

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'électronique

# *Technologie des composants électroniques 2*

Elaboré par:

Dr. Souad MERABET

✚ **Manuscrit élaboré selon le programme officiellement  
agréé et confirmé par le CPNDST.**

✚ **Publique ciblé**  
○ 3<sup>ème</sup> année Licence électronique

## Contenu

1. Introduction
2. Objectif de l'enseignement
3. Connaissances préalables recommandées
4. Organisation
5. Références biblio-Webographies

---

**Semestre : S5**

**Unité d'enseignement : UED 3.1**

**Matière : Technologie des composants électroniques 2**

**Crédit : 01**

**Coefficient : 01**

---

### 1. Introduction

Les composants électroniques sont des éléments qui sont utilisés pour construire des circuits électroniques. Ils peuvent être des dispositifs passifs comme des résistances, des condensateurs ou des inductances, ou des dispositifs actifs comme des transistors, des diodes, des circuits intégrés, etc.

Les composants électroniques sont souvent fabriqués à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium, le germanium ou le gallium arsenide. Ces matériaux présentent des propriétés électroniques particulières qui leur permettent de contrôler le flux d'électrons et donc de fonctionner comme des interrupteurs ou des amplificateurs.

La miniaturisation des composants électroniques a permis de développer des technologies de plus en plus performantes et compactes, comme les microprocesseurs, les mémoires RAM et les capteurs. Les composants électroniques sont ainsi devenus un élément clé de la révolution numérique et de la transformation numérique de la société.

### 2. Objectifs de l'enseignement

L'objectif de l'enseignement de la technologie des composants électroniques est de permettre aux étudiants de comprendre le fonctionnement des composants électroniques, de savoir comment les utiliser et de les intégrer dans des circuits électroniques plus complexes.

Comme ils peuvent développer des compétences techniques qui peuvent être utilisées dans de nombreux domaines, notamment l'ingénierie, la conception de circuits imprimés, la conception de produits électroniques, la réparation d'appareils électroniques, la robotique, l'internet des objets et bien d'autres. Enfin, l'enseignement de la technologie des composants électroniques peut aider les étudiants à développer des compétences en résolution de problèmes et en pensée critique, en plus de leur donner la possibilité de travailler sur des

projets pratiques et de collaborer avec d'autres étudiants pour concevoir et construire des systèmes électroniques fonctionnels.

### 3. Connaissances préalables recommandées

Pour acquérir des connaissances en technologie des composants électroniques, il est utile d'avoir des connaissances préalables en électricité et en électronique de base. Cela peut inclure :

1. Les lois de l'électricité : il est important de comprendre les concepts de tension, de courant et de résistance, ainsi que les lois de l'électricité telles que la loi d'Ohm.
2. Les circuits électroniques de base : cela comprend la compréhension des circuits série et parallèle, ainsi que les différents types de sources d'alimentation et de chargeurs de batterie.
3. Les concepts de base des semi-conducteurs : cela comprend la compréhension de la structure des semi-conducteurs, la différence entre les semi-conducteurs de type N et de type P, et les caractéristiques des diodes et des transistors.
4. La lecture des schémas électroniques : il est important de comprendre comment lire les schémas électroniques et les symboles de composants électroniques.
5. Les compétences en soudure et en assemblage : la technologie des composants électroniques implique souvent la soudure et l'assemblage de composants électroniques sur les circuits imprimés, il est donc utile de savoir comment utiliser un fer à souder et d'autres outils de soudure.
6. Les compétences en programmation : dans certains cas, les composants électroniques sont utilisés avec des microcontrôleurs et nécessitent des compétences en programmation pour les faire fonctionner.

Il est possible de commencer à apprendre les technologies des composants électroniques sans avoir des connaissances tels que le 5., et le 6.

### 4. Organisation

**Chapitre 1** : Conception des alimentations

**Chapitre 2** : Composants actifs de puissance

**Chapitre 3** : Composants optoélectroniques

**Chapitre 4** : Les relais

**Chapitre 5** : Documentation sur les composants

**Chapitre 6** : Circuits de la famille TTL et la famille CMOS

### 5. Références biblio-Webographies

## *Sommaire*

### **Chapitre 1 : Conception des alimentations**

- 1.1. Introduction**
- 1.2. Alimentations stabilisées**
  - 1.2.1. Présentation**
  - 1.2.2. Conception**
    - a. **Le transformateur**
    - b. **Le redressement**
    - c. **Le filtrage**
    - d. **La régulation**
- 1.3. Alimentation variable**
- 1.4. Alimentation à courant continu**
- 1.5. Alimentation symétrique**

### **Chapitre 2 : Composants actifs de puissance**

- 2.1. Les thyristors**
  - 2.1.1. Structure**
  - 2.1.2. Principe de fonctionnement**
  - 2.1.3. Caractéristique**
  - 2.1.4. Le thyristor GTO**
    - 2.1.4.1. Le principe de fonctionnement**
  - 2.1.5. Domaines d'utilisation**
- 2.2. Les Triacs**
  - 2.2.1. Structure**
  - 2.2.2. Symbole**
  - 2.2.3. Principe de fonctionnement**
  - 2.2.4. Caractéristique**
  - 2.2.5. Domaines d'applications**
- 2.3. Les Diacs**
  - 2.3.1. Symbole**
  - 2.3.2. Circuit d'étude du Diac**
  - 2.3.3-Domaines d'applications du Diac**
- 2.4. Le transistor à jonction " UJT "**
  - 2.4.1. Structure et symbole**
  - 2.4.2. Principe de fonctionnement**
  - 2.4.3. Domaines d'applications**
- 2.5. Le transistor à effet de champ " FET "**
  - 2.5.1. Structure et symbole**
  - 2.5.2. Réseaux de caractéristiques**

### **Chapitre 3 : Composants optoélectroniques**

- 3.1. Les diodes Electroluminescentes**
  - 3.1.1. Symbole**
  - 3.1.2. Principe de fonctionnement**
    - a. **Emission de la lumière**
    - b. **Injection des porteurs**
    - c. **Rendement quantique**

- 3.1.3. Propriétés technologiques
- 3.1.4. Codification et valeurs typiques
- 3.1.5. Domaines d'applications
  - a. Afficheurs 7 segments
  - b. Afficheurs 16 segments
- 3.2.1. Symbole
- 3.2.2. Principe de fonctionnement
- 3.2.3. Propriétés technologiques
- 3.2.5. Domaines d'applications
- 3.3. La photodiode
  - 3.3.1. Symbole
  - 3.3.2. Principe de fonctionnement
    - a) En absence de lumière : Obscurité
    - b) Sous lumière : Eclairement
  - 3.3.3. Propriétés technologiques
  - 3.3.4. Codification et valeurs typiques
  - 3.3.5. Domaines d'applications
- 3.4. Le phototransistor
  - 3.4.1. Symbole
  - 3.4.2. Principe de fonctionnement
  - 3.4.3. Propriétés technologiques
  - 3.4.4. Codification et valeurs typiques
  - 3.4.5. Domaines d'applications
- 3.5. L'opto-coupleur
  - 3.5.1. Symbole
  - 3.5.2. Principe de fonctionnement
  - 3.5.3. Propriétés technologiques
  - 3.5.4. Codification et valeurs typiques
  - 3.5.5. Domaines d'applications

#### Chapitre 4 : Autres composants et accessoires spécifiques

- 4.1. Les relais
- 4.2. Relais électromécaniques
- 4.3. Principe de fonctionnement
  - 4.3.1. La partie puissance
  - 4.3.2. La partie commande
  - 4.3.3. Symbole
- 4.4. Relais statique
- 4.5. Domaines d'applications des Relais
- 4.6. Microphone
- 4.6. Haut-parleur
- 4.7. Buzzer
  - 4.7.1. Buzzer électro-mécanique
  - 4.7.2. Buzzer piezzo-électrique "simple"
- 4.8. Quartz

#### Chapitre 5 : Documentation sur les composants

- 5.1. Principaux constructeurs de composants
- 5.2. Sigles d'identification des composants

### **5.3. Notice technique de composants**

#### **Chapitre 6 : Circuits de la famille TTL et la famille CMOS**

##### **6.1. Présentation**

##### **6.2. Circuits de la famille TTL**

- a. Tension d'alimentation
- b. Courants d'entrée et sortie
- c. Niveaux logiques
- d. Temps de propagation

##### **6.2.1. Etage de sortie à collecteur ouvert**

##### **6.2.2. Etage de sortie à trois états (0, 1 et Z)**

##### **6.2.3. Portes logiques à entrées spécifique**

- a. Trigger de Schmitt
- b. Sorties Bufférisées

##### **6.2.4. Précaution d'utilisation des circuits TTL**

##### **6.3. Circuits de la famille CMOS**

##### **6.3.1. Portes logiques P-MOS et N-MOS**

- a. Les portes logiques de base en NMOS
- b. Les portes logiques de base en PMOS

##### **6.3.2. Logique MOS complémentaire**

- a. Porte NON
- b. Porte NAND
- c. Porte NOR

##### **6.4. Caractéristiques électriques**

a/ Série 4000

b/Alimentation

c/Température

d/Caractéristiques de transfert

e/Immunité au bruit

f/Temps de basculement

g/Consommation

1) Puissance statique

2) Puissance dynamique

##### **6.5. Interfaçage**

##### **6.6. Précaution d'utilisation des circuits CMOS**

## Chapitre 1 : Conception des alimentations

### 1.3. Introduction

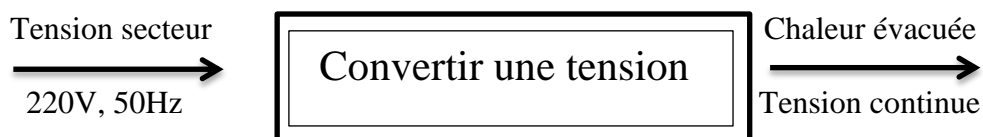
L'alimentation électrique est un élément essentiel de tout appareil électrique. Elle fournit l'énergie nécessaire pour faire fonctionner les circuits électroniques. La conception d'une alimentation électrique implique la sélection des composants appropriés pour concevoir l'énergie électrique d'une source d'alimentation en une tension et un courant appropriés pour le circuit électrique. C'est une étape cruciale dans le développement d'un appareil électronique, nécessitant une compréhension approfondie des principes électriques et électroniques, ainsi que des compétences en conception de circuits électroniques et en sélection de composants.

Divers paramètres sont pris en compte, tels que la tension d'entrée, la tension de sortie, la puissance de sortie, la stabilité de la tension et du courant, l'efficacité énergétique, les contraintes thermiques et les dimensions physiques. De plus, les alimentations électriques doivent être conçues en tenant compte des normes de sécurité applicables, notamment la sécurité électrique et la compatibilité électromagnétique.

### 1.4. Alimentations stabilisées

#### 1.2.1. Présentation

Les alimentations stabilisées sont utilisées pour fournir une tension continue. On en trouve pratiquement dans tous les appareils électroniques (audio, vidéo, ordinateur, etc...) ;



#### 1.2.2. Conception

Il s'agit de transformer une tension alternative en une tension continue par le biais de plusieurs composants (voir Figure 1.1):

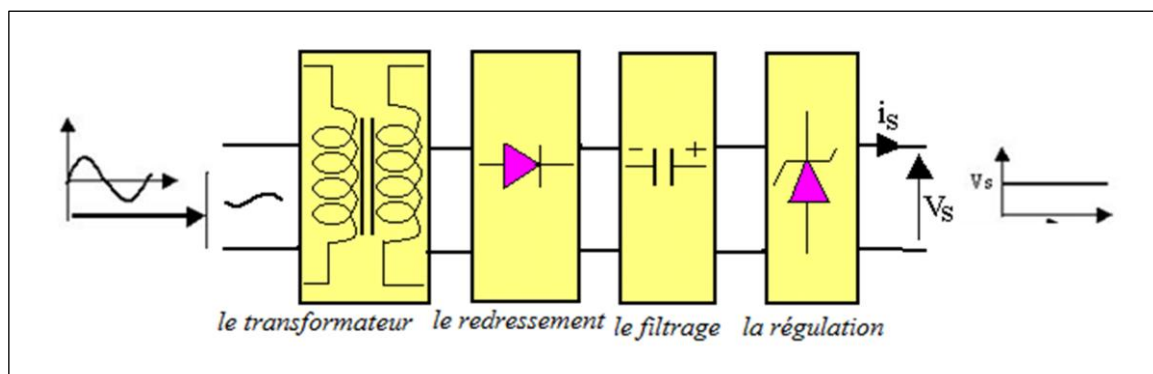


Figure 1.1 : Conception d'alimentation stabilisée.

### a) Le transformateur

Le rôle d'un transformateur est d'abaisser ou d'élever une tension alternative et de préférence de forme sinusoïdale. Il est constitué de deux enroulements placés sur le même noyau magnétique fermé.

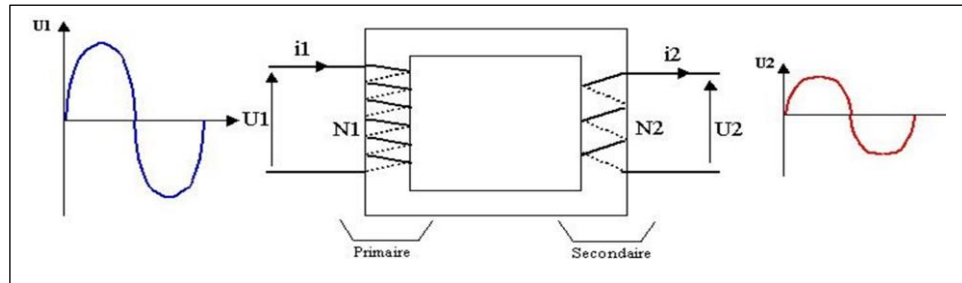


Figure 1.2 : Structure d'un transformateur

-Les spires sont de fil fin recouvertes d'un vernis isolant, le noyau de fer est feuilleté d'un transformateur pour éviter les pertes par effet joule.

-Le champ magnétique créé est de fréquence 50 Hz dans le primaire, sera véhiculé par le noyau ou l'armature vers l'axe d'un autre enroulement secondaire, donc apparition d'une tension alternative.

-Le transformateur est réversible, c'est-à-dire, si on injecte du 12 Volts alternatif dans le bobinage bas tension qui devient « primaire » on obtient du 220 Volts alternatif sur l'autre bobinage.

-Le bobinage primaire représente une résistance ohmique de l'ordre de  $100\ \Omega$  à  $1000\ \Omega$  (fil de cuivre fin et long), auquel s'ajoute une self (inductance) :

$$Z = R + jLW \cong 10k\Omega$$

-La puissance dissipée (consommée) dans l'enroulement secondaire est la même que celle fournie dans l'enroulement primaire :  $P_f = D_d \Leftrightarrow V_p \times I_p = V_s \times I_s \Leftrightarrow \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p}$

D'autre part,  $\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{1}{m} \Rightarrow m = \frac{N_s}{N_p}$  Le rapport de transformation

Avec  $N_s$  et  $N_p$  les nombres de spires au secondaire et primaire.

Si,  $m < 1$ , alors le transformateur est un abaisseur.

Et, si  $m > 1$  alors le transformateur est un élévateur.

Le rendement d'un transformateur est donné par la relation suivante :  $\eta = \frac{P_s}{P_p} \times 100$ , dans le cas où on considère, que le transformateur est parfait et qu'il n'y a pas de pertes.



Dans le cas de pertes, la formule devient :  $\eta = \frac{P_s}{P_p + P_F + P_C} \times 100$ , tel que :  $P_C$ , pertes de cuivre (fil en cuivre), les pertes de Foucault (courant induit dans les masses métalliques), et  $P_F$  pertes par effet joule (ces pertes sont dues à l'échauffement des conducteurs, ont lieu dans les deux enroulements).

Mesure de  $P_F$  et  $P_C$  : 1-Essai à vide : mesure des pertes  $P_F$  :  $P_F = R \cdot I_V^2$

2-Essai en court-circuit  $P_C$  :  $P_C = R_C \cdot I_{CCS}^2$

### b) Le redressement

Cette fonction est réalisée par un pont de diode. L'opération consiste à redresser l'alternance négative. On parle de tension continue redressée (Voir Figure 1.3).

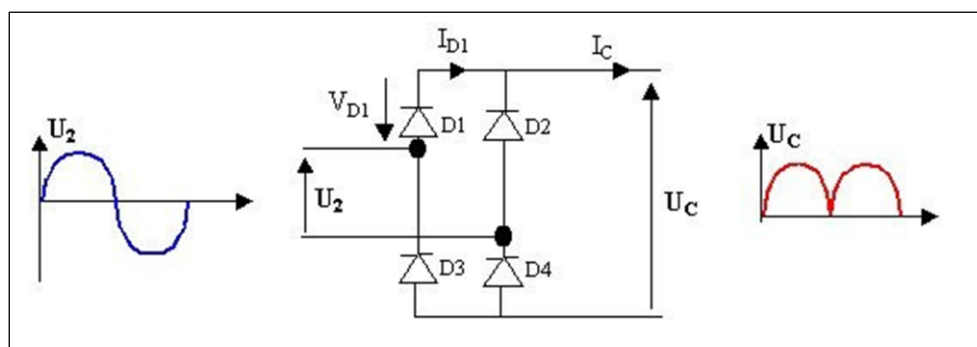


Figure 1.3 : Le redressement

**-Lors de l'alternance positive:** La tension  $U_2(t)$  est positive, les diodes  $D_1$  et  $D_4$  se mettent à conduire. Les diodes  $D_2$  et  $D_3$  sont bloquées car la tension à leurs bornes est négative.

- $D_1$  et  $D_4$  passantes;
- $D_2$  et  $D_3$  bloquées.

**-Lors de l'alternance négative:** La tension  $U_2(t)$  est négative, les diodes  $D_2$  et  $D_3$  se mettent à conduire. Les diodes  $D_1$  et  $D_4$  se bloquent car la tension à leurs bornes est négative.

- $D_2$  et  $D_3$  passantes;
- $D_1$  et  $D_4$  bloquées.

### c) Le filtrage

Après redressement, la tension de sortie aux bornes du pont redresseur est loin d'être continue. Le filtrage a pour but de transformer cette tension redressée en une tension

continue légèrement ondulée. L'élément utilisé pour réaliser cette fonction est le condensateur :

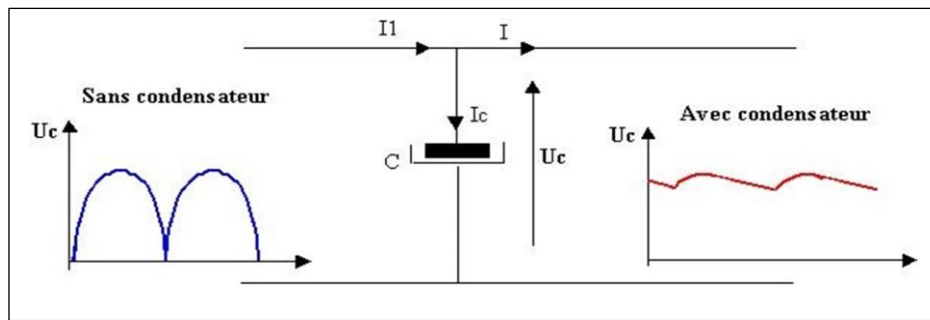


Figure 1.4 : Le Filtrage

#### d) La régulation

Malgré le filtrage, la tension aux bornes du condensateur n'est pas parfaitement continue, elle présente une légère ondulation. Pour obtenir une tension parfaitement continue, on utilise un régulateur de tension :

##### 🔧 Régulation à diode Zener (Voir Figure 1.5)

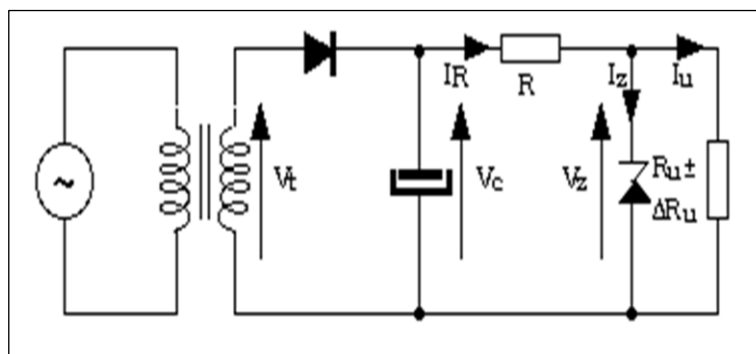


Figure 1.5 : Stabilisation par diode Zener

##### 🔧 Régulation à diode Zener et à transistor bipolaire (Voir Figure 1.6)

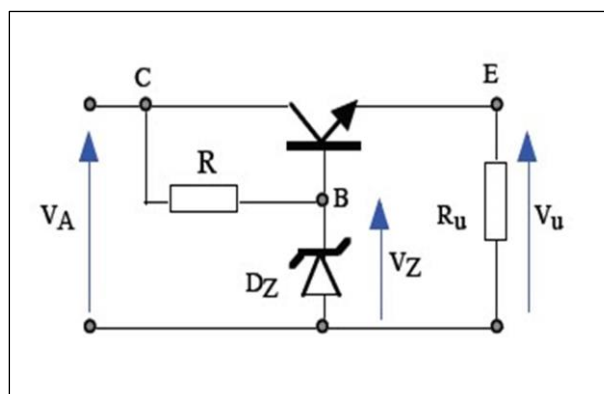


Figure 1.6 : Stabilisation par diode Zener et transistor bipolaire

### 🔌 Régulateur par circuit intégré (Voir Figure 1.7)

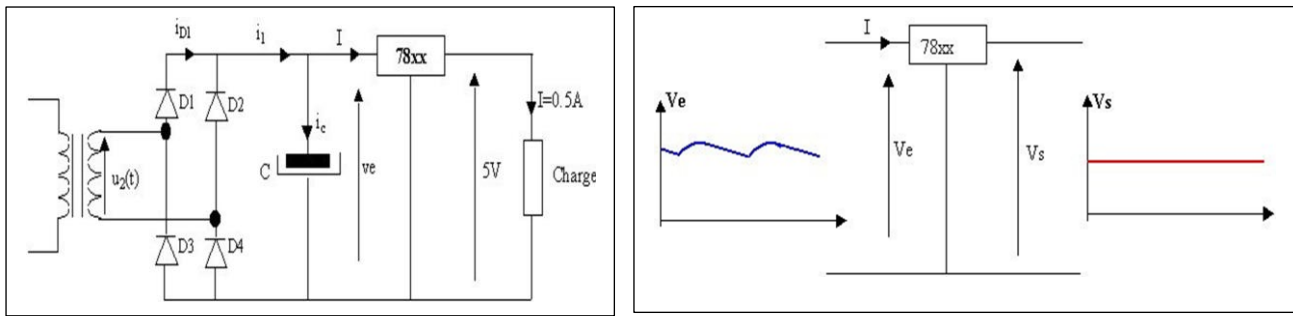


Figure 1.7 : Stabilisation par circuit intégré 78XX

#### Exemple :

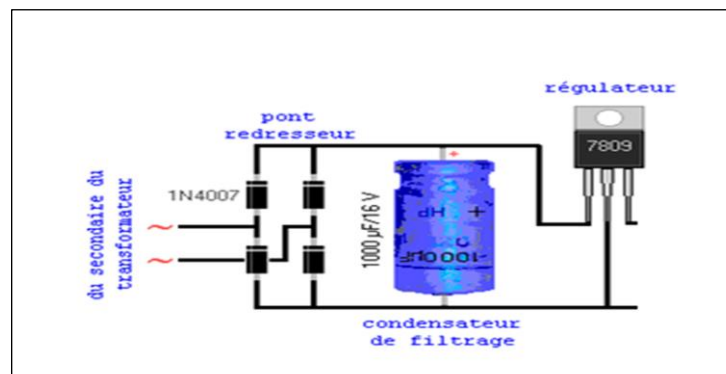


Figure 1.8 : Montage électronique de la régulation par circuit intégré 78XX

### 1.5. Alimentation variable

Alimentation variable ou variable power supply, fait référence à un bloc d'alimentation qui vous permet d'ajuster les niveaux de tension et de courant de sortie en fonction de vos besoins spécifiques. Ces alimentations sont couramment utilisées dans les laboratoires d'électroniques, les applications de test et de mesure, et dans diverses industries où des niveaux de tension et de courant personnalisés sont requis.

Elles sont utilisées pour alimenter une large gamme d'appareils et de circuits électroniques, tels que des moteurs, des LED, des capteurs, des microcontrôleurs et d'autres composants électroniques.

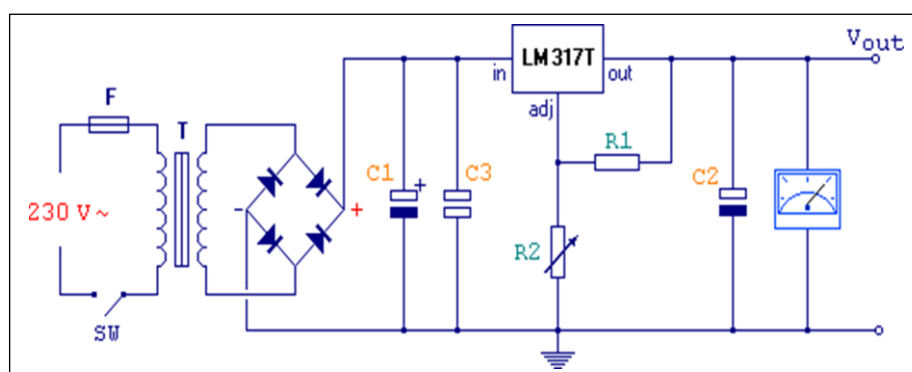


Figure 1.9 : Alimentation variable à circuit intégré LM317

### 1.6. Alimentation à courant continu

L'alimentation à courant continu (DC) est un système électronique qui fournit une tension continue et régulée à un circuit électronique ou un dispositif. Contrairement à l'alimentation à courant alternatif (AC), qui fournit une tension oscillante périodique, une alimentation à courant continu fournit une tension constante et stable. Utilisée dans les applications électroniques, telles que les ordinateurs, les équipements de communication, les équipements de test et de mesure, les équipements médicaux et les systèmes d'automatisation industriels.

Le cas le plus simple, un générateur de courant constant qui se construit avec un transistor PNP et une diode zener :

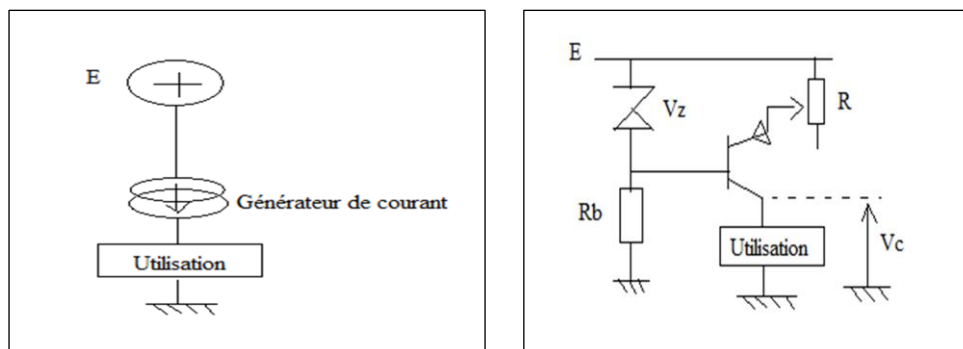


Figure 1.10 : Montages d'alimentation à courant continu

L'intensité de courant de sortie est fixe, alors que la tension de sortie varie automatiquement, selon la résistance de l'utilisation.

### 1.7. Alimentation symétrique

On sait que certains montages, notamment ceux qui comportent des amplificateurs opérationnels, nécessitent une alimentation dite symétrique, c'est-à-dire fournissant une tension positive et une tension négative par rapport à la masse (la référence 0 V). Si on regarde le schéma ci-dessous de la Figure 1.11, on constate qu'une alimentation de ce type n'est en réalité guère plus complexe qu'une alimentation simple :

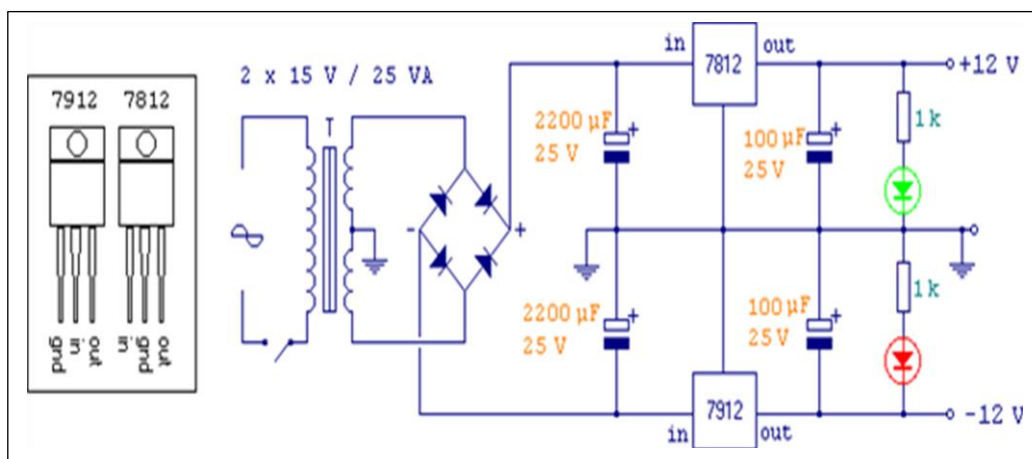


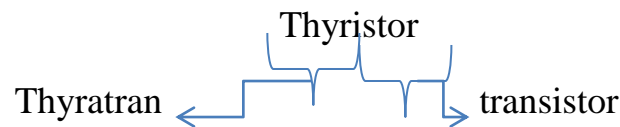
Figure 1.11 : Montage d'alimentation symétrique

Remarque :

- ✓ Le transformateur est à point milieu ;
- ✓ Présence de deux régulateurs, l'un pour la tension positive (le 7812) et l'autre pour la tension négative (le 7912).

## Chapitre 2 : Composants actifs de puissance

### 2.1. Les thyristors



Dit aussi, Redresseur au silicium à électrode de commande. Il travaille à des tensions de 500V à 7000V et des puissances de l'ordre du MW. C'est un élément semi-conducteur à structure PNPN. Les plus connus sont le SCR : Silicon Controlled Rectifier, et le GTO : Gate Turn Off.

#### 2.1.1. Structure

Il est composé de trois jonctions, la configuration apparaît à la Figure 2.1,

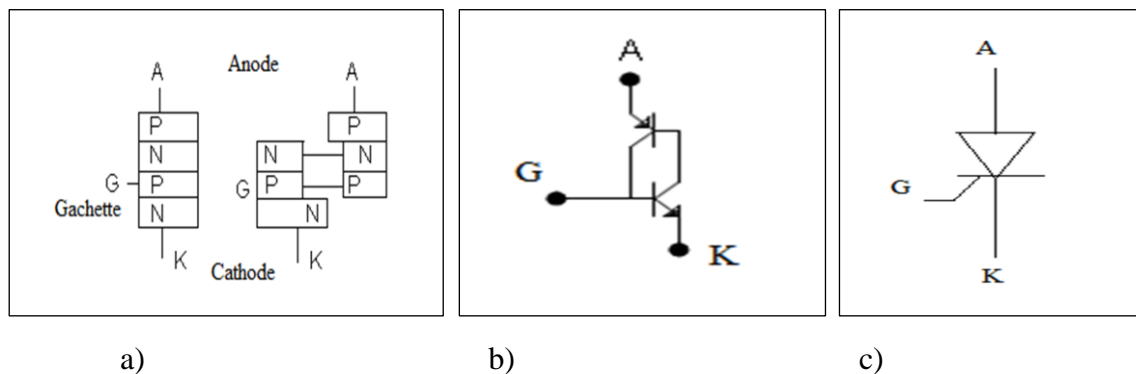


Figure 2.1 : (a) Structure technologique et (b), (c) Symbole électronique

-P : Couche moyennement dopée et moyennement épaisse=couche d'Anode ;

-N : Couche très épaisse et fortement dopée=couche de blocage ;

-P : Couche mince et moyennement dopée=couche de commande ;

-N : Couche très mince et faiblement dopée=couche de cathode.

Cette configuration de trois jonctions (a), donne deux transistors (b) et le symbole électronique est représenté sur (c).

#### 2.1.2. Principe de fonctionnement

Pour trouver le courant d'anode du SCR équivalent de la Figure 2.2, il suffit d'effectuer la somme des courants suivants:

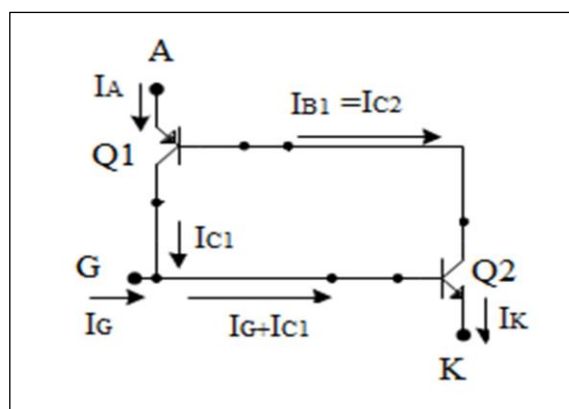
$$I_A = I_{C1} + I_{B1}$$

on note que :

$$I_{B1} = I_{C2}$$

$$I_{B2} = I_G + I_{C1}$$

Figure 2.2





Remarque :

- Le courant hypostatique  $I_H$ , c'est la valeur minimale du courant pour lequel, le thyristor devient amorcé ;
- Si, le courant  $I_{AK}$ , devient inférieur à  $I_H$ , le thyristor est désamorcé.
- Lorsqu'un SCR conduit, les principales caractéristiques à considérer sont le courant maximum  $I_T$ , le courant minimum ou courant de maintien (hypostatique)  $I_H$ .
- Pour un SCR bloqué, il faut tenir compte principalement de la tension maximale qu'il peut supporter en direct, c'est la tension de retournement ou « Breakover Voltage » :  $V_{Bo}$  et en inverse, c'est la tension d'avalanche  $U_{BR}(R)$ .

### 2.1.4. Le thyristor GTO

Le thyristor GTO : thyristor à blocage par gâchette (Gate Turn Off), présente une structure physique semblable à celle du thyristor SCR et son symbole électrique est tel que représenté sur la figure 2.3 ;

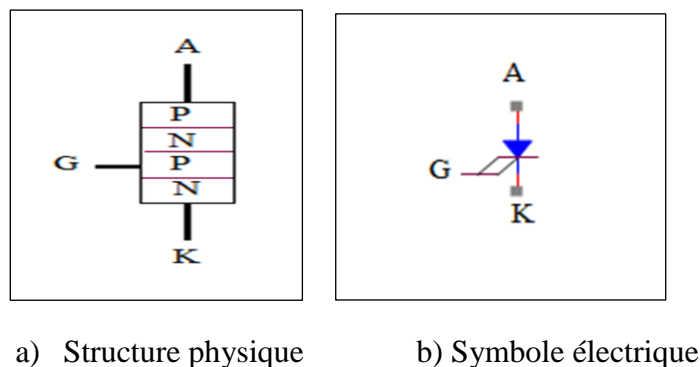


Figure 2.3 : Thyristor GTO

#### 2.1.4.1. Le principe de fonctionnement

Il a la particularité de réaliser les mêmes fonctions du thyristor SCR, mais il possède l'avantage de pouvoir être éteint par une impulsion de la gâchette ; Le blocage se fait par une impulsion négative à la gâchette.

### 2.1.5. Domaines d'utilisation

- ✚ Les thyristors SCR sont utilisés dans de nombreux domaines, notamment, dans les systèmes de conversion de l'énergie électrique, tels que les convertisseurs de puissance et les domaines de l'industrie, des télécommunications, des transports et de l'énergie renouvelables ;
- ✚ Systèmes d'éclairage, tels les gradateurs d'intensité pour les lumières, les lampes halogènes et les lampes à décharge.



- ✚ Dans les systèmes de contrôle de la puissance électronique, tels que les alimentations à découpage, les variateurs de vitesse pour les moteurs électriques et les contrôleurs de chauffage ;
- ✚ Automatisation industrielle, contrôle de la température, la régulation de la vitesse et le contrôle de la puissance ;
- ✚ Appareils ménagers, les fours à micro-ondes, les cuisinières, les lave-vaisselles et machines à laver.

## 2.2. Les Triacs

Un Triac (Triode for Alternating Current), est équivalent à deux thyristors montés en tête-bêche réalisé sur un seul cristal de silicium, pouvant être déclenché dans les deux directions de la polarité du courant alternatif.

### 2.2.1. Structure

Le TRIAC est un dispositif semi-conducteur à trois électrodes (anode 1, anode 2, gâchette) pouvant passer de l'état bloqué à l'état de conduction dans ses deux sens de polarisation. En d'autres termes, il s'agit d'un composant de la même famille que le thyristor, mais qui est Bidirectionnel (le thyristor étant unidirectionnel).

Thyristor1 : P1N1P2N2

Thyristor1 : P2N1P1N4

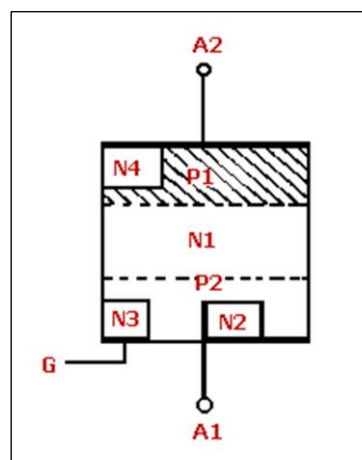
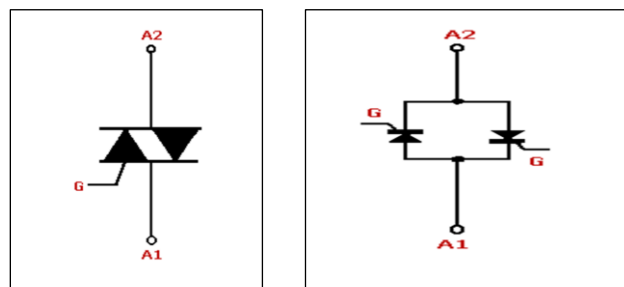


Figure 2.4 : Structure technologique du TRIAC

### 2.2.2. Symbole

Figure 2.5 : Symbole électrique



### 2.2.3. Principe de fonctionnement

Pour contrôler totalement un courant alternatif, il faut deux thyristors, l'un conduit pendant l'alternance positive et l'autre pendant l'alternance négative, ainsi le Triac peut remplir cette fonction.

Pour éteindre le Triac, il faut abaisser le courant en dessous de  $I_H$ .

### 2.2.4. Caractéristique

La caractéristique tension-courant est symétrique. Ce dispositif peut passer d'un état bloqué à un état conducteur dans les deux sens de polarisation (quadrant 1 et 3) et repasser à l'état bloqué par inversion de tension ou diminution du courant au-dessous de la valeur du courant de maintien  $I_H$ .

Parmi les caractéristiques importantes qu'il faut citer :  $V_{BO}$  = Tension maximale que peut supporter le composant en restant maintenu à l'état bloqué. Si cette tension est dépassée le Triac s'amorce.

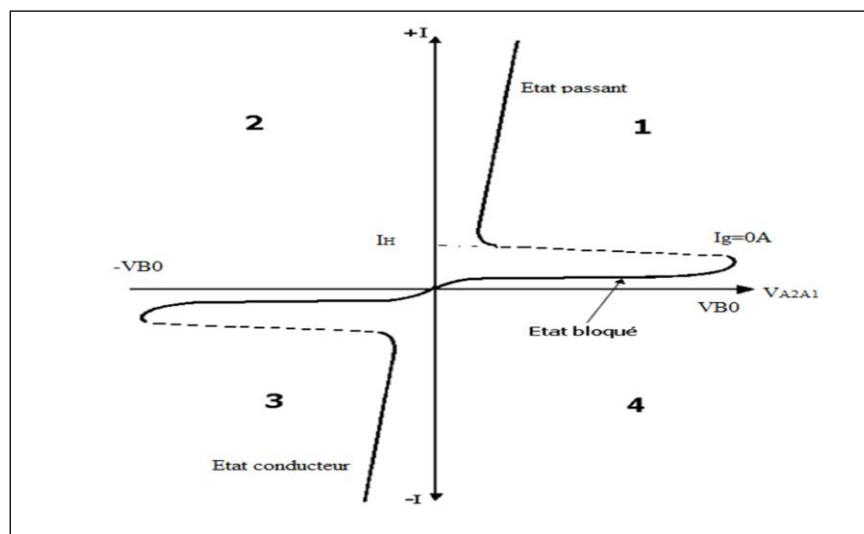


Figure 2.6 : Réseaux de caractéristique du TRIAC

### 2.2.5. Domaines d'applications

Le domaine d'application, est l'éclairage publique ou par exemple, les jeux de lumière.

## 2.3. Les Diacs

Le Diac (Diod Alternating Current), est assimilé à deux diodes Zener montées tête-bêche. Le Diac est un composant à semi-conducteurs, utilisé pour déclencher les Thyristors et les Triacs. C'est un élément symétrique, donc un composant bidirectionnel, devenant conducteur lorsque la tension dépasse un certain seuil (tension de retournement). Sa structure est très simple, puisqu'il s'agit d'une double diffusion d'impuretés de type opposé à celle du substrat (monocristal).

### 2.3.1. Symbole

Son symbole est comme suite :

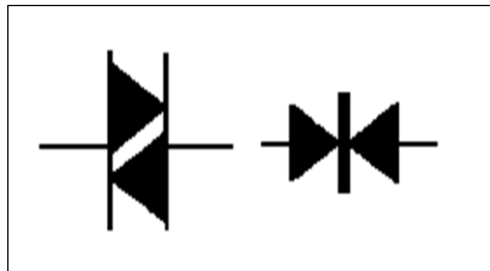


Figure 2.7: Symbole électrique

### 2.3.2. Circuit d'étude du Diac

Soit le montage de la Figure 2.8, le potentiel est réglé P à sa valeur maximale. La tension appliquée sur le Diac et lue sur le voltmètre V est très faible ; le courant mesuré par l'ampèremètre A est également très faible et correspond à un très léger courant de fuite. Manœuvrons P pour augmenter la valeur de la tension V.

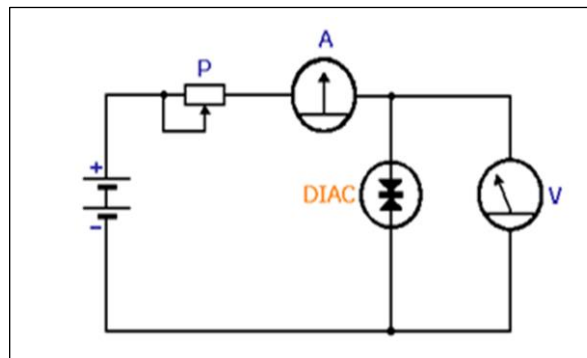


Figure 2.8 : Symbole électrique

Le courant augmente mais très légèrement ( $I_{BR} +$ ), puis brusquement, pour une certaine valeur de tension bien déterminée, le courant augmente de façon intense et la résistance dynamique du Diac devient dynamique. Cela signifie, que cette résistance tout en étant de valeur peu élevée, augmente en fonction du courant.

Si maintenant, dans une seconde expérience on inverse la polarité, on constate que le même phénomène se produit, mais de sens opposé. On obtient ainsi, une courbe pratiquement symétrique.

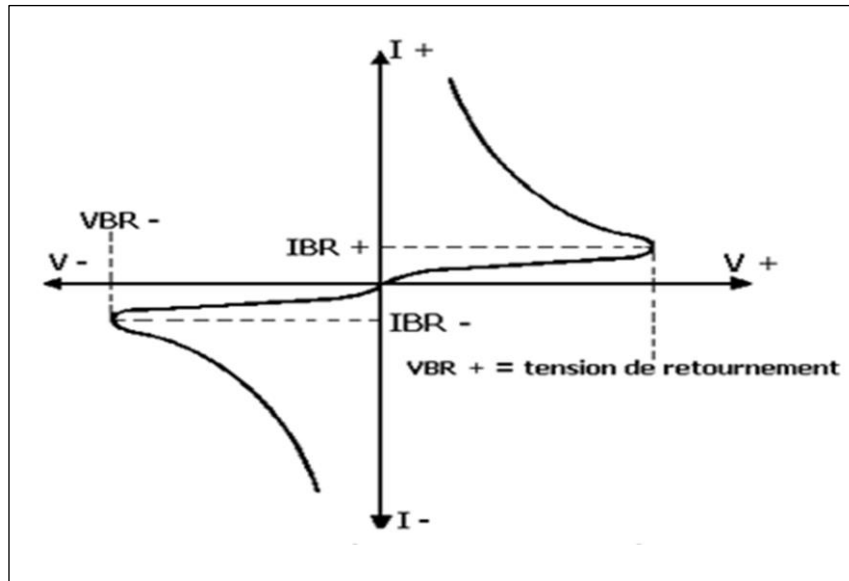


Figure 2.9 : Réseaux de caractéristiques du Diac

Remarque :

1°/ Le Diac n'est pas un redresseur ;

2°/ Il n'est pas possible d'avoir entre ses bornes une tension supérieure à  $V_{BR+}$  et  $V_{BR-}$ , sans risque de destruction du composant.

### 2.3.3-Domains d'applications du Diac

Le Diac est utilisé en association avec le Triac, pour la commande de ce dernier. On peut par exemple réaliser un gradateur de lumière. Dans ce type de montage le thyristor convient mal, car étant donné qu'il ne conduit que dans un seul sens, un scintillement de l'ampoule est perceptible, surtout aux faibles intensités lumineuses.

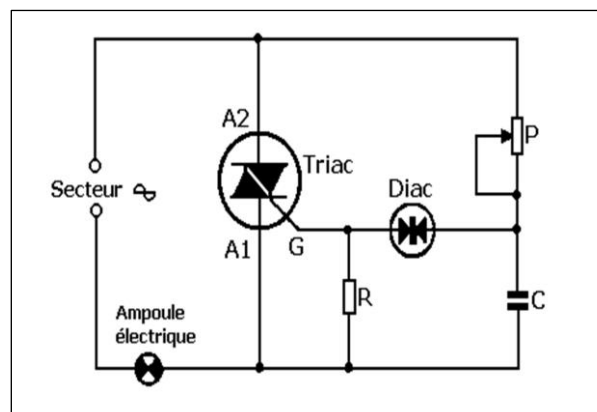


Figure 2.10: Gradateur de lumière

## 2.4. Le transistor à jonction " UJT "

Le transistor unijonction est un dispositif semi-conducteur à trois électrodes et à une seule jonction. Appelé aussi « diodes à deux bases », il est composé d'un barreau de silicium de type N faiblement dopé, dont les deux extrémités portent des contacts ohmiques, appelées bases ( $B_1$  et  $B_2$ ).

### 2.4.1. Structure et symbole

Une jonction PN est réalisée près de la base  $B_2$ , la région P forme l'émetteur (E) du transistor unijonction.

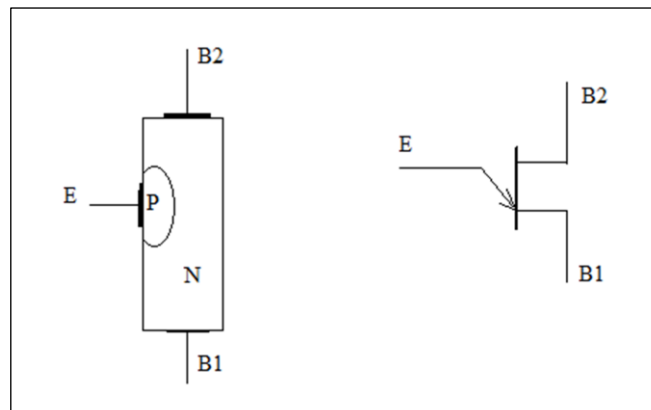


Figure 2.11: Transistor Unijonction, structure et symbole

### 2.4.2. Principe de fonctionnement

Pour analyser le fonctionnement du « UJT », soit le circuit du montage suivant ainsi que le schéma équivalent du transistor :

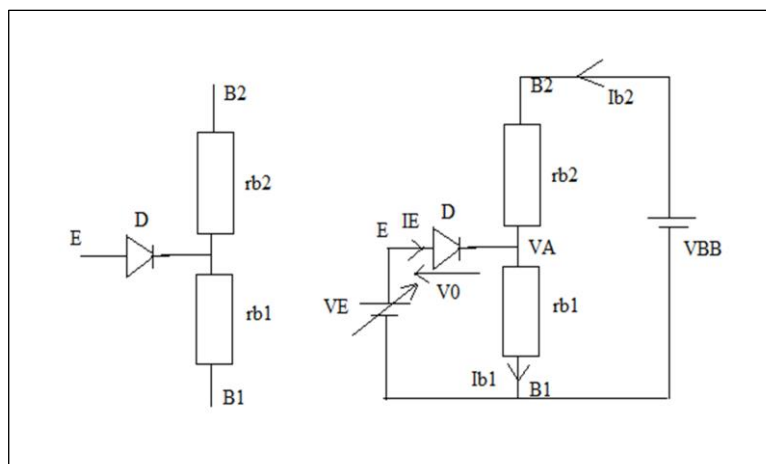


Figure 2.12: Schéma équivalent et montage

$$r_{bb} = r_{b1} + r_{b2}$$

$$\eta = \frac{r_{b1}}{r_{b1} + r_{b2}} \text{ appelé rapport intrinsèque du transistor}$$

$$V_A = \frac{r_{b1}}{r_{b1} + r_{b2}} \cdot V_{BB}$$

$30k\Omega < r_{bb} < 10k\Omega$ ,  $r_{bb}$  : résistance inter-base

Pour  $V_E < V_A + V_0$ , jonction Emetteur-base bloquée (ou polarisée en inverse par  $V_{BB}$ ), faible

courant de fuite :  $I_{b0} = I_{b1} = I_{b2} = \frac{V_{BB}}{r_{b1} + r_{b2}}$

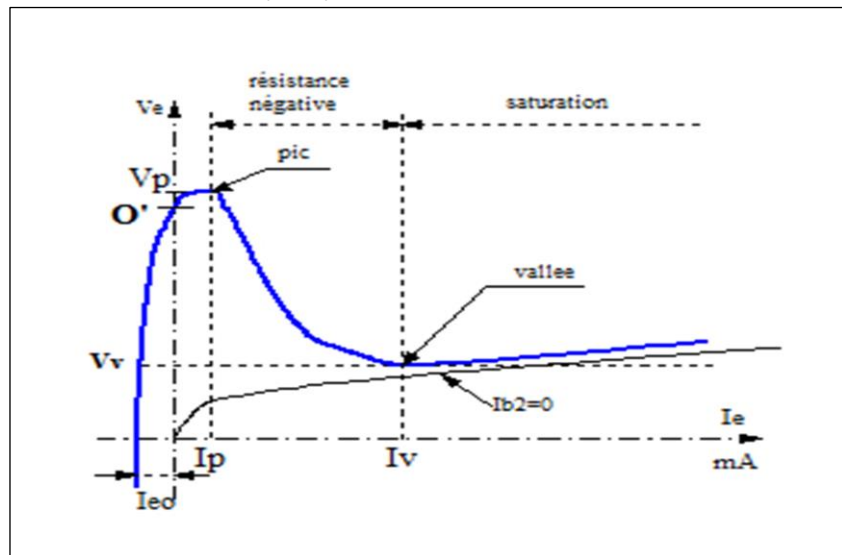


Figure 2.13: Caractéristique de l'UJT

$V_E$ , augmente progressivement, la jonction est toujours polarisée en inverse jusqu'à ce que :  $V_E > V_A + V_0$ , la jonction devient passante et laisse passer le courant, on dit que l' « UJT » entre en conduction. L'émetteur injecte des porteurs positifs (trous) dans la région N. Il se produit alors un effet de résistance négative,  $I_E$  croît très rapidement  $I_v$  et la tension  $V_{Eb1}$  diminue jusqu'à  $V_{vallée}$  (zone de résistance dynamique négative) :

$$V_p = \eta \cdot V_{BB} + V_0$$

### 2.4.3. Domaines d'applications

Les transistors unijonction (UJT) sont largement utilisés dans les circuits électroniques analogiques et de commande. Voici quelques domaines d'utilisation :

- ✚ Oscillateurs, souvent utilisés dans la conception des oscillateurs de relaxation, qui produisent des signaux carrés ou d'impulsion en fonction de la résistance et de la capacité du circuit ;
- ✚ Contrôle de puissance, utilisés comme dispositifs de déclenchement pour les Thyristors et les Triacs, permettant de contrôler la quantité de courant qui passe à travers un circuit de puissance ;
- ✚ Générateurs d'impulsions, générer des impulsions de synchronisation dans les circuits de contrôle et les circuits de temporisation.

## 2.5. Le transistor à effet de champ " FET "

Le principe de fonctionnement d'un transistor à effet de champs est qu'un courant circulant dans une couche mince de semi-conducteur varie sous l'action d'un champ électrique perpendiculaire à la couche semi-conductrice. Ces transistors ne font intervenir qu'un seul type de charges, parfois, on parle de transistor Unipolaire.

### 2.5.1. Structure et symbole

Les transistors à effet de champ ou transistors FET. Ils fonctionnent de la même manière que les transistors bipolaires, ils peuvent servir d'interrupteurs ou d'amplificateurs. La classification des transistors FET est assez complexe, avec de nombreux sous-types assez précis. Dans les grandes lignes, il en existe deux types principaux, appelés transistors JFET (transistor à jonction à effet de champ) et IGFET (transistor à effet de champ à grille isolée).

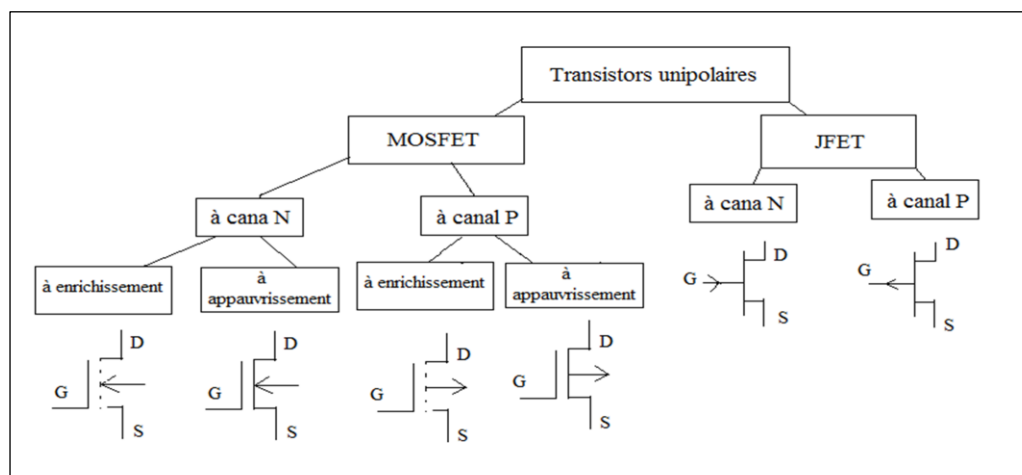


Figure 2.14: Symboles électriques

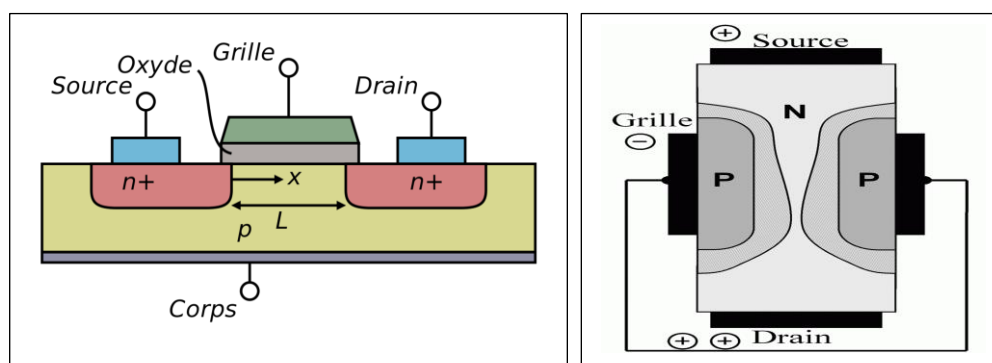


Figure 2.15: Structure technologiques, (a) MOSFET et (b) JFET

### 2.5.2. Réseaux de caractéristiques

Pour le JFET, le courant drain-source est modulé par la tension sur la grille. Cela nous donne une première différence avec le transistor bipolaire : l'équivalent du "courant de collecteur" est commandé par la tension et non le courant de base.

Pour le MOSFET, en appauvrissement, si  $V_{GS}$  est nulle alors le courant  $I_{DS}$  est non nul. Par contre si  $V_{GS}$  est négative, cette tension repousse les électrons, il se forme au voisinage une zone appauvrie en porteurs, le canal s'appauvrit alors le MOSFET est à appauvrissement.

A enrichissement, si  $V_{GS}$  est non nulle alors le canal est bloqué (dépourvu de charges entre source et drain). Si  $V_{GS}$  est positive, le canal se forme (pour un MOSFET canal N), les électrons sont attirés du substrat), et près de la grille se forme une densité d'électrons libres, d'où un courant  $I_{DS}$ .

Il ne faut pas oublier que la grille isolée forme une capacité avec le substrat et que la couche d'isolant ( $\text{SiO}_2$ ) est très mince.

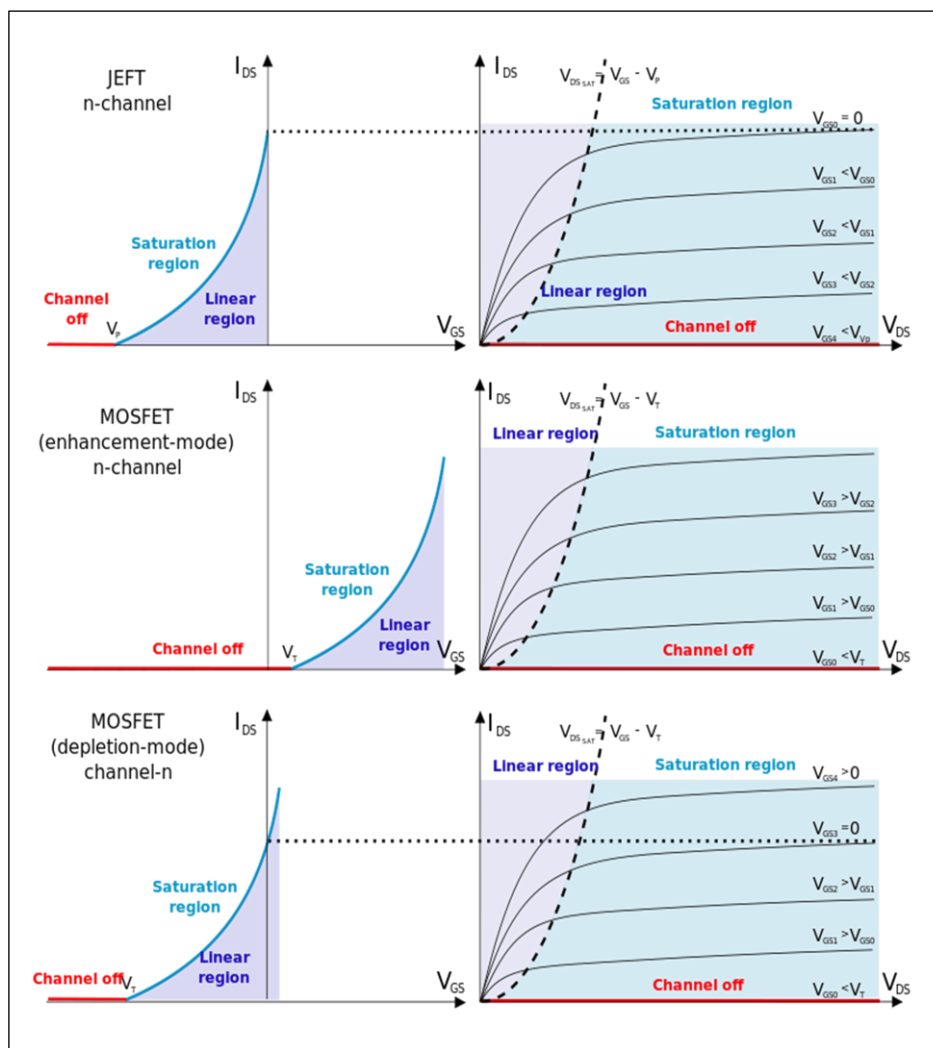


Figure 2.16: Réseaux de caractéristiques du JFET et du MOSFET



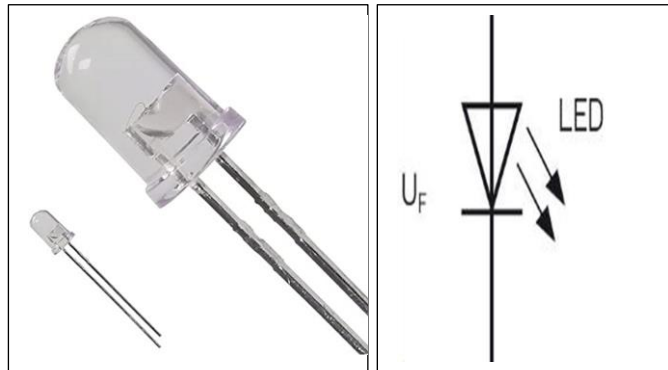
## Chapitre 3 : Composants optoélectroniques

### 3.1. Les diodes Electroluminescentes

Une diode électroluminescente LED (Light Emitting Diode), est une diode semi-conductrice qui produit un rayonnement visible par émission spontanée lorsqu'elle est traversée par un courant électrique.

#### 3.1.1. Symbole

Le symbole utilisé est le même pour toutes les diodes émettrices.



#### 3.1.2. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement est basé sur l'émission de photons par des électrons qui se recombinent avec des trous dans une jonction PN (jonction entre une zone de type P et une zone de type N) dans le semi-conducteur. Lorsque les électrons passent d'un niveau d'énergie plus élevé à un niveau d'énergie plus faible, ils libèrent de l'énergie sous forme de photons de lumière visible ou infrarouge.

##### a) Emission de la lumière

L'énergie émise lors du passage d'un électron d'un niveau d'énergie supérieur à un niveau d'énergie inférieur peut être émise sous forme d'un photon :

$$h\nu = E_2 - E_1 = E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}}$$

On qualifie ce passage de « Transition radiative ».

##### b) Injection des porteurs

Pour obtenir des radiations (des recombinaisons radiatives), il faut amener des électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence. Il suffit de polariser la jonction PN, qui permet d'injecter des porteurs (électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence).

##### c) Rendement quantique

Donc, l'efficacité globale de la production de photons est caractérisée par le rendement externe (souvent dit quantique):

$$\eta_s = \frac{n_p}{n_e} = \frac{\text{nombre de photons sortant}}{\text{nombre de porteurs injectés}}$$

Le rendement externe permet d'exprimer, la relation entre le flux énergétique émis  $\phi$ , et le courant  $i$  ; En effet, pendant une durée  $\Delta t$ , le courant correspond au passage de  $n_e$  électrons de charge élémentaire  $q$  :

$$i = \frac{n_e \cdot q}{\Delta t}, \text{ et le flux énergétique émis pendant une durée } \Delta t \text{ est : } \phi = \frac{n_p}{\Delta t} \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

En combinant ces deux équations, on obtient le rendement quantique ou rendement externe :

$$\eta_e = \frac{\phi}{i} \cdot \frac{q \cdot \lambda}{h \cdot c}$$

### 3.1.3. Propriétés technologiques

Les LEDs ont plusieurs propriétés technologiques qui déterminent leur performance dans différentes applications. Parmi lesquelles :

- ✚ Efficacité lumineuse, qui est définie comme une quantité de lumière produite par unité de puissance électrique consommée.
- ✚ Intensité lumineuse, est la quantité de lumière émise dans une direction donnée.
- ✚ Couleur de lumière, elles sont disponibles dans une large gamme de couleurs, allant du rouge, du vert et du bleu ou blanc chaud et froid. Les couleurs sont déterminés par les matériaux semi-conducteurs utilisés dans la fabrication des LEDs.
- ✚ Durée de vie, les LEDs ont une durée de vie très longue, généralement plusieurs dizaines de milliers d'heures. Cela les rend idéales pour les applications où la maintenance est difficile ou coûteuse.
- ✚ Temps de réponse, elles peuvent s'allumer et s'éteindre très rapidement, ce qui les rend idéales pour les applications où une réponse rapide est nécessaire comme les applications de communication optique.
- ✚ Température de fonctionnement, elles sont sensibles à la température, ce qui peut affecter leur performance et leur durée de vie.

### 3.1.4. Codification et valeurs typiques

Les LEDs sont souvent codées en utilisant des spécifications électriques et optiques clés pour aider à sélectionner la LED appropriée pour une application donnée. Par exemple :

- ✚ Tension directe, c'est la tension nécessaire pour allumer la LED et est généralement mesurée en volts (V). Les valeurs typiques varient en fonction de la couleur de la LED et peuvent aller de 1.8 V (LEDs rouges) à 4 V pour les LEDs blanches.
- ✚ Courant direct, c'est le courant nécessaire pour allumer la LED et est généralement mesurée en milliampères (mA). Les valeurs typiques varient en fonction de la couleur de la LED et peuvent aller de 10 mA (LEDs rouges) à 100 mA pour les LEDs hautes puissance.

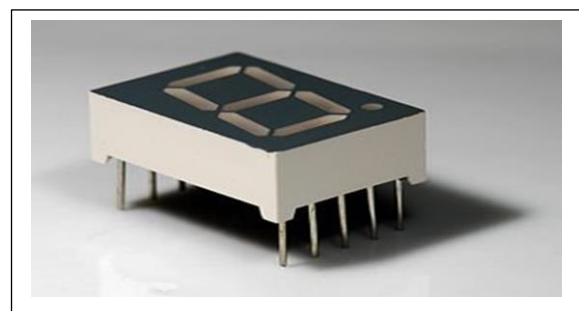
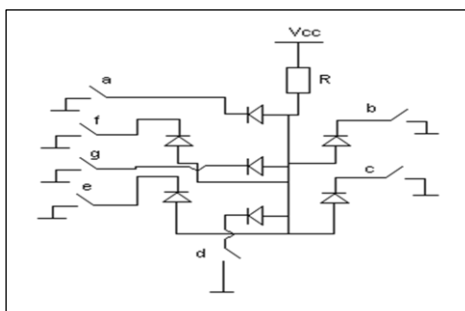
- ✚ Intensité lumineuse, c'est la quantité lumineuse est généralement mesurée en candelas (mcd). Les valeurs typiques varient en fonction de la taille et de la puissance de la LED allant de 1 mcd pour les petites LEDs dites de signalisation à plusieurs milliers de mcd pour les LEDs haute puissance.
- ✚ Angle de vision, sous laquelle la LED émet de la lumière est généralement mesurée en degré ( $^{\circ}$ ). Allant de  $15^{\circ}$  pour les LEDs haute puissance à  $120^{\circ}$  pour les petites LEDs de signalisation.

Il est important de noter que ces valeurs sont des exemples de valeurs typiques et peuvent varier en fonction du fabricant et du modèle de la LED ; La consultation des fiches techniques du fabricant permet l'obtention des spécifications précises d'une certaine LED.

### 3.1.5. Domaines d'applications

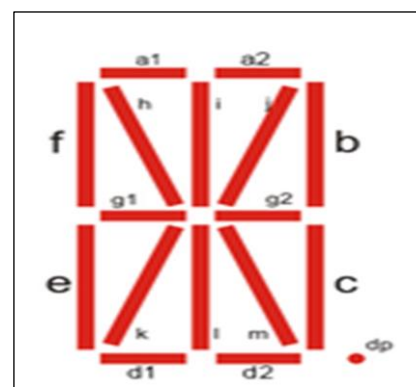
Les LEDs sont utilisées dans une grande variété d'applications d'éclairage et d'affichage, ainsi que dans les télécommunications, les capteurs optiques et de nombreuses autres applications.

#### a) Afficheurs 7 segments



Les interrupteurs a, b, c, d, e, f, g représentent les signaux pilotant chaque segments

#### b) Afficheurs 16 segments



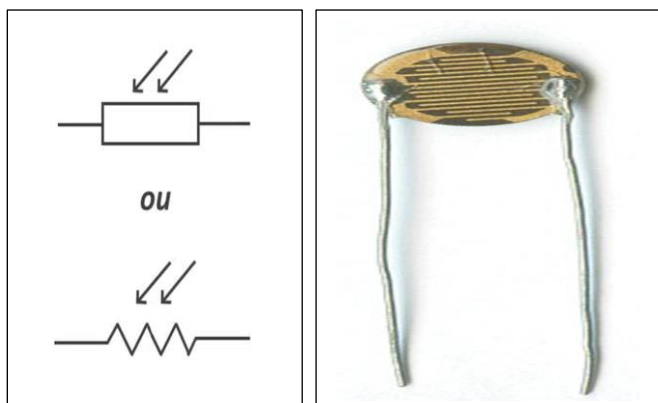
Un affichage à seize segments est une technique d'affichage basée sur seize segments qui peuvent être activés ou désactivés en fonction du motif graphique à produire.

### 3.2. Cellule photorésistante

Une photorésistance est un dipôle à semi-conducteur, dont la valeur de la résistance varie lorsqu'il est exposé à la lumière dans une certaine gamme de longueur d'onde. Appelée aussi :

LDR=light dependent resistor (résistance qui dépend de la lumière). Sa valeur dépend de l'éclairement.

### 3.2.1. Symbole



### 3.2.2. Principe de fonctionnement

En présence de la lumière, l'énergie des photons incidents libèrent des paires électrons-trous, ce qui a pour effet de diminuer la résistance du semi-conducteur proportionnelle à l'éclairement.

### 3.2.3. Propriétés technologiques

- ✚ Matériaux, les photorésistances sont fabriquées à partir de différents matériaux, tels que le sulfure de cadmium, le sélénium, le tellure de cadmium et le dioxyde de titane ; ces derniers sont différents en termes de sensibilité, de plage de longueur d'onde et de vitesse de réponse.
- ✚ Sensibilité, elle détermine la plage de lumière à laquelle elle peut réagir ; soit aux rayons UV, à la lumière visible ou l'infrarouge.
- ✚ Plage de longueur d'onde, courtes longueurs d'ondes : UV, longueurs d'onde plus longues : Infrarouge.
- ✚ Vitesse de réponse, quelques millisecondes à plusieurs secondes.
- ✚ Résistance dans l'obscurité, quelques Ohms à plusieurs mégohms.

### 3.2.4. Codification et valeurs typiques

Voici quelques valeurs typiques et leurs code de couleurs associés ;

- ✚ Dans l'obscurité, de quelques Ohms à plusieurs mégohms.
- ✚ Sous lumière, dépend de la plage de longueur d'onde pour laquelle la photorésistance est conçue.
- ✚ Codification, en utilisant un code de couleur, similaire à celui utilisé pour les résistances fixes, exemples : 1 k $\Omega$ =Marron, noir, rouge, or  
10 k $\Omega$ = Marron, noir, orange, or.

En résumé, les valeurs des résistances de la photorésistance dépendent de la plage de longueur d'onde pour laquelle elle est conçue.

### 3.2.5. Domaines d'applications

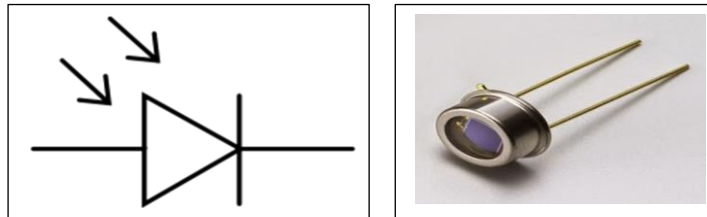
La principale utilisation de la photorésistance est la mesure de l'intensité lumineuse comme détecteurs de lumière, les systèmes de mesure de lumière, les capteurs de mouvement et les cellules photovoltaïques.

En résumé, les photorésistances sont largement utilisées dans divers domaines pour détecter, mesurer et contrôler l'intensité de la lumière.

### 3.3. La photodiode

Une diode à jonction qui produit un courant en fonction de l'éclairement reçu.

#### 3.3.1. Symbole



#### 3.3.2. Principe de fonctionnement

La photodiode est constituée d'une jonction PN, soit de silicium ou de Germanium.

##### a) En absence de lumière : Obscurité

La photodiode se comporte comme une diode normale polarisée en inverse, seul un faible courant inverse (courant de fuite) circule dans le circuit.

Ce courant est appelé, courant d'obscurité  $I_N$ , tel que :

$$I_N = I_S \cdot (1 - \exp(\frac{-V}{V_T}))$$

$V$  : Tension inverse appliquée à la diode,

$I_S$  : Courant inverse (courant de saturation),

$V_T$  : Tension thermique :  $V_T = \frac{k.T}{q}$ , à  $T=300^\circ\text{K}$   $V_T=25\text{mV}$  ou  $26\text{ mV}$

##### b) Sous lumière : Eclairement

Les photons incidents absorbés créent des paires électrons-trous, d'où on a création d'un photocourant tel que :

$$I_T = I_{ph} + I_N$$

Pour avoir un photo-courant il faut que l'énergie du photon soit supérieure ou égale à l'énergie de gap :

$h\nu \geq E_g \Rightarrow h \cdot \frac{c}{\lambda} \geq E_g \Rightarrow \lambda \leq \frac{h \cdot c}{E_g}$ , relation liant la longueur d'onde à la hauteur de la bande interdite dans une photodiode.

### 3.3.3. Propriétés technologiques

Les photodiodes sont des dispositifs optoélectroniques qui convertissent la lumière en courant électrique ; les propriétés technologiques les plus importants sont :

- ✚ Spectre de réponse, c'est la plage de longueur d'onde pour laquelle une photodiode est sensible.
- ✚ Courant inverse, courant circulant dans la photodiode lors de sa polarisation en inverse.
- ✚ Temps de réponse, les photodiodes peuvent avoir des temps très courts de l'ordre de quelques nanosecondes ou des temps lents de l'ordre de microsecondes.
- ✚ Sensibilité.
- ✚ Boîtier, moyen de protection de la photodiode et faciliter son intégration dans un système spécifique.

### 3.3.4. Codification et valeurs typiques

Les valeurs typiques des photodiodes varient considérablement en fonction de leur taille, de leur spectre de réponse, de leur sensibilité, de leur temps de réponse et de leur type de boîtier.

Par exemple, une photodiode de 5 mm peut avoir une sensibilité de 0.5 A/W, un temps de réponse de 20 ns et un boîtier en plastique.

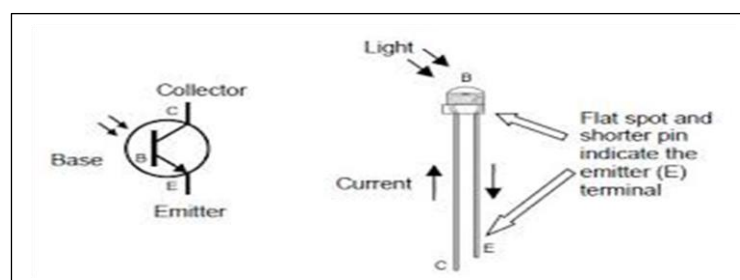
### 3.3.5. Domaines d'applications

Très utilisées dans de nombreux domaines, parmi lesquels, la communication optique, les capteurs, l'imagerie, la spectroscopie, détecteurs de gaz, automatisation industrielle où elles sont utilisées dans les systèmes de contrôle de la qualité et de mesure de précision dans l'automatisation industrielle.

## 3.4. Le phototransistor

C'est un transistor dont la base peut être éclairée. En général il est en silicium et de type NPN.

### 3.4.1. Symbole



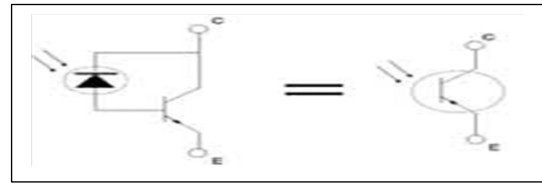
### 3.4.2. Principe de fonctionnement

Les radiations lumineuses sont concentrées sur la jonction base-collecteur.

$$I_T = I_{ph} + I_N$$

Courant dans une photodiode,

$$I_T = I_B$$



La circulation des électrons dans le collecteur (des électrons provenant de l'émetteur + électrons produit par l'effet photoélectrique), constituent le courant électronique du phototransistor,

$$I_E = I_c + I_B = \beta \cdot I_B + I_B = (\beta + 1) \cdot I_B = (\beta + 1) \cdot (I_{ph} + I_N)$$

### 3.4.3. Propriétés technologiques

- ✚ Sensibilité, très sensible à la lumière, arrive à détecter des niveaux de lumière très faibles.
- ✚ Vitesse de réponse, très rapide par à d'autres composants optiques, d'où détection rapide des changements de luminosité.
- ✚ Gain élevé, signal de sortie très amplifié.
- ✚ Faible bruit, ayant un faible bruit de fond, il peut détecter des signaux optiques faibles avec une grande précision.
- ✚ Stabilité à long terme, généralement très stable, peut fonctionner de nombreuses années sans nécessiter une maintenance.
- ✚ Petit format, de petite taille il est facile de l'intégrer dans les dispositifs électroniques.

### 3.4.4. Codification et valeurs typiques

Les phototransistors sont généralement codifiés selon leur boîtier, leur type de montage et leur plage de longueur d'onde de réponse. Exemples :

- ✚ Boîtier, TO-18 : boîtier en métal cylindrique ; TO-92 : boîtier en plastique en forme de transistor.
- ✚ Montage : NPN, transistor à jonction bipolaire ; Darlington, deux transistors NPN connectés en cascade ; PNP transistor à jonction bipolaire.
- ✚ Réponse aux UV, Visible, IR

Les valeurs typiques dépendent de leur conception et de leur application spécifique :

- ✚ Sensibilité : 0.1 à 1000 Ma/lm
- ✚ Gain : de 100 à 1000
- ✚ Vitesse de réponse : qlq microsecondes à plusieurs millisecondes
- ✚ Tension de seuil : de 0.5 à 2 V
- ✚ Courant de collecteur maximum : de 50 à 200 mA.

Ces valeurs peuvent varier en fonction du fabricant et de la conception du phototransistor.

### 3.4.5. Domaines d'applications

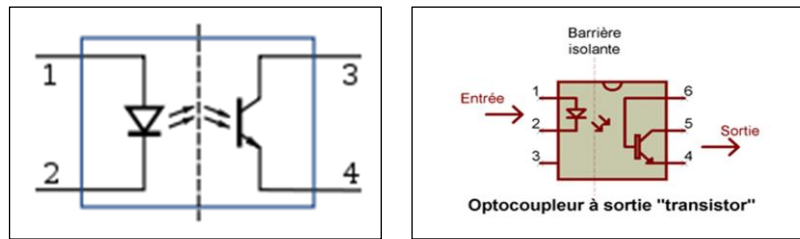
Le phototransistor, est un composant électronique polyvalent qui est utilisé dans de nombreux domaines pour la détection de lumière, la communication optique, l'imagerie, l'automatisation industrielle et le contrôle de l'éclairage.

### 3.5. L'opto-coupleur

Opto-coupleur ou photo-coupleur, est un composant ou un ensemble de composants qui permet le transfert d'informations entre deux parties électroniques isolées l'une de l'autre d'un point de vue électrique. La première partie est un émetteur, et la seconde partie est un récepteur. On peut l'assimiler à un composant qui a une entrée (émetteur) et une sortie (récepteur). On en rencontre l'association d'une diode « LED » et un transistor photosensible (diode + phototransistor). Le grand intérêt d'un photo-coupleur est d'assurer une isolation entre deux circuits électriques (isolation-galvanique).

Les deux composants sont couplés optiquement, mais sont électriquement isolés.

#### 3.4.1. Symbole



#### 3.4.2. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement est basé sur l'utilisation d'une LED et d'un phototransistor ou photodiode. La LED est montée dans un boîtier opaque qui empêche la lumière de se propager en dehors du boîtier, sauf à travers une petite fenêtre transparente. Lorsqu'un courant électrique est appliqué à la diode, celle-ci émet une lumière qui est transmise à travers la fenêtre. Cette lumière est ensuite détectée par le phototransistor ou la photodiode, qui se trouve dans un circuit électrique séparé.

Le phototransistor ou la photodiode convertit la lumière en un signal électrique qui peut être amplifié et traité par le circuit électrique de sortie.

#### 3.4.3. Propriétés technologiques

- ✚ Isolation électrique.
- ✚ Tension de tenue, c'est la tension maximale admissible sans subir de dommage.
- ✚ Courant de collecteur, c'est le courant maximal admissible par le phototransistor.
- ✚ Vitesse de commutation, c'est la vitesse à laquelle le signal est transmis entre les deux circuits. Cette valeur est importante pour les applications où il y a des signaux à haute fréquence.
- ✚ Sensibilité optique, c'est le taux de lumière nécessaire pour déclencher le phototransistor.



### 3.4.4. Codification et valeurs typiques

Les optocoupleurs sont généralement codifiés en fonction de leurs caractéristiques électriques, il est important de consulter les fiches techniques du fabricant pour connaître les valeurs typiques spécifiques à chaque optocoupleur destiné à une application donnée, par exemple :

- ✚ PC 817, ce code indique un optocoupleur ayant une tension de tenue de 80 V et un courant collecteur maximal de 50 mA.
- ✚ MOC3021, c'est un optocoupleur à sortie TRIAC ayant une tension de tenue de 400 V et une vitesse de commutation de 1.6  $\mu$ s.
- ✚ H11AA1, c'est un optocoupleur à sortie Darlington ayant une tension de tenue de 350 V et un courant collecteur maximal de 500 mA.

### 3.4.5. Domaines d'applications

Les optocoupleurs sont souvent utilisés dans des applications où il est important d'isoler électriquement deux circuits électriques, par exemple pour éviter les interférences électromagnétiques ou pour protéger des composants sensibles contre des surtensions ou des courants élevés. Ils peuvent également être utilisés pour transmettre des signaux entre des circuits fonctionnant à des tensions différentes.

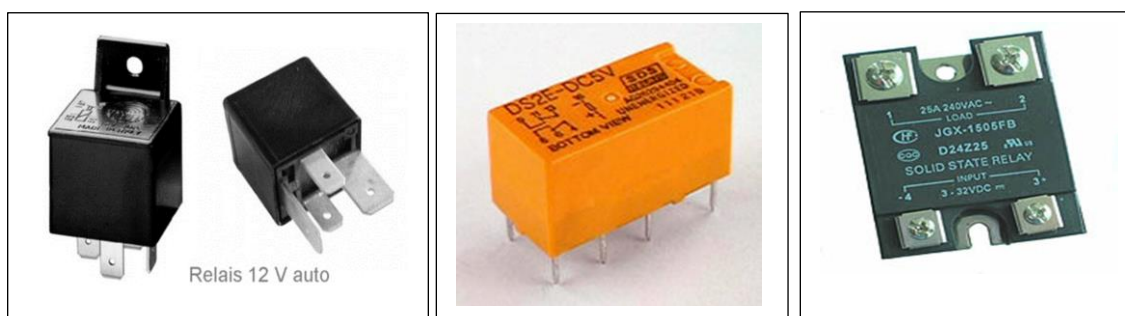
- ✚ Sécurité, assurer la sécurité des opérateurs et des équipements, en isolant les circuits de commande des circuits de puissances dans les systèmes de commande de portes, les systèmes de contrôle d'accès.
- ✚ Communication, communication des interférences électromagnétiques, tels que, RS-232, RS-422 et RS-485.
- ✚ Commande de puissance, dans les convertisseurs de puissance, les onduleurs et les variateurs de fréquence.
- ✚ Commande d'un relais.
- ✚ Contrôle de moteur, contrôler la vitesse et la direction des moteurs, en isolant le circuit de commande du circuit de puissance du moteur.

En résumé, en raison de leur isolation électrique, les optocoupleurs sont largement utilisés dans les applications nécessitant une séparation de haute qualité entre les circuits électriques.

## Chapitre 4 : Autres composants et accessoires spécifiques

### 4.1. Les relais

Un relais est un appareil dans lequel un phénomène électrique (courant ou tension) contrôle la commutation On/Off d'un élément mécanique (on se trouve alors en présence d'un relais électromécanique) ou d'un élément électronique (on a alors affaire à un relais statique). C'est en quelque sorte un interrupteur que l'on peut actionner à distance, et où la fonction de coupure est dissociée de la fonction de commande. La tension et le courant de commande (partie "Commande"), ainsi que le pouvoir de commutation (partie "Puissance") dépendent du relais, il faut choisir ces paramètres en fonction de l'application désirée. Ainsi, il faut choisir des relais différents selon qu'il faut commuter des signaux audio ou des tensions ou courants importants.



Le relais n'est rien d'autre qu'un interrupteur. Ce qui le différencie d'un interrupteur classique, c'est qu'il est commandé. Au lieu de s'enclencher par la pression du doigt, il va fermer le circuit sur ordre d'un autre appareil ou interrupteur. Ces appareils étant eux-mêmes des interrupteurs. Il y a deux types de relais : les relais électromécaniques et les relais statiques.

### 4.2. Relais électromécaniques

D'après la représentation schématisque d'un relais de base (ci-dessous), les autres étant que des variantes ; Le relais est en fait composé de deux parties bien distinctes.

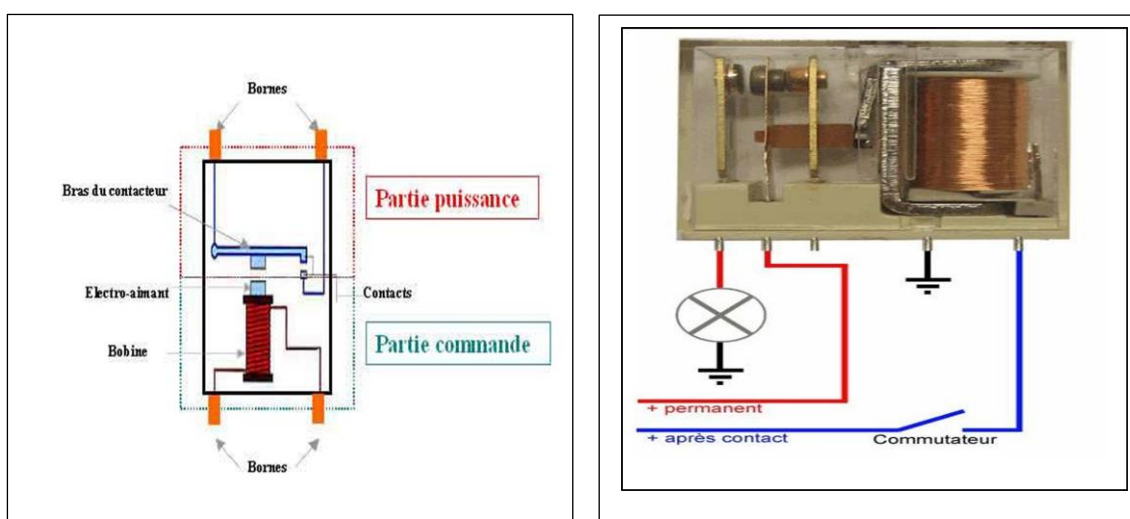


Figure 4.1 : Relais électromécanique

### 4.3. Principe de fonctionnement

#### 4.3.1. La partie puissance

C'est elle qui fait office d'interrupteur, et c'est elle qui va alimenter l'appareil qui sera branché en sortie, (Moteur de ventilation, lumières, pompe à essence....). Elle fournit la puissance électrique, d'où son nom. C'est un bras en acier sur lequel est placé un contacteur en acier spécial. Lorsque les contacts se touchent, le circuit **est dit fermé** ; Le contact est établi entre l'entrée et la sortie puissance, et le courant peut alors circuler d'une borne à l'autre.

#### 4.3.2. La partie commande

Elle est "le doigt" qui va presser sur l'interrupteur. Elle se compose d'une petite bobine, et d'un axe qui se trouve en son centre. Lorsque la bobine est parcourue par un courant, l'axe qui se trouve en son centre devient un aimant ; Cet aimant va pousser ou tirer sur le bras du contacteur. Ceci aura pour effet de fermer le circuit (relais classique).

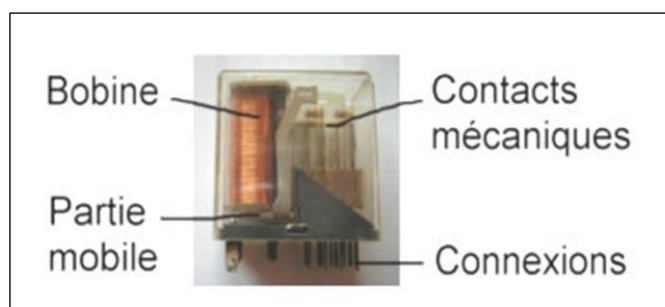
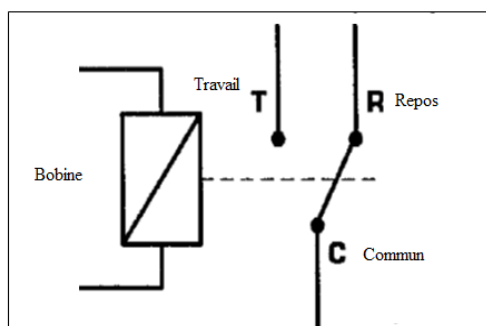


Figure 4.2 : Partie commande

#### 4.3.3. Symbole



### 4.4. Relais statique

Un relais statique, contrairement au relais électromécanique, ne possède pas de pièce en mouvement. La partie "Commande" est généralement constituée d'une source lumineuse (LED), et la partie "Puissance" est élaborée autour d'un ou de plusieurs éléments photosensibles, tel que photo-Triac, phototransistor ou photodiode associée à un circuit de contrôle. Un relais statique peut être tout petit et tenir dans un petit boîtier DIL à 6 pattes (comme un optocoupleur TIL111 par exemple), ou être gros et prévu pour être monté sur un dissipateur thermique (par exemple).

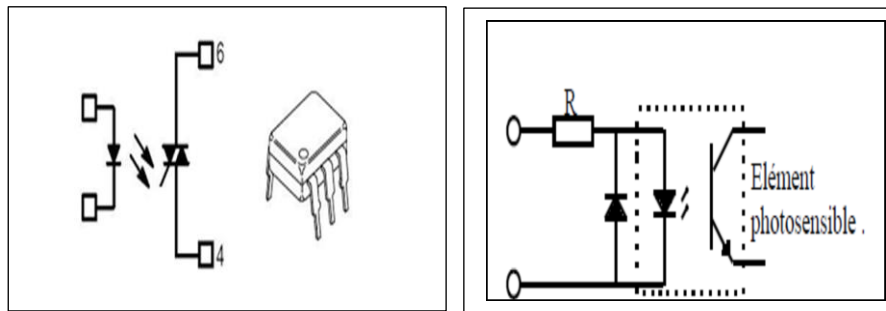


Figure 4.3 : Exemples de Relais statiques

#### 4.5. Domaines d'applications des Relais

- Dans les systèmes de commutation téléphonique ;
- Dans les systèmes d'automatisme industriel ;
- Électroménager ;
- Contrôle d'Éclairage ;
- Contrôle de Moteurs ;
- Contrôle de Température ;
- Utilisation en électricité automobile ;

Alimentation,

- La pompe à carburant ;
- La pompe à injection ;
- Des calculateurs ;
- Phares et antibrouillards ;
- Compresseur de climatisation.

#### 4.6. Microphone

Le microphone est un transducteur électroacoustique, à l'instar de l'oreille animale et humaine: il traduit une onde sonore en signal électrique à l'aide d'une partie mobile, le diaphragme ou membrane, que les ondes sonores viennent exciter (l'équivalent dans l'oreille est le tympan). Par un dispositif qui dépend de la technologie du microphone, ces oscillations mécaniques sont converties en une tension électrique variable (comparable au signal du nerf auditif). Cette tension électrique est acheminée vers le système d'amplification, de pré-amplification ou d'enregistrement auquel le micro est branché.

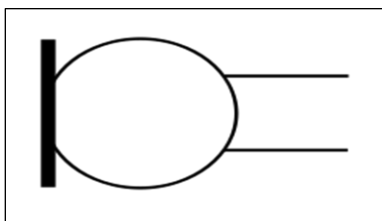


Figure 4.4: Symbole électronique d'un Microphone

Les caractéristiques principales d'un microphone sont donc :

- ✓ Son type,
- ✓ Sa technologie,
- ✓ Sa directivité,
- ✓ Ses caractéristiques électro-acoustiques (sensibilité, pression acoustique maximale, ...).

#### 4.6. Haut-parleur

Les haut-parleurs sont des transducteurs qui ont pour rôle de convertir cette énergie électrique en énergie mécanique (mouvement) grâce à l'électro-aimant : une bobine métallique qui crée un champ magnétique lorsqu'un courant électrique le traverse. Cette bobine se comporte comme un aimant normal, avec une propriété particulièrement pratique : inverser la direction du courant dans la bobine fait basculer les pôles de l'aimant. A l'intérieur d'un haut-parleur, l'électro-aimant est placé devant l'aimant permanent. L'aimant permanent est fixe tandis que l'électro-aimant (la bobine) est mobile. Lorsque des impulsions d'électricité traversent la bobine de l'électroaimant, la direction de son champ magnétique est rapidement modifiée. Cela signifie qu'il est à son tour attiré et repoussé par l'aimant permanent, vibrant d'avant en arrière.

L'énergie mécanique comprime l'air et convertit le mouvement en énergie sonore ou en niveau de pression acoustique (NPA). Le son se déplace dans des ondes de pression. Plus la pression de l'air change rapidement, plus la bobine mobile bouge rapidement, plus la "fréquence" du son que nous entendons est élevée. Lorsqu'un haut-parleur se déplace d'avant en arrière, il pousse sur les particules d'air, ce qui modifie la pression de l'air et crée des ondes sonores.

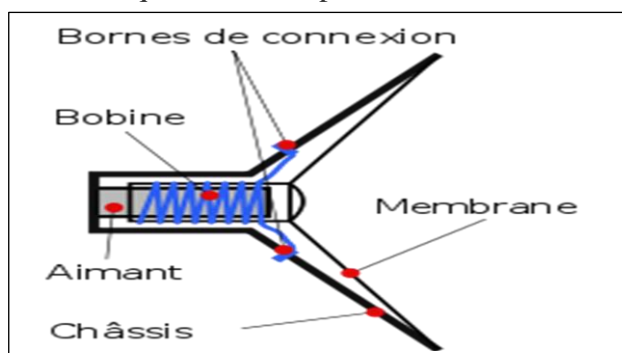


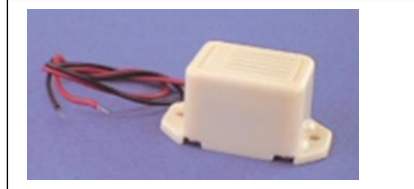
Figure 4.5: Schéma d'un haut-parleur dynamique

#### 4.7. Buzzer

Un buzzer est un élément électromécanique ou électronique qui produit un son quand on lui applique une tension. Certains nécessitent une tension continue (buzzers électro-mécaniques), d'autres nécessitent une tension alternative (transducteurs piezzo-électrique).

#### 4.7.1. Buzzer électro-mécanique

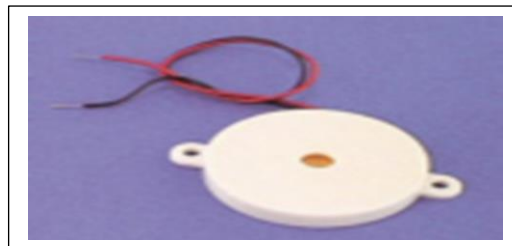
Un buzzer mécanique se présente sous la forme d'un petit boîtier rectangulaire ou cylindrique, avec connexions électriques rigides pour fixation directe sur circuit imprimé, ou avec connections électriques constituées de fils électriques souples. Dans ce deuxième cas, le buzzer possède deux petites pattes de fixation.



Il nécessite une tension continue pour fonctionner, cette dernière doit généralement être comprise entre 3V et 28V, selon les modèles. Un buzzer prévu pour fonctionner sous 6V, fonctionne généralement très bien pour toute tension d'alimentation comprise entre 4V et 8V, et un buzzer prévu pour fonctionner sous 12V, peut parfaitement fonctionner sous une tension comprise entre 6V et 28V.

#### 4.7.2. Buzzer piezzo-électrique "simple"

Un buzzer (transducteur) piezzo-électrique nécessite une tension alternative pour fonctionner, de quelques volts à quelques dizaines de volts (3V à 30V par exemple). Il présente une fréquence de résonance optimale de quelques kHz (entre 1 kHz et 5 kHz en général, par exemple 2 kHz, 2,8 kHz ou 3 kHz). C'est ce type de transducteur que l'on retrouve au dos des montres ayant une fonction alarme.



### 4.8. Quartz

Un quartz est un composant électronique qui possède comme propriété utile d'osciller à une fréquence stable lorsqu'il est stimulé électriquement.

Les propriétés piézoélectriques remarquables du minéral de quartz permettent d'obtenir des fréquences d'oscillation très précises, qui en font un élément important en électronique numérique ainsi qu'en électronique analogique.

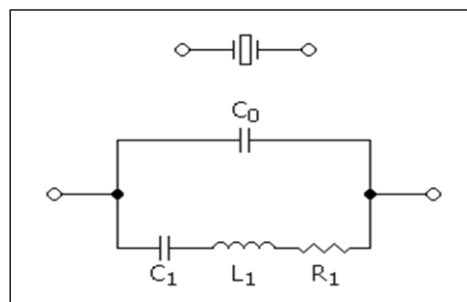


Figure 4.6: Symbole et circuit équivalent d'un quartz

## Chapitre 5 : Documentation sur les composants

### 5.1. Principaux constructeurs de composants

Il y a plusieurs constructeurs de composants électroniques et informatiques importants, citons les principaux :

- ✚ Intel, un leader dans la fabrication de processeurs pour ordinateurs ;
- ✚ AMD, un autre fabricant de processeurs concurrent d'Intel ;
- ✚ NVIDIA, un fabricant de cartes graphiques haut de gamme pour ordinateurs ;
- ✚ Samsung, un fabricant diversifié qui produit des composants pour une variété de produits électroniques, y compris des mémoires, des disques durs, des écrans et des processeurs ;
- ✚ Micro, un fabricant de mémoire vive (RAM), de stockage flash et d'autres composants électroniques ;
- ✚ Qualcomm, un fabricant de puces pour Smartphones et autres appareils mobiles ;
- ✚ Texas instruments, un fabricant de composants électroniques diversifié, y compris des puces, des circuits intégrés et des capteurs ;
- ✚ Broadcom, un fabricant de composants pour les réseaux informatiques et les télécommunications, y compris les puces Wi-Fi, les modems et les antennes ;
- ✚ Western Digital, un fabricant de disques durs, de disques SSD et d'autres dispositifs de stockage ;
- ✚ Kingston, un fabricant de mémoire vive (RAM) et de disque SSD.

D'autres constructeurs de composants aussi existent, tels que, SK Hynix, Toshiba, Seagate, Corsair, Crucial et etc.

### 5.2. Sigles d'identification des composants

L'identification des composants électroniques eut se faire par des symboles, comme ceux étudiés représentés sur la Figure 5.1:

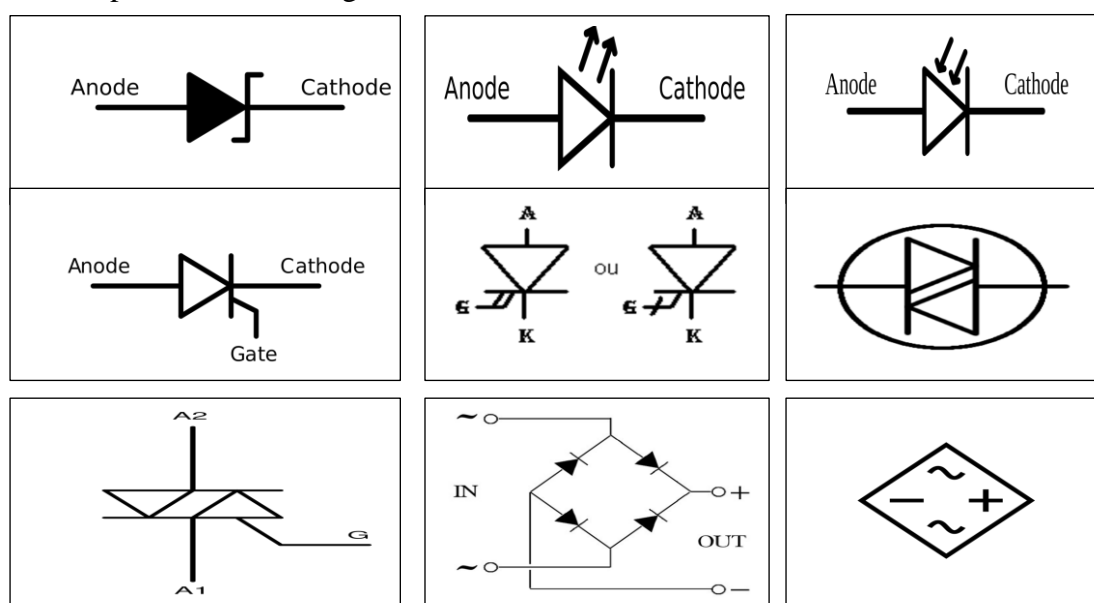


Figure 5.1 : Symboles de composants électroniques



Comme ils peuvent être identifiés par des numéros de pièces, les numéros de pièces peuvent varier en fonction du fabricant, mais ils sont souvent composés de lettres suivies de plusieurs chiffres. Par exemple, une diode 1N4148 est une diode standard couramment utilisée.

### 5.3. Notice technique de composants

Le terme fiche technique, indique une documentation qui résume les caractéristiques d'un composant (par exemple un composant électronique ou mécanique), un appareil (tel qu'un bloc d'alimentation ou chaudière). Le format de la fiche technique peut varier considérablement en fonction du type et de la complexité de la composante documentée.

Les informations sont fournies dans un "pdf" et se trouve sur le site Web du fabricant ou sur des sites spécialisés. Ci-dessous un exemple de fiche technique d'un transistor bipolaire.

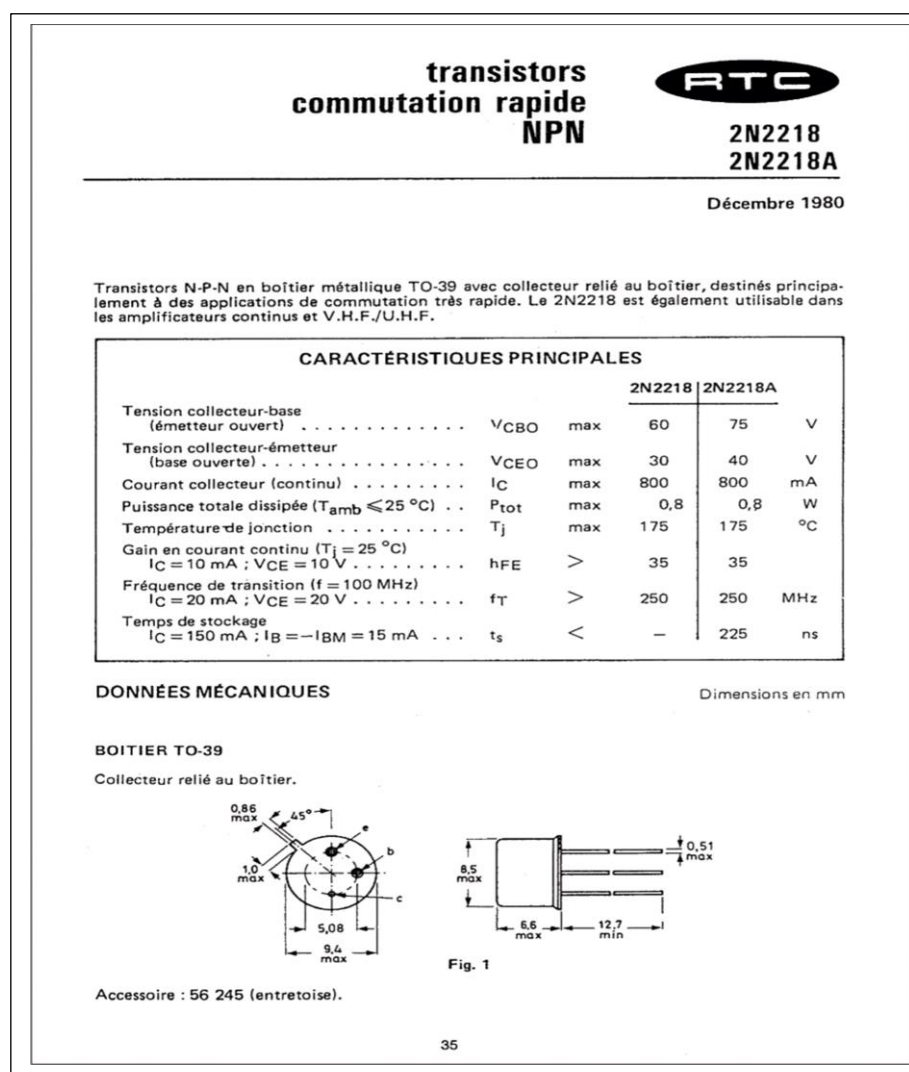


Figure 5.2 : Fiche technique du transistor bipolaire 2N2218



## Chapitre 6 : Circuits de la famille TTL et la famille CMOS

### 6.1. Présentation

Un circuit logique se présente sous forme d'un circuit intégré qui permet de regrouper dans un même boîtier un maximum de composants électroniques dont le plus important est le transistor. Les circuits intégrés logiques sont classés suivant leur technologie de fabrication en plusieurs familles logiques. Chaque famille logique a pour point commun la technologie employée.

### 6.2. Circuits de la famille TTL

La famille **TTL** (**T**ransistor **T**ransistor **L**ogic) : utilise une technologie à base de transistors bipolaires multi-émetteurs. Elle est caractérisée par des paramètres électriques comme l'alimentation et la consommation, et des performances dynamiques comme le temps de propagation.

#### b) Tension d'alimentation

L'alimentation doit être fixe et égale à 5 Volts avec une tolérance de  $\pm 5\%$ .

#### c) Courants d'entrée et sortie

Le courant d'entrée, est celui qui circule dans une entrée d'un circuit TTL. Le courant d'entrée est typique de  $1\ \mu\text{A}$  à  $100\ \mu\text{A}$ . Cette valeur peut varier en fonction du circuit et des spécifications du fabricant.

Le courant de sortie, est celui qui circule dans une sortie d'un circuit TTL. Il est typique de  $8\ \text{mA}$  à  $16\ \text{mA}$ . Cependant cette valeur peut également varier en fonction du circuit et des spécifications du fabricant.

#### d) Niveaux logiques

Pour une famille donnée, les niveaux logiques 0 ou L (Low) et 1 ou H (High) ne correspondent pas à une tension précise, mais à une certaine plage de tension. La terminologie utilisée pour les valeurs de la tension en entrée (Input) :

$V_{IHmin}$  : Tension minimale en entrée qui assure le niveau logique haut.

$V_{ILmax}$  : Tension maximale en entrée qui assure le niveau logique bas.

Dans le cas des TTL,  $V_{IHmin} = 2\ \text{Volts}$  et  $V_{ILmax} = 0.8\ \text{Volts}$

La terminologie utilisée pour les valeurs de la tension de sortie (Output) :

$V_{OHmin}$  : Tension minimale de la sortie à l'état logique haut.

$V_{OLmax}$  : Tension maximale de la sortie à l'état logique bas.

Dans le cas des TTL,  $V_{OHmin} = 2.4\ \text{Volts}$  et  $V_{OLmax} = 0.4\ \text{Volts}$

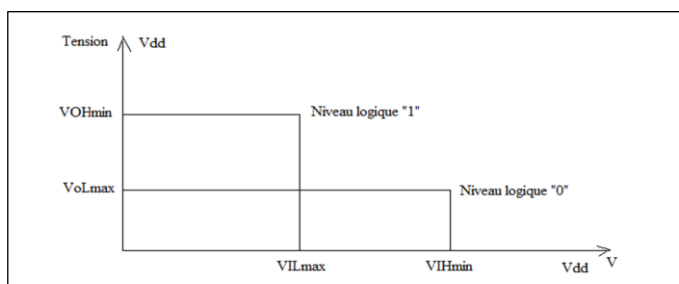


Figure 6.1 : Niveaux logiques

### e) Temps de propagation

Dans une porte logique, les grandeurs sont transmises avec un retard caractéristique de la porte : c'est le temps de propagation de l'information dans la porte.

**TpHL** : Temps de propagation du signal logique lorsque la sortie passe de l'état haut à l'état bas.

**TpLH** : Temps de propagation du signal logique lorsque la sortie passe de l'état bas à l'état haut.

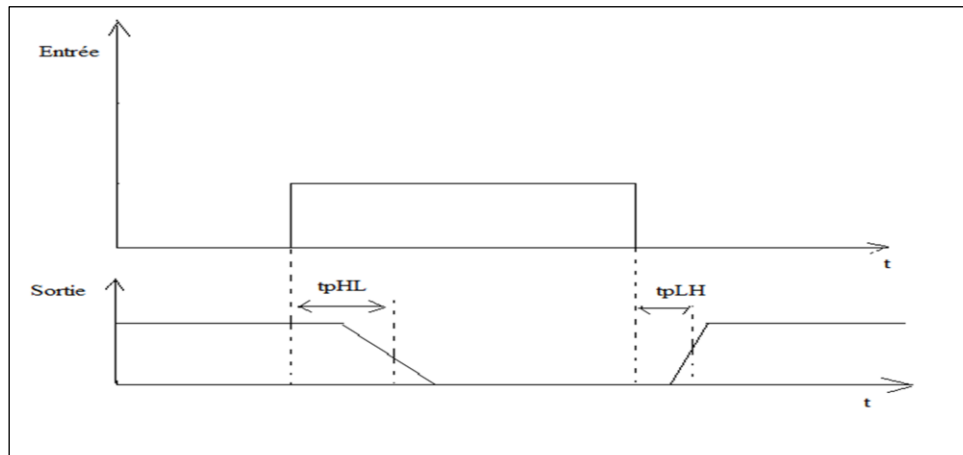


Figure 6.2 : Temps de propagation

#### 6.2.1. Etage de sortie à collecteur ouvert

L'étage de sortie à collecteur ouvert (ou à drain ouvert) permet de piloter des charges externes lorsque la tension et le courant d'une sortie logique normale ne suffisent pas. Pour assurer un niveau logique en sortie, il faut compléter sa polarisation par une résistance de tirage à +Vcc. Le niveau de sortie dépend du choix de R et +V.

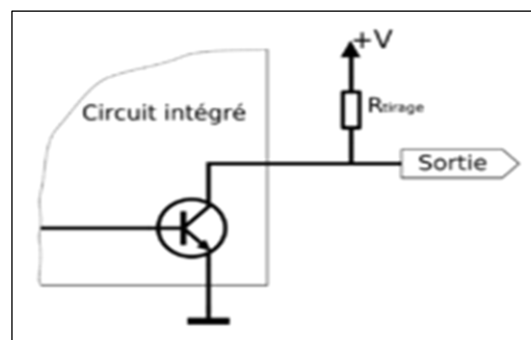


Figure 6.3 : TTL étage de sortie « Collecteur ouvert »

#### 6.2.2. Etage de sortie à trois états (0, 1 et Z)

L'étage de sortie 3 états présente en plus des deux niveaux logiques classiques dits à basse impédance, un 3<sup>ème</sup> état de la haute impédance **HZ** où l'impédance de sortie devient très grande, voire infinie. Lorsqu'une sortie est mise en état **HZ**, elle sera déconnectée et isolée électriquement du reste du montage. Une porte trois états possède en plus des entrées logiques classiques une entrée supplémentaire de contrôle qui permet de mettre ou non la sortie en état **HZ** (voir l'exemple ci-dessous).

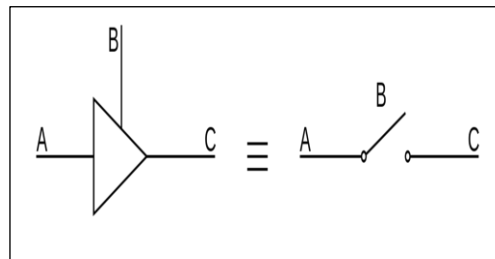


Figure 6. 4 : Etage de sortie « trois états »

### 6.2.3. Portes logiques à entrées spécifique

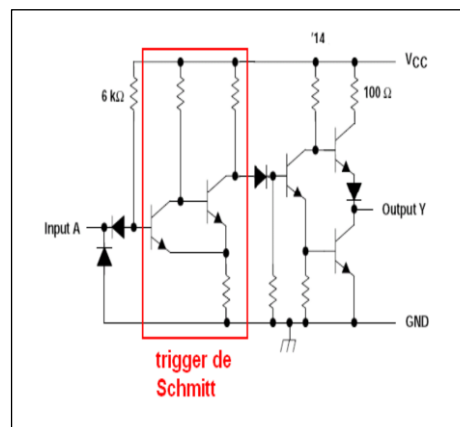
#### b) Trigger de Schmitt

Dits aussi circuits Trigger, certaines portes disposent d'entrées à seuil (Trigger), possédant deux seuils de commutations et répondant à une courbe d'hystérésis ; Ces portes sont utilisées pour passer d'un signal analogique à un signal logique. Exemple la porte logique TTL7414.

Le symbole est :



Schéma interne d'une porte TTL7414



#### c) Sorties Bufférisées

En électronique, un Buffer est un montage spécifique destiné à amplifier le courant de sortie d'un circuit permettant de raccorder plus d'utilisateurs sur la sortie de ce circuit. Le suffixe « B », indique que les portes comportent un « Buffer » en sortie.

### 6.2.4. Précaution d'utilisation des circuits TTL

Voici quelques précautions d'utilisation à prendre en compte :

- ✚ Eviter les surtensions, qui peuvent endommager les composants électroniques. S'assurer que les tensions d'alimentation et les signaux d'entrée sont conformes aux spécifications du circuit ;
- ✚ Eviter les décharges électrostatiques, il est important de prendre des mesures pour prévenir l'accumulation de charges statiques et de manipuler les circuits avec précaution ;
- ✚ Respecter les températures de fonctionnement, pouvant réduire leur durée de vie et affecter leurs performances, il est important de respecter les plages de températures de fonctionnement spécifiques pour le circuit ;

- Respecter les limites de courant, les circuits TTL ont des limites de courant spécifiques pour les entrées et les sorties, il est important de s'assurer que les courants d'entrée et de sortie sont conforme aux spécifiques du circuit.

### 6.3. Circuits de la famille CMOS

#### 6.3.1. Portes logiques P-MOS et N-MOS

La technologie CMOS (Complementary Metal-Oxyde-Semiconducteur) joue un rôle prédominant dans l'industrie du circuit intégré. Le transistor MOS, par sa simplicité de fabrication et ses performances, constitue l'élément de base des circuits intégrés.

Le transistor MOS est un composant actif ayant 3 broches principales nommées Gate (Grille), Drain et Source. Pour des applications numériques, il fonctionne comme un interrupteur commandé par la Grille et permettant au courant de passer de la Source vers le Drain. Il est soit en mode ON (le courant circule de la Source vers le Drain) soit en mode OFF (aucun courant ne circule dans le transistor). Il existe deux types de transistors : le NMOS et le PMOS.

Commençant avec la technologie NMOS, mais les circuits PMOS sont relativement similaires. Dans la technologie NMOS, les portes logiques sont fabriquées avec des transistors NMOS intercalés avec une résistance.

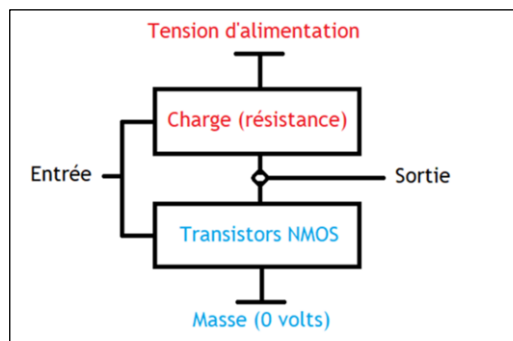
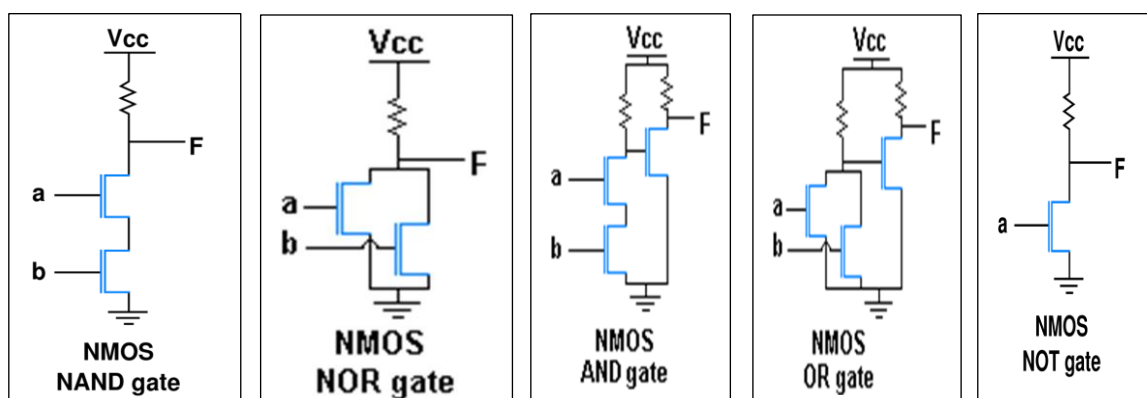


Figure 6. 5 : Circuit logique en NMOS

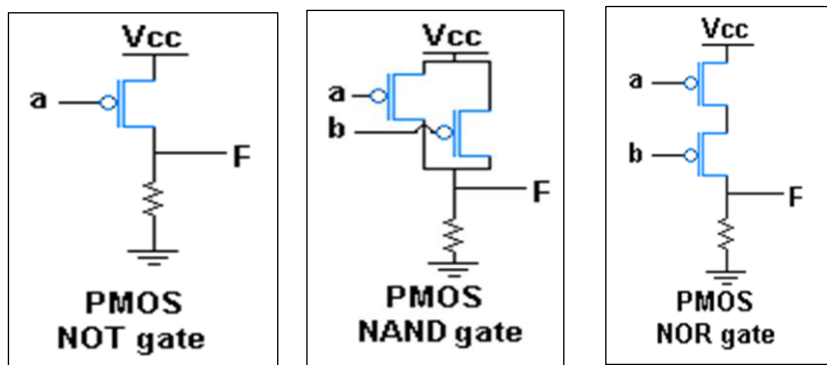
#### b) Les portes logiques de base en NMOS

Les portes de base sont les portes NON, NAND et NOR. Les portes ET et OU sont fabriqués en combinant des portes de base, par exemple plaçant une porte NON à la suite d'une porte NAND/NOR pour obtenir un ET ou un OU.



### c) Les portes logiques de base en PMOS

Avec les circuits PMOS, les transistors sont placés entre la tension d'alimentation et la sortie.



### 6.3.2. Logique MOS complémentaire

Chaque porte logique est fabriquée à la fois avec des transistors NMOS et des transistors PMOS. On peut la voir comme un mélange entre la technologie PMOS et NMOS. Tout circuit CMOS est divisé en deux parties : une intégralement composée de transistors PMOS et une autre de transistors NMOS. Chacune relie la sortie du circuit soit à la masse, soit à la tension d'alimentation.

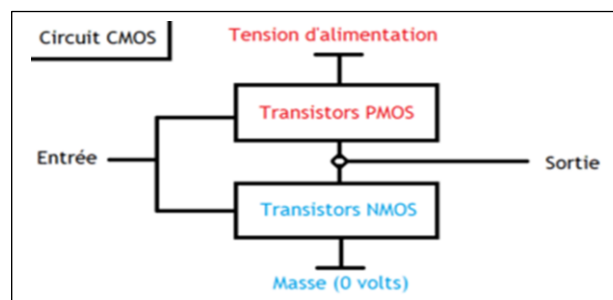
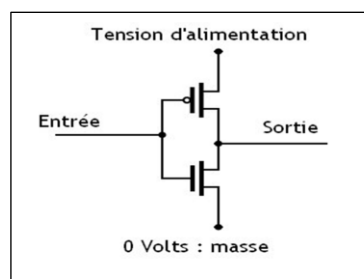


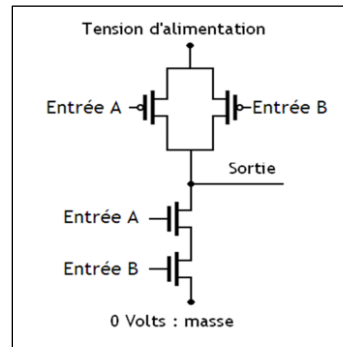
Figure 6. 6 : Circuit logique en CMOS

### b) Porte NON

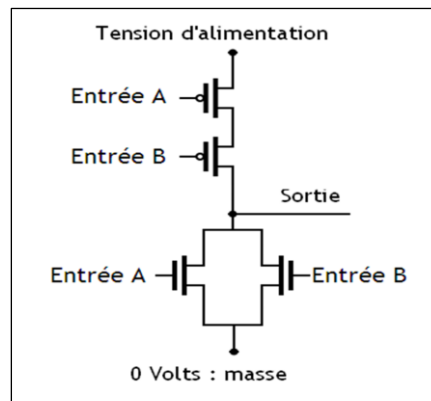
Cette porte est fabriquée avec seulement deux transistors, comme indiqué ci-dessous.



### c) Porte NAND



### d) Porte NOR



## 6.4.Caractéristiques électriques

Les familles complémentaires CMOS sont constituées de plusieurs séries : série 4000 ou série C (CMOS standard), AC : Advanced CMOS, ACT : Advanced CMOS compatible TTL, HC : High speed CMOS logic, HCT : High speed CMOS Logic TTL ;

### a/ Série 4000

C'est la série qui a apparue la première à titre d'exemple, le circuit CD4011B, est la référence du boîtier contenant quatre portes NAND à deux entrées. Le suffixe B indique que les portes comportent un « Buffer » en sortie.

### b/Alimentation

Les circuits de la famille CMOS ne sont pas forcément alimentés entre une tension positive fixe et la masse, comme le cas de la famille TTL, ils peuvent être alimentés entre une tension  $V_{DD}$  et  $V_{SS}$  quelconque en respectant :  $3\text{ V} < V_{DD} - V_{SS} < 18\text{ V}$

### c/Température

La plage de température de fonctionnement : série Commerciale :  $-40, 85^{\circ}\text{C}$  et série militaire :  $-55, 125^{\circ}\text{C}$ .

### d/Caractéristiques de transfert

La tension de transition des circuits CMOS est de l'ordre de :  $V_T = (V_{DD} + V_{SS})/2$

**e/Immunité au bruit**

L'immunité au bruit est bien meilleure que celle de la TTL. La tension de sortie est voisine de la tension d'alimentation (déviations de 0.05 V).

**f/Temps de basculement**

Il dépend de la tension d'alimentation.

**g/Consommation****1) Puissance statique**

Elle est quasiment nulle, car, que la porte soit à l'état bas ou à l'état haut, un des deux transistors constituant un étage est bloqué, il n'y a donc pas de courant absorbé par la porte ( $I_{DD} < 4 \mu A$ ).

**2) Puissance dynamique**

Quand la tension d'entrée est voisine de la moitié de tension d'alimentation, on est dans la zone de transition (un est en train de se bloquer, l'autre de se débloquer), un courant circule, le CMOS consomme de l'énergie dynamiquement.

**6.5.Interfaçage**

	TTL	CMOS
VOHmin	2.4 V	4 V
VOLmax	0.4 V	0.2 V
VILmax	0.8 V	1 V
VIHmin	3.5 V	3.6 V

**6.6.Précaution d'utilisation des circuits CMOS**

Les circuits CMOS sont très couramment utilisés dans l'industrie électronique en raison de leur faible consommation d'énergie et de leur compatibilité avec les technologies de fabrication avancées. Cependant il y a certaines précautions à prendre lors de leur utilisation pour garantir leur fonctionnement fiable et leur durée de vie. Voici quelques-unes des précautions les plus importantes :

- ✚ Eviter les surtensions, il est important de ne pas dépasser les tensions maximales spécifiques dans les caractéristiques du circuit ;
- ✚ Eviter les surintensités, il est important de limiter le courant dans le circuit en utilisant des résistances appropriées ou des dispositifs de limitation de courant ;
- ✚ Eviter les variations de température extrêmes, maintenir les circuits dans les plages de température spécifiées dans les caractéristiques du circuit ;
- ✚ Etc, ...

## 5. Références biblio-Webographies

- [1] R. Besson, Electronique à transistors et à circuits intégrés, Technique et vulgarisation, 1979.
- [2] R. Besson, Technologie des composants électroniques, Editions Radio.
- [3] M. Archambault, Formation pratique à l'électronique, Edition ETSF, 2007.
- [4] B. Woollard, Apprivoiser les composants, Dunod, 1997.
- [5] P. Mayé, Aide-mémoire des composants électroniques, Dunod, 2010.
- [6] P. Mayeux, Apprendre l'électronique par l'expérimentation et la simulation, ETSF, 2006.
- [7] R. Mallard, l'électronique pour les débutants, Elektor, 2012.
- [8] André Champenois, Alimentations thyristors et optoélectronique, Ottawa, Canada, 1988, ISBN : 2-7613-0491-8
- [9] B. Razavi, Design of analog CMOS integrated circuits, McGraw Hill, 2001.
- [10] P. Gray, P. J. Hurst, SH. Lewis, R. Meyer, Analysis and Design of Analog integrated circuits, Willey, 2001.
- [11] D. A. Jonhs, K. Martin, Analog integrated circuits design, Willey, 1997.
- [12] P. Mayé, Les alimentations électroniques, Dunod, 3<sup>ème</sup> édition, 2018, ISBN 978-2-10-078103-4.
- [13] L. Lasne, Electronique de puissance, Cours, études de cas et exercices corrigés, Dunod, 3<sup>ème</sup> édition, 2020.
- [14] [https://zestedesavoir.com/tutoriels/686/arduino-premiers-pas-en-informatique-embarquee/743\\_gestion-des-entrees-sorties/3424\\_afficheurs-7-segments/](https://zestedesavoir.com/tutoriels/686/arduino-premiers-pas-en-informatique-embarquee/743_gestion-des-entrees-sorties/3424_afficheurs-7-segments/)
- [15] [https://www.google.com/search?q=afficheur+16+segments&tbm=isch&source=univ&fir=CkgLKUSM44CnbM%252CBmJ98oqGeEGIVM%252C\\_&usg=AI4\\_kTKDAwRmMVhdJ1xiW7uDjht7raqw&sa=X&ved=2ahUKEwj16ozKtcT9AhWGVaQEHXpdB5kQ7Al6BAgNEAM&biw=1280&bih=657&dpr=1#imgsrc=P4Wxj5CCR5FYGM](https://www.google.com/search?q=afficheur+16+segments&tbm=isch&source=univ&fir=CkgLKUSM44CnbM%252CBmJ98oqGeEGIVM%252C_&usg=AI4_kTKDAwRmMVhdJ1xiW7uDjht7raqw&sa=X&ved=2ahUKEwj16ozKtcT9AhWGVaQEHXpdB5kQ7Al6BAgNEAM&biw=1280&bih=657&dpr=1#imgsrc=P4Wxj5CCR5FYGM)
- [16] <https://www.amazon.fr/r%C3%A9sistance-12000-mcd-%C3%A9lectroluminescentes-lumineuses-elpohl%C2%AE/dp/B0755FQSG1>
- [17] <https://passionelectronique.fr/photoresistance/>
- [18] [https://www.sonelec-musique.com/electronique\\_theorie\\_optocoupleur.html](https://www.sonelec-musique.com/electronique_theorie_optocoupleur.html)



- [19] <https://fac.umc.edu.dz/fstech/cours/Electronique/ST%202eme%20Ann%C3%A9e/chaaba/2eme%20ann%C3%A9e%20electronique/cours%20de%20technologie.pdf>
- [20] [https://www.magoie.net/magoie\\_cours\\_electronic\\_01.pdf](https://www.magoie.net/magoie_cours_electronic_01.pdf)
- [21] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Microphone-page-2.html>
- [22] <http://cours-techniques.blogspot.com/2011/10/buzzer.html>
- [23] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Quartz\\_\(%C3%A9lectronique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Quartz_(%C3%A9lectronique))
- [24] <https://boowiki.info/art/electronique-terminologie/fiche-technique.html>
- [25] <https://www.maxicours.com/se/cours/transistor-bipolaire/>
- [26] <https://fastoche.pagesperso-orange.fr/unijonction/unijonction.htm>
- [27] <https://studylibfr.com/doc/2000378/technologie-des-circuits-int%C3%A9gr%C3%A9s>
- [28] [https://fr.wikibooks.org/wiki/%C3%89lectronique/Les familles MOS: PMOS, NMOS et CMOS](https://fr.wikibooks.org/wiki/%C3%89lectronique/Les_familles_MOS:_PMOS,_NMOS_et_CMOS)
- [29] M. Jézéquel, ELP 304 : Cours2, Circuits combinatoires, Telecom Bretagne.