V_2 + V_3 = R_1 I + R_2 I + R_3 I = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot I = R_{eq} I$$

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^n R_i \quad (\text{III-7})$$

b) Association en parallèle

Deux dipôles sont dits montés en parallèle s'ils sont soumis à la même tension.



$$i_1 = \frac{V}{R_1}, \quad i_2 = \frac{V}{R_2}, \quad i_3 = \frac{V}{R_3}$$

$$i = i_1 + i_2 + i_3 = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \cdot V = \frac{V}{R_{eq}}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \quad (\text{III-8})$$

III-2-8. Les différents types de résistances

On trouve de nombreux types, différents par leur structure, leur forme, leur caractéristique, selon la technique de fabrication adoptée et l'emploi auquel elles sont destinées :

a) Résistances fixée

Ces résistances possèdent une valeur déterminée et se présentent sous trois types :

- ✓ **Résistance au carbone aggloméré** : sont petites et plus utilisées en raison de leur prix, elles ne sont pas stables.
- ✓ **Résistance à couche** : peuvent être soit au carbone, soit à film métallique. Elles ont une bonne stabilité.
- ✓ **Résistances bobinées** : puissance dissipée élevée ($\geq 3W$).

b) Résistances variables

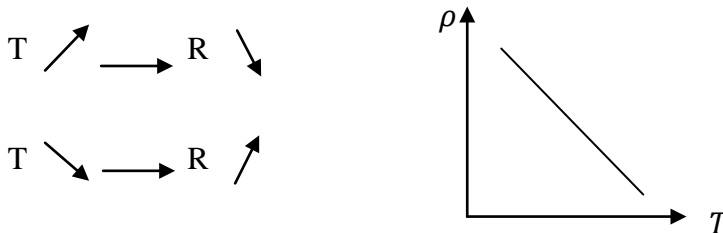
Les différents types des résistances variables sont comme suit :

- ✓ Résistances variables {
 - Réglables
 - Potentiomètres

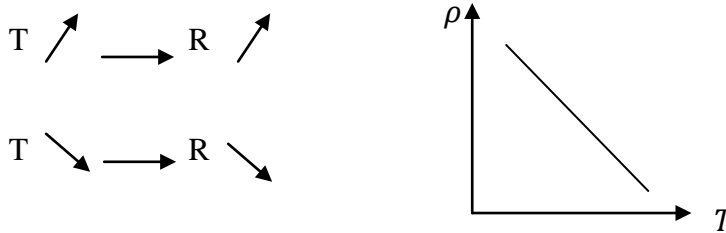
- ✓ Résistances spéciales {
 - CTN, CTP
 - VDR

CTN, CTP (thermistance) : résistances varie avec la température

CTN : coefficient de température négatif



CTP : coefficient de température positif



VDR (Varistance) : Ce sont des résistances dont la valeur ohmique varie en fonction de la tension à ses bornes.

III-2-9. Les caractéristiques publiées par les constructeurs

Chaque fabricant donne des spécifications techniques pour ses résistances.

- **Résistance nominale** : C'est la valeur indiquée sur le corps de la résistance.
- **Tolérance** : C'est un pourcentage, en plus ou en moins autour de la valeur nominale, que le fournisseur s'engage à respecter.
- **Puissance nominale (Pn)** : C'est la puissance que peut dissiper la résistance dans l'air en convection naturelle (sans ventilation) à T comprise entre 20°C et 70°C et pression atmosphérique.
- **Tension maximale aux bornes** : C'est la tension aux bornes de la résistance à ne pas dépasser $V = \sqrt{P \cdot R}$.
- **Coefficient de tension** : Caractérise la variation de la valeur de la résistance en fonction de la tension à ces bornes. Il s'exprime en [%].
- **Coefficient de température.**

Stabilité : On dit qu'une résistance est stable lorsqu'après un long usage, sa valeur reste proche de celle qu'elle avait à l'origine.

III-2-10. Codes de marquage

Il n'est pas aisé de mesurer chaque résistance que l'on devra utiliser pour réaliser un montage, c'est pourquoi les fabricants de résistance ont décidé de « marquer » leur résistances avec un code :

a) Code des couleurs

	Chiffres significatifs	Coefficient de multiplication	Tolerance
Argent		0.01	$\pm 10\%$
Or		0.1	$\pm 5\%$
Noir	0	1	$\pm 20\%$
Brun	1	10	$\pm 1\%$
Rouge	2	10^2	$\pm 2\%$
Orange	3	10^3	
Jaune	4	10^4	
Vert	5	10^5	
Bleu	6	10^6	
Violet	7		
Gris	8		
Blanc	9		

(Ne Manger Rien Où Je Vais Battre Votre Grand Bec)

b) Code à chiffres (pour les résistances de puissance)

- Un code d'origine japonaise consiste en 3 chiffres, les deux premiers donnent la valeur, le dernier donne le multiplicateur exprimé en 10^x .

Exemple :

223 représente $22 \cdot 10^3 \Omega$ ou 22000Ω ou $22K\Omega$.

470 représente $47 \cdot 10^0 \Omega$ ou 47Ω .

685 représente $68 \cdot 10^5 \Omega$ ou $6.5M\Omega$.

- Sur les schémas européens on utilise un code semblable : une lettre représente un multiplicateur ; E= unité K= Kilo M= méga
La lettre est placée comme point décimal.

Exemple :

22K représente $22 \cdot 10^3 \Omega$ ou 22000Ω ou $22K \Omega$.

47E représente 47Ω .

0E1 représente 0.1Ω .

5K6 représente 5600Ω ou $5.6K \Omega$.

6M8 représente 6800000Ω ou $6.8M \Omega$.

III-3. Les condensateurs

III-3-1. Définition

- Un condensateur est un composant constitué de deux armatures conductrices séparées par un isolant appelé diélectrique. Ils peuvent être plans, cylindriques ou sphériques.
- Les condensateurs permettent d'emmagasiner des charges électriques et donc de l'énergie électrique.

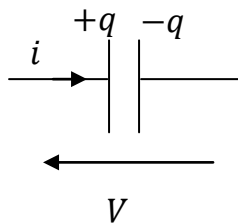


Fig III-3. Symbolisation d'un condensateur
Convention récepteur

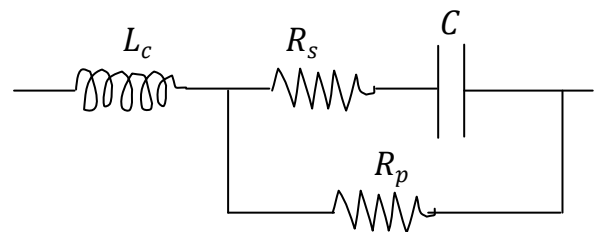


Fig III-4. Schéma réel d'un condensateur

III-3-2. La capacité d'un condensateur

On constate que pour un condensateur donné, la charge Q portée par ses armatures est proportionnelle à la différence de potentiel V qu'on y applique la constante de proportionnalité de cette relation C est appelée **capacité** du condensateur.

$$C = \frac{q}{V} \quad (\text{III-9})$$

q : charge électrique en Coulomb [C]

V : La tension en Volt [V]

C : La capacité en Fard [F]

Nous pouvons aussi donner la relation de la capacité (d'accumulation) C du condensateur en fonction des dimensions du condensateur :

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (\text{III-10})$$

ε_0 : Permittivité du vide $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} [F \cdot m^{-1}]$

ε_r : Permittivité relative de la matière du diélectrique

A : L'aire d'une armature [m^2]

d : Epaisseur du diélectrique

III-3-3. Comportement du condensateur sous différents régimes

Le condensateur n'est intéressant qu'en régime variable c'est-à-dire lorsque V varie.

En effet, en régime permanent, la tension étant constante, on a $i = C \cdot \frac{dV}{dt} = 0$

Le condensateur se comporte donc en régime permanent comme un interrupteur ouvert.

III-3-4. L'énergie électrique emmagasinée par un condensateur

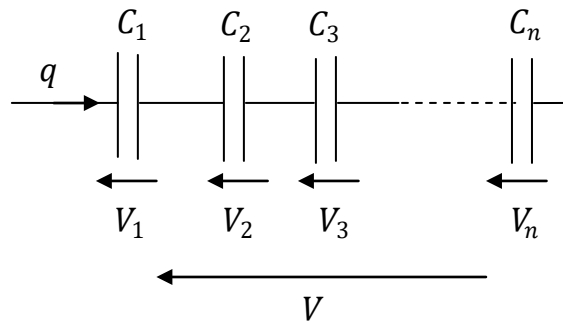
L'énergie emmagasinée par un condensateur entre $t = 0$ où $V = 0$ et le temps t où $V = V$ est donnée par la relation :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \quad (\text{III-11})$$

III-3-5. Associations de condensateurs

❖ Association en série

Lorsque l'on a des condensateurs en série, les quantités d'électricités emmagasinées par chaque condensateur sont identiques.



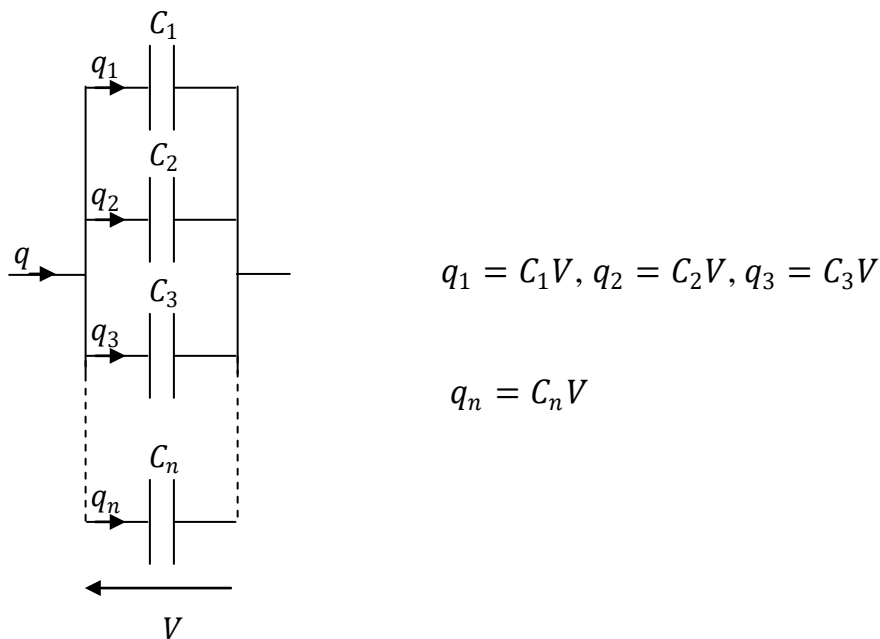
$$V_1 = \frac{q}{C_1}, \quad V_2 = \frac{q}{C_2}, \quad V_3 = \frac{q}{C_3}, \quad V_n = \frac{q}{C_n}$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n = q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \right) = \frac{q}{C_{eq}}$$

$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (\text{III-12})$$

❖ Association en parallèle

Lorsque l'on a des condensateurs en parallèle, les quantités d'électricités emmagasinées dans les condensateurs s'additionnent.



La quantité d'électricité vaut donc :

$$q = q_1 + q_1 + q_1 + \dots + q_1 = (C_1 + C_1 + C_1 + \dots + C_1).V = C_{eq}.V$$

$$C_{eq} = \sum_{i=1}^n C_i \quad (\text{III-13})$$

III-3-6. Caractéristiques nécessaires au choix d'un condensateur

Les caractéristiques électriques les plus importants à connaître pour utiliser au mieux les condensateurs sont :

- Sa **capacité** et la **Tolérance** sur cette capacité.
- **La tension maximale de service** :
 - en courant continu (symbole VNCC) indique la valeur de tension continue qui peut être appliquée au condensateur en régime permanent.
 - En courant alternatif (symbole VNCA) indique la valeur de crête de la tension alternative pouvant être appliquée au condensateur en régime variable.
- **La nature de son diélectrique** : (vide, plastique, verre,..).

III-3-7. Différents types de condensateurs

Il existe plusieurs types de condensateurs, parmi eux on distingue :

- **Condensateur enroulé** : Le diélectrique peut être papier ou du plastique (polystyrène, polystère,...).
- **Condensateur électrolytique** (diélectrique liquide) : Ces condensateurs ont une forte capacité de $1\mu F \rightarrow 1qF$.
- **Condensateur à film plastique** : Ce sont des condensateurs d'excellente qualité.
- **Condensateur céramique** : Ils sont plus petits et à capacité petite. Les valeurs de $1pF \rightarrow 470nF$.

III-3-8. Marquage des condensateurs

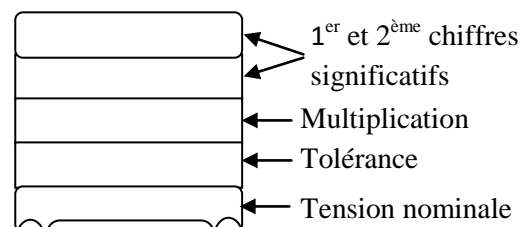
On peut lire la valeur d'un condensateur :

- Soit par le code des couleurs.
- Soit par lecture directe.

❖ Code des couleurs

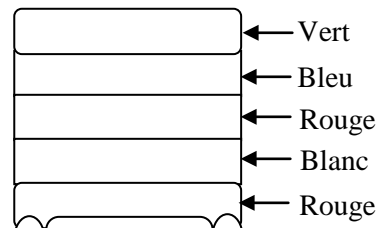
Généralement utilisé par les condensateurs céramiques ; pour les trois premières lignes, on utilise le même code des couleurs qui est celui des résistances mais la valeurs est lue en pF .

- La tolérance :
Blanc $\mp 10\%$
Noir $\mp 20\%$
- La tension :
Rouge : 250V; Jaune : 400V.



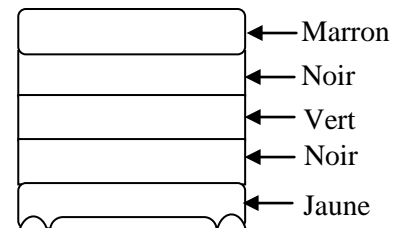
Exemple : $C = 56 \cdot 10^2 pF$

Tolérance = $\mp 10\%$; Tension = 250V



- Quelles sont les couleurs qui correspondent à $c = 1 \mu F$; Tolérance = $\mp 20\%$; Tension = 400V ?

$$c = 1 \mu F = 10 \cdot 10^5 pF$$



❖ **La lecture directe**

Ce type de lecture peut être utilisé pour les condensateurs céramiques ; à papier ou chimique (électrolytique).

- **Condensateur céramique** : la lecture est directe.

$$\boxed{10 nF} : 10 nF ; \boxed{470 pF} : 470 pF ; \boxed{.47n} : 0.47 nF$$

Où peut être à 3 chiffres :

$$\boxed{103} : 10 \cdot 10^3 pF$$

$$\boxed{47} : 47 pF$$

$$\boxed{682} : 68 \cdot 10^2 pF$$

$$\boxed{100} : 10 \cdot 10^0 pF$$

- **Condensateur à papier** : On trouve la valeur du condensateur soit en pF soit en nF .

✓ La précision est indiquée par une lettre :

F \longrightarrow $\mp 1\%$; G \longrightarrow $\mp 2\%$; M \longrightarrow $\mp 20\%$

J \longrightarrow $\mp 5\%$; K \longrightarrow $\mp 10\%$

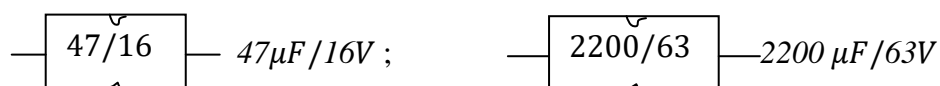
✓ La tension nominale en volt

Exemple :

8200/K/600 $C = 8200 pF \mp 10\%, 600 V$

.68/J/400 $C = 0.68 nF \mp 5\%, 400V$

- **Condensateur chimique** : La valeur de la capacité est directement lue en μF suivie par la tension nominale.



III-4. Les bobines

III-4-1. Définition

Une bobine, self, solénoïde, où l'auto-induction est un composant de base de l'électronique et de l'électrotechnique, elle est constituée d'un bobinage en enroulement d'un fil conducteur éventuellement autour d'un noyau en matériau ferromagnétique. Lorsqu'un courant traverse celle-ci, elle produit un champ magnétique dans l'espace environnant.

III-4-2. L'inductance

Le flux produit par une bobine est proportionnel au courant qui la traverse, le coefficient de proportionnalité se nomme **inductance**.

$$\varphi = L.I \quad (\text{III-14})$$

L : inductance en Henry (H).

φ : en Weber (Wb).

$$L = \mu N^2 \frac{S}{l}$$

N : le nombre de spires

S : la section du conducteur métallique en m^2

l : la longueur du support cylindrique

$$\mu = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$$

La relation liant le courant et la tension aux bornes d'une bobine est donnée par :

$$V = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (\text{III-15})$$

III-4-3. Les modèles de la bobine

a) La bobine idéale

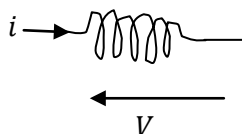


Fig III-5. Symbolisation d'une bobine idéale

b) La bobine réelle

En pratique, la bobine est constituée d'un enroulement de fils. Ces fils ont une résistance au passage du courant.

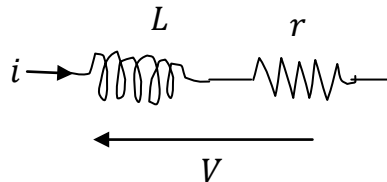


Fig III-6. Symbolisation d'une bobine réelle

III-4-4. L'énergie emmagasinée par une bobine

Une bobine emmagasine de l'énergie sous forme électromagnétique lorsqu'elle est parcourue par un courant. Cette énergie est donnée par : (entre $t = 0$ où $V = 0$ et le temps t où $V = V$).

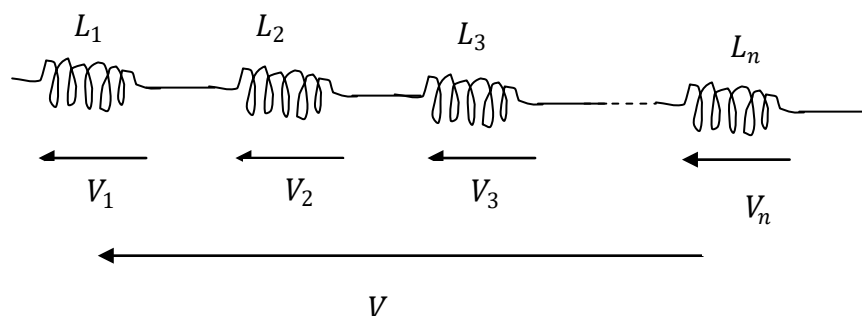
$$W = \int_0^t P(t) \cdot dt = \frac{1}{2} L i^2(t) \quad (\text{III-16})$$

Avec $P(t)$: la puissance reçue par la self

$$P(t) = u(t) \cdot i(t) = \frac{1}{2} L \frac{d^2 i(t)}{dt^2} \quad (\text{III-17})$$

III-4-5. Associations de bobines

❖ Association en série



Chaque self est parcourue par le même courant :

$$V_k = L_k \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

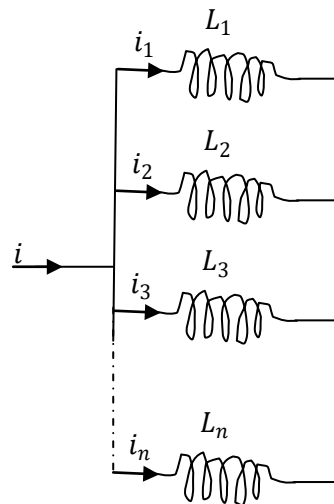
$$V(t) = \sum_{k=1}^n V_k = \frac{di(t)}{dt} \cdot \sum_{k=1}^n L_k = L_{eq} \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

$$\Rightarrow L = \sum_{k=1}^n L_k \quad (\text{III-18})$$

En série, l inductance équivalente est la somme des inductances.

❖ Association en parallèle

Chaque self est soumise à la même tension



$$V_k = L_k \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^n i_k(t) \Rightarrow$$

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{V(t)}{L_{eq}} = \sum_{k=1}^n \frac{di_k(t)}{dt} = \sum_{k=1}^n \frac{V(t)}{L_k}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{L_{eq}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{L_k} \quad (\text{III-19})$$

En parallèle, l'inductance équivalente est égale à l'inverse de la somme des inverses des inductances.

III-4-5. Les transformateurs

a) Définition

Un transformateur est un appareil qui permet de diminuer ou augmenter la tension d'un courant alternatif. Un transformateur, c'est deux bobines, une appelée primaire, où passe le courant de 220V par exemple et une appelée secondaire, qui délivre en fait 12V.

b) Eléments inductifs (transformateurs)

En électronique, on distingue plusieurs types de transformateurs :

- ✓ **Transformateurs d'alimentation** : pour produire des divers tensions d'alimentation.
- ✓ **Transformateurs d'adaptation d'impédances** : pour améliorer la transmission de puissance entre deux étages.
- ✓ **Transformateurs d'isolement** : pour permettre des signaux variable sous leurs valeurs, quand celle-ci est très élevée.
- ✓ **Transformateurs d'impulsion** : pour produire des fortes tensions ou des fortes courants.

CHAPITRE IV : LES COMPOSANTS ACTIFS

IV -1. Notions sur les semi-conducteurs

Pour comprendre le fonctionnement des composants électroniques, il faut tout d'abord étudier les semi-conducteurs matériaux qui ne sont ni conducteurs ni isolants.

✓ Les semi-conducteurs

- Ils se placent entre les conducteurs et les isolants.
- Ils possèdent une résistivité intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants : ils se comportent comme des isolants aux basses températures lorsque l'agitation thermique est faible et comme des conducteurs aux températures élevées.

✓ Les semi-conducteurs purs où intrinsèque

- Lorsque le corps est parfaitement pur, il est qualifiée d'intrinsèque, exemple : Si, Ge.
- Le Silicium Si est un atome tétravalent, il possède quatre électrons de valence qui vont se mettre en commun avec d'autres atomes de Si pour avoir la forme cristalline.
- A $T=0$ K toutes les liaisons covalentes sont maintenues. C'est un bon isolant.
- Lorsque la température du cristal augmente, certains électrons de valence quittent leurs places, certaines covalences sont interrompues. On dit qu'il y a rupture de la liaison covalente et par conséquent :
 - Libération de certains électrons.
 - Il reste une liaison rompue (un ion Si^+) \Leftrightarrow naissance d'une paire de charge : électron libre (charge négative) et trou (charge positive).

✓ **Les semi-conducteurs dopés ou extrinsèques**

On fait appelle à un semi-conducteur extrinsèque pour croitre la concentration d'électrons ou des trous, pour cela on introduit dans un cristal de Silicium (Si) ou Germanium (Ge) des atomes :

Si + atome pentavalent = **SC dopé type N**
(P, As, Sb,...etc.)

Si + atome trivalent = **SC dopé type P**
(B, Al, Ga, In,...etc.)

IV-2. La diode à jonction

IV-2-1. Constitution

La diode est un composant semi-conducteur comportant deux électrodes désignées généralement par anode et cathode.

La diode PN résulte de la jonction de deux éléments semi-conducteurs généralement en silicium. L'un des éléments a subit un dopage de type P, l'autre un dopage de type N.

Symbole

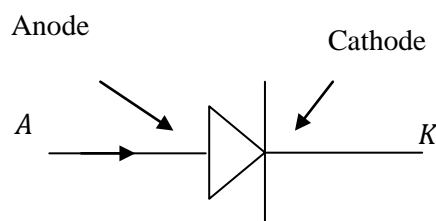
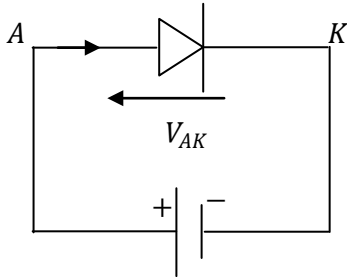


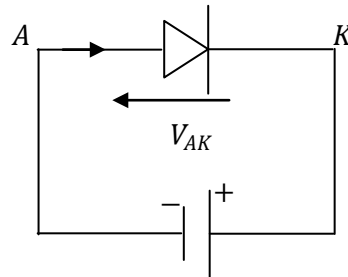
Fig IV-1. Symbole de la diode

IV-2-2. Polarisation de la diode

a) Polarisation directe



b) Polarisation inverse



- En polarisation directe, la tension appliquée ($V_{AK} > 0$) permet le passage d'un courant électrique de l'anode vers la cathode appelé courant direct.
- En polarisation inverse la tension appliquée ($V_{AK} < 0$) empêche le passage du courant. Le courant inverse est pratiquement nul.

IV-2-3. Caractéristiques électriques

a) Caractéristique statique courant-tension de la diode

Cette caractéristique décrit l'évolution du courant traversant la diode en fonction de la tension à ses bornes en courant continu.

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (\text{IV-1})$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \approx 25\text{mV} \text{ à } T = 300\text{ K} \quad (k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K})$$

- Caractéristique directe ($V_d > 0$) $I_d \approx I_s \exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right)$
- Caractéristique inverse ($V_d < 0$) $I_d \approx -I_s$.

Quand la tension appliquée dépasse la valeur spécifiée par le fabricant, le courant décroît très rapidement s'il n'est pas limité par des éléments externes, il y a destruction rapide de la diode.

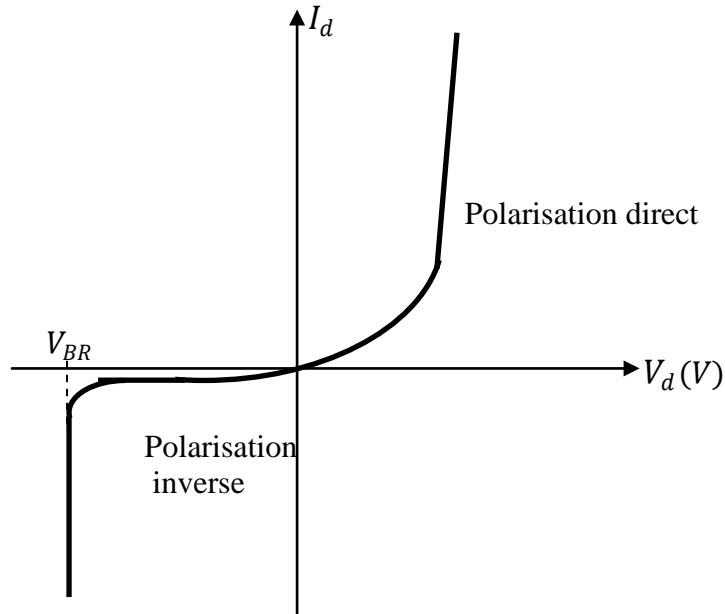


Fig IV-2. Caractéristique statique d'une jonction PN polarisée (réel)

b) Résistance différentielle (ou dynamique)

La résistance dynamique étant l'inverse de la pente en un point de fonctionnement de la caractéristique. C'est la résistance dynamique au point de fonctionnement (V_d, I_d) . Elle est en fonction du courant de polarisation I_d au point étudié.

$$r_d = \frac{dV}{dI} \quad (\text{IV-2})$$

IV-2-4. Principales caractéristiques d'une diode

- **Tension de seuil** : Correspond à la tension à partir de laquelle la diode commence à conduire quand elle est dans le sens passant.
- **Tension inverse** : Appelée aussi tension de claquage. Il s'agit de la tension maximale que l'on applique à la diode dans le sens bloquant (avant qu'elle ne conduise). Une diode normale risque de griller quand cette tension inverse maximale est dépassée,

mais certaines diodes supportent ce fonctionnement et ont même été conçues pour travailler de cette façon (les diodes Zener).

- **Courant direct :** Il s'agit de l'intensité maximale qui peut parcourir le composant de façon continue quand il est polarisé dans le sens passant.

IV-2-5. Modèles d'approximation d'une diode

Considérons le circuit ci-dessous :

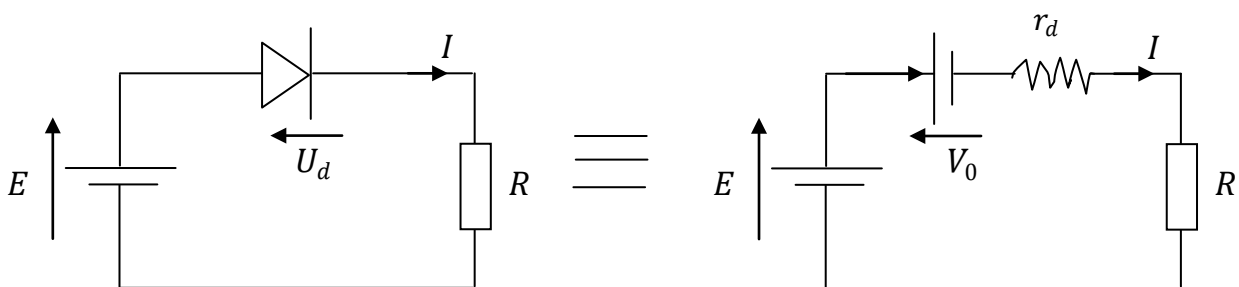


Fig IV-3. Circuit équivalent de la diode

La diode peut être représentée par sa résistance dynamique (considérée généralement constante) en série avec V_0 qui représente la barrière de potentiel.

Quatre cas de simplification sont généralement utilisés dans les calculs de circuit à diodes :

- a) $V_0 = 0$ et $r_d = 0$ b) $V_0 = 0$ et $r_d \neq 0$ c) $V_0 \neq 0$ et $r_d = 0$ d) $V_0 \neq 0$ et $r_d \neq 0$

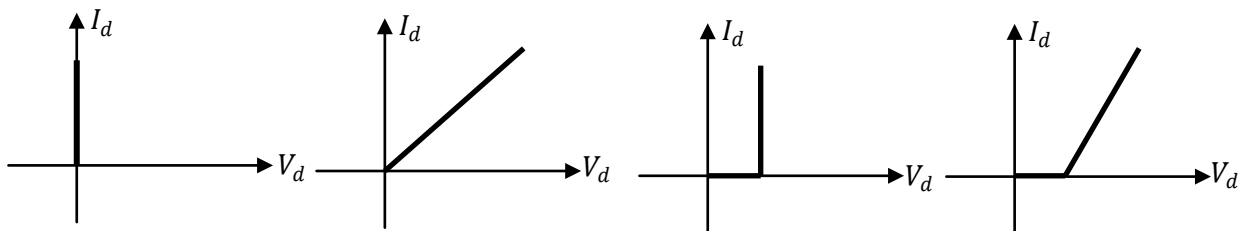


Fig IV-4. Caractéristique courant- tension simplifiées d'une diode

IV-2-6. Point de fonctionnement

Considérons le circuit ci-dessous :

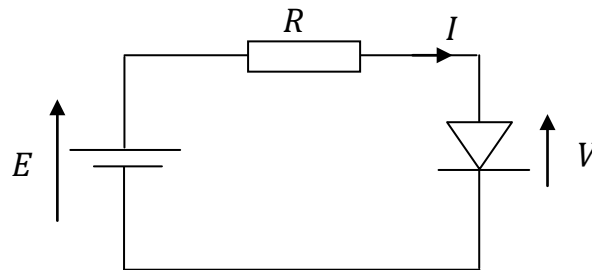


Fig IV-5. Circuit de polarisation d'une diode

La caractéristique $I = f(V)$ d'une diode réelle étant non linéaire, le point de fonctionnement peut être déterminé graphiquement. En traçant sur un même graphe la droite de charge statique définit par l'équation :

$$I = \frac{E}{R} - \frac{V}{R} \quad (\text{IV-3})$$

Le point de fonctionnement de la droite, définit par (I_M, V_M) est l'intersection des deux courbes.

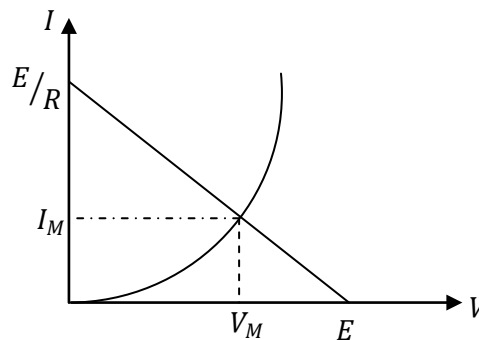


Fig IV-6. Détermination du point de fonctionnement

IV-2-7. Présentation des diodes

La valeur des diodes peut être indiquée par plusieurs façon : soit en clair selon un codage normalisé soit en code couleurs.

a) Affichage en claire

Globalement, deux normes pour deux types de dénomination :

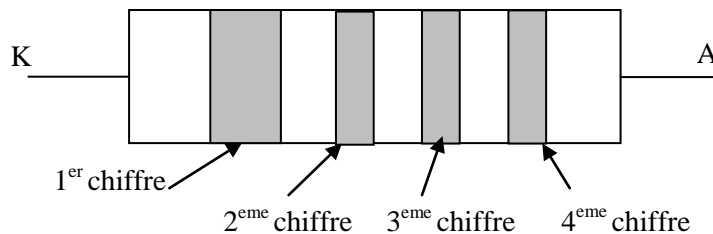
- Les diodes suivant la norme Américaine commencent par 1N et se terminent par un numéro d'ordre (exp 1N4148).
- Les diodes suivant la norme Européenne commencent par deux lettres (AA, AB, BA, BB, BAX où BAW...) et se terminent par un numéro d'ordre.

b) Affichage en code couleurs

Le codage de la valeur de la diode est réalisé avec quatre anneaux de couleur. Parmi ces quatre anneaux un où deux sont plus larges que les autres, ce qui permet de savoir par où commencer la lecture. Le coté où se trouve le où les plus larges correspond à la cathode.

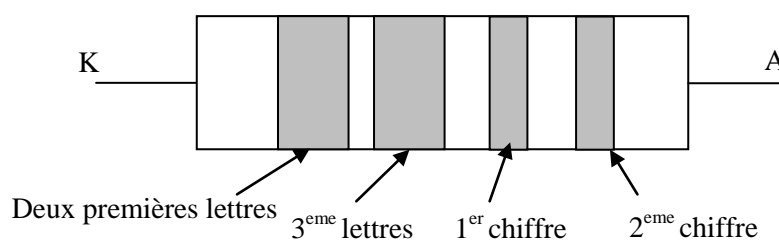
➤ Un seul anneau est plus large que les autres

Nous somme en présence d'une diode dont le marquage est normalisé selon un codage Américain et le nom de la diode commence toujours par 1N.



➤ Deux anneaux sont plus larges que les autres

Nous somme en présence d'une diode dont le marquage est normalisé selon un codage Européen et le nom de diode commence par trois (deux plus une) lettres.



Chiffres significatifs		Premières lettres		Troisième lettre	
Noir	0	Marron	AA	Orange	S
Marron	1	Rouge	BA	Jaune	T
Rouge	2			Vert	V
Orange	3			Bleu	W
Jaune	4			Violet	X
Vert	5			Gris	Y
Bleu	6			Blanc	Z
Violet	7				
Gris	8				
Blanc	9				

Tableau IV-1. Correspondance entre couleurs et valeurs

IV-3. La diode Zener

IV-3-1. Définition

Une diode Zener est une diode spécialement conçue pour exploiter le claquage inverse. La tension de claquage est appelée **tension Zener**.

La représentation symbolique est montrée ci-contre :

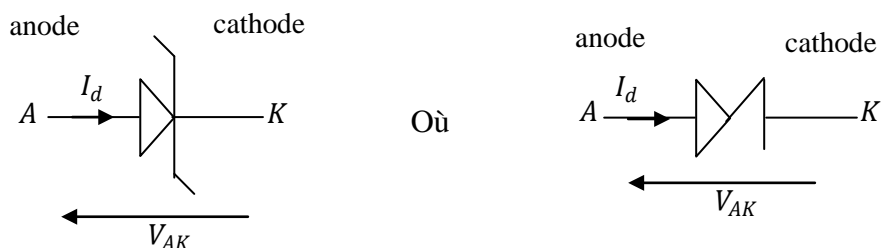


Fig IV-7. Symbolisation d'une diode Zener

IV-3-2. Caractéristique statique courant- tension d'une diode Zener

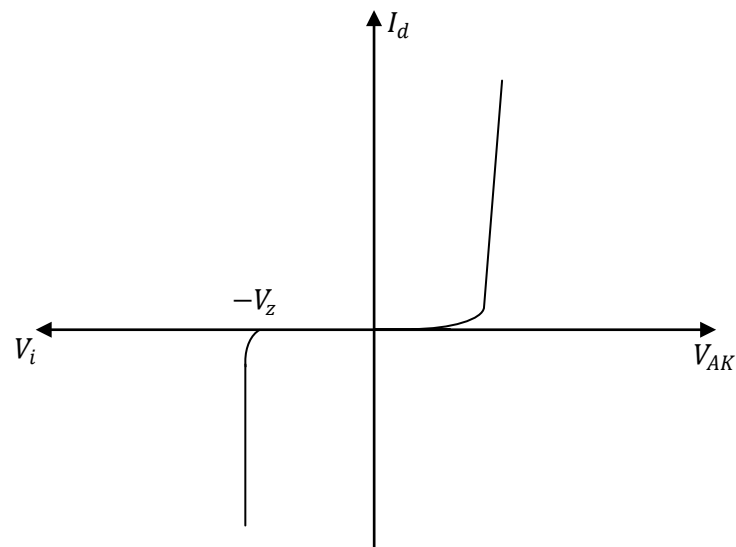


Fig IV-8. Caractéristique statique d'une diode Zener.

- ✓ En polarisation directe, une diode Zener est équivalente à une diode normale.
- ✓ En polarisation inverse, la diode conduit lorsque la tension inverse V_i devient supérieure à la tension Zener V_z .

La caractéristique linéaire conduit à l'équation $V_i = V_z + R_z I_i$ où R_z est la résistance dynamique inverse.

Dans ce cas, la diode Zener est équivalente au model suivant:

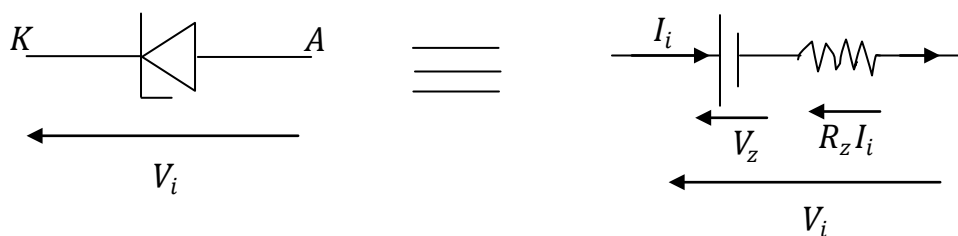


Fig IV-9. Schéma équivalent à une diode Zener polarisée en inverse

IV-4. Diodes Schottky (Schottky barrier diodes)

Les diodes Schottky sont constituées d'un contact entre un métal et un semi-conducteur de type P ou de type N sous des conditions adéquates, une charge d'espace se forme au dessous du contact métallique, ce qui conduit à une tension de diffusion interne et à une caractéristique I-V similaire à celle de la jonction PN.

La représentation symbolique est montrée ci-contre :



Fig IV-10. Symbolisation d'une diode Schottky

Remarques

- ✓ La tension de seuil d'une diode Schottky (0.3V) est plus faible que celui d'une jonction PN.
- ✓ Le courant inverse de la jonction PN est plus faible que celui de la diode Schottky.
- ✓ Les diodes Schottky sont très utilisées en protection contre les surtensions à cause de leur rapidité.

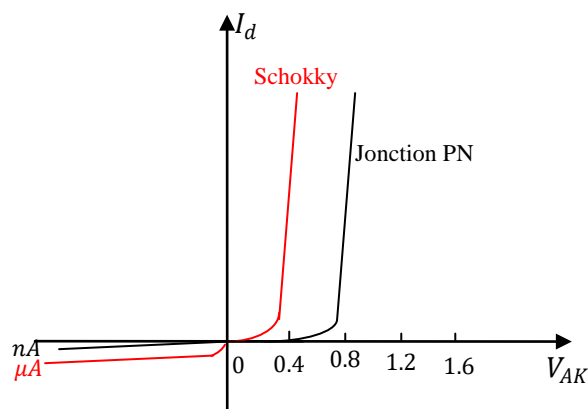


Fig IV-11. Comparaison des caractéristique d'une diode Schottky et jonction PN.

IV-5. Transistors

Inventé dans les années 50, le transistor est l'élément de base de l'électronique moderne. Le terme transistor est la contraction des termes anglais **transfert** et **résistor**. Les transistors peuvent être classés en deux classes principales :

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

IV-5-1. Transistor bipolaire

IV-5-1-1. Constitution- Symbole

Le transistor bipolaire est un composant électronique utilisé comme : interrupteur commandé, amplificateur stabilisateur de tension, modulateur de signal...

Il est constitué d'un monocristal de semi- conducteur (principalement le Silicium) dopé pour obtenir deux jonctions disposées en série et de sens opposé.

Il existe deux types fondamentaux de transistors bipolaires :

- Les transistors NPN dans lesquels une mince couche de type P est comprise entre deux zones de type N^+ et N.
- Les transistors PNP dans lesquels une mince couche de type N est comprise entre deux zones de type P^+ et P.

Le tableau IV-2 suivant donne une vue d'ensemble de ces deux transistors.

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

- La région du milieu est appelée Base (doit être mince environs $1\mu\text{m}$).
- Les deux autres régions sont appelées Emetteur et Collecteur, le nom émetteur signifie émettre des porteurs de charges et collecteur signifie collecter des porteurs de charges.

IV-5-1-2. Le fonctionnement des transistors bipolaires

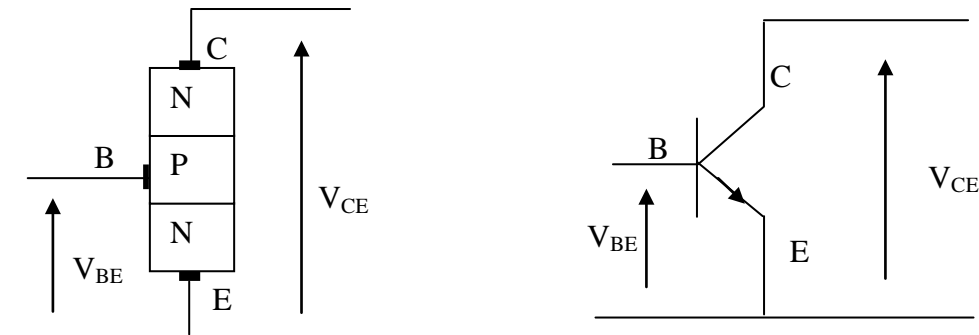


Fig IV-12. Fonctionnement d'un transistor NPN

La diode Base-Emetteur est polarisée en directe et un courant de base peut circuler. La diode Collecteur-Base est bloquée. Comme la couche de la base est très mince, les porteurs de charges (pour le transistor NPN les électrons et les trous pour les PNP) provenant de l'émetteur peuvent pénétrer dans la zone de diffusion entre le collecteur et la base. Ceux-ci sont attirés par le potentiel du collecteur et sont aussi collectés. Il y a alors un courant de collecteur.

IV-5-1-3. Relations entre les courants d'un transistor

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

$$\begin{cases} I_C = \beta I_B \\ I_E = I_C + I_B = (\beta + 1)I_B \end{cases} \quad (\text{IV-4})$$

β facteur d'amplification de courant (gain en courant).

IV-5-1-4. Caractéristique statique d'un transistor

- ✓ Les caractéristiques statiques d'un transistor forment un réseau constitué :
 - Des caractéristiques d'entrée $I_B = f(V_{BC})$ à $V_{CC} = c^{st}$.
 - Des caractéristiques de transfert $I_C = f(I_B)$ à $V_{CE} = c^{st}$.

- Des caractéristiques de sortie $I_C = f(V_{CE})$ à $I_B = c^{st}$.

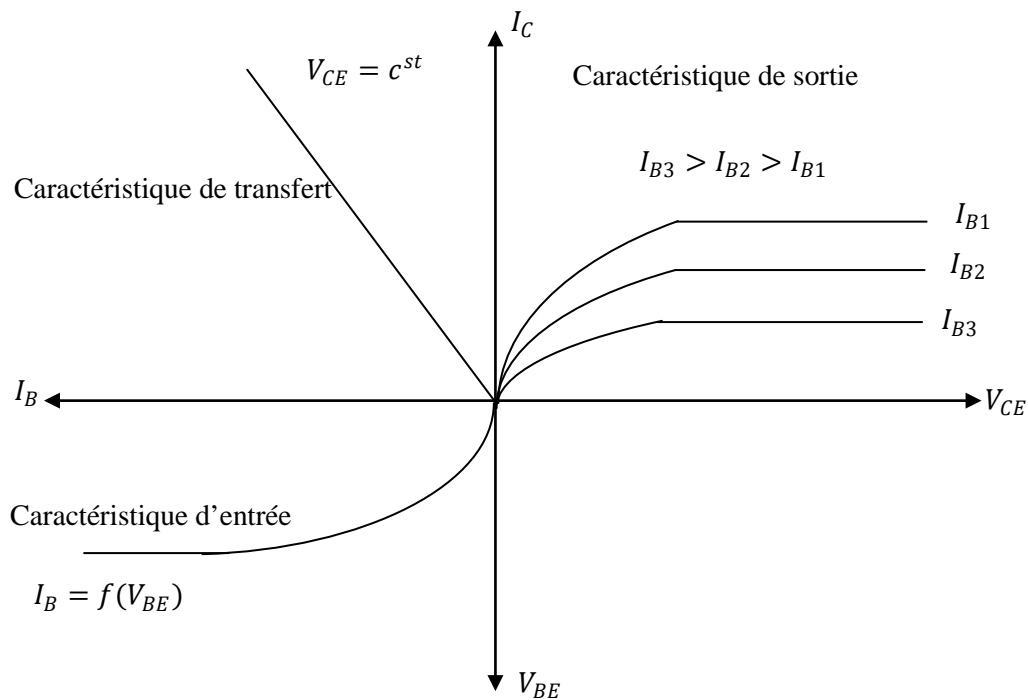


Fig IV-13. Caractéristiques statiques d'un transistor

✓ Interprétation

- $V_{BE} = f(I_B)$ à $V_{CE} = c^{st}$ la courbe a l'allure d'une tension de diode polarisée en directe.
- $I_C = f(I_B)$ c'est une droite passant par l'origine

$$I_C = f(I_B) = \beta I_B.$$
- $I_C = f(V_{CE})$ pour $I_B = c^{st}$

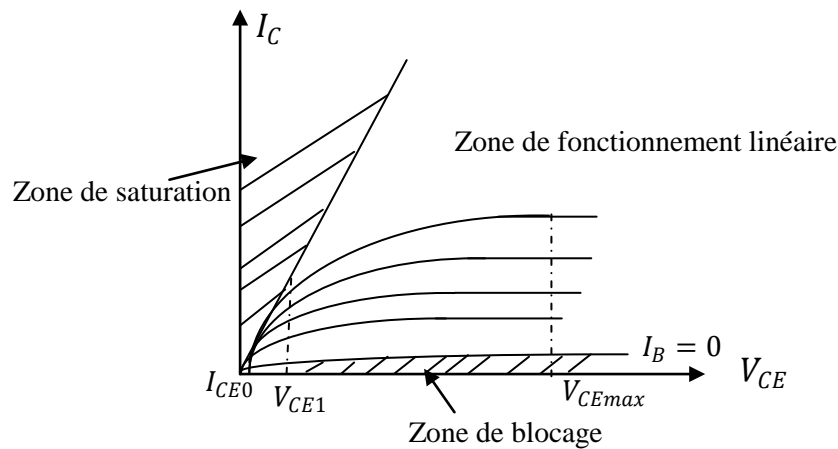
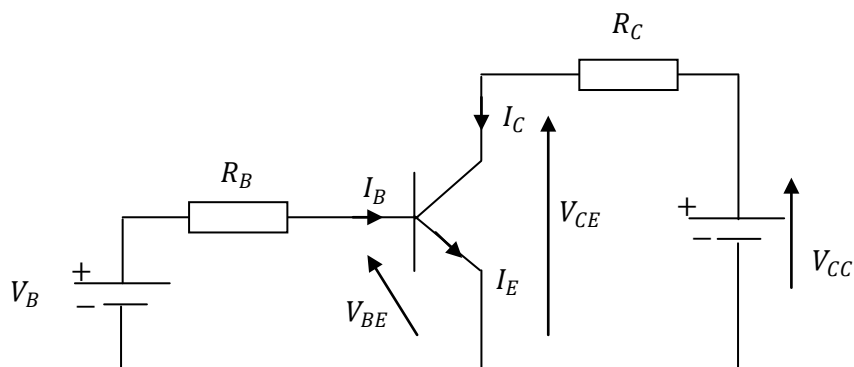


Fig IV-14.

- Quand $I_B = 0$ le courant $I_C = 0$.
- Quand $I_C < I_{CE0}$ le transistor est bloqué, I_C est pratiquement nul.
- Quand $V_{CE} < V_{CE1}$ \Rightarrow zone de saturation.
- Au de de la $V_{CE} > V_{CE1}$ le courant est constant. (zone de fonctionnement linéaire $V_{CE1} < V_{CE} < V_{CEmax}$, c'est la zone où le transistor fonctionne comme amplificateur dans un circuit. Le point de fonctionnement du transistor doit appartenir à cette zone.

IV-5-1-5. Polarisation du transistor



IV-15. Circuit de polarisation d'un transistor

R_C est appelé résistance de charge qui permet de limiter le courant dans le transistor. Elle joue un rôle important en régime dynamique.

a) Equation de la maille d'entrée

$$V_B = R_B I_B + V_{BE} \quad \Longrightarrow \quad I_B = \frac{V_B}{R_B} - \frac{V_{BE}}{R_B} \quad (\text{IV-5})$$

Equation de la droite d'attaque statique à l'entrée.

Les deux points extrêmes de cette droite :

$$P_1 \begin{cases} V_{BE} = 0 \\ I_{Bm} = \frac{V_B}{R_B} \end{cases} \quad P_2 \begin{cases} I_B = 0 \\ V_{Bm} = V_B \end{cases}$$

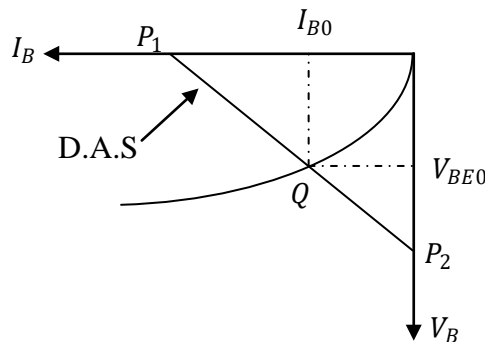


Fig IV-16. Détermination du point de fonctionnement à l'entrée

Le point de fonctionnement de la droite d'attaque statique (D.A.S) avec la caractéristique $I_B = f(V_{BE})$ du transistor nous donne le point de fonctionnement où de repos du transistor (V_{BE0}, I_{B0}).

b) Equation de la maille de sortie

$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} \quad \Longrightarrow \quad I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} - \frac{V_{CE}}{R_C} \quad (\text{IV-6})$$

Equation de la droite de charge statique .

Les deux points extrêmes sont :

$$P_1 \begin{cases} V_{CE} = 0 \\ I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} \end{cases} \quad P_2 \begin{cases} I_C = 0 \\ V_{CE} = V_{CC} \end{cases}$$

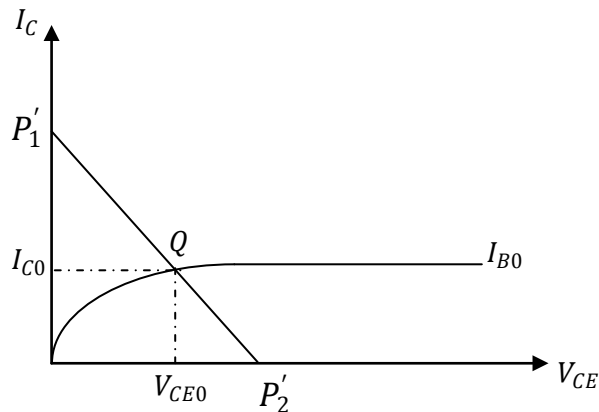


Fig IV-17. Détermination du point de fonctionnement à la sortie

L'intersection de la droite de charge statique avec la caractéristique $I_C = f(V_{CE})$, nous donne le point de repos en sortie $Q(I_{C0}, V_{CE0})$.

Remarque

Le but de la polarisation est de fixer le point de repos qui permet le fonctionnement correct du transistor.

IV-5-1-6. Critère de choix d'un transistor

Pour choisir un transistor par rapport à un domaine d'utilisation on tient essentiellement compte des paramètres ci-dessous :

- La tension de claquage V_{CEmax} : au-delà de cette tension, le courant I_C croit rapidement et peut ainsi entraîner la destruction du transistor.
- Le courant de collecteur maximal I_{Cmax} : Le dépassement de ce courant n'est pas destructif, mais le gain en courant β chute fortement, ce qui rend le transistor peu intéressant.

- La puissance maximale que peut dissiper le transistor : $P_{max} = V_{CE} \cdot I_C$.
- Le gain en courant β .
- La tension de saturation V_{CEsat} si le transistor est utilisé en commutation.
- La fréquence de coupure.

IV-5-1-7. Marquage des transistors

- Suivant la norme américaine (JEDEC Joint Electron Device Engineering Council) commence par 2N et se terminent par un numéro d'ordre et un suffixe. 2N numéro de série suffixe

Exemple : 2N 2222 A

Le numéro de série compris entre 100 et 9999

Le suffixe indique le groupe de gain :

A : faible gain

B : gain medium.

C : gain élevé.

L'absence de suffixe signifie un gain quelconque.

- Les transistors suivant la norme européenne prend la forme :
[deux lettres] [une lettre][numéro de série][suffixe]

Exemple : BC557B

La première des deux lettres indique le matériau : A : Ge, B : Silicium ; C : GaAs ;

R : matériau composé.

(la grande majorité des transistors commence par la lettre B).

La deuxième lettre indique le champ d'application du circuit :

A : diode RF (radio fréquence), B : varicap

C : transistor AF faible signal

D : transistor AF puissance

F : transistor HF faible signal haute fréquence.

L : transistor HF puissance.

La troisième lettre indique que le circuit est plutôt destiné à un usage industriel ou professionnel qu'à un usage domestique. Il s'agit souvent des lettres W, X, Y ou Z.

Le suffixe indique le groupe de gain comme pour la norme américaine.

IV-5-2. Transistor à effet de champ TEC

IV-5-2-1. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un transistor à effet de champ est qu'un courant circulant dans une mince couche de semi-conducteur varie sous l'action d'un champ électrique perpendiculaire à la couche semi-conducteur à la couche semi-conductrice (c'est l'effet de champ). Ce champ va modifier la résistance de la couche de semi-conducteur. Ces transistors trouvent leur utilité notamment dans la fabrication des circuits intégrés.

Le transistor à effet de champ est appelé généralement TEC (transistor à Effet de Champ) ou bien FET (Field Effet Transistor). Dans le cas des transistors classiques étudiés précédemment, nous avons parlé pour le fonctionnement de ceux-ci de deux porteurs (électrons et trous) d'où l'appellation de transistors bipolaires. Les transistors à effet de champ quant à eux ne font intervenir qu'un seul type de porteur (transistors unipolaires).

IV-5-2-2. Famille de TEC

Les TEC se distinguent, par la nature du semi-conducteur qui lui constitue, sa forme géométrique et le procédé de fabrication. Il existe deux grandes familles de transistors à effet de champ :

- Les TEC à jonction (JTEC ou JFET)
- Les TEC à grille isolée (TMOS, MOSFET, MOSTEC).

a) Le transistor JFET (Junction Field Effet Transistor)

Le JFET est un composant qui possède trois bornes de connexion :

- **Source** : électrode par laquelle les porteurs entrent dans le canal.
- **Drain** : électrode par laquelle les porteurs quittent dans le canal.
- **Grille** : électrode de commande ($I_G = 0$)

Ce transistor est caractérisé par le fait que l'électrode de commande G constitue une jonction PN avec le canal du barreau de semi-conducteur, dans cette catégorie de transistor à effet de champ il existe encore deux famille selon le type de canal (N ou P).

Sur les JFET on ne pourra appliquer sur l'électrode de commande G qu'une polarisation inverse de la jonction grille- source (V_{GS}). Il est à noter également que la résistance d'entrée des JFET est nettement supérieure à la résistance d'entrée d'un transistor bipolaire mais reste très inférieure à celle des MOSFET citée après.

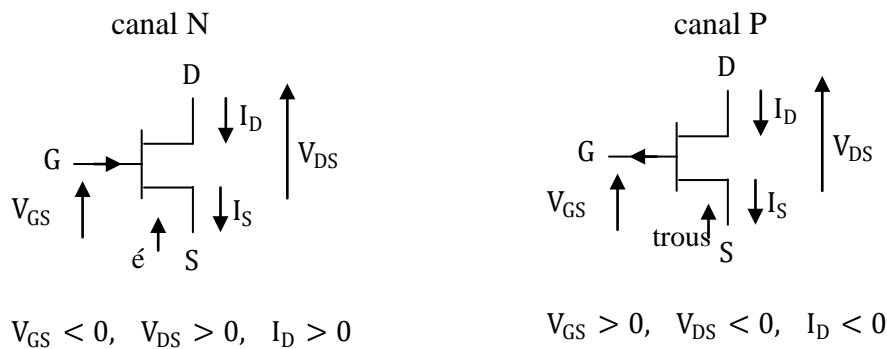


Fig IV-18. Symboles des JFET

b) Le transistor MOSFET

Les transistors MOSFET (Métal Oxyde Silicium Field Effet Transistor), appelé transistors à effet de champ (TEC) à grille isolée du canal par une mince couche d'isolant (oxyde de silicium : SiO_2). Ce type transistor à effet de champ permet de commander la grille avec des tensions positives, négatives, ou nulles. Par rapport au JFET, le MOSFET aura une très

grande impédance d'entrée. Il existe deux versions, le canal N et le canal P, et les électrodes vont aussi s'appeler drain, source et grille.

Les MOSFET sont encore classée en deux familles :

- ❖ Les MOSFET à enrichissement ou canal diffusé.
- ❖ Les MOSFET à appauvrissement où canal induit.

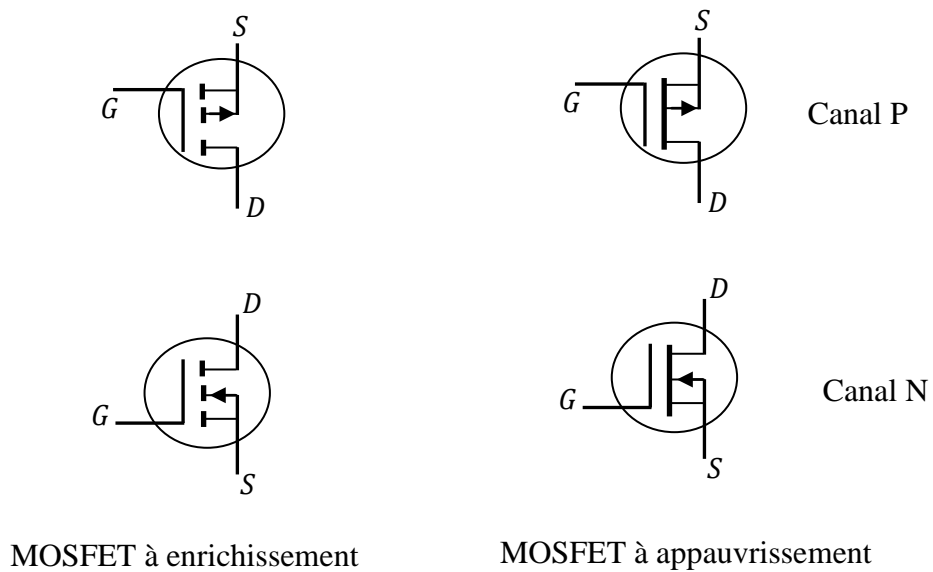


Fig IV-19. Symboles des MOSFET

CHAPITRE V : LES COMPOSANTS OPTOELECTRONIQUES

V-1. Introduction

- ❖ 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 électromagnétisme semi-conducteurs sont le principe des composants optoélectroniques dont le rôle est la conversion d'un signal optique en un signal électrique où réciproquement. Ce sont donc des transducteurs électrique vers optique où optique vers électrique.

- ❖ Conversion :

Photon-électron : donne le principe des photorécepteurs (photodiodes).

Electron-photon : donne le principe des émetteurs des lumières (les diodes électro-luminescentes).

- ❖ Suivant leur mode opératoire, on distingue deux types de composants optoélectroniques : Les photo-détecteurs qui sont des composants qui convertissent le signal optique en un signal électrique, et les photoémetteurs qui convertissent le signal électrique en un signal optique. Ces deux types de composants sont élaborés à partir de matériaux semi-conducteurs et leurs principes de fonctionnement sont basés sur les interactions rayonnement-semi-conducteur.

- ❖ Les trois processus d'interaction entre le rayonnement et le semi-conducteur d'énergie de gap E_g étant :

a. Absorption

Dans un système à deux niveaux, un photon incident ayant une énergie ($h\nu$) supérieure à l'énergie de la bande interdite (E_g) est absorbée par un électron de la bande de valence qui passe à la bande de conduction (figure V-1-(a)).

La transition de l'état E_1 à l'état E_2 se fait par l'absorption d'un photon d'énergie E_{21} :

$$\text{Où : } E_{21} = E_2 - E_1 = h\nu \quad (\text{V-1})$$

b. Emission spontanée

Un photon d'énergie $h\nu$ est émis par un atome initialement dans un niveau excité 2, le faisant passer au niveau 1 sans qu'il y ait d'interaction avec le photon (figure V-1-(b)).

c. Emission stimulée

Un photon entre en interaction avec un atome qui est initialement dans l'état excité, l'atome désexcité en émettant un second photon, ce dernier est identique au première où la même phase, la même direction, même polarisation (figure V-1-(c)).

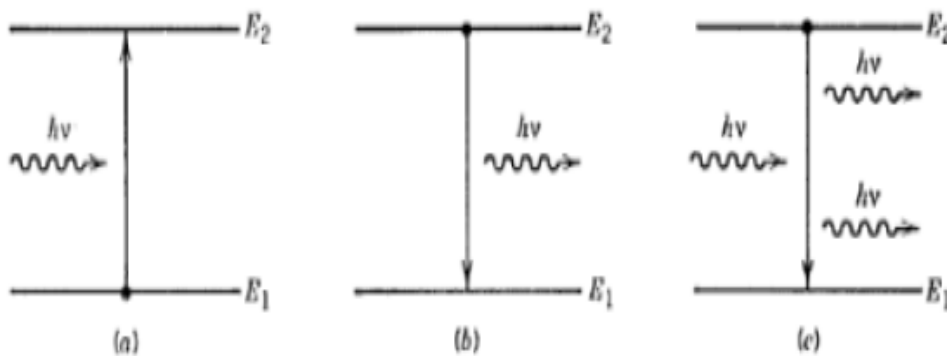


Fig V-1. Trois processus fondamentaux survenus entre les deux états d'énergie d'un atome : (a) d'absorption, (b) l'émission et (c) l'émission stimulée.

V-2. Diodes électroluminescentes (Light-Emitting Diodes ou LED)

V-2-1. Définition

Les diodes électroluminescentes convertissent un courant électrique en un rayonnement lumineux. Il s'agit de diodes PN polarisées en direct pour lesquelles les porteurs injectés dans les régions neutres subissent des recombinaisons radiatives. L'énergie est libérée sous la forme d'un rayonnement lumineux au lieu d'être dissipée sous forme de chaleur. Les LED sont essentiellement employées dans les dispositifs d'affichage.

La représentation symbolique est montrée ci-contre

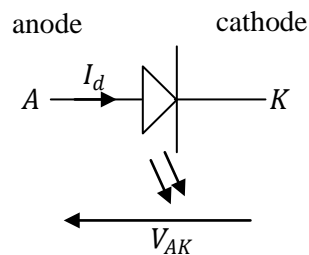


Fig V-2. Symbole d'une diode LED

V-2-2. Polarisation de la diode

La diode électroluminescente fonctionne sous polarisation directe. Lorsque la tension d'alimentation est assez importante, la LED doit être protégée par une résistance pour limiter le courant qui la traverse à des valeurs inférieures à l'intensité maximale de courant tolérée.

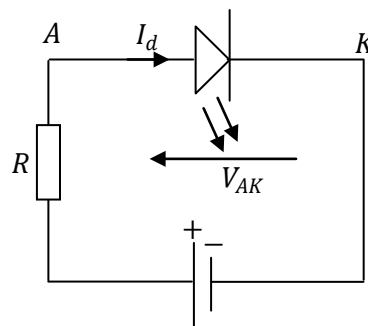


Fig V-3. Circuit de polarisation de la LED

V-2-3. Caractéristique statique courant-tension de la diode

Le courant qui traverse la LED est donné par :

$$I = I_s \left(\exp\left(\frac{qV_d}{kT}\right) - 1 \right) \quad (\text{V-1})$$

La caractéristique IV de la LED, illustrée sur la figure V-4, est semblable à celle d'une diode simple avec une tension de seuil V_{th} assez élevée, puisqu'en relation directe avec l'énergie du photon émis $V_{th} \approx \frac{h\nu}{q}$.

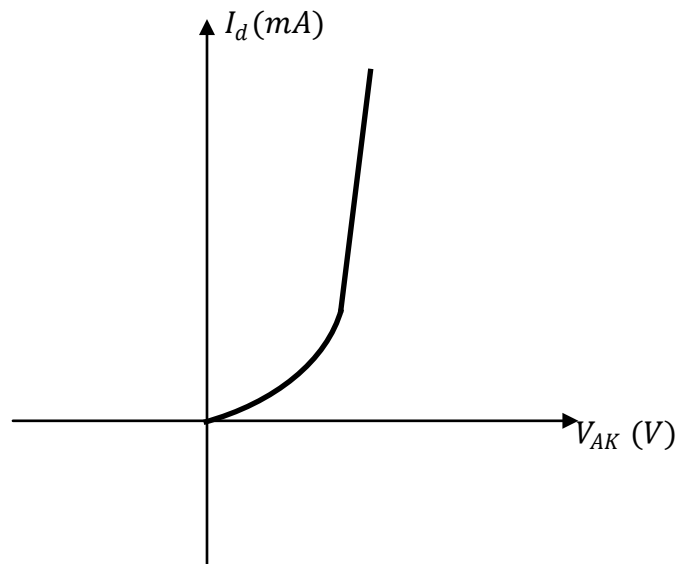


Fig V-4. Caractéristique statique d'une diode LED

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

Couleurs	Tension de seuil $V_{th}(V)$	$I_d(mA)$	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	

V-2-4. Différentes familles des diodes électroluminescentes

Il existe plusieurs manières de classer les LED, on peut citer deux classements :

a) Classement selon la puissance

Les diodes électroluminescentes de faible puissance $< 1W$, ce sont les plus connues du grand public car elles sont présentées dans notre quotidien depuis des années. Ce sont elles qui jouent le rôle de voyant lumineux sur les appareils électroménagers par exemple.

Les LED de forte puissance $> 1W$, souvent méconnues du grand public, elles sont pourtant en plein essor et leurs applications sont souvent ignorées : flash de téléphones portables, éclairage domestique, éclairage de spectacle, lampe de poche ou frontales.

Le principe de fonctionnement est pratiquement équivalent ; toutefois certaines différences significatives existent entre les deux familles. Elles disposent chacune d'un champ d'application spécifique.

b) Classement selon le spectre d'émission

Une autre manière de les classer est de considérer la répartition de l'énergie dans gamme de longueur d'onde couvrant le visible (Longueurs d'ondes de l'ordre de $380 - 780 \text{ nm}$) ou l'invisible (principalement l'infrarouge).

- ✓ **Les LED blanches** : l'énergie est répartie dans le visible sur toute la gamme de longueurs d'onde $380-780 \text{ nm}$ environ.
- ✓ **Les LED infrarouges** : l'énergie est au delà du spectre visible de la lumière, utilisés par exemple pour faire du positionnement (console wifi), des télécommandes, de l'éclairage pour caméra infrarouge....

V-2-5. Applications des LED

Les nombreuses applications des LED concernent principalement :

- ✓ Les voyants, témoins et indicateurs lumineux.
- ✓ Les afficheurs et les panneaux de signalisation.

- ✓ Les télécommandes infrarouges.
- ✓ Les émetteurs optiques pour transmission par fibre optique.
- ✓ Les opto-coupleurs qui assurent une transmission avec isolation galvanique.
- ✓ L'éclairage.
- ✓ Les fourches et capteurs optiques, les détecteurs de passage...

V-2-6. Avantages et inconvénients des LED

Les avantages des diodes électroluminescentes sont nombreux à savoir :

- Facilité de montage en circuit.
- Consommation inférieure aux lampes à incandescence et du même ordre de grandeur que les tubes de fluorescence.
- Excellente résistance mécanique (chocs, écrasement, vibrations).
- Taille beaucoup plus réduite que les lampes classiques, ce qui offre la possibilité de réaliser des sources de lumière très ponctuelles, de faible à très faible consommation électrique (quelque dizaines de milliwatts) et avec un bon rendement. En assemblant plusieurs LED, on peut réaliser des éclairages avec des formes novatrices.
- Durée de vie beaucoup plus longues qu'une lampe à incandescence classique où même qu'une lampe fluorescente (20 000 à 50000 heures environ contre 5000 à 15000 heures pour les lampes fluorescente et 1000 heures pour les lampes à incandescence).
- Fonctionnement en très basse tension (TBT), plus de sécurité et de facilité de transport.
- Par rapport aux systèmes lumineux classiques, elles s'allument et s'éteignent en un temps très court, ce qui permet l'utilisation en transmission de signaux à courte distance (opto-coupleurs) ou longue (fibres optiques).

- Vu leur puissance, Les LED classiques ne chauffent presque pas et ne brûlent pas les doigts. Pour les montages de puissance supérieure à $1W$, il faut prévoir une dissipation de chaleur pour éviter l'endommagement de la diode. En effet, une diode électroluminescente convertit environ 20% de l'énergie électrique en lumière, le reste étant dégagé sous forme de chaleur.

Les inconvénients des diodes électroluminescentes ne sont pas nombreux, on peut citer par exemple :

- L'existence d'effets sanitaires liés à l'usage des LED. La forte proportion de lumière bleue des LED pourrait être à l'origine de lésions oculaires.
- Prix d'achat des LED reste plus élevé que celui des lampes classique, à luminosité égale mais devrait baisser rapidement compte-tenu de développement rapide.
- La LED étant un semi-conducteur, elle est affectée par la température : plus elle chauffe, plus sa tension directe de jonction décroît, et son rendement lumineux se dégrade. Cela pose des problèmes de fiabilité si une mise en œuvre thermique adéquate n'est pas réalisée (pour les modèles de puissance).

V-3. Diodes Lasers

V-3-1. Définitions

- ❖ Le terme laser est l'acronyme anglais de (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) qui signifie l'amplification de la lumière par émission stimulée de radiation basée sur le phénomène de l'émission stimulée, qui a été postulée par Einstein dans les années 1910.
- ❖ L'amplification de la lumière par émission stimulée de photons produit une lumière qui est monochromatique, directionnelle, cohérente et de haute intensité.
- ❖ La diode laser est un composant similaire à la diode électroluminescente, car elle est constituée d'une jonction p-n réalisée sur des matériaux à gap direct avec une région active où les porteurs injectés, par forte polarisation directe de la diode, se recombinent

de façon radiative, produisant une lumière cohérente issue d'émissions stimulées de photons. Une telle diode laser s'appelle laser à homo-jonction, sa structure de base est représentée sur la figure V-4. Son faisceau lumineux de sortie est latéral. Il est très directif et de fréquence très précise.

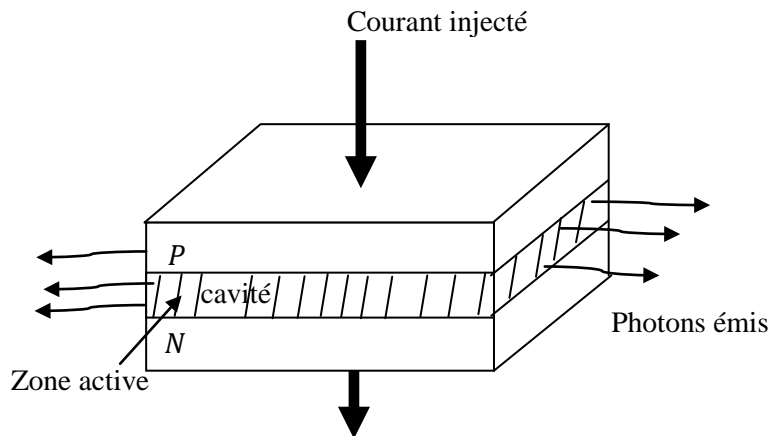


Fig V-4. Structure de base d'une diode laser

V-3-2. Principe de fonctionnement d'un laser

Le fonctionnement d'un laser repose sur trois composantes comme représenté sur la figure (V-5).

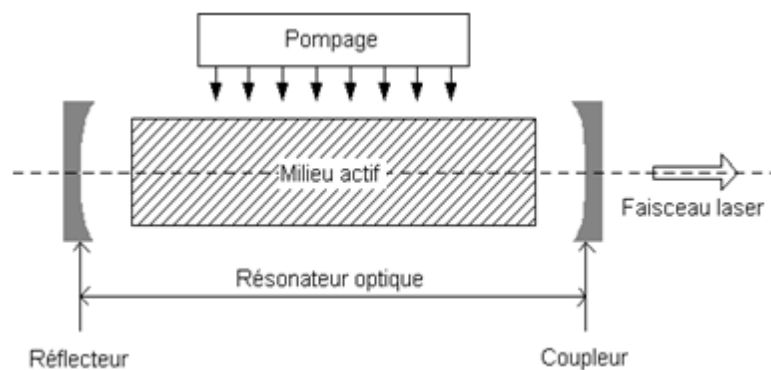


Fig V-5. Schéma d'un système laser

- Un milieu amplificateur où l'inversion de population et l'amplification du nombre de photons grâce au phénomène d'émission stimulée qui s'y produit, ce milieu peut être : solide, liquide ou gazeux, mais dans notre cas, c'est un matériau semi-conducteur.
- Un processus de pompage permettant d'amener les atomes du niveau fondamental sur le niveau d'énergie excité.
- Une cavité résonante généralement constituée de deux miroirs parallèles entre lesquels est placé le milieu actif. Ceux-ci permettent de réintroduire le faisceau lumineux dans l'amplificateur et de réaliser une sélection spectrale des fréquences pouvant être générées: seules les fréquences présentant un retour en phase après un aller-retour dans la cavité seront sélectionnées.

L'effet laser se produit lorsque, d'une part, l'émission stimulée devient prépondérante par rapport à l'émission spontanée (inversion de population), et d'autre part, le gain dans le milieu amplificateur devient supérieur aux pertes optiques dans la cavité (pertes par absorption, pertes par propagation et pertes par réflexions sur les miroirs). On appelle *seuil d'émission laser* la densité de puissance de pompage nécessaire pour réaliser ces deux conditions.

V-3-3. 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.V-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 $P(I)$ est quasiment droite.
- A fort courant, la courbe s'éloigne de la droite à cause de l'échauffement du composant.

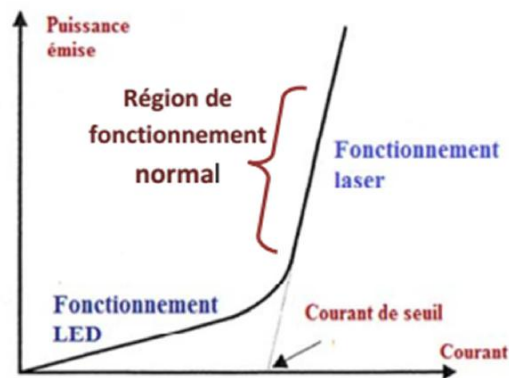


Fig V-6. Caractéristique puissance-courant de la diode laser

V-3-4. 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'homo-jonction $GaAs$ 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.
- 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-3-5. Différents types de Laser

La très grande diversité des LASER en rend difficile une classification claire. La classification ci-dessous, basée essentiellement sur la nature du milieu amplificateur :

- ✓ **Laser à solide** : le milieu amplificateur est un solide (cristal, verre).
- ✓ **Laser à fibre** : au sens strict, les Laser à fibre sont également des Laser à solide : des ions métalliques (néodyme, erbium, ytterbium, etc.).
- ✓ **Laser à semi-conducteur** : le milieu actif est encore un solide (semi-conducteur), mais avec des propriétés et des applications très différentes de celles des Laser à solide.
- ✓ **Laser à Gaz** : ces Laser utilisent comme milieu amplificateur un gaz (CO_2 , Hélium – néon (He-Ne)).

V-3-6. Les différents types des lasers à semi-conducteurs

a. Laser à homo-jonction

Le laser à jonction est la juxtaposition de deux semi-conducteurs de même nature mais dopés différemment. A la frontière entre ces deux milieux, les électrons diffusent de la région n vers la région p , puis se recombinent dans la région p avec les trous présents dans cette région.

A l'équilibre thermodynamique, il n'y a qu'un seul niveau de Fermi, et par l'application d'une faible différence de potentiel direct entre les semi-conducteurs suffit de modifier la concentration des porteurs minoritaires au voisinage de la jonction (séparation des niveaux de Fermi).

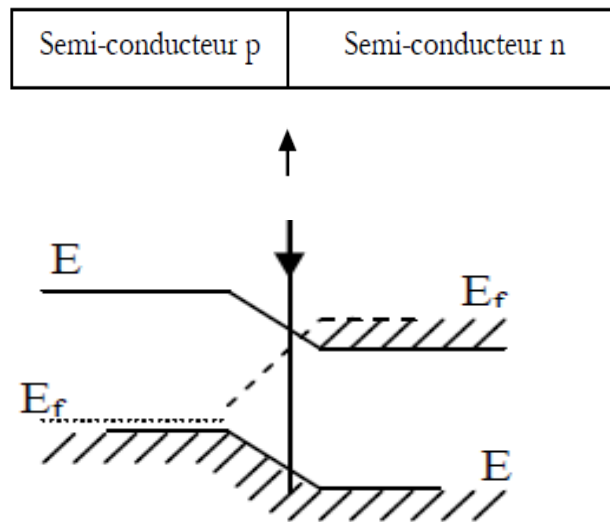


Fig V-7. Principe du laser à homo-jonction

b. Laser à double hétérojonction (DH)

L'utilisation d'une hétéro-structure c'est-à-dire l'assemblage de trois couches, deux couches de grand gap de chaque côté et d'une couche de bande interdite plus faible. On ne peut pas assembler n'importe quels semi-conducteurs ensemble, il est nécessaire qu'ils aient mêmes paramètres de maille cristalline. Cette structure permet de confiner l'onde optique dans la couche active pour favoriser le couplage des photons et des porteurs à l'origine de l'émission stimulée. L'indice optique de la zone active (bande gap plus petite) est plus élevée que celui de la zone de confinement, l'onde optique est alors piégée dans la zone active.

Sous l'effet d'une polarisation directe, un courant circule dans la jonction qui correspond au passage des électrons de la région n vers la région p et inversement pour les trous. A l'interface de la jonction, c'est-à-dire au niveau de la zone active, il y a un confinement puis recombinaison radiative des porteurs (électrons et trous), et émission d'un rayonnement.

A partir d'une tension de la polarisation V_d , le quasi-niveau de Fermi en bande de conduction E_{fc} se rapproche du bas de la bande de conduction et E_{fv} se lève du haut de la bande de la valence.

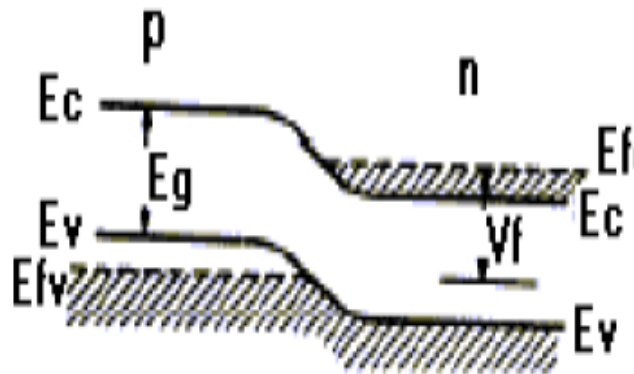


Fig V-8. : Diagramme de bande pour une hétérojonction (polarisation directe $V_d = V_{d1}$)

Si on augmente la tension de la polarisation V_d d'une valeur suffisante $V_{d2} > V_{d1}$, l'injection des porteurs est suffisante pour obtenir la situation suivante:

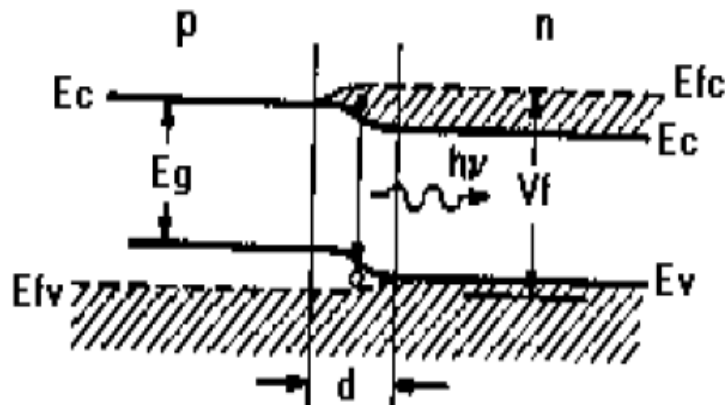


Fig V-9 : Diagramme de bande pour une hétéro-structure

(Polarisation directe $V_d = V_{d2} > V_{d1}$)

c. Lasers semi-conducteurs à puits quantiques

Un puits quantique est une structure à couche mince semi-conductrice qui possède une énergie de gap donnée confinée entre deux couches de semi-conducteurs d'énergie de gap plus élevée (figure V-10). Ainsi, la couche médiane appelée couche active se comporte comme un puits de potentiel pour les électrons comme pour les trous, si la différence de gap est convenablement partagée entre les bandes de conduction et de valence dans les deux matériaux. Si de plus, son épaisseur est suffisamment petite relativement au libre parcours moyen de l'électron (10-100 nm), le mouvement des électrons perpendiculaires aux interfaces est quantifié et leurs densités d'états permis deviennent constantes « en escalier », au lieu d'une densité parabolique dans un semi-conducteur massif. Ce phénomène est appelé effet de taille quantique.

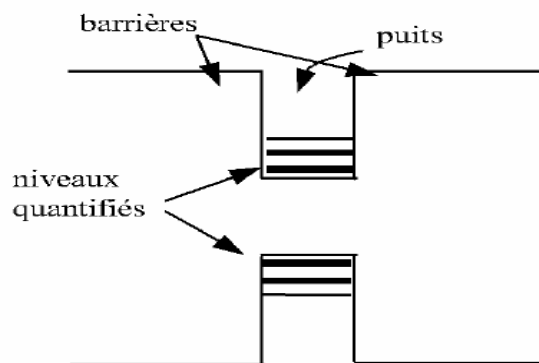


Fig V-10 : Puits quantiques

Le puits quantique existe sous trois types différents :

- 1) **Puits quantique de type I** : les électrons et les trous sont confinés dans le même matériau constituant le puits. L'énergie de photon dépend des énergies de confinement des porteurs et du gap du matériau puits.

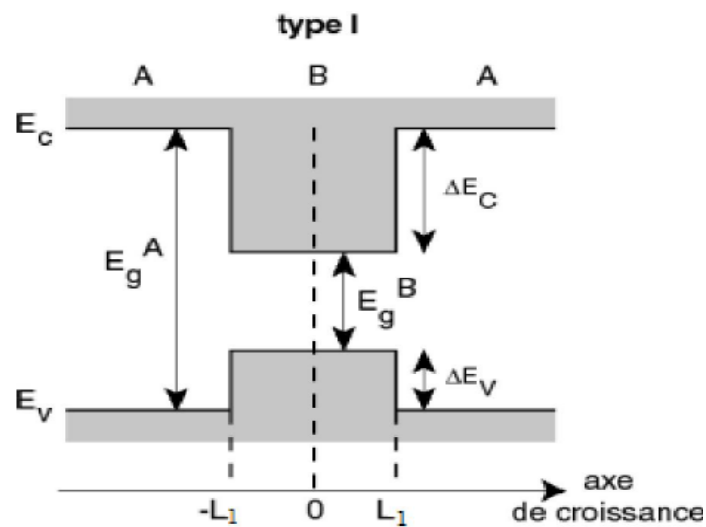


Fig V-11. Puits quantique de type I

- 2) **Puits quantique de type II** : les porteurs sont confinés dans deux matériaux adjacents. L'énergie de photon est fonction des énergies de confinement des porteurs mais aussi des gaps des deux matériaux formant l'hétéro-structure.

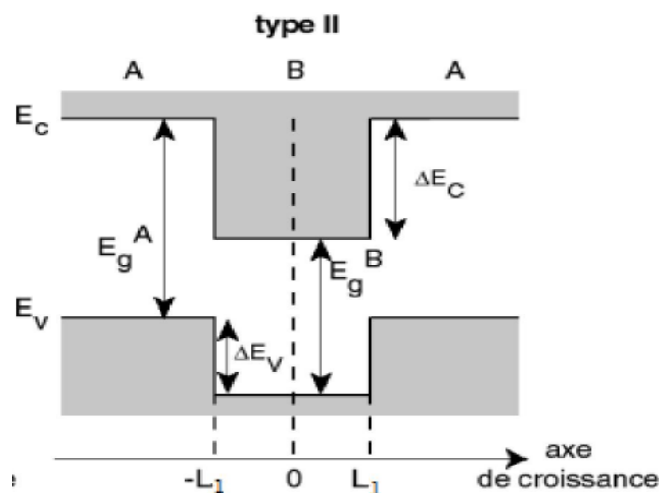


Fig V-12. Puits quantiques de type II

- 3) **Puits quantique de type III**

Est un cas particulier ; où le bas de la bande de conduction se trouve en dessous du haut de la bande de valence. Cette situation appelée aussi configuration semi-métallique.

L'énergie de photon émis n'est alors fonction que des énergies de confinement des électrons et des trous, donc des épaisseurs des couches.

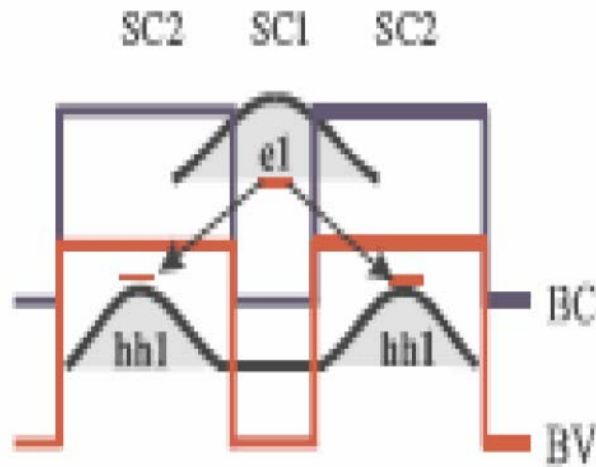


Fig V-13. Puits quantique de type III

V-3-7. Utilisation des diodes lasers

Les diodes Lasers sont donc utilisées dans plusieurs domaines, particulièrement dans: les télécommunications optiques, la lecture de CD, l'holographie et le stockage de l'information dans les disques optiques (CD ou DVD pour la musique comme pour l'informatique), les photocopieuses ou les imprimantes LASER, les applications médicales et industrielles... (Lecteurs code barre), les systèmes d'interconnexion optique par fibre ou en espace libre ainsi que d'autres applications.

V-4. Photodiodes

V-4-1. Définition

Une photodiode est constituée par une jonction *PN* polarisée en inverse. Entre les zones P et N apparaît sous l'application d'un champ électrique une zone de transition, appelée zone de charge d'espace, qui permet la création et la séparation des paires électron-trou.

Pour pouvoir augmenter le rendement quantique, la zone de transition doit posséder une épaisseur W suffisante, mais dans les photodiodes rapides la zone de transition ne doit pas être

trop grande afin de diminuer le temps de transition des porteurs, il existe donc un compromis entre le rendement et la vitesse.

La représentation symbolique est montrée ci-contre :

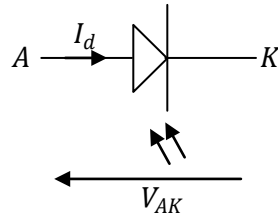


Fig V-14. Symbole d'une photodiode

V-4-2. Principe de fonctionnement des photodiodes

A l'origine, la photodiode est une diode qui n'a pas été encapsulée et qui est donc sensible aux radiations extérieures. Son principe de fonctionnement est basé sur les mécanismes de conduction dans une jonction *PN* polarisée en inverse et soumise à un rayonnement (Fig V-15).

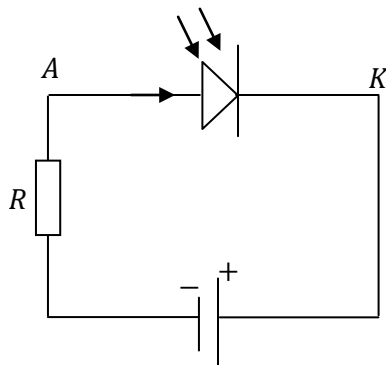


Fig V-15. Jonction *PN* sous polarisation inverse et soumise à un rayonnement

Les porteurs photo-générés sont séparés et accélérés par un champ électrique puis collectés pour contribuer au courant mesuré.

Le courant qui circule dans une diode est donné par l'expression :

$$I = I_s(e^{V/U_T} - 1) \quad (\text{V-2})$$

Où I_s est le courant de saturation, $U_T \approx 26 \text{ mV}$ à 300K et V la tension appliquée.

Lorsque la diode est polarisée en inverse et pour $|V| \gg U_T \Rightarrow I \approx -I_s$

Le courant mesuré est dû aux porteurs minoritaires des régions P et N et de la génération de paires électron-trou dans la Z.C.E.

Dans le cas de la photodiode, le rayonnement absorbé augmente ce courant par la création de porteurs dans la zone de charge d'espace.

Considérons le schéma de la figure V-16 suivante :

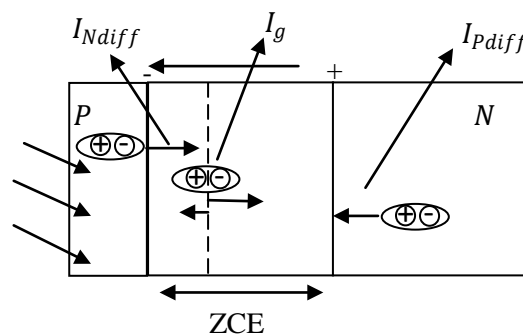


Fig V-16. Génération de porteurs par absorption de lumière dans les différentes zones de la diode

Les photons incidents créent des paires électron-trou dans chacune des régions : P , ZCE et N :

- Dans les régions neutres P et N , les porteurs minoritaires diffusent. Ceux qui atteignent la charge d'espace sont attirés par le champ et contribuent au courant par leur diffusion créant un photo-courant de diffusion (I_{diff}).
- Dans la ZCE , les paires électron-trou créées sont dissociées par le champ électrique ; l'électron est propulsé vers la région n et le trou vers la région p . Ces deux photo-porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération (I_g).

Les deux mécanismes s'ajoutent pour donner naissance au photo-courant I_{ph} :

$$I_{ph} = I_{Pdiff} + I_{Ndiff} + I_g \quad (V-3)$$

Ce photo-courant contribue alors à l'augmentation du courant inverse de la diode :

$$I = I_s(e^{V/U_T} - 1) - I_{ph} \quad (\text{V-4})$$

V-4-3. Caractéristique statique courant-tension de la diode

Le photo-courant est pratiquement indépendant de la tension de polarisation (Eq (V-4)). La caractéristique de la diode en obscurité et sous éclaircissement est donnée sur la figure V-17 suivante :

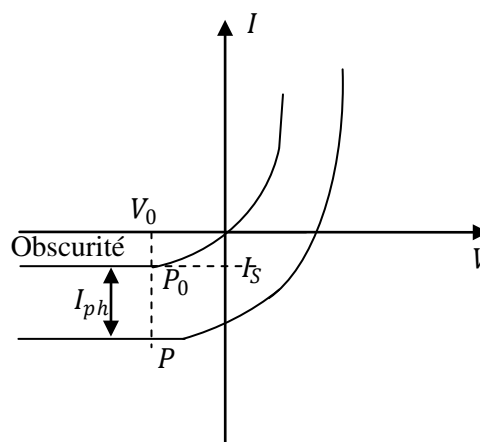


Fig V-17. Caractéristique d'une photodiode en obscurité et sous éclaircissement

Dans la pratique, une photodiode peut être utilisée suivant deux modes de fonctionnement :

➤ **Mode photo-conducteur** ($V_0 < 0$)

Ici on applique une tension inverse, c'est le mode le plus utilisé pour les longueurs d'onde dans le visible et dans le proche infrarouge.

Dans ce cas, on mesure le photo-courant débité par la diode :

$$I = I_s(e^{V_0/U_T} - 1) - I_{ph} \quad (\text{V-5})$$

Les photodiodes sont en général polarisées par des tensions de l'ordre de 5V et inférieures à la tension d'avalanche.

Dans ce cas, on peut supposer que la tension V_0 est très grande devant U_T , ce qui nous permet d'écrire :

$$I = -(I_s + I_{ph}) \approx -I_{ph} \quad (V-6)$$

Le courant mesuré est alors proportionnel à l'intensité de la lumière incidente.

➤ **Mode photovoltaïque ; $I = 0$:**

Correspond à une diode, sans polarisation externe, est en circuit ouvert (cas des cellules solaires). Dans ce cas, on mesure le photo-voltage qui apparaît aux bornes de la diode:

$$I = I_s(e^{V_{co}/U_T} - 1) - I_{ph} \quad (V-7)$$

Qui donne

$$V_{co} = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (V-8)$$

V_{co} tension de circuit ouvert, est proportionnelle au logarithme népérien du photo-courant, donc la tension V mesurée est proportionnelle au logarithme népérien de l'intensité du rayonnement.

V-4-4. 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_{ph} . Ceci se traduit par le circuit de la figure V-18

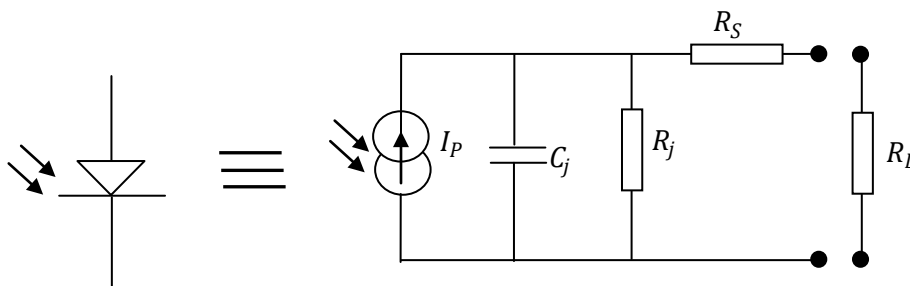


Fig V-18. Schéma équivalent de la photodiode

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

$$C_j = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{W} \quad (\text{V-9})$$

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-4-5. Différents types de photodiode

a. Photodiode à homo-jonction PN

A partir d'un matériau semi-conducteur tiré ou déposé par épitaxie, on réalise une jonction par diffusion. Dans ce genre de structures, la grande partie de l'absorption des photons se réalise en dehors de la zone de charge d'espace.

b. Photodiodes PIN

On augmente artificiellement la valeur de W_0 en intercalant une région intrinsèque entre les régions de type N et de type P (figure V-19). Si la polarisation inverse de la structure est suffisante, un champ électrique important existe dans toute la zone intrinsèque et les photo-porteurs atteignent très vite leur vitesse limite V_S . On obtient ainsi des photodiodes rapides et très sensibles. La structure PIN est la photodiode la plus commune.

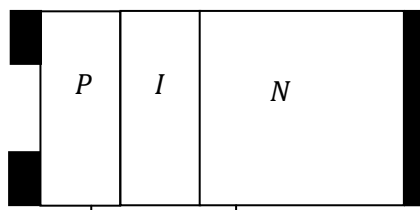


Fig V-19. Photodiode PIN.

c. Photodiode à avalanche

Lorsque la polarisation inverse de la photodiode est voisine de la tension de claquage, les photo-porteurs créés dans la zone de charge d'espace sont multipliés par effet d'avalanche. Le gain ainsi obtenu est facilement supérieur à 100, toutefois certaines précautions doivent être prises dans le circuit de polarisation car ce gain est très sensible à la tension de polarisation et à la température. Les photodiodes à avalanche sont utilisées dans les systèmes de télécommunication par fibres optiques.

d. Photodiode Schottky

La diode Schottky est obtenue par dépôt d'une fine couche métallique sur base semi conducteur. Ces photodiodes à jonction métal-semi conducteur présentent par rapport aux structures classiques l'avantage d'avoir un domaine spectral plus étendu. Une photodiode Schottky est constituée d'un substrat de silicium de type N , sur lequel est déposée une couche mince métallique, généralement de l'or. On réalise ainsi une barrière de Schottky. Lorsque le rayonnement crée des paires électron-trou dans la zone de charge d'espace du semi-conducteur, la diode est le siège d'un photo-courant de génération analogue à celui de la photodiode à jonction PN . L'avantage de la photodiode Schottky réside dans le fait que la couche métallique, si elle est suffisamment mince, est transparente au rayonnement dans le domaine du proche ultraviolet.

e. Photodiode à hétérojonction

C'est une structure qui associe deux semi-conducteurs à gaps différents. On dépose par épitaxie sur un matériau semi-conducteur de type donné (P par exemple) un autre matériau de gap différent et de type opposé. Parmi les photodiodes à hétérojonction, on peut citer les diodes à Te-Ge ; Te-Si ; InSb-InAs ; Ge-GaAs.

V-5. Cellule solaire Photovoltaïque

V-5-1. Définition

Contrairement aux photodiodes, ces cellules fonctionnent sans polarisation extérieure. La figure V-20, montre la structure d'une cellule solaire.

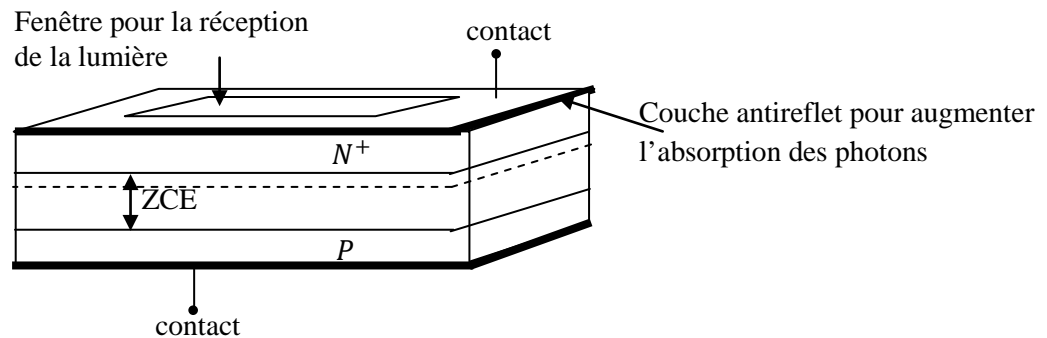


Fig V-20. Structure d'une cellule solaire.

V-5-2. Principe de fonctionnement

Les porteurs de charges (e^- , h^+) générés par l'absorption des photons dans la zone ZCE seront séparés par le champ électrique interne de la jonction et y diffusent dans les zones P et N^+ où ils sont majoritaires.

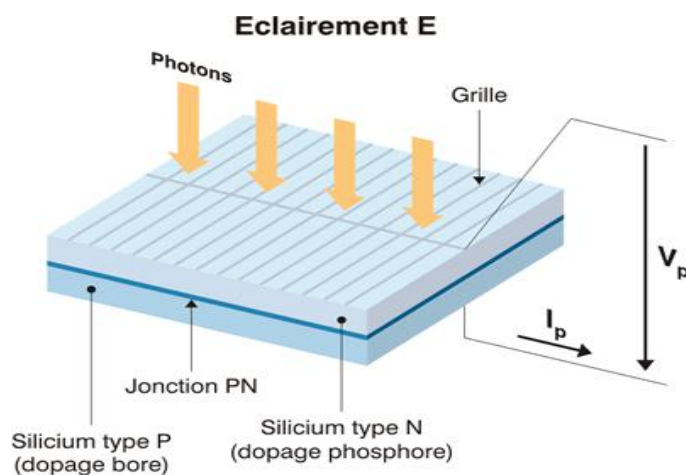


Fig V-21. Structure d'une cellule solaire avec éclairement

Ensuite, ils seront collectés au niveau des contacts métalliques qui assurent la liaison électrique avec le circuit extérieur donnant lieu à un courant photoélectrique I_{ph} qui en parcourant une charge (batterie, moteur, résistance...), fait apparaître une différence de potentiel entre les deux faces de la cellule comme c'est indiqué sur la figure V.22.

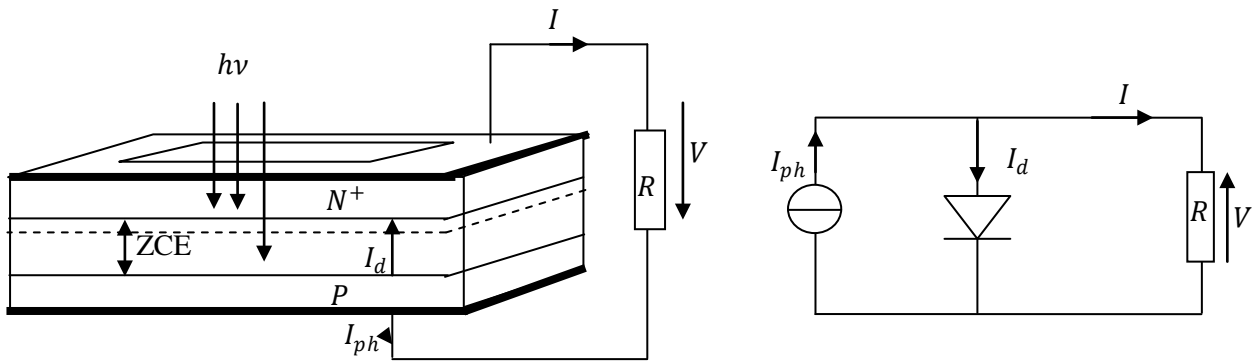


Fig V-22. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

V-5-3. Schéma électrique équivalent

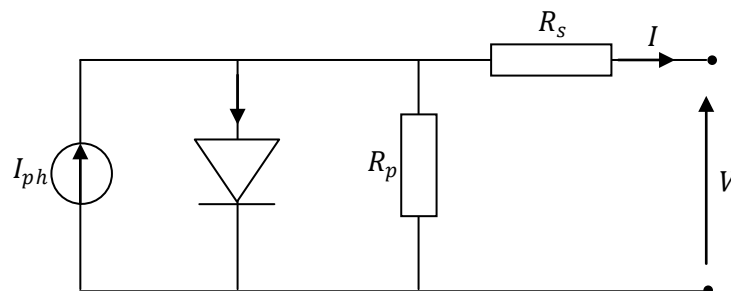


Fig V-23. Schéma équivalent d'une cellule solaire

- ❖ Le générateur (I_{ph}) modélise le courant photoélectrique produit sous éclaircissement.
- ❖ La diode modélise le composant en obscurité.
- ❖ R_s résistance série du composant, c'est la somme des résistances des zones de contact plus la résistance de la zone intrinsèque.
- ❖ R_p résistance parallèle qui modélise les courants parasites traversant la cellule dus aux porteurs photo-générés puis recombinaison.

V-5-4. Courant fourni par une cellule photovoltaïque

$$I = I_{ph} - I_s \exp \left[\frac{q(V+R_s I)}{KT} - 1 \right] - \frac{(V+R_s I)}{R_p} \quad (V-9)$$

Vu la très faible valeur de R_s , on peut négliger la chute de tension à ses bornes ($R_s I$) devant la tension de sortie V , et l'équation de courant devient alors :

$$I = I_{ph} - I_s \exp \left[\frac{qV}{KT} - 1 \right] - \frac{V}{R_p} \quad (V-10)$$

Le schéma représentatif de la cellule est alors représenté par la figure V-24.

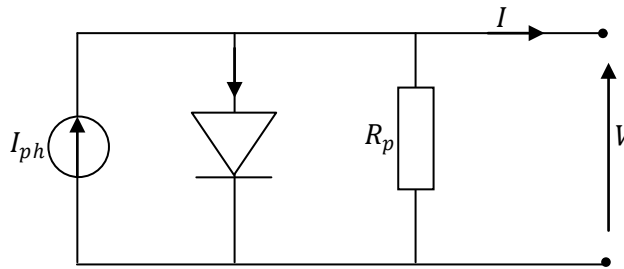


Fig V-24. Schéma équivalent simplifié d'une cellule solaire

Comme on peut ne pas tenir compte du faible courant traversant la très forte résistance R_p , on travaille avec l'équation de courant suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \exp \left[\frac{qV}{KT} - 1 \right] \quad (V-11)$$

Le schéma représentatif de la cellule encore simplifié est alors représenté par la figure V-25.

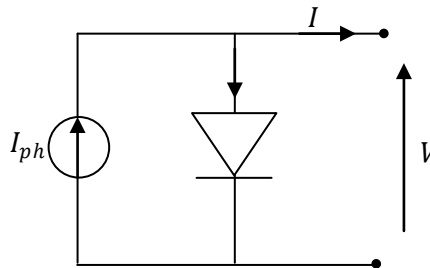


Fig V-25. Schéma équivalent encore simplifié

V-5-5. Paramètres d'une cellule solaire

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension-Puissance représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe:

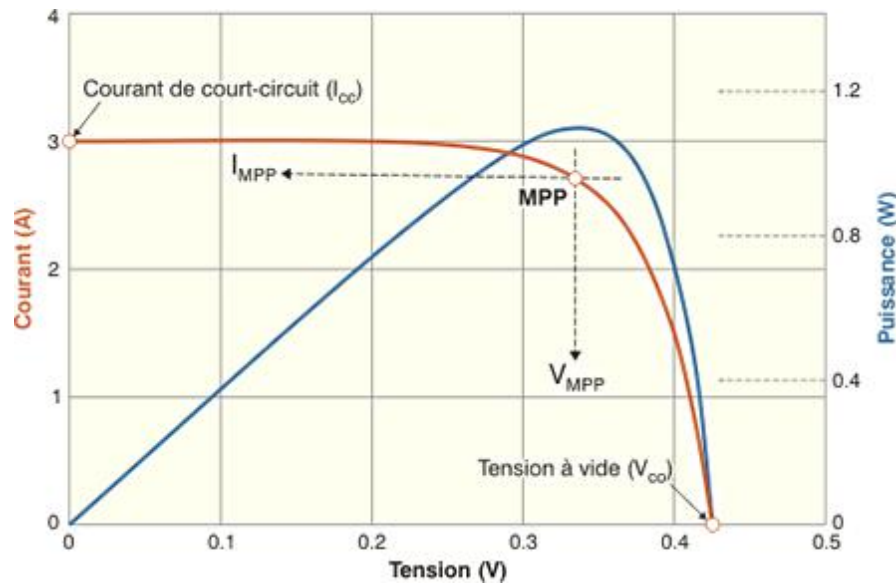


Fig V-26. Caractéristique et paramètres d'une cellule solaire
(Courant-Tension- Puissance) d'une cellule solaire au silicium

- Sa tension à vide V_{cc} . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit I_{cc} : Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal MPP : (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} I_{opt} , (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}).

Remarque

Pour permettre une comparaison de l'efficacité de différentes cellules, on définit ces caractéristiques dans des conditions de test bien précises (STC = Standard Test Conditions). Ces conditions sont : émission lumineuse de 1000 W/m^2 , température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, conditions spectrales Air Mass 1.5 (composition du spectre identique au spectre solaire lorsqu'il traverse une épaisseur et demie d'atmosphère, ce qui correspond à un angle d'incidence de 41.8° par rapport à l'horizontale).

Récapitulatif

La cellule peut être caractérisée par trois paramètres :

- Le courant de court-circuit I_{cc} ,
- La tension en circuit ouvert V_{co} ,
 - Le facteur de forme F_F , défini par le rapport de la puissance utile fournie par la cellule sur le produit $I_{cc} \cdot V_{co}$. Pour les cellules de bonne performance : $0,75 \leq F_F < 1$.
- Le rendement optique η : rapport entre l'énergie électrique fournie et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{F_F \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{inc}} \quad (\text{V-12})$$

En général, le rendement d'une cellule unique ne dépasse pas 15–16%, c'est pour cela on associe des batteries de cellules pour arriver à une puissance électrique convenable. Actuellement, les cellules très consommées en grande quantité dans le marché du photovoltaïque sont à base de silicium (Si) vue leur bas prix par comparaison aux cellules à base des matériaux tels que : GaAs, CdTe, CIGS,....

V-5-6. Raccordement des cellules entre elles

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm^2 (10 sur 10) tourne aux alentours de 1.25 Watt. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires.

La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique. Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.

a) Association en série

Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

Branchement de panneaux en série

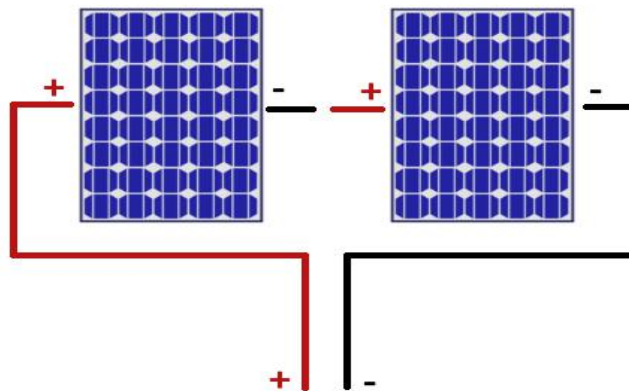


Fig V-27. Branchement de panneaux en série

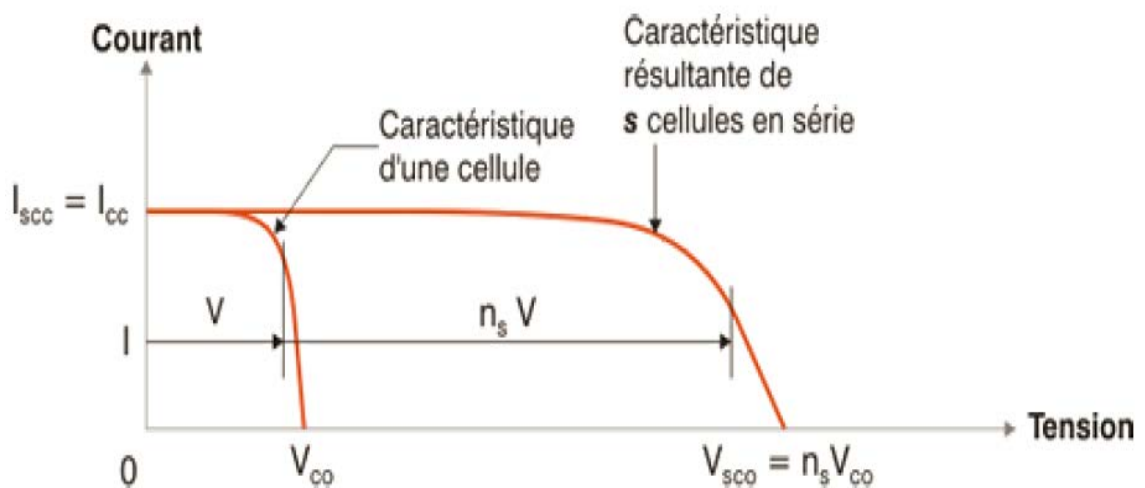


Fig V-28. Caractéristiques pour le branchement de panneaux en série

b) Association en parallèle

Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules.

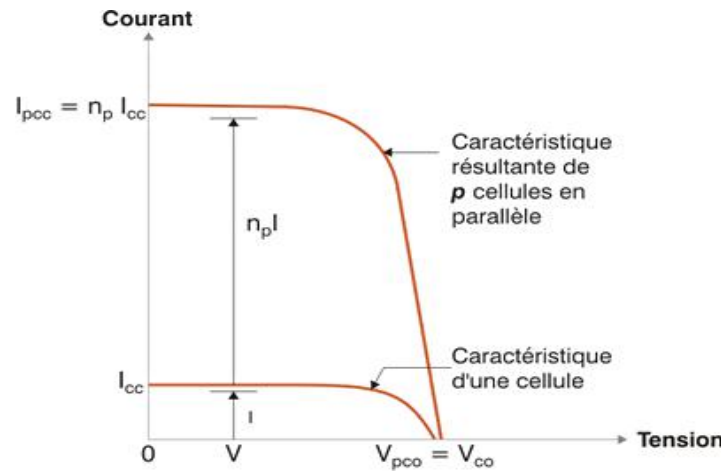


Fig V-29. Caractéristiques pour le branchement de panneaux en parallèles

Bibliographies

- [1] H. Mathieu, H. Fanet, « *Physique des semi-conducteurs et des composants Electroniques* », Edition Masson, Paris, (2009).
- [2] S.M. Sze, « *Semiconductor Devices: Physics and Technology* », 2nd Edition., J. Wiley, (2002).
- [3] E. Amzallag, J. Cipriani, J. Ben Aïm, N. Piccioli, « *Electrostatique et Electrocinétique* », Edition Dunod, Paris, (2006).
- [4] D.A. Neamen. « *Semiconductors Physics and Devices, Basic Principles* », University of New Mexico, McGrawHill, 3rd Edition, (2003).
- [5] Chovet., P. Masson. « *Physique des semi-conducteurs* ». Ecole Polytechnique, Université de Marseille. France, (2005).
- [6] R. Breahna, « *Les composants Electroniques Passifs* », Les Presses de l'Université Laval.
- [7] S. Rebiai-Benahmed, « *Composants optoélectroniques* », Esience.
- [8] B. Amana, C. Richter, O. Heckmann, « *LASER à Semi-Conducteur (Diode LASER)* », Les Presses de l'Université de Cergy-Pontoise, Master 1 Physique.
- [9] J.C. Chaimowicz. « *Introduction à l'optoélectronique - Principes et mise en œuvre* » ; Ed. Dunod. 1992.
- [10] E.F. Schubert, « *Light-Emitting Diodes* », Cambridge University Press, (2003).
- [11] T. Neffati, « *Electronique de A à Z* », Edition Dunod, Paris, (2006).
- [12] P. Maye, « *Aide-mémoire: Composants électroniques* », Edition Dunod, Paris, (2015).
- [13] E. Rosencher, B. Vinter. « *Optoélectronique; Collection Sciences Sup* » ; Edition Dunod, -2ème édition. (2002).
- [14] Z. Toffano. « *Optoélectronique: composants photoniques et fibres optiques* » ; Edition Ellipses. (2001).