ECOLE NORMALE SUPERIEURE

DÉPARTEMENT DES SCIENCES NATURELLES

SECTION DE PHYSIQUE TECHNOLOGIE

# SYLLABUS DE L'ECUE « ÉLECTRONIQUE FONDAMENTALE »

## CLASSE : BACCALAURÉAT II

**Par**

**Dr Agnes NAKIMANA**

**Agnes NAKIMANA** est titulaire d'un doctorat en optique après une thèse soutenue en janvier 2013, à Changchun University of Sciences and Technolgy (en Chine). Elle est actuellement enseignant-chercheur à l'École Normale Supérieure du Burundi, au Département des Sciences naturelles, où elle est Chargé de Cours. Elle enseigne également dans d'autres universités du pays. Ses activités d'enseignement portent principalement sur l'électronique fondamentale, Optique physique, Electronique approfondie et la physique des lasers.

# Avant-propos

Dans le système BMD, l'enseignant n'est pas le seul détenteur du savoir. L'étudiant doit participer à sa propre formation et l'enseignant lui indique les différents types d'outils pédagogiques nécessaires à une documentation appropriée. Parmi ces outils figurent les syllabus d'Eléments Constitutifs d'Unités d'Enseignement (ECUEs) dispensés pour chaque programme de formation. C'est dans ce contexte que le présent syllabus de l'ECUE dénommé Electronique fondamentale est produit afin qu'il soit à la disposition des étudiants et du public.

Dans toute la suite, nous désignons par :

− ECUE : Elément Constitutif d'Unité d'Enseignement.

− ECUEs : Eléments Constitutifs d'Unité d'Enseignement.

− UE : Unité d'Enseignement.

Selon l'organisation pédagogique des enseignements des ECUEs de la Section de Physique-Technologie, l'Ecole Normale Supérieure, le présent syllabus porte sur l'un des deux ECUEs de l'UE numéro 1 intitulé Physique III dans l'offre de formation en cours.

## 1)Identification et description de l'ECUE

- Nom de l'ECUE : Electronique fondamentale
- Code de l'ECUE : PTE 2302
- Nombre de crédits : 3
- Volume horaire total : 45 heures
- Prérequis : Electricité I et Electricité II

L'ECUE d'Electronique fondamentale proposé dans le programme de Baccalauréat en Physique-

Technologie est un outil indispensable pour connaitre les différents composants électroniques et leur mode de fonctionnement. Le public cible est constitué par les étudiants de la

deuxième année de Baccalauréat en Physique-Technologie.. Objectifs d'apprentissage de l'ECUE

## 2) Objectifs d'apprentissage de l'ECUE

### a) Objectif général

Connaitre les composants électroniques les plus utiles et leurs modes de fonctionnement.

### b) Objectifs spécifiques

A la fin de l'ECUE, l'étudiant devra être capable de :

- Comprendre les principes fondamentaux de l'électricité et de l'électronique ;
- Analyser des circuits électriques simples en régime continu en appliquant les lois et théorèmes de Kirchhoff ;
- Identifier les composants passifs et actifs d'un circuit électronique et expliquer leurs rôles ;
- Décrire les propriétés et le fonctionnement des matériaux semi-conducteurs ;
- Identifier les différents types de diodes et de transistors et expliquer leurs caractéristiques ;
- Comprendre les applications des composants électroniques dans les circuits de redressement, d'amplification et de commutation ;
- Réaliser et analyser des montages électroniques élémentaires à partir des connaissances acquises.

## 3) Brève introduction du contenu

L'électronique constitue l'un des fondements essentiels des technologies modernes, notamment dans les domaines des télécommunications, d'automatisation et des systèmes électriques. La compréhension des lois fondamentales qui régissent les circuits électriques ainsi que le fonctionnement des composants électroniques est indispensable à l'analyse, à la conception et à la réalisation de systèmes électroniques.

Cet ECUE vise à fournir aux étudiants les connaissances théoriques et pratiques nécessaires à l'étude des circuits électriques et électroniques. Il aborde d'abord au premier chapitre l'analyse des circuits linéaires et les différents théorèmes fondamentaux de l'électricité. Ces théorèmes permettent de simplifier l'étude des circuits comportant plusieurs sources électriques et de déterminer les grandeurs électriques essentielles, telles que les tensions et les courants, dans différentes branches d'un circuit.

L'ECUE porte également sur l'étude des principaux composants électroniques, notamment les résistances et les condensateurs au deuxième chapitre, les semi-conducteurs au troisième chapitre, les diodes et les

transistors au quatrième et cinquième chapitre. Il permet aux étudiants de comprendre leurs caractéristiques, leurs principes de fonctionnement et leurs applications dans les circuits électronique. A la fin de chaque chapitre des exercices et des séances de travaux pratiques sont proposés aux étudiants.

À l'issue de cet enseignement, les étudiants devront être capables d'appliquer les théorèmes fondamentaux à la résolution de circuits électriques, d'identifier les principaux composants électroniques, d'expliquer leur fonctionnement et d'analyser des montages électroniques élémentaires. Cet ECUE constitue ainsi une base essentielle pour les enseignements ultérieurs en électronique analogique, en électronique numérique et dans les systèmes de télécommunication.

## 3) Méthodes d'enseignement employées

Les méthodes d'enseignement privilégiées dans cet ECUE d'Electronique sont celles qui suscitent la curiosité et l'autonomie de chaque étudiant, et qui lui permettent aussi d'accroître son niveau de motivation face aux tâches qui lui sont proposées. Ainsi, il sera employé des méthodes active et participative incluant les travaux en autonomie et/ou en groupes suivi de la mise en commun. Des exercices d'application et des travaux pratiques sont donnés a la fin de chaque chapitre.

Les supports didactiques utilisés dans le cadre de ce cours sont : Plaque d'expérimentation, différents types de résistances, des condensateurs, des diodes normales et Zener, les transistors PNP et NPN et des fils conducteurs pour la connexion des composants.

## 5. Modalités d'évaluation des apprentissages

L'évaluation des apprentissages dans le cadre de cet ECUE est essentiellement écrite. Un travail dirigé comptant pour 40% est donné à mi-parcours (évaluations formative) et un examen est donné à la fin du cours (évaluation sommative). Cet examen couvre toute la matière et compte pour 60%. La plupart des travaux pratiques se font en groupe.

# TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos ..... i

1)Identification et description de l'ECUE ..... i

2) Objectifs d'apprentissage de l'ECUE ..... ii

a) Objectif général ..... ii

b) Objectifs spécifiques ..... ii

3) Brève introduction du contenu ..... ii

3) Méthodes d'enseignement employées ..... iii

5. Modalités d'évaluation des apprentissages ..... iii

TABLE DES MATIÈRES ..... iv

CHAP.0 : INTRODUCTION GÉNÉRALE ..... 1

CHAP.I : REGIME CONTINU ET LOIS DE KIRCHHOFF ..... 3

I.1. Introduction ..... 3

I.2. Objectif du chapitre ..... 4

I.3. Définitions ..... 4

I.3.1. Réseaux électrique ..... 4

I.3.2. Dipôles électriques ..... 5

I.4. Classification des dipôles ..... 6

I.4.1. Dipôles passifs linéaires ..... 6

I.4.2. Dipôles actifs (idéal, réel) ..... 6

I.5. Association des dipôles ..... 7

I.5.1 Association des dipôles passifs ..... 8

I.5.2. Association des dipôles actifs ..... 8

I.6. Lois de Kirchhoff ..... 9

I.6.1 Lois des nœuds ..... 9

I.6.2. Lois des mailles ..... 10

I.7. Conclusion ..... 10

I.8. Exercices d'application ..... 11

CHAP II: Résistances et condensateurs ..... 13

II.1. Introduction ..... 13

II.2 : Objectif du chapitre ..... 14

II.3. Résistances ..... 14

II.3.1 : Loi d'ohm ..... 15
II.3.2 : Puissance ..... 15
II.3.3 : Identification des valeurs d'une résistance ..... 16
II.3.4 : Association des résistances ..... 18
II.4. Condensateurs ..... 18

II.4.1. Capacité électrique ..... 19
II.4.2 : Constante diélectrique ..... 23
II.4.3 : Calcul de la capacité d'un condensateur ..... 24
II.4.4 : Charge et décharge d'un condensateur ..... 25
II.4.5 : Condensateur et l'énergie électrique ..... 28
II.4.6 : Energie emmagasinée par un condensateur ..... 28
II.4.7 : Association des condensateurs ..... 32
II.5 : Conclusion ..... 32

II.6 : Exercices d'application ..... 33

Chap. III. LES SEMI-CONDUCTEURS ..... 34

III.1: Introduction ..... 34

III.2 : Objectifs du chapitre ..... 35

III.3. Propriétés des semi-conducteurs ..... 35

III.4 : Les semi-conducteurs intrinsèques ..... 38

III.5 : Semi-conducteurs extrinsèques ..... 38

III.5.1. Semi-conducteurs extrinsèques de type N ..... 39
III.5.2. Semi-conducteurs extrinsèques de type P ..... 40

III.6 : Conclusion ..... 41
III.7 : Exercices d'application ..... 41
Chap. IV : Diode ..... 42
IV.1 : Introduction ..... 42
IV.2.Objectifs du chapitre ..... 42
IV.3. Jonction PN ..... 43
IV. 4. Théorie de la diode ..... 44
IV.4.1. Définition et constitution d'une diode ..... 44
IV. 4.2. Polarisations d'une diode ..... 44
IV.3. Caractéristique de la diode ..... 47
IV.4. Diode Zener ..... 48
IV.5. Les applications des diodes ..... 49
IV.5.1. Redressement simple alternance ..... 49
IV.4.2. Redressement double alternance ..... 51
IV.4.3. Stabilisation par diode Zener ..... 52
Conclusion ..... 54
Chap. V. TRANSISTOR A JONCTION OU TRANSISTOR BIPOLAIRE ..... 57
Introduction ..... 57
V.1. Types de transistors ..... 57
V.2 Principe de fonctionnement : effet transistor. ..... 58
V.3. Réseau de caractéristique du transistor ..... 60
V.4. Polarisation du transistor ..... 62
V.4.2 . Polarisation par Pont ..... 64
Conclusion ..... 66
1.1.1 Conclusion générale ..... 68

# CHAP.0 : INTRODUCTION GÉNÉRALE

L’électronique est une discipline scientifique et technologique qui étudie le comportement, le contrôle et l’utilisation des électrons dans les composants et les circuits électriques et électroniques. Elle constitue l’un des domaines fondamentaux des sciences de l’ingénieur et joue un rôle essentiel dans le développement des technologies modernes, notamment dans les systèmes de communication, l’informatique, l’automatisation, les télécommunications, l’instrumentation et les systèmes de commande.

L’ECUE d’électronique fondamentale vise à fournir aux étudiants les connaissances théoriques et pratiques nécessaires à la compréhension du fonctionnement des circuits électroniques ainsi que des principaux composants qui les constituent. Il permet notamment de comprendre les phénomènes électriques qui interviennent dans les circuits, d'analyser les différentes grandeurs électriques et d'étudier les caractéristiques et les applications des composants électroniques de base.

Dans un premier temps, le cours aborde les notions fondamentales relatives aux circuits électriques en régime continu. Une attention particulière est accordée aux lois et théorèmes de Kirchhoff, qui constituent des outils indispensables pour analyser et résoudre les circuits électriques. Le deuxième chapitre porte sur l'étude des composants passifs, principalement les résistances et les condensateurs, en mettant en évidence leurs caractéristiques, leurs propriétés et leurs comportements dans les circuits électriques.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des semi-conducteurs, matériaux essentiels au développement de l'électronique moderne. Il permet de comprendre leurs propriétés électriques, leur structure et les principes physiques qui expliquent leur fonctionnement. Sur cette base, le quatrième chapitre présente les différents types de diodes, leurs caractéristiques et leurs principales applications, notamment dans le redressement, la régulation et la protection des circuits électroniques.

Enfin, le cinquième chapitre porte sur les différents types de transistors. Il examine leurs principes de fonctionnement, leurs caractéristiques et leurs domaines d'application, en particulier dans les circuits d'amplification et de commutation.

À travers ces différents chapitres, l’ECUE cherche à établir un lien entre les principes théoriques et leurs applications pratiques. Il constitue ainsi une base indispensable pour aborder des enseignements plus avancés en électronique analogique, électronique numérique, systèmes de communication et automatisation.

# CHAP.I : REGIME CONTINU ET LOIS DE KIRCHHOFF

## I.1. Introduction

L’étude de l’électronique repose essentiellement sur la compréhension des phénomènes électriques et du comportement des différents composants qui constituent les circuits électroniques. Avant d’aborder le fonctionnement des composants électroniques tels que les diodes et les transistors, il est indispensable de maîtriser les notions fondamentales relatives aux circuits électriques, aux grandeurs électriques ainsi qu’aux lois qui régissent leur fonctionnement.

Ce premier chapitre est consacré à l’étude des circuits électriques en régime continu et aux lois fondamentales permettant leur analyse. Il présente, dans un premier temps, les notions de base relatives aux réseaux électriques, notamment les nœuds, les branches, les mailles et les dipôles électriques. Il aborde ensuite la classification des dipôles en distinguant les dipôles passifs et actifs, linéaires et non linéaires, ainsi que les caractéristiques des sources idéales et réelles de tension et de courant.

Le chapitre traite également des différentes associations de dipôles, notamment les associations en série et en parallèle, ainsi que les méthodes permettant de déterminer leurs grandeurs électriques équivalentes. Une attention particulière est accordée aux lois de Kirchhoff, à savoir la loi des nœuds et la loi des mailles, qui constituent des outils essentiels pour déterminer les intensités des courants et les tensions dans les différentes parties d'un circuit électrique.

À travers les explications théoriques et les exercices d'application, ce chapitre vise à développer chez l'étudiant les compétences nécessaires pour identifier, simplifier et analyser des circuits électriques en régime continu. Les connaissances acquises serviront de base à l'étude des composants électroniques et à la compréhension des circuits plus complexes abordés dans les chapitres suivants.

## I.2. Objectif du chapitre

À la fin de ce chapitre, l'étudiant devrait être capable de :

- Définir les notions de réseau électrique, de nœud, de branche, de maille et de dipôle ;
- Distinguer les dipôles passifs des dipôles actifs, ainsi que les dipôles linéaires des dipôles non linéaires ;
- Identifier les caractéristiques des sources idéales et réelles de tension et de courant ;
- Déterminer les grandeurs électriques équivalentes des associations de dipôles en série et en parallèle ;
- Appliquer la loi des nœuds et la loi des mailles de Kirchhoff ;
- Calculer les tensions, les intensités des courants et les résistances équivalentes dans des circuits électriques en régime continu ;
- Résoudre des problèmes pratiques d'analyse de circuits électriques simples.

## I.3. Définitions

### I.3.1. Réseaux électrique

Un réseau ou circuit électrique est un ensemble de composants électriques reliant entre eux : résistance, condensateur, bobine de self-induction, diode, transistor, etc... Il comporte au moins une source de tension ou de courant et un ou plusieurs éléments passifs ou actifs.

Dans un réseau électrique, on distingue :

• **le nœud :** c'est un point de raccordement entre au moins deux composants. Par exemple sur la figure I.1, les points A, B, C et D sont des nœuds.

• **la branche :** c'est une portion du réseau compris entre deux nœuds, c'est le cas par exemple des branches : AB, BD, CD ou AC.

• **la maille :** c'est une partie du réseau (un contour fermé) qui se referme sur elle-même par exemple le contour ABDC représente une maille.

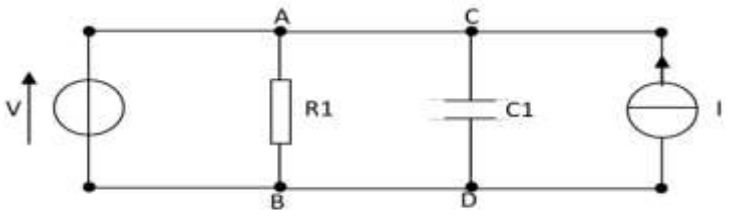



Figure I.1 : Réseau électrique

### I.3.2. Dipôles électriques

Un dipôle est un conducteur qui possède une borne d'entrée A et une borne de sortie B du courant.

Il est caractérisé par deux grandeurs : l'intensité qui le traverse I et la tension entre ses bornes $U_{AB}=U_A-U_B$. Un dipôle peut fonctionner comme un récepteur (figure I.2.a) ou bien comme un générateur (figure I.2.b) selon l'orientation du courant I et de la différence de potentiel V entre A et B.

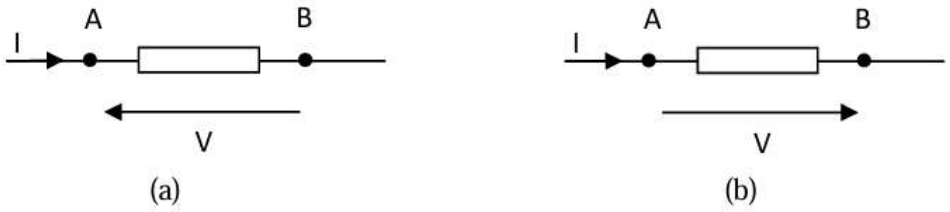



Figure I.2: (a) Convention récepteur, (b) Convention générateur,

Dans un dipôle, la tension V est liée avec le courant I par la caractéristique réciproque: I = f(V).

Selon l'allure de cette caractéristique, différentes familles de dipôle peut être distinguées. On cite les

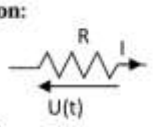
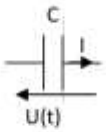
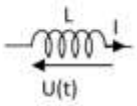
- **dipôles linéaires** comme les résistances et les générateurs de tension et de courant idéaux;
- **dipôles non linéaires** comme les diodes, les transistors, etc... Car la relation entre le courant I et la différence de potentiel V n'est pas une droite**.**

## I.4. Classification des dipôles

### I.4.1. Dipôles passifs linéaires

On appelle **un dipôle passif** lorsque la tension V et le courant I sont dans le sens contraire car la puissance p = V.I est *absorbée* par le dipôle (p < 0).

Nous allons maintenant rappeler les lois générales des trois types de dipôles passifs élémentaires: résistance, bobine et condensateur.

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Représentation:** |  |  |  |
| **Dipôle passif:** | **Résistance** | **Condensateur** | **Inductance** |
| **Loi fondamentale:** | $u(t) = R.i(t)$ | $i(t) = C\frac{du(t)}{dt}$ | $u(t) = L\frac{di(t)}{dt}$ |

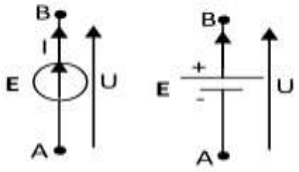
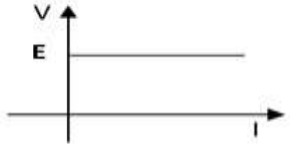
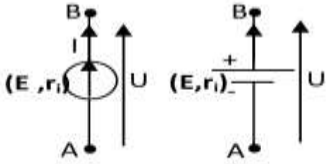
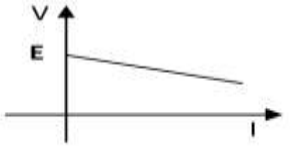
### I.4.2. Dipôles actifs (idéal, réel)

On appelle **un dipôle actif** lorsque la tension V et le courant I sont dans le même sens car la puissance p = V.I est *délivrée* par le dipôle (p> 0).

#### a- Sources de tension

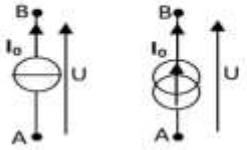
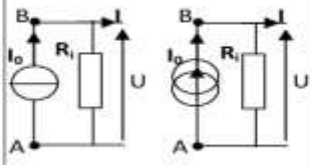
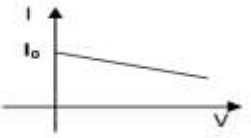
Dans le cas **d'une source de tension idéale**, la tension U entre ses bornes, égale à E (la force électromotrice), elle ne dépend pas du courant I qu'elle délivre puisque sa résistance interne $r_i$ est nulle.

Par contre, pour **les sources de tension réelles**, la tension de sortie diminue si le courant débité augmente.

| | Représentation | Caractéristique |
|---|---|---|
| **Source de tension idéale** |   |   |
| **Source de tension réelle** |   |   |

## b- Sources de courant

Dans le cas **d'une source de courant idéale**, le courant I délivré par cette source est fixe et égale à $I_0$, il ne dépend pas de la tension appliquée entre les bornes de la source. Une source de **courant réelle** présente toujours une résistance interne $R_i$. Cette dernière est montée en parallèle avec une source de courant idéale.

| | Représentation | Caractéristique |
|---|---|---|
| **Source de courant idéale** |   |   |
| **Source de courant réelle** |   |   |

## I.5. Association des dipôles

On dit que :

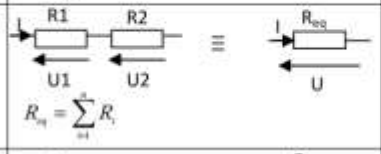
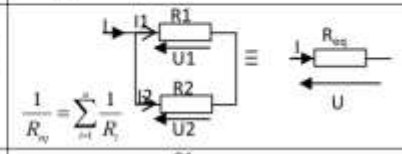
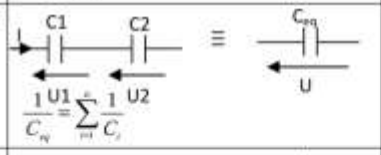
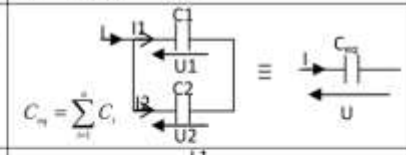
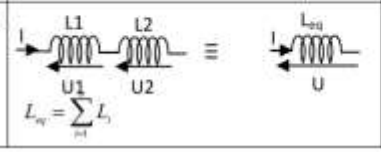
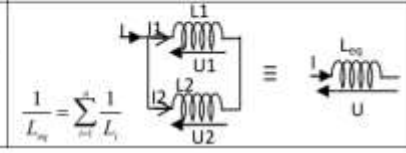
Deux dipôles sont **en série** si le *même courant* électrique qui les traverse.

Deux dipôles sont **en parallèle** si la *tension* appliquée à leurs bornes est *la même*.

On peut généraliser cette définition pour n dipôles.

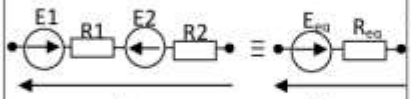
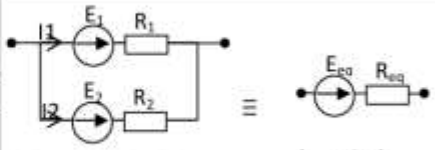
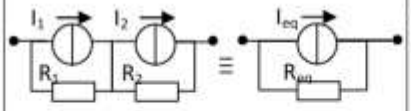
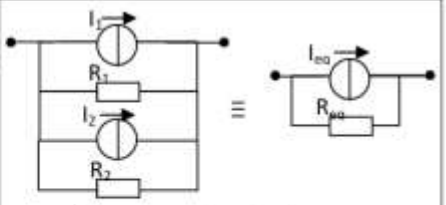
### I.5.1 Association des dipôles passifs

On se propose de déterminer le dipôle équivalent à l'association de plusieurs dipôles élémentaires passifs de même type (résistances, condensateurs et inductance). On doit envisager les deux types d'association (série et parallèle):

| Dipôle passif | Association série<br>$U=\sum_{i=1}^{n}U_i$ $I=I_1=I_2=I_i$ | Association parallèle<br>$I=\sum_{i=1}^{n}I_i$ $U=U_1=U_2=U_i$ |
|---|---|---|
| **R** : résistance (Ω)<br>**G** :conductance G=1/R ($\Omega^{-1}$) ou (S/Siemens) | <br>$R_{eq}=\sum_{i=1}^{n}R_i$ | <br>$\frac{1}{R_{eq}}=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{R_i}$ |
| **C** : capacité du condensateur (F / Farad) | <br>$\frac{1}{C_{eq}}=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{C_i}$ | <br>$C_{eq}=\sum_{i=1}^{n}C_i$ |
| **L** : inductance de la bobine (H / Henry) | <br>$L_{eq}=\sum_{i=1}^{n}L_i$ | <br>$\frac{1}{L_{eq}}=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{L_i}$ |

### I.5.2. Association des dipôles actifs

L'association de n générateurs réels de tension ou de courant (avec résistances internes) est équivalente respectivement à un générateur de tension ou de courant unique, dont la résistance interne équivalente $R_{eq}$, la force électromotrice équivalente $E_{eq}$ produite par la source de tension équivalente et le courant équivalent produit par la source de courant équivalente sont calculés selon le type d'association (série ou parallèle) des dipôles actifs .

| Dipôle actif | Association série | Association parallèle |
|---|---|---|
| Générateur de tension |   $R_{eq}=\sum_{i=1}^{n}R_i$ $E_{eq}=\sum_{i=1}^{n}E_i$ |   $E_{eq}=E_1=E_2=E$ $\frac{1}{R_{eq}}=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{R_i}$ |
| Générateur de courant |   $R_{eq}=\sum_{j=1}^{n}R_j$ $I_{eq}=I_1=I_2=I$ |   $I_{eq}=\sum_{i=1}^{n}I_i$ $\frac{1}{R_{eq}}=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{R_i}$ |

## I.6. Lois de Kirchhoff

### I.6.1 Lois des nœuds

En tout nœud d'un circuit, *la somme algébrique des courants qui entrant au nœud est égale à la somme des courants sortant du nœud* (conservation de la charge électrique). Ceci se traduit mathématiquement par la relation suivante :

$$\sum_{i=1}^{n} I_E = \sum_{j=1}^{m} I_S$$

Par exemple, on a donc ici au nœud N : $I_1+I_2+I_4+I_6=I_3+I_5$

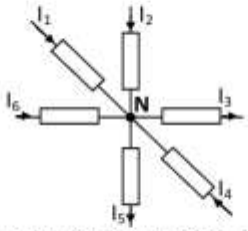



Figure I.4 Application de la loi de Kirchhoff

La loi des nœuds peut encore s'écrire sous la forme suivante : $\sum_{k=1}^{n} I_k = 0$

En tout nœud d'un réseau électrique la somme algébrique des courants est nulle : $I_1+I_2+I_4+I_6+(-I_3)+(-I_5)=0$

### I.6.2. Lois des mailles

*La somme algébrique des tensions le long d'une maille quelconque M (circuit fermé) est nulle*. Ceci se traduit mathématiquement par la relation suivante : $\sum U_k = 0$.

Toutes les tensions $U_i$ qui sont produites soit par les sources soit par le passage du courant dans les dipôles passifs se dirigent positivement ou bien négativement selon le sens de parcours choisis sur la aille.

Par exemple, selon le sens arbitraire de parcours sur :

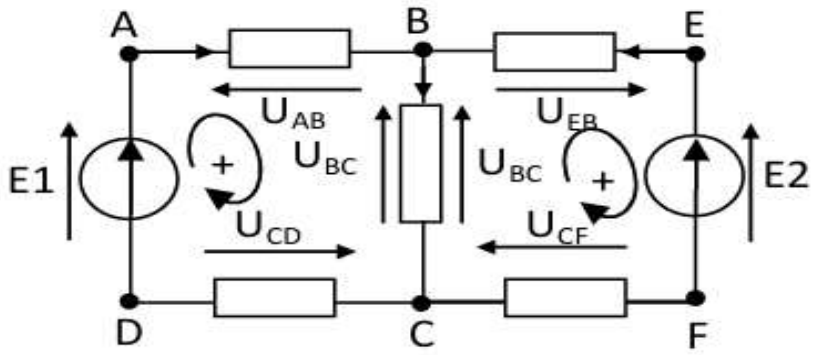



Figure I.5 Application de la loi des mailles

Par exemple, selon le sens de parcours choisi sur :

• la maille ABCD, on a donc : $E_1 - U_{AB} - U_{BC} - U_{CD} = 0$

• la maille BEFC, on a donc : $U_{BC} + U_{EB} + U_{CF} - E_2 = 0$

• la maille AEFD, on a donc : $E_1 - U_{AB} + U_{EB} - E_2 + U_{CF} - U_{CD} = 0$

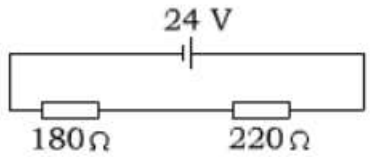
## I.7. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les notions fondamentales relatives aux circuits électriques en régime continu, notamment les réseaux électriques, les différents types de dipôles, leurs caractéristiques et leurs modes d'association. Il a également mis en évidence l'importance des lois de Kirchhoff (loi des nœuds et loi des mailles) dans l'analyse et la résolution des circuits électriques. La maîtrise de ces notions constitue une base indispensable pour comprendre le comportement des composants électriques et électroniques. Elles serviront ainsi de prérequis à

l'étude des résistances, des condensateurs et des composants semi-conducteurs dans les chapitres suivants.

## I.8. Exercices d'application

### Exercices 1




a) Ajoutez des flèches sur le dessin pour représenter :
   -les tensions U1, U2 et U de la source de tension
   - l'intensité du courant.

b) Calculer
   - La résistance équivalente à l'association des deux résistances en série.
   - L'intensité du courant dans le circuit.
   - Les tensions aux bornes de chaque résistance.

### Exercice 2

Calculez la capacité totale de:

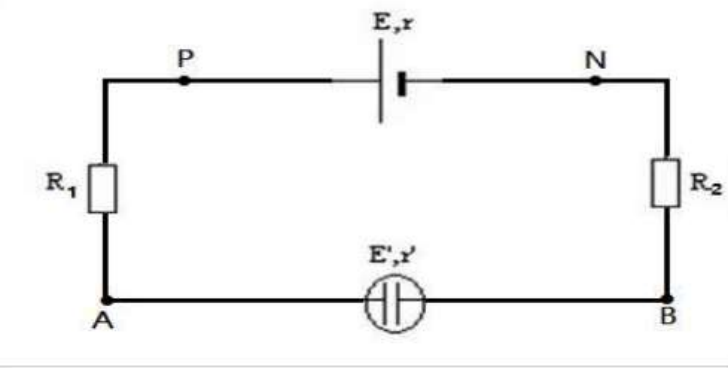
a) 3 condensateurs en série : 10 µF, 10µF et 22 µF;

b) 4 condensateurs en parallèle : 10 pF, 10 pF, 33 pF et 33 pF;

c) 2 condensateurs en parallèle (100 pF et 220 pF) placés en série avec un 3ème de 220 pF

### Exercice 3

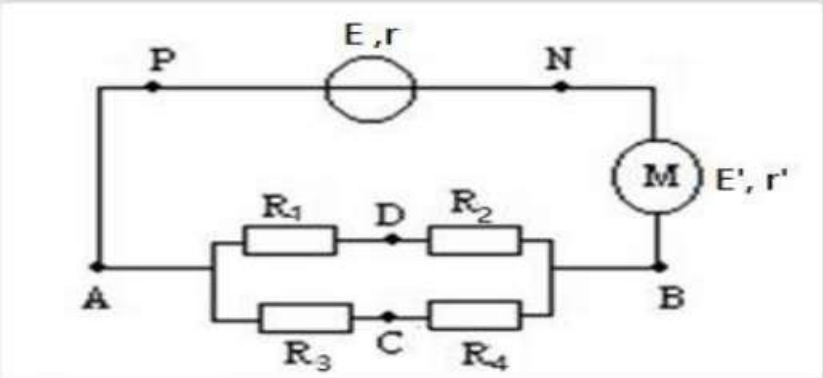
On donne : $\boldsymbol{E} = \mathbf{8\ \Omega}$, $\boldsymbol{r} = \mathbf{2\ \Omega}$, $\boldsymbol{R1} = \mathbf{10\ \Omega}$, $\boldsymbol{R2} = \mathbf{20\ \Omega}$, $\boldsymbol{E'} = \mathbf{5}$ , $\boldsymbol{r'} = \mathbf{4\ \Omega}$.




a) Calculer l'intensité du courant traversant $\boldsymbol{R_1}$.
b) Determiner $\boldsymbol{U_{PN}}$.

## Exercices 4

On donne: $\boldsymbol{E} = \mathbf{15}\ \boldsymbol{V}$, $\boldsymbol{r} = \mathbf{0}$, $\boldsymbol{E'} = \mathbf{5}\boldsymbol{V}$, $\boldsymbol{r'} = \mathbf{1}\ \boldsymbol{\Omega}$, $\boldsymbol{R1} = \mathbf{10}\ \boldsymbol{\Omega}$, $\boldsymbol{R2} = \mathbf{20}\ \boldsymbol{\Omega}$ ; $\boldsymbol{R3} = \mathbf{33}\ \boldsymbol{\Omega}$, $\boldsymbol{R4} = \mathbf{50}\ \boldsymbol{\Omega}$.




a) Calculer la résistance équivalente $\boldsymbol{R_{eqAB}}$ à la portion AB.
b) Représenter le circuit équivalent.
c) Calculer l'intensité traversant le générateur.
d) Déterminer l'intensité traversant $\boldsymbol{R1}$ (Calculer $\boldsymbol{UAB}$).
e) Déterminer $\boldsymbol{UAC}$.

# CHAP II: Résistances et condensateurs

## II.1. Introduction

Les composants électroniques constituent les éléments de base de tout circuit électronique. Leur connaissance est indispensable pour comprendre le fonctionnement des équipements électroniques, analyser les circuits et réaliser des montages adaptés à différentes applications. Chaque composant possède des caractéristiques électriques particulières qui déterminent son comportement et son rôle dans un circuit.

Ce deuxième chapitre est consacré à l'étude de deux composants passifs fondamentaux : les résistances et les condensateurs. Ces composants sont largement utilisés dans les circuits électroniques, notamment pour limiter le courant électrique, répartir les tensions, stocker l'énergie électrique et assurer différentes fonctions dans les systèmes électroniques.

Dans un premier temps, l'étude porte sur les résistances, en présentant leur principe de fonctionnement, la loi d'Ohm, la puissance électrique dissipée ainsi que les différentes méthodes d'identification de leurs valeurs, notamment à l'aide du code de couleurs. Les différentes possibilités d'association des résistances en série et en parallèle seront également abordées.

Dans un second temps, le chapitre traite des condensateurs, en mettant l'accent sur leur constitution, leur capacité électrique et les caractéristiques des matériaux diélectriques. Il examine également les phénomènes de charge et de décharge, le stockage de l'énergie électrique ainsi que les différentes associations de condensateurs en série et en parallèle.

À travers les notions théoriques et les exercices d'application, ce chapitre vise à permettre aux étudiants de reconnaître ces composants, de comprendre leurs propriétés électriques et de déterminer les grandeurs qui caractérisent leur fonctionnement. Ces connaissances constituent un préalable important à l'étude des composants semi-conducteurs et des circuits électroniques plus complexes.

## II.2 : Objectif du chapitre

À la fin de ce chapitre, l'étudiant devrait être capable de :

- Définir les notions de réseau électrique, de nœud, de branche, de maille et de dipôle ;
- Distinguer les dipôles passifs des dipôles actifs, ainsi que les dipôles linéaires des dipôles non linéaires ;
- Identifier les caractéristiques des sources idéales et réelles de tension et de courant ;
- Déterminer les grandeurs électriques équivalentes des associations de dipôles en série et en parallèle ;
- Appliquer la loi des nœuds et la loi des mailles de Kirchhoff ;
- Calculer les tensions, les intensités des courants et les résistances équivalentes dans des circuits électriques en régime continu ;
- Résoudre des problèmes pratiques d'analyse de circuits électriques simples

## II.3. Résistances

Les résistances sont les éléments les plus utilisées en électronique. Leur fonction est de s'opposer au passage du courant.

Une résistance est constitue de materiau ayant une forte resistivité. Elle s'oppose au passage du courant dans un circuit electrique. On l'utilise donc en géneral pour limiter le courant dans un circuit electique.

Généralement la résistance est un composant lineaire qui est régie par la loi de l'ohm. Mais si la valeur de la résistance est fonction du courant, elle est non lineaure. C'est le cas pour les resistances métalliques.

### II.3.1 : Loi d'ohm

Si on applique une tension (pression) U aux bornes d'une résistance R, il en résulte la circulation d'un courant I lié aux deux grandeurs précédentes par la relation :

$$U = R\,I$$

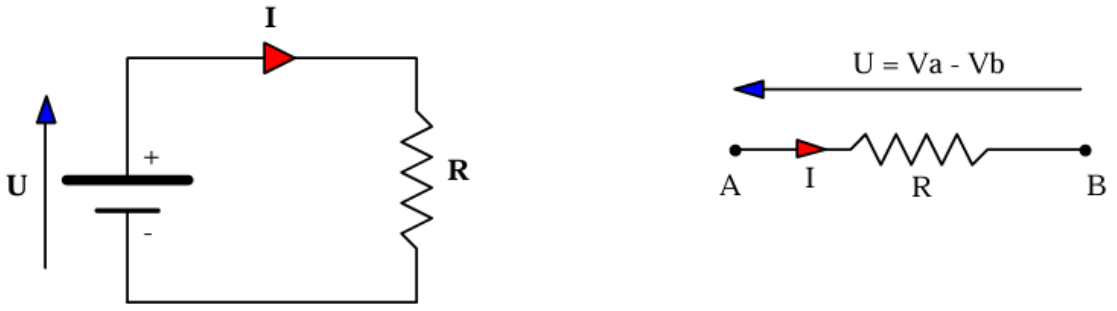



Fig. I-1 : convention de dessin

### II.3.2 : Puissance

Un composant ayant une tension U à ses bornes et qui est traversé par un courant I dissipe une puissance P (en général par effet joule = échauffement) telle que :

$$P = U\,I$$

P est la quantité d'énergie dissipée pendant l'unité de temps (joule/seconde), elle est exprimée en Watt (W). Dans le cas d'une résistance, si on applique la loi d'ohm on obtient :

$$P = UI = RI^2 = R\,U^2$$

### II.3.3 : Identification des valeurs d'une résistance

#### 1. Code de couleur à 4 bandes

Les résistances vendues dans le commerce sont marquées avec un code de couleur qui permet de reconnaitre leurs valeurs. Les systèmes les plus utilisés sont le système à 4 anneaux et le système à 5 anneaux.

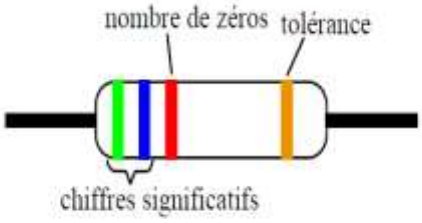



Fig. I-2 : code de couleur à 4 anneaux

| | | |
|---|---|---|
| | Noir | 0 |
| | Maron | 1 |
| | Rouge | 2 |
| | Orange | 3 |
| | jaune | 4 |
| | Vert | 5 |
| | Bleu | 6 |
| | Violet | 7 |
| | Gris | 8 |
| | Blanc | 9 |

La lecture se fait de gauche à droite à partir de l'extrémité ou sont groupes les anneaux. Les deux premiers anneaux indiquent la valeur des chiffres significatifs. Le troisième anneau indique le nombre de zéros. Le quatrième anneau indique la tolérance : Or=5%, Agent=10%.

La tolérance permet au % donné de calculer la fourchette (intervalle) à l'intérieur de laquelle la résistance est obligatoirement inscrite. Il s'agit en quelque sorte de la précision de la résistance.

Exemple 1. Déterminer la résistance correspondant à la distribution suivante.

Marron, noir, orange, or.

En résumé le 1$^{er}$ anneau indique le 1$^{er}$ chiffre ; le 2$^{ème}$ anneau le 2$^{ème}$ chiffre et le 3$^{ème}$ anneau le nombre de zéros suivant les deux 1ers chiffres.

$$R=10.000 \pm 5\% \rightarrow R \in [9500\ \Omega, 10500\ \Omega]$$

Exemple 2 : Quelle est la numérotation correspondant à la distribution suivante : marron, vert, orange ?

$$R=15000\ \Omega$$

## 2. Code de couleur à 5 bandes

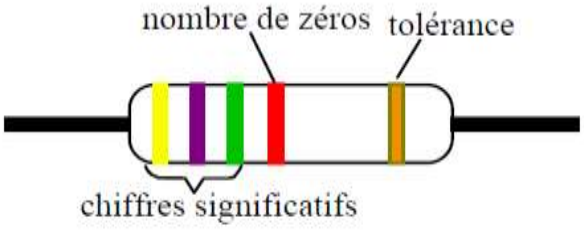



Fig. I-3 : code de couleur à 5 bandes

Les trois premiers anneaux indiquent la valeur des chiffres significatifs. Le quatrième anneau indique le nombre de zeros. Le cinquième anneau indique la tolérance : rouge=2%, Or=5%, Argent=10%.

Ainsi une résistance marquée : jaune, violet, vert, rouge et or a une valeur de : $47500\Omega \pm 5\%$

### II.3.4 : Association des résistances

D'autre part si l'on ne possède pas de résistances de la valeur indiquée, on peut utilement avoir recours au montage soit en série soit en parallèle.

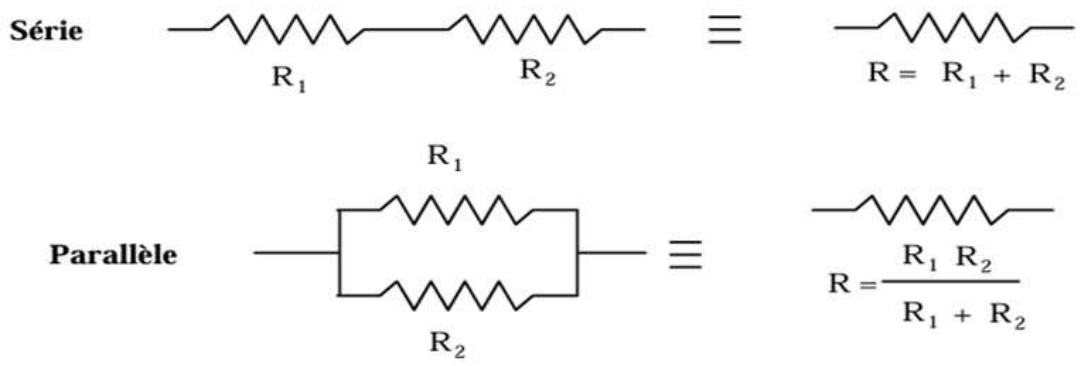



***Fig.II. 4 : Association des resistances***

## II.4. Condensateurs

Les condensateurs, comme les résistances, sont des composants passifs les plus souvent utilisés dans les montages électroniques.

On appelle condensateurs deux plaques de métal placés en regard et ne se touchant pas. Un condensateur est un composant constitué de deux armatures métalliques séparées par un isolant appelé diélectrique. Les dimensions de ces plaques ou surfaces, la distance séparant les plaques et la nature de l'élément qui les sépare ou diélectrique sont autant de facteurs directement lés à la valeur de la capacité d'un condensateur.

Pour simplifier, on peut considérer le condensateur comme un réservoir qui peut emmagasiner des électrons. Comme tout réservoir, il a un volume d'emmagasinage qu'on appelle CAPACITE qu'on désigne par la lettre C et qui se mesure en Farad. Les condensateurs sont polarisés : ils ont

une borne (+) et une borne (-) et se comporte un peu comme une pile rechargeable qu'il ne faut surtout pas charger dans le sens inverse.

### II.4.1. Capacité électrique

Puisqu'il faut des quantités d'électricité différentes pour porter des corps de dimensions différentes à un même potentiel électrique, nous pouvons caractériser chaque corps par la quantité d'électricité qu'il doit posséder pour atteindre le potentiel de un volt **;** cette quantité d'électricité est la **capacité électrique** (symbole **C**) du corps.

Pour un corps qui possède une quantité d'électricité déterminée, et qui se trouve à un potentiel déterminé, on obtient la capacité électrique en divisant la quantité d'électricité par le potentiel.

$$C = Q / V$$

Par exemple, on obtient la capacité d'un corps qui a une quantité d'électricité de **quatre coulombs** et qui se trouve à un potentiel de **huit volts** en faisant la division **4 / 8 = 0,5 ;** il faut donc **0,5 coulomb** pour atteindre le **potentiel de un volt**, c'est-à-dire que la capacité électrique est de **0,5 coulomb par volt**.

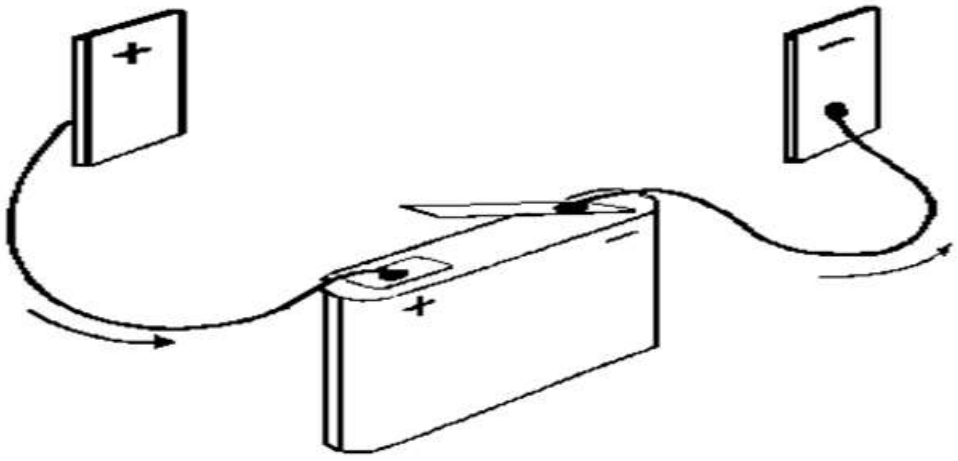
Ainsi, **la capacité électrique se mesure en coulomb par volt**, unité de mesure à laquelle fut donné le nom de **farad** (symbole **F**), en l'honneur du savant Michaël FARADAY. Le corps considéré dans notre exemple a donc une capacité de **0,5 farad.**

Il faut noter qu'une sphère de la dimension de la terre aurait une capacité d'environ **1 F ;** le farad est donc une unité de mesure beaucoup trop grande.

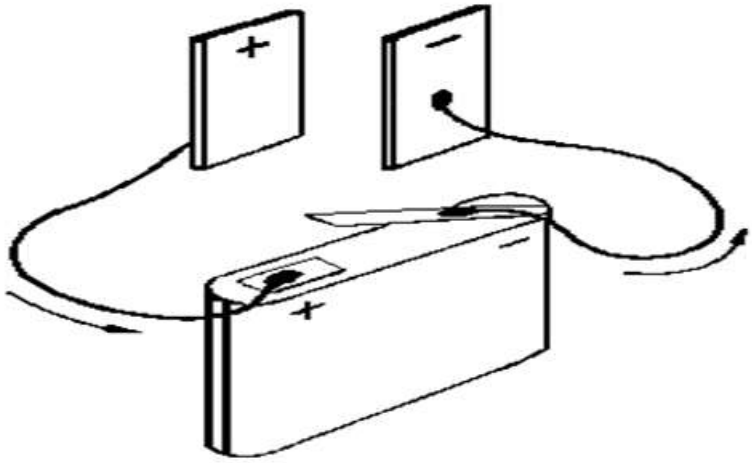
Pour cette raison, en pratique, nous utilisons principalement les sous-multiples du farad soit **:**

- **Le microfarad : $1\mu F=10^{-6}$ F.**
- Le **nanofarad** : $1nF=10^{-9}$ **F** soit $10^{-3}$ **µF.**
- Le **picofarad : 1 $pF=10^{-12}$ F, soit $10^{-6}$ µF ou $10^{-3}$ nF**.

La capacité d'un corps dépend en premier lieu de la présence dans son voisinage d'autres corps électrisés. Cette constatation peut être faite expérimentalement en considérant les deux plaques métalliques de la figure suivante.



a) Liaisons des plaques à la pile.



b) Rapprochement des deux plaques.

***Fig.II. 5 :Influence de la distance sur la capacité***

Ces deux plaques métalliques rigoureusement identiques sont reliées chacune à un pôle d'une pile, et se chargent d'électricité positive ou négative suivant le pôle auquel elles sont reliées.

Nous constatons que le processus de charge des deux plaques est très simple : un certain nombre d'électrons va du pôle négatif de la pile à la plaque qui lui est reliée, la chargeant négativement, tandis que le pôle positif de la pile attire un nombre égal d'électrons à la plaque qui lui est reliée **;** celle-ci se charge positivement.

Dans les conducteurs qui relient chaque plaque à la pile, il se crée un mouvement d'électrons dont le sens est indiqué sur la figure. Le mouvement d'électrons cesse de lui-même lorsque la quantité d'électrons présente sur chaque plaque est telle que chaque plaque est au même potentiel que le pôle de la pile qui lui est relié.

Entre les deux plaques existe la même différence de potentiel qu'aux bornes de la pile.

Comme nous l'avons vu précédemment, la quantité d'électricité que pourra emmagasiner chaque plaque dépend de sa capacité, or, les deux plaques étant identiques, elles possèdent la même capacité donc elles emmagasinent deux quantités d'électricité égales **mais l'une est positive et l'autre négative.**

Supposons à présent que nous rapprochons les deux plaques en les disposant bien en face l'une de l'autre, (fig. b), mais en évitant tout contact entre elles pour ne pas mettre la pile en court-circuit. De ce rapprochement des plaques, il apparaît une nouvelle circulation d'électrons, dans le sens indiqué sur la figure  et donc une augmentation de la quantité d'électricité contenue sur chaque plaque.

Pour le moment, limitons-nous à constater cet état de fait, l'explication en sera donnée plus tard. Nous constatons que la quantité d'électricité sur chaque plaque a augmenté, bien que le potentiel de celles-ci n'ait pas changé.

Nous pouvons donc affirmer qu'en rapprochant deux plaques, leur capacité augmente.

Puisque la capacité change en faisant varier la distance entre les plaques, nous ne devons plus tenir compte d'une seule plaque mais considérer un ensemble constitué de deux plaques placées face à face à une distance déterminée, de la manière indiquée figure suivante.

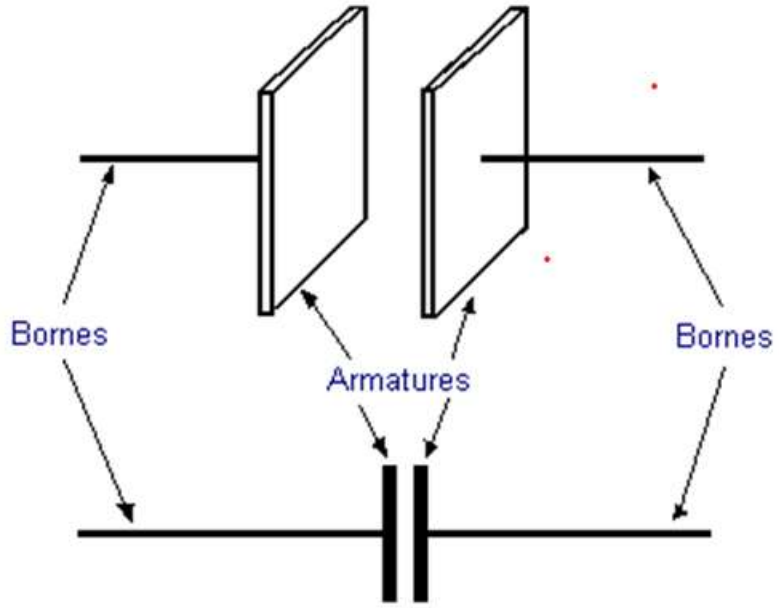



***Fig.II.6 : Condensateur et son symbole***

Cette disposition représente le type de **condensateur** le plus simple, qui est justement constitué de deux plaques en regard, appelées pour la circonstance **armatures**, munies de deux conducteurs, appelés **bornes,** pour leur raccordement aux circuits. A la figure précédente il est également donné le symbole graphique du condensateur tel que vous le rencontrez dans les schémas électriques.

Quelles que soient leurs caractéristiques ou le fabricant qui les conçoit, un condensateur est toujours constitué de deux armatures séparées par un isolant.

Pour définir la capacité d'un condensateur, il faut tenir compte de ses deux armatures et considérer ainsi la différence de potentiel existant entre elles.

Bien qu'un condensateur se compose dans tous les cas de deux armatures, une seule quantité d'électricité entre en ligne de compte. Elle est constituée des électrons qui, comme nous l'avons vu dans les figures a et b, sont passés de l'armature devenue positive sur l'armature devenue négative et ceci par l'intermédiaire de la pile.

Nous devons seulement considérer la quantité d'électrons manquante sur une armature ou bien celle présente en surplus sur l'autre, puisqu'il s'agit, en tout état de cause, de la même quantité d'électricité qui s'est transférée d'une armature sur l'autre.

**En conclusion, la capacité d'un condensateur s'obtient en divisant la quantité d'électricité présente sur l'une de ses armatures par la différence de potentiel existant entre ses armatures.**

$$C = \frac{Q}{V}$$

### II.4.2 : Constante diélectrique

Deux Condensateurs, dont les armatures sont de même surface et séparées par la même distance mais dont le diélectrique est différent, présentent des capacités différentes.

La différence entre les propriétés des matériaux constituant les diélectriques est caractérisée par la **constante diélectrique absolue** du matériau.

Le symbole de la constante diélectrique absolue d'un matériau est **ε** (**epsilon**) **;** son unité est le **farad par mètre** (**F / m**).

Tout diélectrique possède sa propre constante diélectrique. Celle de l'air, qui est d'ailleurs considérée comme identique à celle du vide, est appelée **constante diélectrique de l'air ou du vide** et a pour symbole $\boldsymbol{\varepsilon_0}$ (epsilon zéro). $\varepsilon_0$= **8,85 pF/m**.

La connaissance de $\varepsilon_0$ est très importante car en pratique, il n'est pas coutume d'indiquer la constante diélectrique absolue ($\varepsilon$) d'un matériau et vous trouverez plutôt la **constante diélectrique relative ($\varepsilon_r$) qui indique le rapport de la constante diélectrique absolue du matériau considéré et de la constante diélectrique de l'air ou du vide.**

$$\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0$$

La constante diélectrique relative $\varepsilon_r$ ne possède pas, quant à elle, d'unité ($\varepsilon_0$ et $\varepsilon$ possédant la même unité qu'est le **F / m**).

**NOTE :** La constante diélectrique relative est également appelée **permittivité relative**, de même que la constante diélectrique absolue est également appelée **permittivité absolue**.

### II.4.3 : Calcul de la capacité d'un condensateur

Nous savons donc que la capacité d'un condensateur dépend de ses dimensions (surface des armatures et distance entre elles) et de son diélectrique. Nous devons donc pouvoir calculer cette capacité d'après ces éléments, de même que nous avons pu déterminer la résistance d'un conducteur d'après ses dimensions et d'après la matière qui le constitue.

Nous avons vu que lorsque nous augmentons la surface des armatures d'un condensateur, nous augmentons la quantité d'électricité présente sur celles-ci et donc aussi la capacité du condensateur**.** La capacité d'un condensateur est proportionnelle à la surface de ses armatures donc**:**

$$C = f(S) \qquad (1)$$

Nous avons vu ensuite que la quantité d'électricité sur les armatures augmente si nous diminuons la distance qui les sépare. Nous pouvons conclure que la capacité d'un condensateur est inversement proportionnelle à la distance qui sépare ses armatures **:**

$$C = f(1 / d) \qquad (2)$$

Enfin intervient la constante diélectrique absolue du matériau utilisé. Plus cette constante est élevée, plus grande est la capacité du condensateur **:**

$$\mathbf{C = f\ (\varepsilon)} \qquad \mathbf{(3)}$$

De la combinaison des trois relations que nous venons d'établir, la formule générale de calcul d'un condensateur devient donc **:**

$$C = \frac{\varepsilon.S}{d}$$

C : Capacité en F

ε: Constante diélectrique absolue en F / m

S : Surface des armatures en m²

d : Distance entre les armatures (ou épaisseur du diélectrique) en m

Toutefois, comme nous considérons le plus souvent la constante diélectrique relative, la formule précédente devient **:**

$$C = \frac{\varepsilon_r.\varepsilon_0.S}{d}$$

Après avoir examiné tous les éléments du condensateur qui influent sur sa capacité, nous allons analyser le comportement du condensateur lorsqu'il est inséré dans un circuit électrique de manière à comprendre les raisons pour lesquelles ce composant est très utilisé en pratique.

### II.4.4 : Charge et décharge d'un condensateur

Examinons le circuit de la figure 3 dans lequel le condensateur est représenté par son symbole graphique.

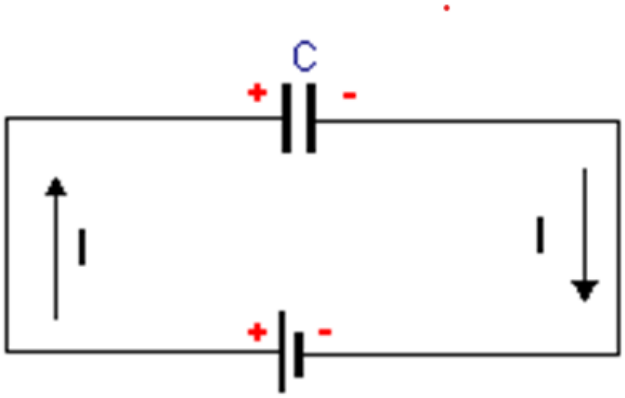



***Fig.II.7: Charge d'un condensateur***

Dès que le condensateur (**C**) est relié à la pile, il se produit le phénomène déjà analysé précédemment, à savoir qu'un certain nombre de charges électriques passent d'une armature à l'autre.

Ce déplacement constitue un courant électrique qui, sur la figure 3, est dirigé suivant le sens conventionnel. Ce courant est appelé **courant de charge** du condensateur.

**Le courant de charge persiste jusqu'à ce que la quantité d'électricité parvenue sur les armatures du condensateur engendre, entre celles-ci, une différence de potentiel égale à la tension de la pile.** Le condensateur est alors dit **chargé.**

Une fois le condensateur chargé, **il ne circule aucun courant dans le circuit**, étant donné que la tension créée aux bornes de (**C**) est égale mais opposée à la tension de la pile.

La décharge du condensateur peut facilement être observée. Il suffit de retirer le condensateur et de le brancher par exemple, aux bornes d'une résistance, comme illustré à la figure suivante.

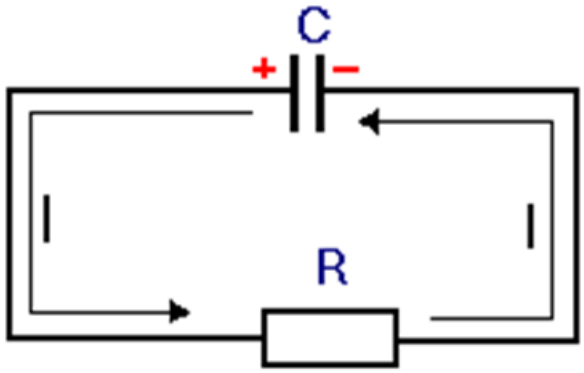



***Fig.II.8 : Décharge d'un condensateur***

La tension présente aux bornes du condensateur fait circuler un courant dans la résistance R qui, selon le sens conventionnel, est dirigé de l'armature positive vers l'armature négative.

Ce courant dû aux charges électriques accumulées sur les armatures du condensateur ne dure qu'un bref instant. Il cesse lorsque les charges présentes en surnombre sur une armature ont rejoint l'armature sur laquelle elles font défaut. Cette opération réalisée, le condensateur est dit **déchargé** et le courant créé par cette décharge est appelé **courant de décharge** du condensateur.

Si un condensateur une fois retiré de son circuit de charge et qu'ensuite il n'est pas relié à une résistance, il conserve sur ses armatures les charges accumulées.

N.B :

1- Un condensateur, après s'être chargé, empêche toute circulation ultérieure du courant fourni par une pile.

2- Le condensateur (non connecte à une résistance) resterait chargé indéfiniment si le diélectrique se trouvant entre ses armatures était un **isolant** parfait. En pratique, cela n'arrive jamais. Le diélectrique laisse passer petit à petit les charges électriques d'une armature à l'autre, ce qui décharge lentement le condensateur.

### II.4.5 : Condensateur et l'énergie électrique

Nous venons de voir comment nous pouvons charger un condensateur au moyen d'une pile et le décharger ensuite dans une résistance. Il est facile de comprendre que lors de ces deux opérations, de l'énergie électrique est mise en jeu.

Pour cela, il suffit d'observer l'effet thermique engendré dans la résistance par le courant de décharge du condensateur. Cet effet thermique se fait forcément au prix d'une consommation d'énergie électrique.

Cette énergie consommée a évidemment été fournie par le condensateur qui, lui-même, l'avait reçue de la pile.

Si le condensateur est en mesure de céder cette énergie à la résistance, c'est qu'il ne l'a pas auparavant dissipée mais emmagasinée.

**Le condensateur a la propriété d'emmagasiner l'énergie électrique**, il est donc **un élément conservateur** d'énergie à la différence de la résistance qui est **un élément dissipateur.**

Voyons maintenant comment il est possible de quantifier l'énergie électrique emmagasinée par un condensateur et de quelle manière celle-ci s'est emmagasinée.

### II.4.6 : Energie emmagasinée par un condensateur

Pour charger un condensateur, la pile doit déplacer une quantité d'électricité (**Q**) d'une armature à l'autre de ce composant. Cette quantité d'électricité est déterminée par le produit de la tension (**V**) de la pile par la capacité (**C**) du condensateur

$$Q=V \times C$$

Pour produire ce phénomène, une certaine énergie (**W**) est fournie par la pile et cette énergie est égale au produit de la quantité d'électricité (**Q**) par la tension (**V**).

$$W=Q \times V$$

Cependant, cette énergie (**W**) n'est pas emmagasinée totalement par le condensateur, en réalité, le condensateur n'emmagasine que la moitié de l'énergie (**W**) fournie par la pile. La seconde moitié est dissipée en chaleur dans la résistance interne de la pile et éventuellement dans d'autres résistances du circuit.

Pour s'en convaincre, examinons la figure 5 où la résistance (**R**) représente la résistance totale du circuit, c'est-à-dire la résistance interne de la pile plus celle des liaisons électriques et des armatures du condensateur.

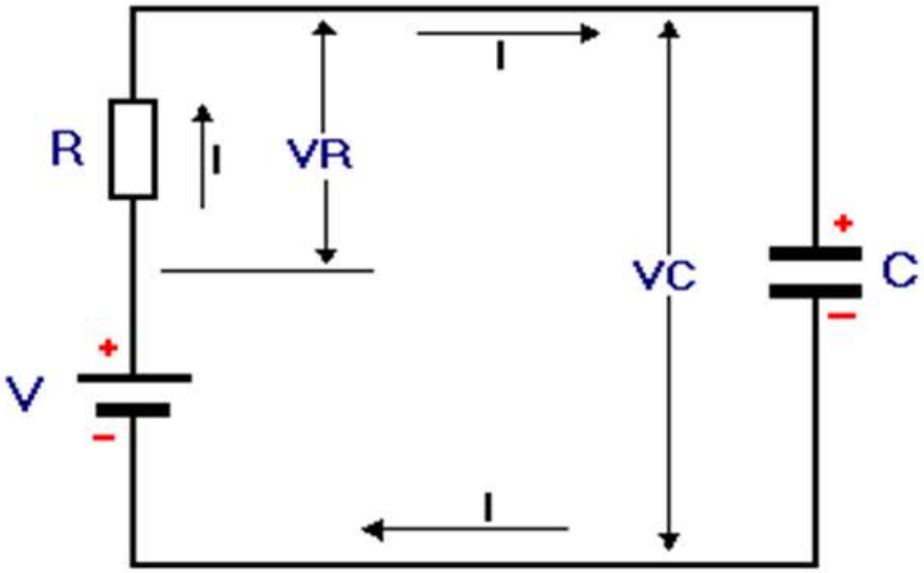



***Fig.II.9 : Circuit de charge d'un condensateur***

Au moment où le condensateur est relié au circuit, la tension $\mathbf{V_C}$ à ses bornes est nulle, donc toute la tension **V** de la pile se retrouve aux bornes de la résistance **R** ($\mathbf{V_R = V}$). Puis au fur et à mesure de la charge du condensateur, la tension $\mathbf{V_C}$ augmente, tandis que $\mathbf{V_R}$ diminue. Quand la charge est terminée, toute la tension de la pile se retrouve aux bornes de **C**, tandis que $\mathbf{V_R}$ est nulle. Les tensions $\mathbf{V_C}$ et $\mathbf{V_R}$ possèdent ainsi une allure analogue mais inverse puisque l'une est croissante et l'autre décroissante.

Puisque le courant électrique (**I**) traverse à la fois **R** et **C**, la quantité d'électricité (**Q**) fournie par la pile au circuit se divise bien en deux parties égales entre **R** et **C**. L'énergie $\mathbf{W_C}$ emmagasinée par le condensateur est donc égale à l'énergie $\mathbf{W_R}$ dissipée dans la résistance.

L'énergie totale **W** fournie par la pile est égale à $\mathbf{W_R + W_C}$ mais comme $\mathbf{W_R = W_C}$, nous avons également :

$$\mathbf{W_R = W_C = W / 2}.$$

L'énergie fournit par une pile pour charger un condensateur est donnée par la formule :

**W = Q x V ;** ceci nous permet de quantifier l'énergie réellement emmagasinée par le condensateur**:**

$$\mathbf{W_C = Q \times V / 2.}$$

Ou encore sachant que la quantité d'électricité accumulée par un condensateur est donnée par le produit **Q = C x V**, nous pouvons remplacer **Q** dans la formule précédente par sa valeur et nous obtenons **:**

$$\mathbf{W_C = C \times V^2 / 2}$$

Toute l'énergie $\mathbf{W_C}$ emmagasinée par le condensateur est ensuite intégralement restituée par celui-ci lors de sa décharge.

**PARENTHÈSE :** Il est intéressant de voir selon quelles lois varient la tension aux bornes du condensateur et le courant qui circule dans le circuit pendant la charge du condensateur. Ces allures sont reportées respectivement figure b et c *tandis que la figure 6-a donne le circuit électrique pris comme exemple **:***

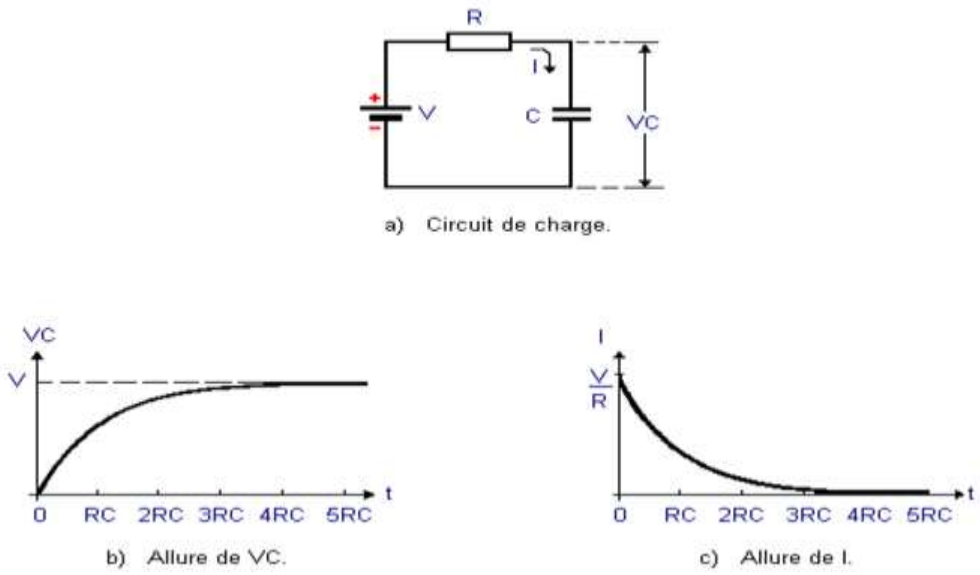



***Fig.II.10 : Courbes caracteristique de Vc et de I***

A l'instant initial $\mathbf{t_0}$, où la liaison électrique est établie, il circule de la pile au condensateur un courant **I = V / R** égal à celui qui circulerait en permanence si nous avions non pas un condensateur mais un simple fil ne présentant aucune résistance (fig. 6-c). Juste après $\mathbf{t_0}$, le condensateur commence sa charge et la tension VC à ses bornes croît (fig. 6-b). En conséquence, le courant (**I**) commence à décroître jusqu'à s'annuler lorsque (**C**) est chargé **:** la tension aux bornes de (**C**) est maximale.

Les variations du courant et de la tension ont une allure dite **exponentielle**, les équations de telles courbes sont les suivantes **:**

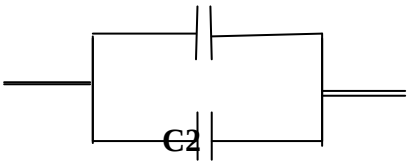
$$\mathbf{I = V / R. (e^{- t / RC})}$$

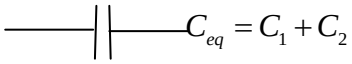
$$\mathbf{VC = V (1 - e^{- t / RC})}$$

### II.4.7 : Association des condensateurs

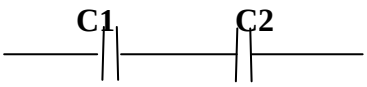
Les condensateurs peuvent être associes soit en série soit en parallèle.

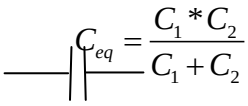
**En parallèle :** C1




**En série :**




## II.5 : Conclusion

Ce chapitre a permis d'étudier deux composants passifs essentiels en électronique : les résistances et les condensateurs. L'analyse de leurs caractéristiques, de leurs propriétés électriques et de leurs modes d'association a permis de comprendre leurs rôles respectifs dans les circuits électroniques. Les résistances permettent notamment de limiter le courant et de dissiper l'énergie électrique, tandis que les condensateurs ont la capacité de stocker et de restituer cette énergie. La maîtrise de ces notions constitue une base importante pour aborder l'étude des matériaux semi-conducteurs et des composants électroniques actifs dans le chapitre suivant.

## II.6 : Exercices d'application

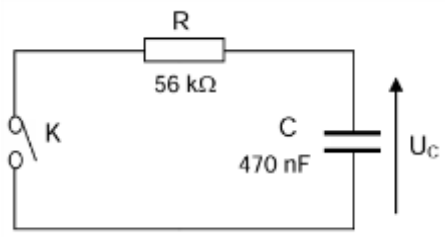
**Exercices 1 :**

1. Déterminez les valeurs des résistances suivantes :
   a) R Vio R arg
   b) J R O or
   c) Vio B R arg
2. Montrez les couleurs se trouvant sur les résistances suivantes :
   a) 47000Ω+5%
   b) 56400+10%

**Exercices 2 :**

1. Un condensateur de 100 µF est chargé sous une tension de 30 V.
   a) Quelle est la quantité d'électricité emmagasinée?
   b) Quelle est l'énergie électrique emmagasinée?

2. Le condensateur étant chargé à 5 V, on ferme ensuite K. Au bout de combien de temps la tension $U_C$ = 2 V. Quelle est la valeur de $I_C$ en ce moment ?



# Chap. III. LES SEMI-CONDUCTEURS

## III.1: Introduction

Les semi-conducteurs occupent une place essentielle dans le domaine de l'électronique moderne. Ils constituent les matériaux de base utilisés dans la fabrication de nombreux composants électroniques, notamment les diodes, les transistors et les circuits intégrés. Leur importance réside principalement dans leur capacité à contrôler et à modifier le passage du courant électrique en fonction de certaines conditions physiques et des traitements auxquels ils sont soumis.

Ce chapitre est consacré à l'étude des propriétés fondamentales des matériaux semi-conducteurs, en particulier le silicium et le germanium. Il présente leur structure atomique, l'influence de la température sur leur conductivité électrique ainsi que les notions de bande de valence et de bande de conduction. Il aborde également la distinction entre les conducteurs, les isolants et les semi-conducteurs.

Une attention particulière sera accordée aux semi-conducteurs intrinsèques, constitués de matériaux purs, et aux semi-conducteurs extrinsèques, obtenus par dopage avec des impuretés. Ces derniers sont classés en deux catégories : les semi-conducteurs de type N, dans lesquels les électrons sont les porteurs majoritaires, et ceux de type P, dans lesquels les trous constituent les porteurs majoritaires.

La compréhension de ces notions est indispensable pour expliquer la formation et le fonctionnement de la jonction PN, qui constitue le principe de base de nombreux composants électroniques, notamment les diodes et les transistors.

## III.2 : Objectifs du chapitre

À la fin de ce chapitre, l'étudiant devrait être capable de :

- Définir un matériau semi-conducteur et expliquer ses propriétés électriques ;
- Distinguer les conducteurs, les isolants et les semi-conducteurs ;
- Expliquer les notions de bande de valence et de bande de conduction ;
- Distinguer les semi-conducteurs intrinsèques des semi-conducteurs extrinsèques ;
- Expliquer le principe du dopage et différencier les semi-conducteurs de type P et de type N ;
- Identifier les porteurs majoritaires et minoritaires dans chaque type de semi-conducteur ;
- Expliquer le principe de formation d'une jonction PN.

## III.3. Propriétés des semi-conducteurs

Un semi-conducteur est généralement définit comme étant un matériau dont la conductivité est entre celle des isolant et celle des conducteurs.

*Ordres de grandeur*
Isolant : $\sigma < 10^{-6}$ S/m (S = Siemens, c'est-à-dire $\Omega^{-1}$)
Conducteur : $\sigma \approx 108$ S/m
Semi-conducteur : $\sigma \approx 10^{-4}$ à 0.1 S/m

Les semi-conducteurs doivent leur nom au fait que leur conductivité (résistivité) est intermédiaire entre celle des conducteurs comme les métaux et celle des isolants. En fait, la différence la plus caractéristique réside dans le sens de la variation de la conductivité avec la température. Alors que la résistance d'un fil métallique augmente avec la température, celle d'un semi-conducteur diminue.
Un semi-conducteur est généralement définit comme étant un matériau dont la conductivité dépend de la température et augmente avec celle-ci.
Par conséquent, on peut désigner le semi-conducteur comme étant un isolant pour les basses températures et comme un conducteur pour les hautes températures.

Les semi-conducteurs les plus utilisés sont le silicium (Si) et le germanium (Ge) qui sont des éléments tétravalents qui appartiennent à la quatrième colonne de la classification périodique des éléments. Leurs atomes comportent **quatre** électrons (de valence) sur la couche périphérique (couche de valence). Ces éléments cristallisent dans un système cubique, avec sur chaque cube élémentaire, un atome à chaque sommet, un atome au centre de chaque face et 6 atomes à l'intérieur. Avec cette structure, chaque atome se trouve au centre d'un tétraèdre régulier dans les quatre atomes voisins occupent les sommets.

On sait qu'une couche électronique est particulièrement stable quand elle a 8 électrons; les semi-conducteurs réalisent cette situation en mettant en commun chaque électron de la couche de valence par deux atomes voisins, la figure Fig. II-2 illustre un exemple simplifié de cette situation.

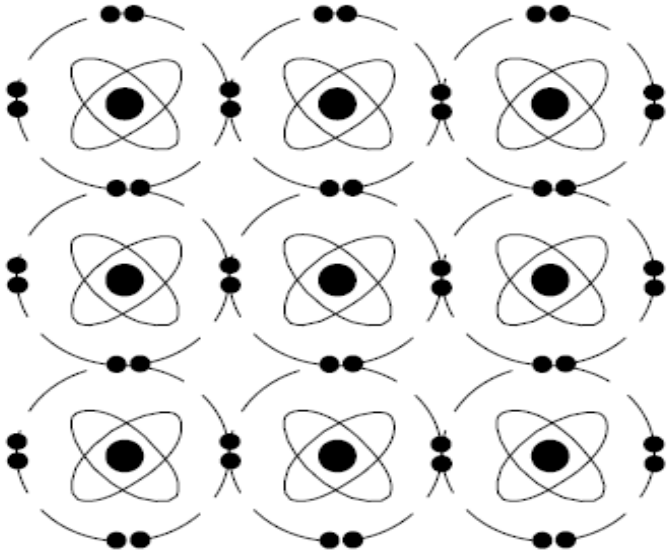


***Fig.III.1: Mise en commun des electron de la couche de valence***

### a) Agitation thermique

Les particules qui constituent la matière sont en perpétuel mouvement. Les électrons tournent autour des noyaux, et ceux-ci, bien que figés dans le cristal, vibrent autour de leurs positions

moyennes. Ces mouvements s'appellent l'agitation thermique dont l'ampleur augmente avec la température, et s'arrête complètement au zéro absolu (-273 °C).

### b) Bande de Valence

Nous avons vu comment les électrons de la dernière couche étaient coupés à assurer la liaison de valence avec les atomes voisins, c'est pour ça qu'on les appelle les électrons de valence. Leur niveau d'énergie se situe entre des limites qui constituent une bande d'énergie dite bande de Valence.

### c) Bande de conduction

Si un électron reçoit une énergie suffisante par échauffement ou par rayonnement, il peut quitter son orbite et devenir libre dans le réseau cristallin d'une façon analogue à un satellite auquel on communique une énergie suffisante pour le libérer de l'attraction terrestre. Les électrons libres ont leur énergie qui se situe dans une bande d'énergie dite bande de conduction, car, étant libres, ils peuvent participer à la conduction d'un courant électrique si un champ est appliqué au semi-conducteur.

### d) Les conducteurs

Dans les conducteurs, la bande de valence et la bande de conduction se chevauchent, il n'a pas de **gap** entre les deux. Un électron n'a aucun mal de quitter son atome pour aller "vagabonder" dans le réseau cristallin, on dit qu'il passe dans la bande de conduction. L'énergie d'agitation thermique à la température ambiante fait que chaque atome libère au moins un électron qui voyage librement dans le cristal et on se retrouve avec un nombre extrêmement de porteurs libres qui, dès qu'on crée un champ électrique au sein du conducteur à l'aide d'un générateur, vont être attirés par la borne positive de ce dernier créant un courant électrique important.

### e) Les Isolants

Les isolants sont caractérisés par une bande interdite très importante séparant la bande de valence de la bande de conduction. Ce qui veut dire qu'il faut beaucoup trop d'énergie pour arracher un électron de sa liaison de valence. Le résultat est qu'on ne trouve aucun électron libre dans le cristal et même si on applique un champ électrique, aucun courant n'en résulte.

## III.4 : Les semi-conducteurs intrinsèques

Dans les semi-conducteurs **idéalement purs**, il y a autant de trous que d'électrons libres car les premiers apparaissent lors de la formation des seconds, on dit qu'il y a création **d'une paire électron-trou**. Le nombre d'électrons est noté **ni**. Si on applique un champ au sein du semi-conducteur en connectant un générateur de tension à ses bornes, il circule un courant qui résulte du déplacement des deux type de conducteurs, les électrons libre vers le pôle (+) du générateur et les trous vers le pôle (-) du générateur. L'expression de la conductivité est : $\sigma_i = n_i\, e\, (\mu_n + \mu_p)$.

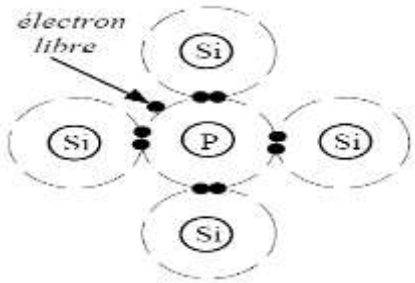
$\mu_n$ est la mobilité des électrons libres et $\mu_p$ est la mobilité des trous. Pour le silicium $\mu_n = 0.13$ $m^2/Vs$ et $\mu_p = 0.05$ $m^2/Vs$ ce qui donne une conductivité $\sigma_i = 1.6\ 10^{16} \times 1.6\ 10^{-19}(0.13 + 0.05) = 0.46\ 10^{-3}\ (\Omega m)^{-1}$ soit une résistivité $\rho_i = 1/\sigma_i = 2200\Omega m$.

Quand la température augmente, la croissance de $\mathbf{n_i}$ est très importante ce qui provoque une augmentation importante de la conductivité et donc du courant électrique.

## III.5 : Semi-conducteurs extrinsèques

Ce sont des semi-conducteurs intrinsèques dans lesquels on a introduit des atomes étrangers qu'on appelle impuretés ce qui va modifier complètement leurs caractéristiques électriques. Cette opération d'injections d'impuretés s'appelle **dopage** d'un semi-conducteur.

### III.5.1. Semi-conducteurs extrinsèques de type N




C'est le cas où les atomes étrangers sont pentavalents (antimoines, phosphore, arsenic) c.a.d. qu'ils ont 5 électrons sur la couche périphérique (de valence).

Parmi ces 5 électrons, 4 vont être mis en commun avec les atomes voisins pour assurer les liaisons de valence, le 5$^{ème}$, resté libre, peut ce déplacer et participer à la conduction. On dit que les impuretés utilisées sont des **donneurs** (d'électrons). **Bien que l'électron devenu libre laisse un ion positif derrière lui, celui ci (constitué de l'atome donneur) a 8 électrons sur sa couche de valence, il n'a pas tendance à capter l'électron d'un atome voisin, ce n'est donc pas un trou (porteur) car il ne participera pas au courant de trous** (par le mécanisme de déplacement de trou qui à lieu à chaque fois qu'un atome ionisé comportant un trou capte un électron de l'atome voisin pour compléter sa dernière couche).

Sous l'effet de la tension, certains électrons de la couche périphérique peuvent se détacher créant ainsi des trous. Mais le nombre d'électrons libres est très élèves par rapport au nombre de trous. C'est pourquoi les **électrons** sont les **porteurs majoritaires** et les **trous minoritaires** dans un tel semi-conducteur. Comme les électrons sont porteurs de charge négatives, le semi-conducteur extrinsèque est dit de type N.

Le dopage par des atomes donneurs va donc favoriser la conduction par électrons libres au détriment de la conduction par trous.

Sous l'effet de la tension appliquée, les électrons se dirigent vers la borne + et constituent le courant des électrons tandis les trous se dirigent vers la bornes – et constituent le courant des trous qui est très minime.

### III.5.2. Semi-conducteurs extrinsèques de type P

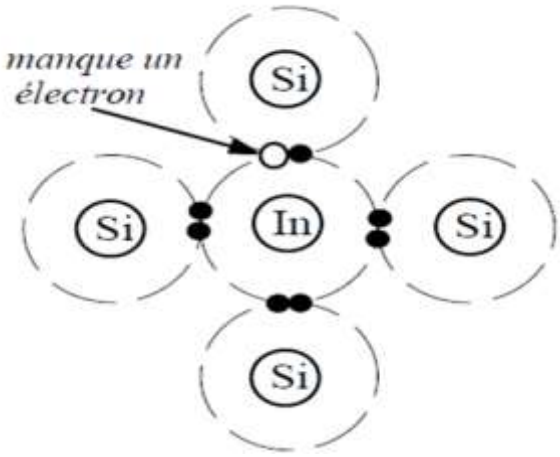



**Fig. III.2 : Dopage par atome accepteur**

Ici, les atomes d'impureté sont des accepteurs (bore, aluminium, gallium, indium), ils ont seulement trois électrons sur la couche de valence. Si on les introduit dans un cristal intrinsèque, ils mettent en commun leurs 3 électrons avec les 4 atomes du semi-conducteur qui les entourent pour former les liaisons de valence. Ils se trouvent à la fin avec 7 (3+4) électrons sur la couche de valence, cette configuration est instable et aura tendance à capter un électron d'un atome voisin pour compléter sa couche à 8 électrons. Dès que cet électron est capté, l'atome Accepteur devient un ion négatif et introduit un trou dans le cristal qui va participer à la conduction par trou. Aucun électron libre n'a été crée lors de la formation du trou, les trous sont donc beaucoup plus nombreux que les électrons, ils constituent les porteurs majoritaires et le semi-conducteur est de type P.

Sous l'effet de tension, certains électrons peuvent encore être détachés de la couche périphérique créant en plus des trous. Le nombre de trous est plus élevé que celui des électrons libres. C'est pourquoi les trous sont appelés des porteurs majoritaires.

Lorsque le cristal est connecté, les trous se dirigent vers la borne négative du générateur constituant ainsi le courant des trous et les électrons se dirigent vers la borne positive du générateur constituant le courant des électrons qui est négligeable dans un semi-conducteur de type P.

## III.6 : Conclusion

En conclusion, les semi-conducteurs sont des matériaux essentiels en electronique en raison de leurs propriétés électriques particulières, intermédiaires entre celles des conducteurs et des isolants. Leur conductivité peut être modifiée par différents procédés, notamment le dopage, permettant ainsi de contrôler le passage du courant électrique. La distinction entre les semi-conducteurs de type N et de type P constitue une base fondamentale pour comprendre le fonctionnement des composants électroniques tels que les diodes, les transistors et les circuits intégrés. Ainsi, la maitrise de leurs propriétés et de leur comportement permet de mieux comprendre le fonctionnement des dispositifs électroniques modernes.

## III.7 : Exercices d'application

1. Un semi-conducteur en silicium possède une conductivité électrique de :$\sigma$=0.02S/m. Calculer sa résistivité électrique ($\rho$). Rappeler l'unité de la résistivité.
2. Un semi-conducteur intrinsèque possède les caractéristiques suivantes :
   - Concentration des électrons : ni = 1,5 x $10^{16}$ $m^{-3}$
   - Charge élémentaire : e = 1,6 x$10^{-19}$C
   - Mobilité des électrons : $\mu$n = 0,13$m^2$/V.s
   - Mobilité des trous : $\mu$p = 0,05 $m^2$/V.s

   Calculer la conductivité électrique du semi-conducteur et en déduire sa résistivité.

3. Un semi-conducteur intrinsèque présente une concentration en électrons libres égale à : ni=2x$10^{19}m^{-3}$
   a) Quelle concentration des trous dans ce semi-conducteur
   b) Apres dopage, le matériau devient un semi-conducteur de type N et sa concentration en électron est $10^{21}$ $m^{-3}$. Identifier les porteurs majoritaires et les porteurs minoritaires.
   c) Que devient le type de semi-conducteur si le dopage est effectué avec des accepteurs ?

# Chap. IV : Diode

## IV.1 : Introduction

La Diode constitue l'un des éléments fondamentaux de l'électronique à semi-conducteurs. Elle est obtenue en associant deux matériaux semi-conducteurs, l'un de type P et l'autre de type N. Le contact entre ces deux régions entraîne des phénomènes physiques particuliers, notamment la diffusion des porteurs de charges et la formation d'une zone de déplétion, qui confèrent à la jonction ses propriétés électriques spécifiques.

L'étude de la jonction PN permet de comprendre le principe de fonctionnement de la diode, son comportement lorsqu'elle est polarisée en direct ou en inverse, ainsi que sa caractéristique courant-tension. Ce chapitre abordera également la diode Zener et quelques applications pratiques des diodes, notamment le redressement des signaux alternatifs et la stabilisation de la tension. Ces notions constituent une base essentielle pour l'analyse et la compréhension des circuits électroniques.

## IV.2.Objectifs du chapitre

À la fin de ce chapitre, l'étudiant devra être capable de :

- Expliquer le principe de formation et le fonctionnement d'une jonction PN.
- Décrire la structure et le symbole électrique d'une diode.
- Distinguer les deux modes de polarisation d'une diode : directe et inverse.
- Analyser le comportement d'une diode dans un circuit électrique.
- Tracer et interpréter la caractéristique courant-tension d'une diode.
- Déterminer les tensions et les courants dans un circuit comportant une ou plusieurs diodes.
- Expliquer le principe de fonctionnement et les caractéristiques d'une diode Zener.
- Analyser des circuits de redressement simple et double alternance.
- Utiliser une diode Zener dans un montage de stabilisation de tension.
-

## IV.3. Jonction PN

Si on place l'un contre l'autre deux cristaux semi-conducteurs, un de type P et l'autre de type N, au voisinage de la jonction ainsi effectuée, les électrons majoritaire du coté N vont diffuser vers le coté P et trous majoritaires du côté P vont diffuser vers le côté N. Les électrons passés du coté P vont se recombiner avec les trous abondants de ce côté, et les trous passés du côté N vont se recombiner avec les électrons abondants de ce coté. Il se crée alors une région sans porteurs où il n'y a plus que des ions positifs du coté N et des ions négatifs du coté P. Cette région dite, **zone de charge d'espace ou zone dépeuplée** n'est plus neutre électriquement. De part et d'autre de la jonction, il existe une double répartition des charges assez semblable à celle que l'on trouve sur les armatures d'un condensateur, les charges positives d'un côté, les négatifs de l'autre.

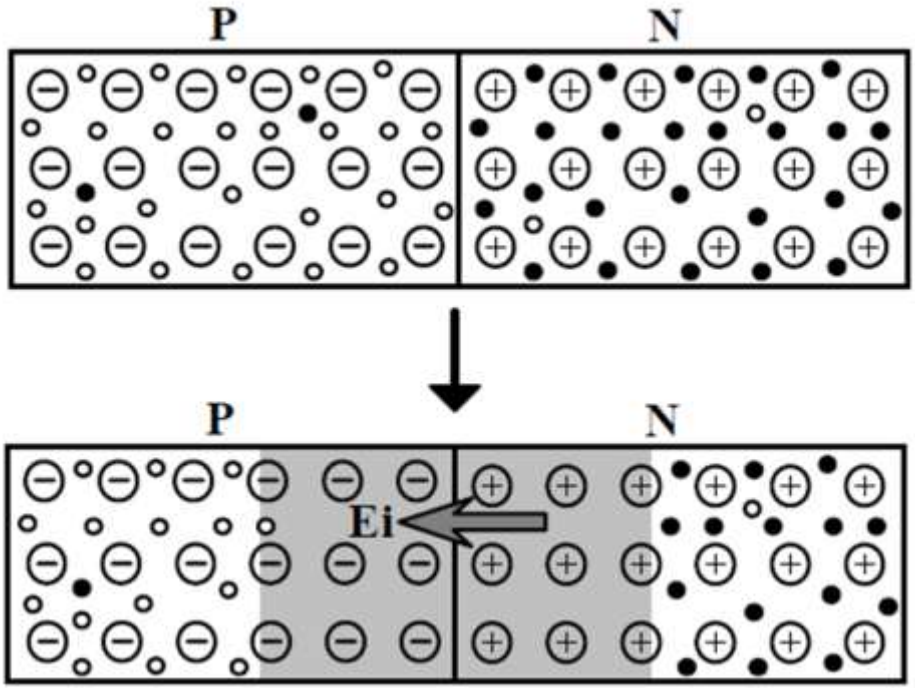



***Fig.IV.1 : Jonction PN***

Il se crée alors un champ électrique interne Ei orienté de N vers P qui va s'opposer à la diffusion des porteurs de part et d'autre de la jonction. En effet, si un électron arrive dans la zone

dépeuplée, il sera rappelé par le champ vers la zone d'où il vient. De la même façon, les trous qui arrivent dans cette zone sont renvoyés par le champ dans la zone P d'où ils sont venus. Si on reprend le phénomène depuis le début, au fur et à mesure que les porteurs diffusent de part et d'autre de la jonction, les charges d'espace (+) et (-) augmentent et le champ augmente avec elles. Plus le champ augmente, plus la diffusion des porteurs est freinée, on dit qu'il y a création d'une barrière de potentiel qui empêche les porteurs de traverser la jonction. Il arrive un moment où il s'établit un équilibre statistique, tout se passe comme si aucun électron n'arrive à diffuser du coté P et aucun trou n'arrive à diffuser du coté N, les charge (+) et (-) de chaque côté de la jonction cessent d'augmenter et le champ aussi.

## IV. 4. Théorie de la diode

### IV.4.1. Définition et constitution d'une diode

La diode à jonction est l'élément de base des circuits à semi-conducteur obtenu par simple réalisation d'une jonction PN. La figure suivante représente la structure semi-conductrice d'une diode avec son symbole dans les circuits électroniques.

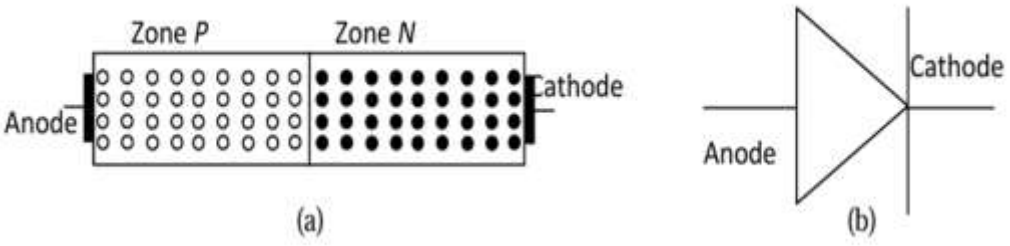



***Fig.IV.2 : Diode à jonction (a) structire semi-conducteur (b) symbole***

Le coté de la diode dopée P est appelé anode et le coté dopée N est appelé cathode.

### IV. 4.2. Polarisations d'une diode

La polarisation d'une diode est effectuée par l'application d'une tension externe U entre sa région P et sa région N. Il existe deux façons de branchement de la source externe : polarisation

directe qui permet le passage d'un courant électrique dans la jonction alors qu'une polarisation inverse l'empêche.

### a- Polarisation directe

Si on applique une source de tension externe $V_{ex}$ telle que : la borne + de la source est lié au côté P de la jonction et la borne - de la source est lié au côté N, on dit que la diode ou la jonction PN est **polarisée en directe**.

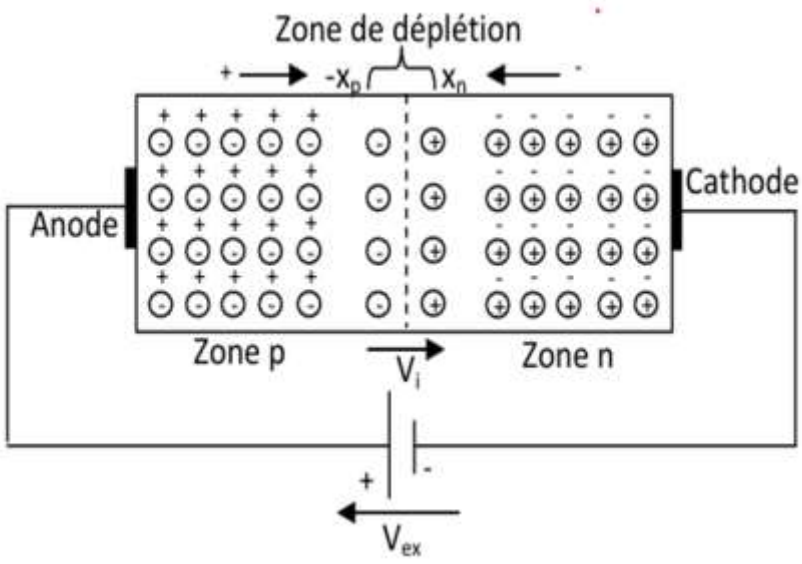



***Fig.IV .3 : Polarisation directe d'une diode (joction PN)***

Le champ électrique externe $E_{ex}$ cpréé par $V_{ex}$ s'oppose à l'effet du champ interne Ei créé par $V_i$. Par conséquent, l'effet de diffusion va être renforcé et lorsque $V_{ex}$ soit supérieur à $V_i$ un courant I va se créer dans la jonction. La barrière de potentiel $V_d$ est ainsi diminuer, alors des électrons peuvent traverser la zone de déplétion (de N vers P) qui devient donc conductrice ; **la diode est dite passante.**

### b- Polarisation inverse

Si on applique une source de tension externe $V_{ex}$ de telle sorte que le champ électrique créé s'oppose à l'effet du champ interne créé, on dit que la diode ou la jonction PN est **polarisée en inverse.**

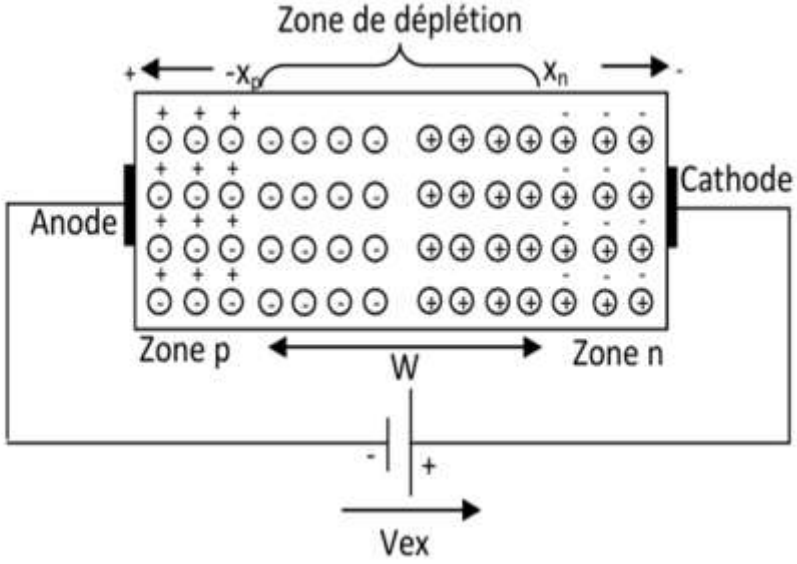



***Fig.IV.4 : Polarisation en Inverse d'une diode (jonction PN)***

Le champ électrique externe $E_{ex}$ dû à $V_{ex}$ repousse les électrons vers leur région N et les trous vers leur région P. Ce phénomène résulte un élargissement de la zone de déplétion d'où la jonction devient pratiquement isolante. On dit que **la diode est bloquée**.

Par conséquent, la hauteur de la barrière de potentiel va être augmentée, qui empêche les porteurs de charge majoritaires des deux zones de se déplacer d'où un courant quasiment nul. Cependant, les porteurs de charge minoritaires (électrons de la zone p et trous de la zone n) vont se déplacer en créant un faible courant dit : **courant de saturation $I_S$**.

## IV.3. Caractéristique de la diode

Une diode est un composant électronique obtenu en recouvrant une jonction PN par une couche protectrice en plastique afin d'en faciliter sa manipulation.

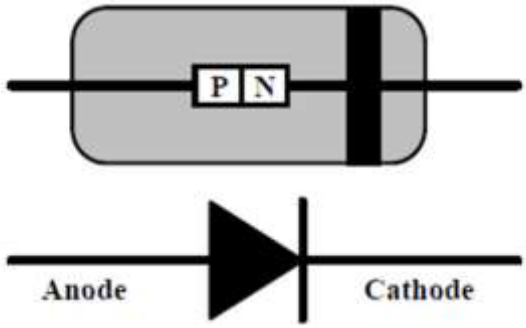



***Fig.IV.5 : Diode***

Quand la diode est polarisée en direct, si on note $V_D$ la tension appliquée à ses bornes, alors elle est traversée par un courant $I_D$ t.q:

$$I_D = I_0\left(e^{\frac{V_D}{\psi}} - 1\right) \text{ avec } \psi = \frac{kT}{q}$$

**k** est la constante de Boltzmann, **T** est la température absolue et **q** est la charge de l'électron. A la température ambiante (T=300 °K), ψ = 26 mV.

**$I_o$** est le courant inverse de la diode, il ne dépend pas de la tension de polarisation, mais dépend fortement de la température. A la température ambiante (25 °C), sa valeur ne dépasse guère le nA, à 125 °C, sa valeur est multipliée par 16000.

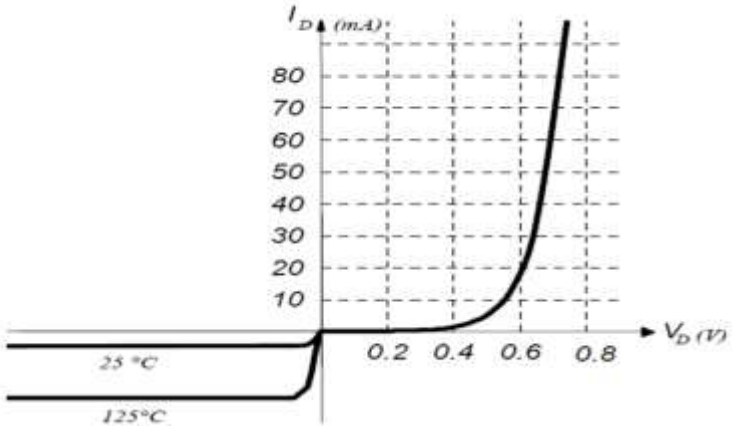



***Fig.IV.6 : Caracteristique d'une diode***

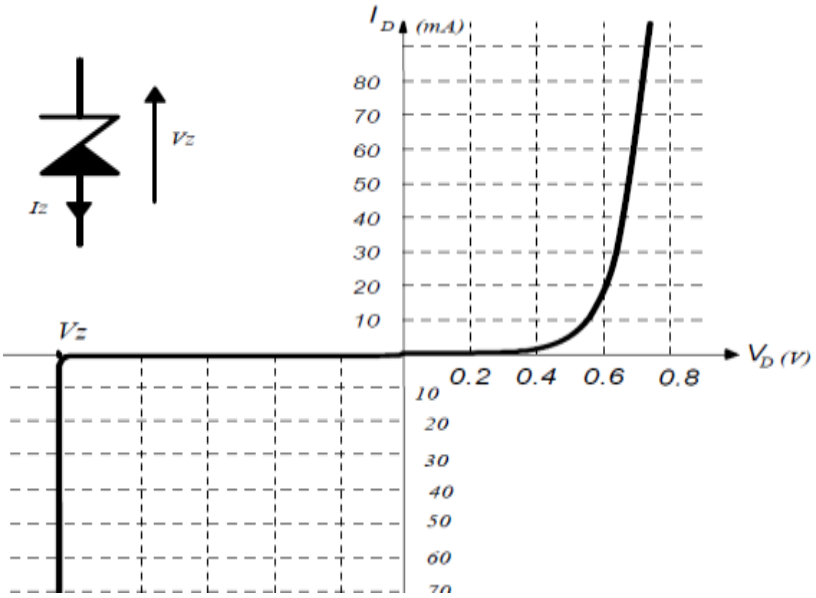
Sur la figure (Fig. IV-5) l'échelle de la tension et du courant n'est pas la même dans le sens directe et le sens inverse.

## IV.4. Diode Zener

Lorsque la diode est polarisée en inverse, le courant inverse qui la traverse est quasiment nul. On ne peut cependant pas augmenter indéfiniment la tension inverse aux bornes d'une diode. Lorsque cette tension atteint une certaine valeur, le champ électrique qui règne dans la jonction devient suffisamment élevé pour ioniser les atomes en leur arrachant les électrons de valence qui deviennent libres et génèrent un courant inverse très important. On dit qu'il y a un effet d'avalanche ou qu'il y a **claquage de la diode**. La tension aux bornes de la diode reste **constante** quel que soit le courant inverse qui circule dans la diode. Cette tension dite tension de claquage $V_B$ (breakdown voltage) reste importante pour les diodes à usage général (quelques 100ène de Volts), sa valeur est précisée par les constructeurs pour chaque type de diode.

La diode **Zener** est une diode pour laquelle on a utilisé des semi-conducteurs N et P très fortement dopés ce qui a comme effet de réduire la tension de claquage $V_B$ qui sera appelée **tension Zener** $V_Z$. Durant la fabrication, on sait contrôler avec précision la valeur de $V_Z$. Les

diodes Zener sont fabriquées pour être utilisés en inverse dans la zone d'avalanche. Dans ce cas, la tension à ses bornes reste égale à Vz quelque soit le courant Iz qui la traverse. On l'appelle diode **stabilisatrice** de tension. Evidemment, une Zener polarisée en directe fonctionne comme une diode normale.




## IV.5. Les applications des diodes

La diode est le composant electronique le plus utilisé dans les circuits. Nous allons voir son utilisation pour le redressement et la stabilisation des tensions.

### IV.5.1. Redressement simple alternance

Le redressement est la conversion d'un signal **bipolaire** en un signal **unipolaire**. Il est définit aussi comme étant la conversion **de l'alternatif en continu**. A partir d'un signal alternatif, on peut y avoir deux possibilités : l'obtention d'un signal continu positif ou bien négatif. Le circuit simple alternance consiste à :

• Eliminer la partie négative et à laisser passer que la partie positive d'un signal alternatif (fig.a)

• Eliminer la partie positive et à laisser passer que la partie négative d'un signal alternatif (fig. b)

Le principe de fonctionnement est illustré par le chronogramme des figures suivantes, où la diode utilisée est supposée idéale.

La figure précédente montre comment l'alternance négative est supprimée. Alors, on est passé d'un signal bipolaire à un signal unipolaire positif.

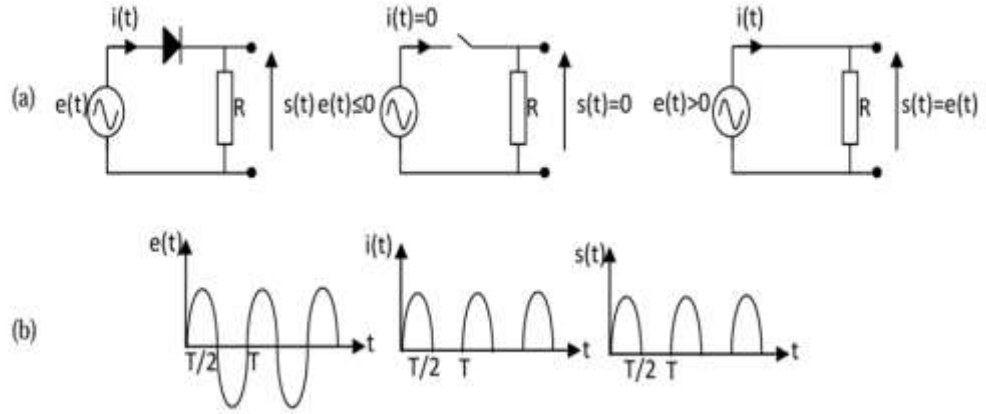



*Fig.IV.6 : Redressement simple alternace (positive) : (a) circuit de base, schema equivalent (b) chronogramme*

La figure suivante montre comment l'alternance négative est supprimée. Alors, on est passé d'un signal bipolaire à un signal unipolaire positif.

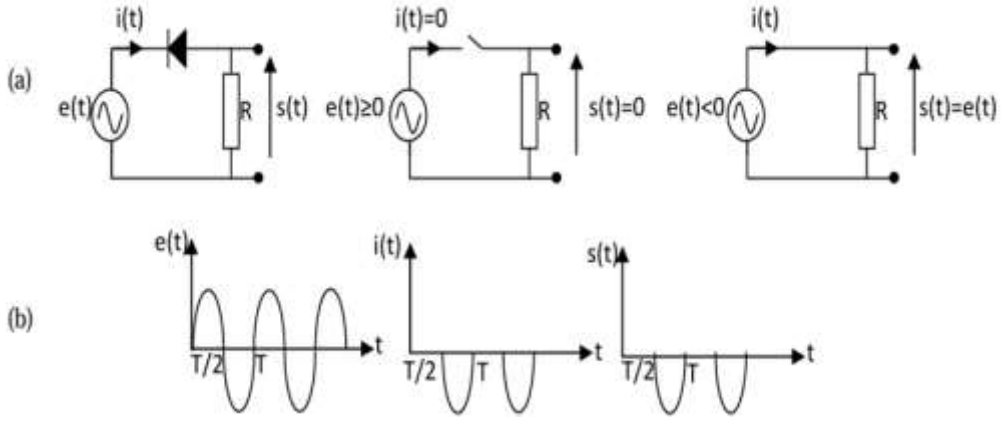



*Fig.IV.7 : Redressement simple alternace (négative) : (a) circuit de base, schema equivalent (b) chronogramme*

**Remarque** : Dans le cas d'une diode parfaite ou réelle, cette diode ne peut conduire qu'à partir d'une tension de seuil $V_d$, alors, l'amplitude de crête du signal de sortie est inférieur à l'amplitude de crête du signal d'entrée de sorte que la différence est égale approximativement à la valeur de la tension de seuil.

### IV.4.2. Redressement double alternance

Le redressement double alternance utilise un pont à quatre diodes $D_1$, $D_2$, $D_3$ et $D_4$. L'application d'une tension sinusoïdale à l'entrée du circuit de redressement permet d'obtenir un signal ou l'alternance positive est restituée telle quelle, alors que la polarité de l'alternance négative est inversée.

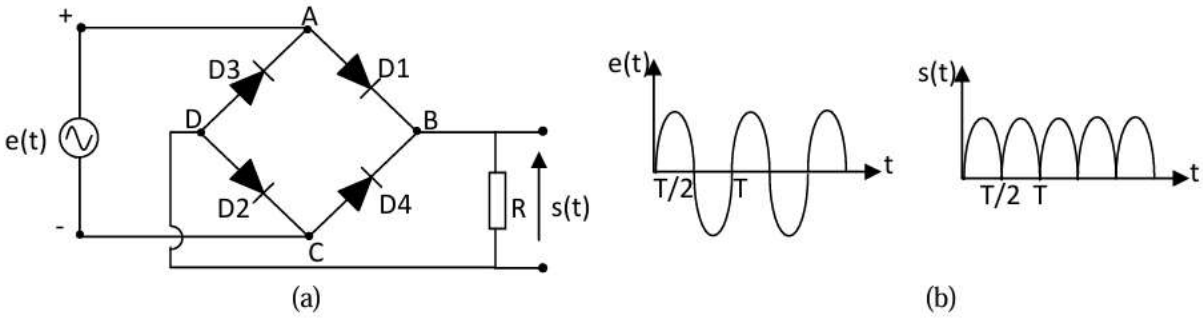



Figure III.17 : Redressement double alternance: (a) circuit à pont de diodes (b) chronogramme

Les diodes utilisées dans le pont sont considérées comme idéales:

- Lorsque la tension d'entrée est positive, un courant positif sort par la borne (+) et entre par la borne (-). Ce qui provoque la conduction de D1 et D2 et le blocage de D3 et D4. Alors, on peut réduire le circuit de la figure précédente à celui schématisé à la figure suivante.

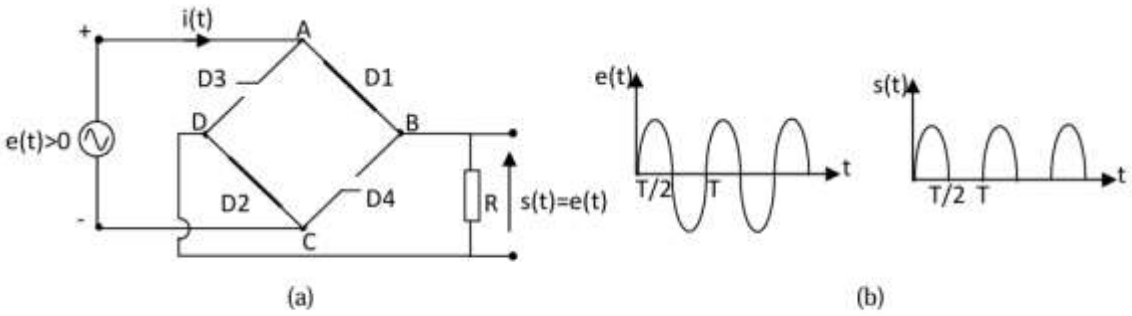



Figure III.18 : Restitution de l'alternance positive à la sortie (a) schéma équivalent (b) chronogramme

L'alternance positive est restituée à la sortie.

- ❖ Lorsque la tension d'entrée est négative, un courant négative sort par la borne (-) et entre par la borne (+) . Ce qui provoque la conduction de D3 et D4 et le blocage de D1 et D2. Alors, on peut réduire de la façon suivante.

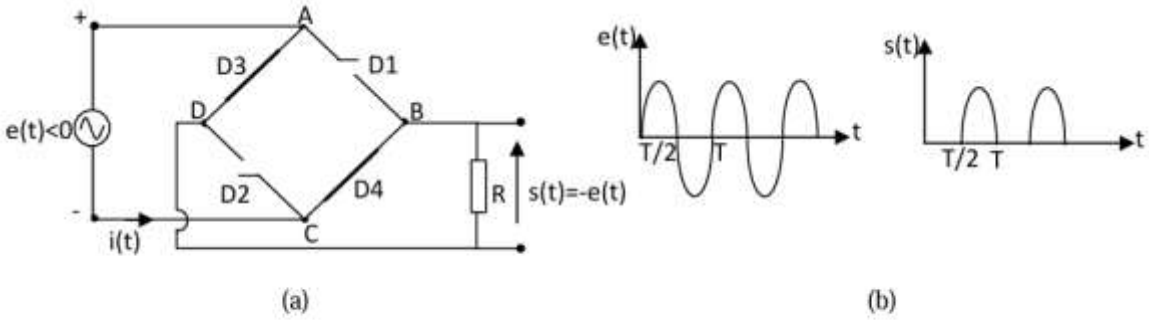



Figure III.19 : Inversion de l'alternance négative à la sortie (a) schéma équivalent (b) chronogramme

De ce fait l'alternance négative est inversée à la sortie.

Comme les diodes D1, D2, D3 et D4 travaillent simultanément, on obtient à la sortie le signal de la première figure (III.17).

### IV.4.3. Stabilisation par diode Zener

Une des principales applications de la diode Zener est la limitation de tension. Elle peut dans une certaine limite maintenir la tension constante quel que soit le courant qui la traverse.

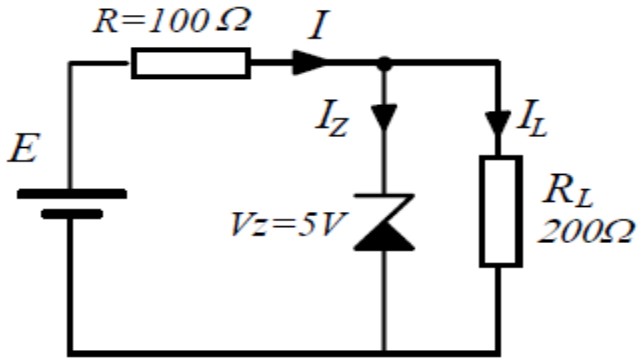


Fig. III-7 : stabilisation par zener

Avec le montage de la figure Fig. III-7, on va essayer de stabiliser la tension aux bornes la charge RL à l'aide d'une diode Zener (VZ=5V).

Pour les faibles valeurs de E, la Zener reste bloquée, la tension VL aux bornes de RL sera calculée comme si la Zener était absente. Dès que VL dépasse VZ, la Zener conduit et VL reste égale à VZ.

**a) E = 3V**

On suppose que la Zener est bloquée, Iz = 0,

$$V_L = \frac{R_L}{R_L + R} E = \frac{200}{300} x3 = 2V$$

VL<Vz , donc la Zener est bien bloques ; tout courant I passe de la charge

$$I_L = I = \frac{E}{R_L + R} = \frac{3V}{0.3K} = 10mA$$

$V_L$=2V; $I_L$=10mA

**b) E = 6V**

On suppose que la Zener est bloquée, Iz = 0,

$$V_L = \frac{R_L}{R_L + R} E = \frac{200}{300} x6 = 4V$$

VL<Vz , donc la Zener est bien bloques ; tout courant I passe de la charge

$$I_L = I = \frac{E}{R_L + R} = \frac{6V}{0.3K} = 20mA$$

$V_L$=4V; $I_L$=20mA

**c) E = 9V**

On suppose que la Zener est bloquée, Iz = 0,

$$V_L = \frac{R_L}{R_L + R} E = \frac{200}{300} x9 = 6V$$

Comme VL<Vz , donc la Zener conduit et impose $V_L=V_z=5V$ ; la tension est stabilisée à 5V.
le courant se partage entre $I_z$ et $I_L$.

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{5V}{0.2K} = 25mA \; ; \; I = \frac{E - V_Z}{R} = \frac{9V - 5V}{0.1K} = 40mA; I_Z = I - I_L = 15mA$$

$V_L=5V$; $I_L=25mA$

**d) E = 12V**

Il est évident que la Zener va conduire ici aussi et imposer $V_L=V_z=5V$. La tension VL est stabilisée à 5V que soit la tension de la source.

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{5V}{0.2K} = 25mA \; ; \; I = \frac{E - V_Z}{R} = \frac{12V - 5V}{0.1K} = 70mA; I_Z = I - I_L = 35mA$$

$V_L=5V$; $I_L=25mA$

En conclusion, on remarque que tant que la Zener est bloquée, la tension VL aux bornes de la charge n'est pas stabilisée. Tout se passe comme si la Zener n'était pas là.

Dès que la Zener conduit, la tension aux bornes de la charge est stabilisée à la valeur VZ, le courant dans la charge RL reste égal à VZ/RL, et c'est le courant Iz qui circule dans la Zener qui varie pour compenser les variations de I.

# Conclusion

En conclusion, la diode est un composant électronique fondamental dont le fonctionnement repose sur les propriétés de la jonction PN. Sa capacité à laisser passer le courant dans un sens et à le bloquer dans le sens opposé lui confère de nombreuses applications en électronique. L'étude de ses caractéristiques et de ses différents modes de polarisation permet de comprendre son utilisation dans les circuits de redressement et de stabilisation de tension, notamment à travers la

diode Zener. La maîtrise de ces notions constitue une étape importante pour aborder l'étude d'autres composants électroniques, tels que les transistors

**Exercices d'application**

1. On considère le circuit électrique suivant constitué d'une source de tension continue E=12V, d'une résistance R1=1kΩ, d'une résistance R2=2kΩ) et d'une diode au silicium montée en série avec R2. La diode est caractérisée par une tension de seuil VD=0,7V. On suppose que la diode est polarisée en direct.

a) Représenter le modèle électrique équivalent de la diode passante.
b) Déterminer le courant I qui traverse le circuit.
c) Calculer la tension aux bornes de chaque résistance.
d) Déterminer la puissance dissipée par la diode.

2. On réalise un montage redresseur double alternance à l'aide d'un pont de quatre diodes supposées idéales. La tension alternative appliquée à l'entrée du pont est sinusoïdale, de fréquence f=50Hz et de valeur efficace U=12V. La charge utilisée est une résistance RL=100Ω.
   a) Expliquer le fonctionnement du pont de diodes pendant l'alternance positive.
   b) Expliquer son fonctionnement pendant l'alternance négative.
   c) Calculer la valeur maximale de la tension de sortie.
   d) Calculer la valeur moyenne de la tension redressée.
   e) Déterminer la valeur moyenne du courant dans la charge.
   f) Déterminer la fréquence du signal redressé.

3. On considère un circuit de stabilisation de tension constitué d'une source continue E, d'une résistance série R=200Ω, d'une diode Zener de tension VZ=6V et d'une résistance de charge RL=600Ω. La diode Zener est montée en inverse aux bornes de la charge. On étudie trois valeurs de la tension d'alimentation :

   - Cas 1 : \(E=5V\)

- Cas 2 : \(E=9V\)
- Cas 3 : \(E=15V\)

On suppose que la diode Zener est idéale et que sa puissance maximale admissible est de 500mW.

a) Pour chaque valeur de \(E\), déterminer si la diode Zener conduit ou reste bloquée.
b) Calculer la tension \(V_L\) aux bornes de la charge.
c) Calculer le courant \(I_L\) dans la charge.
d) Lorsque la diode Zener conduit, calculer le courant \(I_Z\).
e) Vérifier si la puissance dissipée par la diode Zener reste inférieure à sa puissance maximale admissible.

# Chap. V. TRANSISTOR A JONCTION OU TRANSISTOR BIPOLAIRE

## Introduction

Le transistor bipolaire est l'un des composants fondamentaux de l'électronique moderne. Constitué de trois couches de semi-conducteurs de type P et N, il existe sous deux formes principales : le transistor NPN et le transistor PNP. Son fonctionnement repose sur l'interaction entre deux jonctions PN et permet de contrôler un courant électrique important à partir d'un courant de faible intensité.

Grâce à cette propriété, le transistor est principalement utilisé dans deux domaines : l'amplification des signaux électriques et la commutation électronique. Dans ce chapitre, nous étudierons sa structure, son principe de fonctionnement, ses caractéristiques électriques ainsi que les différentes méthodes de polarisation permettant de déterminer son point de fonctionnement. Ces notions permettront de comprendre le rôle du transistor dans les circuits électroniques et ses nombreuses applications pratiques.

## V.1. Types de transistors

N’importe quel transistor est constitué de trois couches de semi-conducteurs extrinsèques. On distingue deux types de transistors **bipolaires**, les transistors **NPN** et les transistors **PNP**.

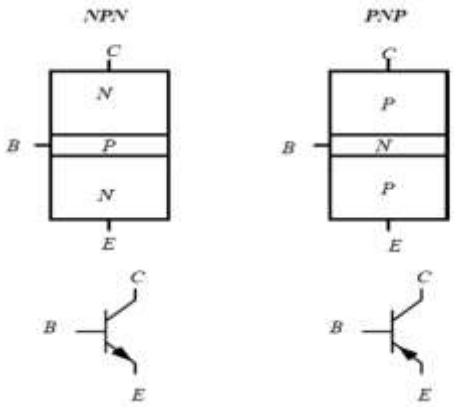


*Fig.1 : Transistor bipolaire*

Le transistor **NPN** est constitué par :

• Une couche N fortement dopée constituant **l'émetteur**.

• Une couche P très mince et faiblement dopée constituant la **base**.

• Une couche N faiblement dopée constituant le **collecteur**.

Le transistor **PNP** est constitué par :

• Une couche P fortement dopée constituant **l'émetteur**.

• Une couche N très mince et faiblement dopée constituant la **base**.

• Une couche P faiblement dopée constituant le **collecteur**.

## V.2 Principe de fonctionnement : effet transistor.

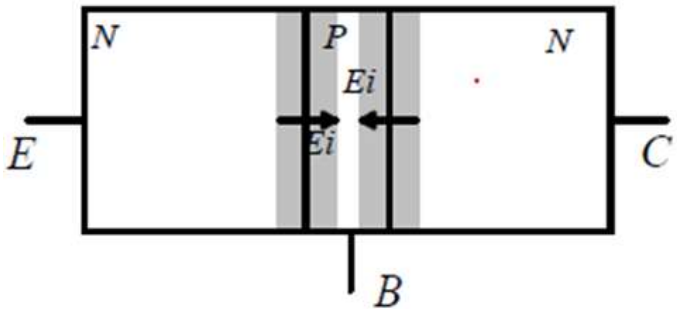



***Fig.2 : NPN non polarisé***

En l'absence de polarisation (Fig. 2), les porteurs majoritaires diffusent de part et d'autres des deux jonctions PN, provoquant la création de deux zones dépeuplées (de déplétion) où règnent deux champs Ei qui s'opposent à la diffusion et engendrent une situation d'équilibre.

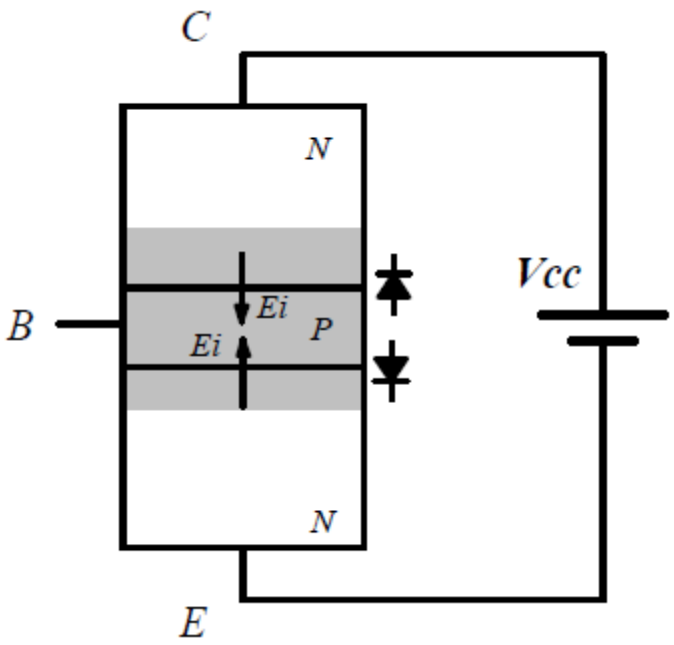



*Fig.3: NPN polarisé*

Si on applique un générateur externe entre le collecteur et l'émetteur (Fig. Précédente) la jonction collecteur-base est polarisée en inverse, sa zone dépeuplée devient plus large, aucun courant ne circule entre le collecteur et l'émetteur.

Si on applique un deuxième générateur entre la base et l'émetteur, la jonction base - émetteur se trouve polarisée en direct, la zone de déplétion qui l'entourait disparaît et un courant directe circule entre la base et l'émetteur, on l'appelle le courant de base $I_B$.

La polarisation de la jonction B-E en direct va être à l'origine d'un deuxième courant dans le transistor, en effet, l'émetteur fortement dopé N injecte un grand nombre d'électrons dans la base (diffusion des porteurs majoritaires), ces électrons ne vont pas tous être récupérés par le circuit extérieur, car, comme la base est très mince, un grand nombre d'entre eux va se trouver au voisinage de la jonction base - collecteur. Pour cette jonction, les électrons du côté de la base constituent les porteurs minoritaires dont le passage côté collecteur est fortement encouragé par le champ important qui règne autour de cette jonction. Il en résulte la circulation d'un courant important entre le collecteur et l'émetteur à travers la base (Fig. IV-4), ce phénomène est appelé **effet transistor**.

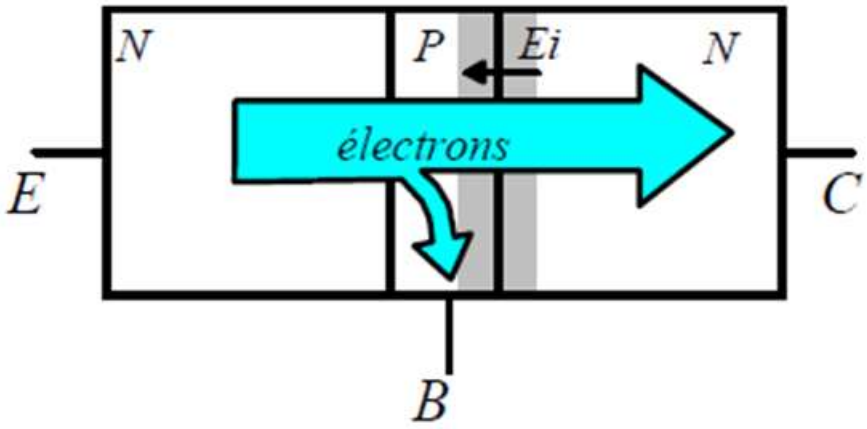



***Fig.4 : Effet transistor***

Le courant de l'émetteur est noté $I_E$, celui de la base est noté $I_B$ et celui du collecteur est noté $I_C$. Ces trois courants obéissant aux relations suivantes:

$$I_E = I_B + I_C$$
$$I_C = \alpha I_E$$
$$I_C = \beta I_B$$

α est voisin de l'unité (0.95 à 0.99) ce qui permet souvent de considérer $I_C = I_E$, par contre, le rapport β entre le courant du collecteur et celui de la base est important, il varie entre quelques dizaines à quelques centaines, c'est le **gain en courant** du transistor.

En résumé, le transistor est un composant électronique géré par la relation $\mathbf{I_C = \beta I_B}$. Cette relation traduit la possibilité de contrôler un courant important ($I_C$) à l'aide d'un courant beaucoup plus faible ($I_B$) d'où son utilisation à grande échelle en amplification.

## V.3. Réseau de caractéristique du transistor

C'est un réseau de courbes qui décrit l'évolution du courant du collecteur $I_C$ en fonction de la tension $V_{CE}$ et ceci pour différentes valeurs du courant de base $I_B$.

$$I_C = f(V_{CE})_{I_B=cte}$$

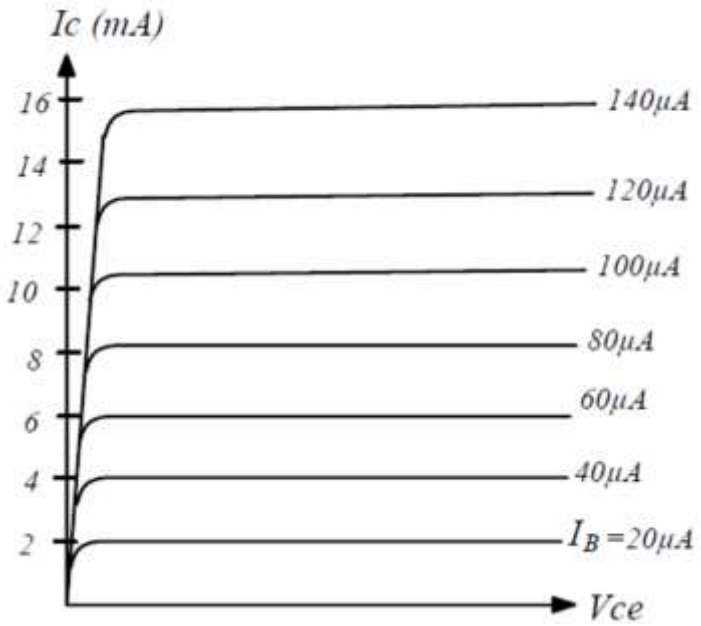



***Fig. 5 : Caracteristiques d'un transistor bipolaire***

En observant le réseau de caractéristiques de Fig. IV-5, on peut faire deux observations :

- pour les mêmes variations du courant $I_B$, les courbes sont plus espacées pour les valeurs importantes de $I_C$, ce qui veut dire que β n'est pas réellement une constante mais augmente avec $I_C$. La variation de β avec le courant $I_C$ n'est pas très importante, dans la suite de ce cours nous considérerons que β **est une Constante qui ne dépend que du type du transistor.**

- Pour les valeurs importantes de $I_C$, les courbes ne sont plus tout à fait horizontales mais légèrement inclinées. Dans ce cas la relation $I_C = \beta I_B$ devrait être remplacée par $I_C = \beta I_B + 1/\rho V_{CE}$. ρ est la résistance interne de sortie du transistor, elle varie d'un transistor à l'autre. D'une manière générale sa valeur est suffisamment importante pour puisse négliger le terme $1/\rho V_{CE}$ devant $\beta I_B$.

## V.4. Polarisation du transistor

Pour fonctionner correctement, le transistor doit avoir sa jonction base-émetteur polarisée en direct ce qui engendre un courant $I_B$ dans la base et un courant $I_C = \beta I_B$ dans le collecteur. L'état du transistor est caractérisé par ce qu'on appelle le point de fonctionnement correspondant au couple ($V_{CE}$, $I_C$) qui sont la tension entre le collecteur et l'émetteur ainsi que le courant du collecteur $I_C$.

### V.4.1. Polarisation par une résistance de base

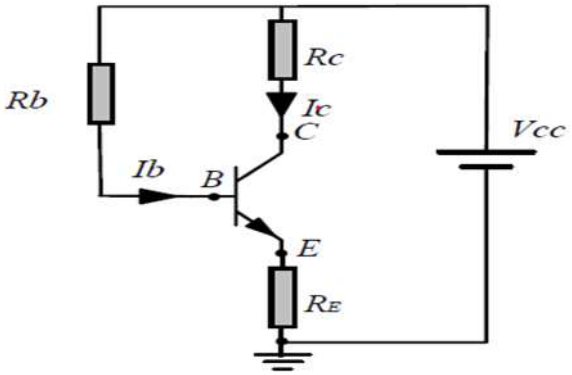



***Fig. 6 : Polarisation par une resistance***

- On détermine le courant $I_B$ en écrivant la loi d'Ohm dans la maille d'entrée :

$$Vcc = R_B I_B + 0.7 + R_E (I_B + I_C)$$

En remplaçant $I_C$ par $\beta I_B$, on obtient :

$$I_B = \frac{V_{CC} - 0.7}{R_B + (\beta + 1)R_E}$$

- Le courant du collecteur est $I_C = \beta I_B$
- La tension $V_{CE}$ est obtenue en écrivant la loi d'Ohm dans la maille de sortie :

$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} + R_E (I_B + I_C)$$

Soit

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_C - R_E I_B$$

**Application numérique :**

Vcc=12V, β=100, $R_B$ =750KΩ, $R_E$ =1KΩ, $R_C$ =4KΩ.
Calculer le point de fonctionnement.

$$I_B = \frac{12 - 0.7}{750K + 101k} = 13.3\mu A$$
$$I_C = 100x13.3\mu A = 1.33mA$$
$$V_{CE} = 12 - (4K + 1K)x1.33m - 1kx13.3\mu A = 5.35V$$

Il arrive que le problème soit posé à l'envers, c'est à dire qu'on se donne un point de fonctionnement et qu'on cherche les valeurs des résistances qui permettent d'obtenir ce point de fonctionnement.

**Exemple :**

Soit un transistor de gain β=100, polarisé à l'aide d'une alimentation Vcc=12V,
Calculer $R_B$, $R_E$, et $R_C$ pour obtenir le point de fonctionnement {$V_{CE}$ =5V, $I_C$=1mA}
Si on écrit la loi d'Ohm dans les deux mailles d'entrée et de sortie, on s'aperçoit que nous n'avons pas suffisamment de donnée pour calculer les trois résistances. Il faut fixer une donnée supplémentaire, fixons la tension de l'émetteur à $V_E$= 2V.

$I_B = I_C / \beta$ = 1mA / 100 = 0.01 mA

$V_B = V_E + 0.7 = 2.7V$

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_B}{I_B} = \frac{12 - 2.7}{0.01mA} = 930K\Omega$$
$$R_E = \frac{V_E}{I_E} = \frac{V_E}{I_C - I_B} = \frac{2}{1.01mA} = 1.98K\Omega$$
$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE} - V_E}{I_C} = \frac{12 - 5 - 2}{1mA} = 5K\Omega$$

### V.4.2 . Polarisation par Pont

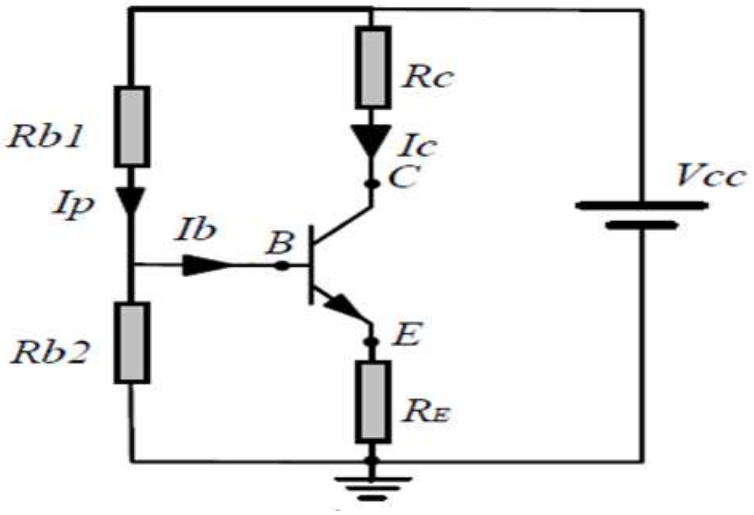



**Fig.7 :Polarisation par pont**

La base est polarisée par un "pont" constitué de deux résistance $R_{B1}$ et $R_{B2}$ (Fig.7). Pour faciliter le calcul, on applique le théorème de Thévenin au circuit d'entrée et on obtient le schéma de Fig.8 ce qui permet de ramener le problème à une polarisation par une résistance de base.

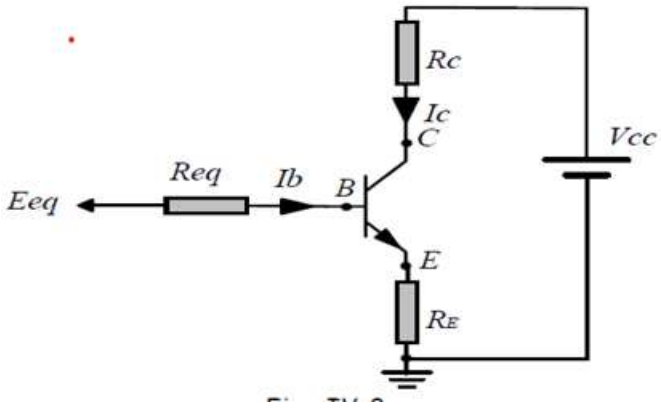



***Fig.8 :Polarisation par une resistance de base***

- $V_{eq} = \dfrac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}$

- $R_{eq} = R_{B1} // R_{B2} = \dfrac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$
- Le courant $I_B$ est déterminé à partir de :

$$V_{eq} = R_{eq} I_B + 0.7 + R_E (I_B + I_C)$$

En remplaçant $I_C$ par $\beta I_B$, on obtient :

$$I_B = \frac{V_{eq} - 0.7}{R_{eq} + (\beta + 1) R_E}$$

- Le courant du collecteur est $I_C = \beta I_B$
- La tension $V_{CE}$ est obtenue en écrivant la loi d'Ohm dans la maille de sortie :
  $V_{cc} = R_C I_C + V_{CE} + R_E (I_B + I_C)$

  Soit $V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_C - R_E I_B$

**Application numérique :**

$V_{cc}$=12V, β=100, $R_{B1}$ =56KΩ, $R_{B2}$ =10KΩ, $R_E$ =2KΩ, $R_C$ =10KΩ.

Calculer le point de fonctionnement.

On trouve : Veq = 1.82 V, Req = 8 KΩ d'où

$$I_B = \frac{1.82 - 0.7}{8K + 101x2K} = 5.3\mu A$$
$$I_C = 100x5.3\mu A = O.53mA$$
$$V_{CE} = 12 - (10K + 2K)x0.53mA - 2Kx5.3\mu A = 5.6V$$

**Exercice :** Vcc=12V, β=100, Calculer $R_{B1}$, $R_{B2}$, $R_E$, et $R_C$ pour obtenir le point de fonctionnement :

**Réponse :** {$V_{CE}$ = 5.5V, $I_C$ = 1mA, $V_E$ = 1V}.

Ces données ne suffisent pas pour calculer les deux résistances du pont, elles permettent seulement de calculer Req Pour lever cette indétermination, on se donne une des deux résistances

et on calcule l'autre. Une deuxième solution consiste à se donner le rapport entre le courant du pont $I_P$ et le courant de base $I_B$

Si on note $I_1$ le courant dans $R_1$ et $I_2$ le courant dans $R_2$, on a $I_1 = I_B + I_2$, si $I_2$ est grand devant $I_B$, on peut négliger $I_B$ et on obtient $I_1 = I_2 = I_P$ = courant du pont.

Prenons $I_P = 30$ IB.

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1mA}{100} = 0.01mA$$

$$V_B = V_E + 0.7V = 1.7V$$

$$R_{B1} = \frac{V_{CC} - V_B}{I_1} = \frac{12 - 1.7}{30x0.01mA} = 34.3K\Omega;$$

$$R_{B2} = \frac{V_B}{I_2} = \frac{1.7}{29x0.01mA} \approx 5.9K\Omega$$

$$R_E = \frac{V_E}{I_E} = \frac{V_E}{I_C + I_B} = \frac{1}{101mA} \approx 1K\Omega$$

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE} - V_E}{I_C} = \frac{12 - 5.5 - 1}{1mA} = 5.5K\Omega$$

## Conclusion

En conclusion, le transistor bipolaire est un composant essentiel des circuits électroniques grâce à sa capacité à amplifier et à commander les signaux électriques. Son fonctionnement repose sur le contrôle du courant du collecteur par le courant de base. La maîtrise de ses caractéristiques électriques et de ses différentes méthodes de polarisation permet de déterminer son point de fonctionnement et de garantir son bon fonctionnement dans un circuit. Ces connaissances constituent une base importante pour comprendre les applications du transistor, notamment dans les montages amplificateurs et les circuits de commutation.

**Exercices d'application**

1. On considère un transistor NPN caractérisé par un gain en courant $\beta=100$. Le courant de base est $I_B=20\mu A$.

   a) Calculer le courant du collecteur $I_C$.
   b) Calculer le courant de l'émetteur $I_E$.
   c) Vérifier la relation entre les trois courants du transistor

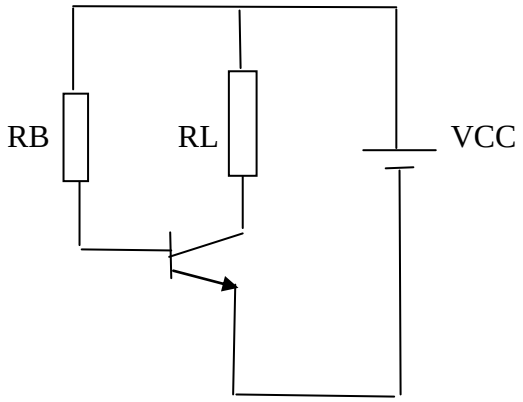
2. Un transistor bipolaire fonctionne normalement. On mesure un courant de base $I_B=50\mu A$ et un courant de collecteur $I_C=5mA$.

   a) Calculer le gain en courant $\beta$ du transistor.
   b) Si le courant de base augmente à $80\mu A$, déterminer le nouveau courant du collecteur en supposant que le gain reste constant.
   c) Calculer le courant de l'émetteur dans ce deuxième cas.

3. On considère un transistor NPN monté selon le circuit de polarisation par résistance de base. Les caractéristiques du circuit sont : Tension d'alimentation : VCC=12V, Résistance de base : RB=560kΩ, Résistance du collecteur : RC=2kΩ, Gain en courant : $\beta=100$, Tension base-émetteur : VBE=0,7V. On suppose que l'émetteur est directement relié à la masse.

   a) Calculer le courant de base IB.
   b) Déterminer le courant du collecteur IC.
   c) Calculer la tension VCE.
   d) Déterminer le point de fonctionnement du transistor.

4. On considère le montage suivant, avec un transistor tel que β=80 et VBE=0.7V. On désire avoir un point de fonctionnement tel que VCE=6V et IC=3.6µA. Quelles valeurs faut-il donner à RB et RL ?




### 1.1.1 Conclusion générale

Au terme de ce cours, nous avons étudié les notions fondamentales de l'électronique, en mettant l'accent sur les propriétés des semi-conducteurs et le fonctionnement des principaux composants électroniques. L'étude des semi-conducteurs a permis de comprendre les mécanismes de conduction électrique ainsi que la formation et les propriétés de la jonction PN. À partir de cette dernière, nous avons abordé le fonctionnement des diodes, leurs caractéristiques électriques et leurs principales applications, notamment le redressement des signaux alternatifs et la stabilisation de tension à l'aide de la diode Zener.

Nous avons également étudié le transistor bipolaire, sa structure, son principe de fonctionnement, ses caractéristiques et ses méthodes de polarisation, en mettant en évidence son rôle essentiel dans l'amplification et la commutation des signaux électriques.

Ainsi, les connaissances acquises dans ce cours constituent une base indispensable pour l'analyse, la conception et la réalisation de circuits électroniques simples. Elles permettront

également aux étudiants d'aborder plus facilement des notions avancées en électronique analogique et numérique, tout en développant leurs compétences pratiques à travers des montages et des expérimentations.

REFERENCES


1. Granjon, Y. (2022). *Électricité en régime continu : sources d'alimentation, dipôles résistifs et associations de résistance, lois de Kirchhoff, théorèmes fondamentaux de l'électricité, principe de superposition, puissance et énergie électriques*. Dunod, 47 p. ISBN : 978-2-10-083626-0.
2. Piou, M. (2010). *Lois générales de l'électricité en régime continu : lois de Kirchhoff*. Baselecpro, document pédagogique en ligne.
3. Becherrawy, T. (2008). *Mini manuel d'électrocinétique : cours et exercices corrigés*. Dunod, 240 p.
4. Palermo, C., & Torres, J. (2020). *Électricité : l'essentiel du cours – Exercices corrigés (2e éd.)*. Dunod, 320 p.
5. Sapoval, B., & Hermann, C. (1990). *Physique des semi-conducteurs.* Paris : Ellipses, 284 p.
6. Colinge, J.-P., & Van de Wiele, F. (1996). *Physique des dispositifs semi-conducteurs*. Bruxelles : De Boeck, 388 p.
7. Rousseau, J.-J. (1999). *Introduction à l'électronique : cours et exercices corrigés*. Paris: Ellipses Universités, 256 p. ISBN: 978-2-7298-9918-9.
8. Neffati, T. (2008). *Introduction à l'électronique analogique : cours et exercices corrigés*. Paris: Dunod, 252 p. ISBN : 978-2-10-051393-2.
9. Manneville, F., & Esquieu, J. (2010). *Électronique : théorie du signal et composants. Cours et exercices corrigés (2e éd.)*. Paris : Dunod, 320 p. ISBN : 978-2-10-055806-3.
10. Canet, P. (2018). *Électronique analogique basse fréquence : composants, circuits, amplification, filtrage. Cours et exercices corrigés*. Paris : Ellipses, 320 p.