

**III.1 Rappels élémentaires sur la physique des semi-conducteurs :**

Un semi-conducteur est généralement défini comme étant un matériau dont la conductivité dépend de la température et augmente avec celle-ci.

**Ordres de grandeur**

Isolant :  $\sigma < 10^{-6}$  S/m (S = Siemens, c'est-à-dire  $\Omega^{-1}$ )

Conducteur :  $\sigma \approx 10^8$  S/m

Semi-conducteur :  $\sigma \approx 0.1$  à  $10^{-4}$  S/m

Par conséquent, on peut désigner le semi-conducteur comme étant un isolant pour les basses températures et comme un conducteur pour les hautes températures. En outre, il existe d'autres paramètres qui définissent le comportement du semi-conducteur tels que : l'éclairement, le dopage et la concentration des porteurs de charges...

**III.1.1 Définition et structure atomique d'un semi-conducteur**

Les semi-conducteurs ont la même structure cristallographique que celle du diamant. Dans un cristal semi-conducteur, les atomes sont arrangés de telle sorte qu'un atome sera entouré de quatre autres.

L'atome semi-conducteur est un atome tétravalent, il a quatre électrons sur sa couche périphérique. Alors, cet atome est entouré dans un cristal par quatre autres de même type, ce qui résulte huit électrons sur sa couche périphérique comme nous montre la figure III.1.

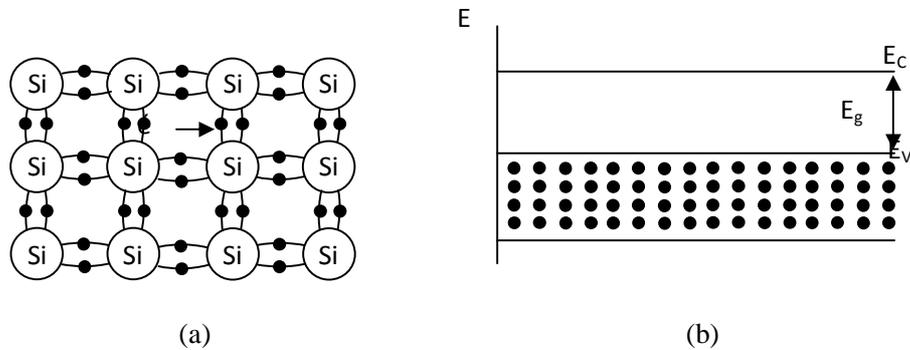


Figure III.1 : Etat d'une structure semi-conducteur à  $T=0^{\circ}\text{K}$ , (a) structure cristalline, (b) bandes d'énergie

Aux très basses températures, tous les électrons dans la bande de valence sont liés avec les atomes. Alors, la bande de conduction est totalement vide, on dit que le semi-conducteur se comporte comme un isolant.

Aux températures élevées ou même ambiantes, les électrons de valence reçoivent de l'énergie suffisante pour dépasser la bande interdite  $E_g$  à la bande de conduction comme nous montre la figure III.2

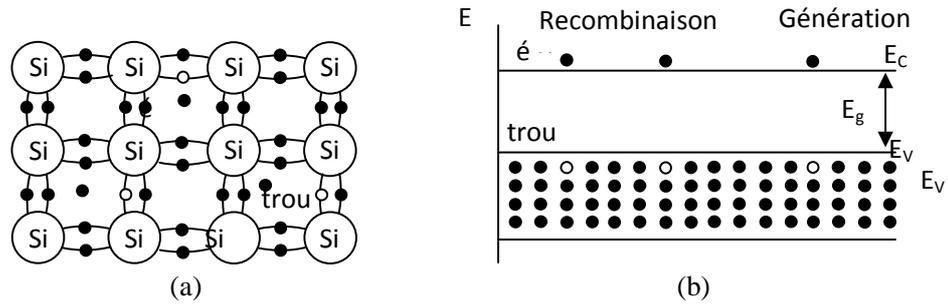


Figure III.2 : Etat d'une structure semi-conducteur à T ambiante (a) structure (b) bande d'énergie

**La génération :** est le passage des électrons, qui reçoivent de l'énergie, de la bande de valence à la bande de conduction.

**La recombinaison:** est la disparition des électrons excités, qui perdent de l'énergie, de la bande de conduction à la bande de valence.

Si on applique un champ électrique sur le substrat de silicium, les électrons de conduction acquièrent une vitesse qui leurs permette de se déplacer dans le sens opposé à celui du champ électrique appliqué. Les trous de valence qui sont considérés comme des charges positifs permettent aux électrons de se déplacer d'un trou à un autre en résultant un déplacement des trous dans le même sens que le champ électrique appliqué.

### III.1.2 Dopage des semi-conducteurs :

La conductivité des semi-conducteurs peut être augmentée par un ajout contrôlé des impuretés dans un matériau semi-conducteur pur (intrinsèque). Ce procédé, appelé dopage, permet l'augmentation des porteurs de charge (électron ou trou), par conséquent, l'augmentation de la conductivité et la réduction de la résistivité. Ces deux catégories d'impuretés sont type *n* et type *p*.

#### a. Semi-conducteur extrinsèque de type *n*

Pour augmenter le nombre des électrons de conduction dans le silicium pur, un nombre contrôlé d'atome pentavalents appelés donneurs sont ajoutés au cristal de silicium. Ces derniers, tel que le Phosphore et l'Arsenic, sont des atomes avec cinq électrons de valence (figure III.3). Chaque pentavalent atome forme avec quatre atomes de silicium adjacents une liaison de covalence en quittant un extra électron qui va être devenu un électron libre de conduction. Les électrons dans les matériaux de type N sont appelés : porteurs de charge majoritaires et les trous sont appelés : porteurs de charge minoritaires.

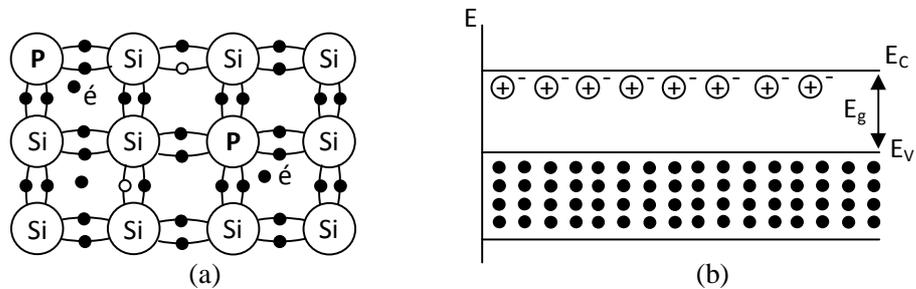


Figure III.3 : Semi-conducteur de type *n* (a) structure (b) bande d'énergie

**b. Semi-conducteur extrinsèque de type *p***

Pour augmenter le nombre des trous dans le silicium pur, un nombre d'atome tétravalents appelés accepteurs sont ajoutés au cristal de silicium. Ces derniers, sont des atomes avec seulement trois électrons de valence tel que le Bore et le Gallium (figure III.4).. Chaque tétravalent atome forme avec quatre atomes de silicium adjacents une liaison de covalence. Tous les trois électrons de l'atome impurété sont utilisés pour former les liaisons de covalence.

Cependant, puisque quatre électrons sont nécessaires dans la structure cristalline, un trou est formé avec chaque atome tétravalent ajouté. Alors, avec les matériaux de type *p*, les accepteurs causent des extra trous de valence qui présentent les porteurs de charge majoritaires et les électrons présentent les porteurs de charge minoritaires.

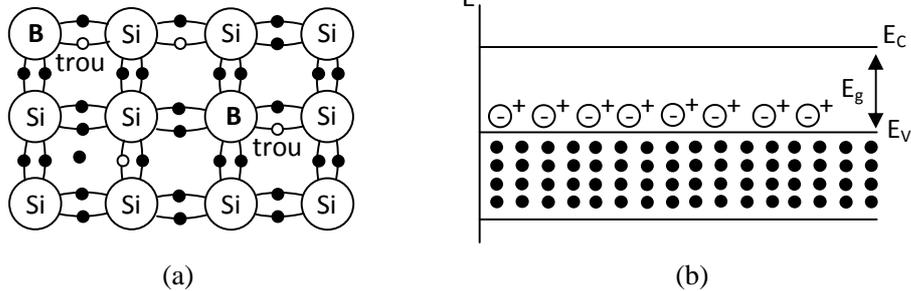


Figure III.4 : Semi-conducteur de type *p* (a) structure (b) bande d'énergie

On peut constater des figures figure III.3 et figure III.4 que l'introduction des atomes d'impurétés résultent des niveaux d'énergie voisins de la bande de conduction dans le cas des donneurs ou voisins de la bande de valence dans le cas des accepteurs. Ce qui explique qu'une faible quantité d'énergie est suffisante pour faire libérer le cinquième électron de l'atome donneur comme elle est suffisante pour faire bouger les électrons de la bande de valence d'un trou à un autre des atomes accepteurs.

**III.1.3 Concentration des porteurs de charge**

**a. Semi-conducteur intrinsèque**

Dans un semi-conducteur pur, il existe autant d'électrons libres que de trous donnés par : *n* nombre électrons de conduction et *p* les trous de valence par unité de volume, appelé concentrations des porteurs intrinsèques.

Pour un semi-conducteur intrinsèque on a:

$$n = p = n_i \Rightarrow n \cdot p = n_i^2 \text{ où :}$$

$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$  *n<sub>i</sub>*: concentration intrinsèque (caractéristique du matériau semi-conducteur pur), elle dépend fortement de la température.

A  $T=300^\circ K$  :  $n_i = 1.6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  (pour le cas du Si)

$n_i = 2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  (pour le cas du Ge)

$n_i = 1.1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$  (pour le cas du GaAs)

$E_g$  : Gap ou largeur de la Bande Interdite

$N_C$ : densité effective d'électrons dans la bande de conduction.

$N_V$ : densité effective de trous dans la bande de valence.

$K = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV}/^\circ K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J}/^\circ K$ : la constante de Boltzman

### b. Semi-conducteur extrinsèque dopé $n$

Si le semi-conducteur est dopé  $n$ , il y a beaucoup plus d'électrons libres que de trous. On dit que :  
Pour un semi conducteur dopé  $n$  :  $n \neq p$  et  $n \gg n_i$

En revanche, on a toujours :  $n.p = n_i^2$

Si  $N_D$  est la concentration en atomes donneurs on a alors :  $n \approx N_D^+$  et  $p \approx \frac{n_i^2}{N_D^+}$

A la température ambiante l'ionisation des atomes d'impuretés est considérée comme complète. Donc, à  $T=300^\circ\text{K}$  : on peut donner :  $n = N_D = N_D^+$  et  $p = N_A = N_A^-$

### c. Semi-conducteur extrinsèque dopé $p$

Si le semi-conducteur est dopé  $p$ , il y a beaucoup plus de trous que des électrons. On dit que :  
Pour un semi conducteur dopé  $p$  :  $n \neq p$  et  $p \gg n_i$

En revanche, on a toujours :  $n.p = n_i^2$

Si  $N_A$  est la concentration en atomes accepteurs on a alors :  $p \approx N_A^-$  et  $n \approx \frac{n_i^2}{N_A^-}$

### III.1.4 La jonction PN

La jonction  $PN$  est formée entre deux zones de différent dopage de type  $p$  et de type  $n$  obtenus par diffusion ou par bombardement ionique sur le même substrat de semi-conducteur. La zone  $n$  a plusieurs électrons libres (porteurs de charge majoritaires) et quelque trou généré thermiquement (porteurs de charge minoritaires). Par contre, la zone  $p$  a quelque électron généré thermiquement (porteurs de charge minoritaires) et pas mal de tous (porteurs de charge majoritaires).

La jonction  $PN$  forme une diode de base, elle est nécessaire pour le fonctionnement des dispositifs à semi-conducteurs tels que les diodes et les transistors,...

### III.1.5 La zone de déplétion

Lorsque la jonction  $PN$  se forme, quelque électron de conduction près de la jonction la traverse vers la zone  $p$  et se recombine avec les trous près de la jonction comme nous montre la figure III.5.

Pour chaque électron qui traverse la jonction et se recombine avec un trou, l'atome pentavalent obtient avec une charge positive dans la zone  $n$  près de la jonction. En outre, lorsque l'électron se recombine avec un trou dans la zone  $p$ , l'atome tétravalent acquiert une charge négative.

Par conséquent, des ions sont retrouvés positifs dans le côté  $n$  de la jonction et négatif le côté  $p$ . L'existence des ions positifs et négatifs sur les côtés opposés de la jonction crée une barrière de potentiel  $V_B$  à travers la zone de déplétion.

La barrière de potentiel dépend de la température, mais elle est à peu près de  $0.7\text{V}$  pour le cas de Silicium et de  $0.3\text{V}$  pour le cas du Germanium à la température ambiante.

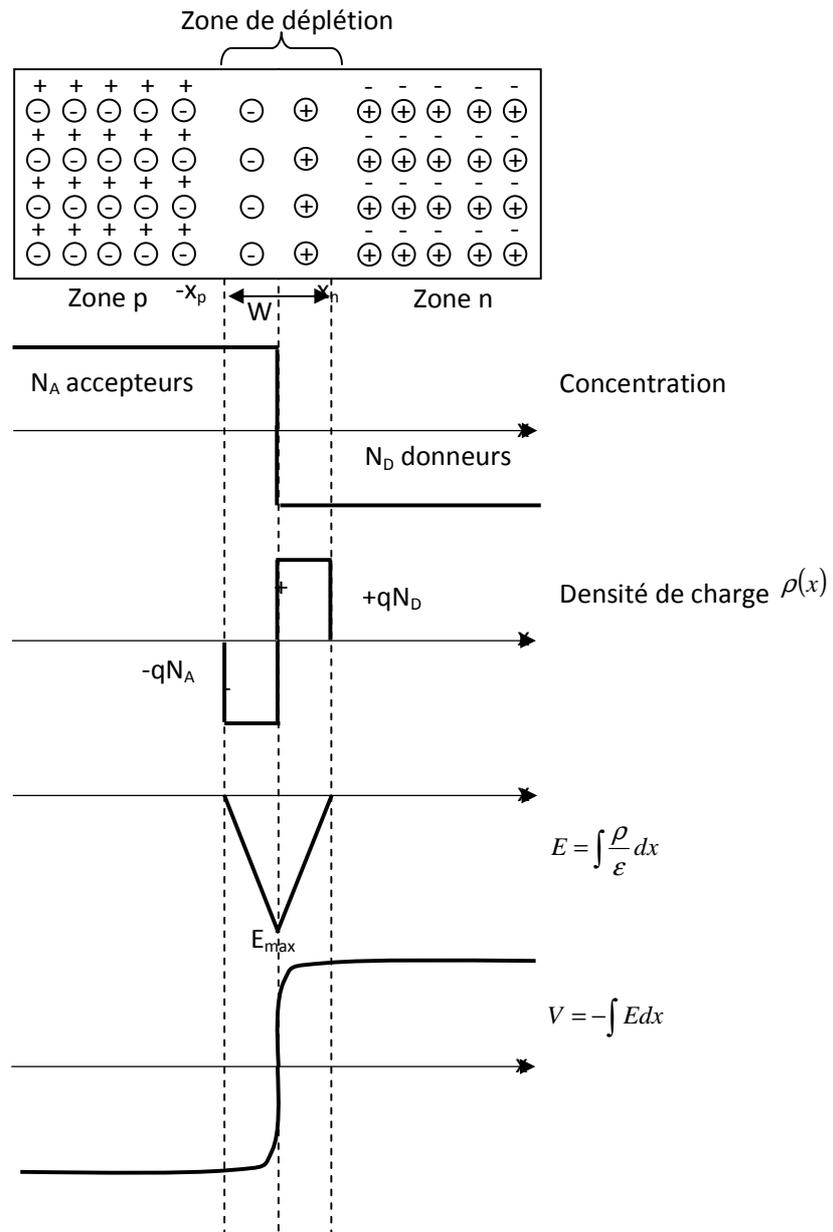


Figure III.5 : Grandeurs spécifiques dans une jonction PN

### III.2 Théorie de la diode :

#### III.2.1 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 III.6 représente la structure semi-conductrice d'une diode avec son symbole dans les circuits électroniques.

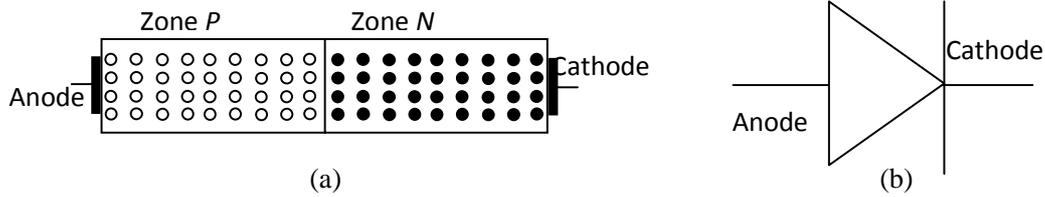


Figure III.6 : diode à jonction (a) structure semi-conducteur (b) symbole

Le coté de la diode dopée  $p$  est appelé anode et le coté dopée  $n$  est appelé cathode.

**III.2.2 Polarisation d'une diode (jonction PN)**

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 façon 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 : le plus de la source est lié au côté  $p$  de la jonction et le moins de la source est lié au côté  $n$ , on dit que la diode ou la jonction  $PN$  est polarisée en directe (figure III.7).

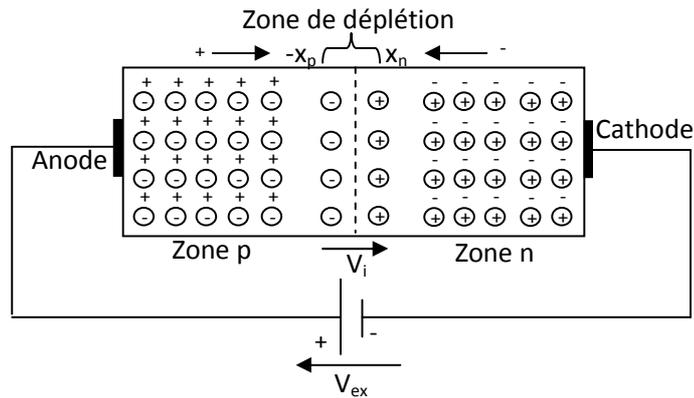


Figure III.7 : polarisation directe d'une diode (jonction PN)

Le champ électrique externe  $E_{ex}$  créé par  $V_{ex}$  s'oppose à l'effet du champ interne  $E_i$  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 diminuée, 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 (figure III.8).

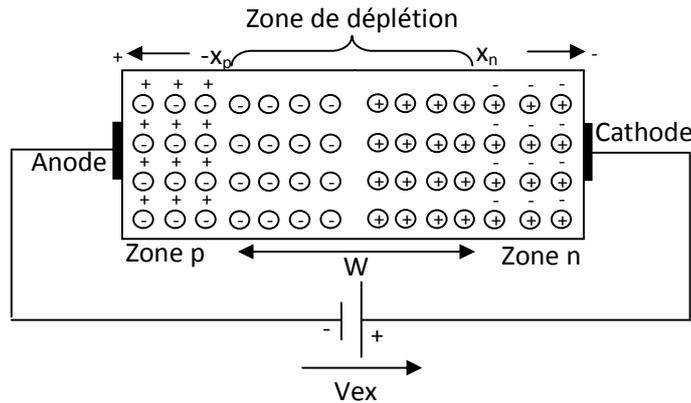


Figure III.8 : polarisation inverse d'une diode (jonction PN)

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  $I_s$ .

### III.2.3 Caractéristique courant-tension d'une diode

La caractéristique  $I = f(V)$  d'une diode est représentée sur la figure suivante :

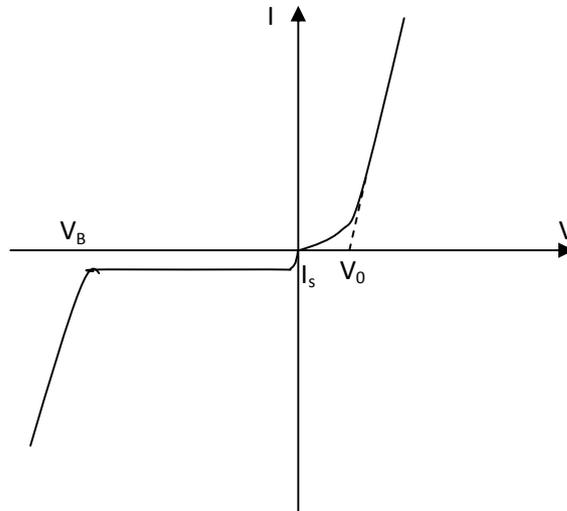


Figure III.9 : caractéristique électrique I-V d'une diode

La tension  $V$  entre l'anode et la cathode de la diode est liée au courant  $I$  qui la traverse par une relation exponentielle donnée par :  $I = I_s \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$  où :

$I_s$  : Courant de saturation de la diode

## Chapitre III – Diodes

$k$  : Constante de Boltzmann,  $k=1.38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

$T$  : Température

$q$  : Charge de l'électron,  $q=1.60219 \times 10^{-19} \text{ C}$

$\frac{kT}{q} = V_{th} \approx 0.026 \text{ V} = 26 \text{ mV}$  : Tension thermique pour une température ambiante  $T=300^\circ\text{K}$

La tension  $V_0$  est la tension de seuil de la diode. Le courant  $I_S$  de saturation est le courant qui traverse la diode dans le cas où cette dernière est bloquée. La tension  $V_B$  appelée la tension de claquage, elle correspond une tension inverse qui déclenche le phénomène d'avalanche.

### a. Résistance statique

La résistance statique de la diode définit la résistance équivalente d'une diode lorsqu'elle est parcourue par un courant constant.

D'après la figure III.10, on constate que la diode est polarisée par une source de tension continue. Donc, la résistance équivalente à la diode vue par la source  $E$  est une résistance statique  $R_S$  qui peut être

donnée par :  $R_S = \frac{V}{I}$

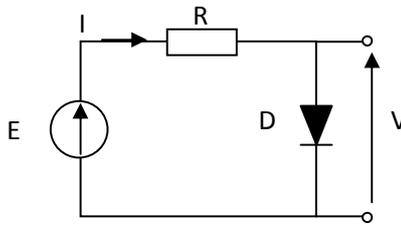


Figure III.10 : Polarisation d'une diode par une source continue

D'après le circuit de la figure III.10, on a :  $E = RI + V \Rightarrow I = -\frac{V}{R} + \frac{E}{R}$  : droite de charge

La valeur de cette résistance peut être aussi déterminée graphiquement par les coordonnées  $(V_0, I_0)$  du point d'intersection  $Q$  entre la droite de charge et la caractéristique  $I-V$  de la diode telle qu'il est illustré par la figure III.11. le point  $Q(V_0, I_0)$  représente le point de fonctionnement de la diode.

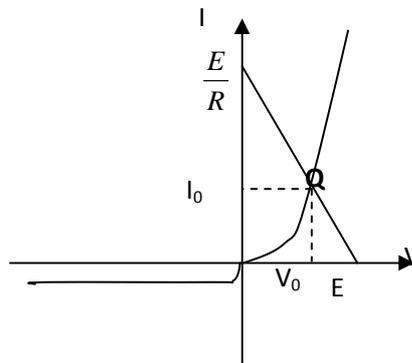


Figure III.11 : Détermination de la résistance statique de la diode graphiquement

**b. Résistance dynamique**

La résistance dynamique définit la résistance équivalente de la diode en régime variable, elle est appelée aussi résistance différentielle ou résistance en alternatif.

La résistance dynamique est donnée par le rapport de la variation de la tension aux bornes de la diode à la variation du courant qui la parcourt :  $R_d = \frac{\Delta V}{\Delta I}$

Si on dérive l'équation caractéristique  $I$ - $V$  de la diode, on obtient :

$$\frac{dI}{dV} = \frac{q}{KT} I_s e^{\frac{qV}{KT}} = \frac{q}{KT} (I + I_s) \Rightarrow R_d = \frac{dV}{dI} = \frac{q}{I + I_s} \frac{KT}{q}$$

Comme  $I_s$  est négligeable devant  $I$ ,  $R_d = \frac{dV}{dI} = \frac{KT}{q} = \frac{0.026[V]}{I[A]} = \frac{26[mV]}{I[mA]}$  à  $T=300^\circ K$

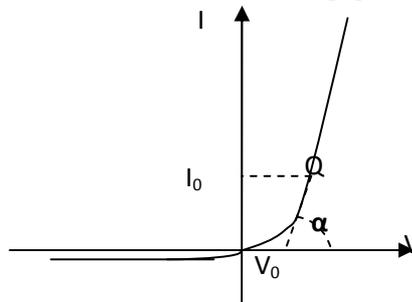


Figure III.12 : Détermination de la résistance dynamique de la diode graphiquement

Graphiquement, la résistance est définie par l'inverse de la tangente de la courbe caractéristique  $I$ - $V$  de la diode au point de fonctionnement  $Q$ . de la figure III.12, la résistance dynamique est définie

comme :  $R_d = \frac{I}{tg \alpha}$

**III.2.4 Schéma équivalent à une diode**

Dans un circuit électronique, la diode peut être s'exprimée seulement en deux états : bloqué ou passant. Alors, il est intéressant de remplacer chacune de ces diodes selon leurs états par un circuit équivalent.

**a. Etat bloqué :**

A l'état bloqué ( $V_{KA} \leq V_d$  :  $V_{KA} \leq 0V$  pour le cas d'une diode idéale et  $V_{KA} \leq 0.7V$  pour le cas d'une diode parfaite ou réelle), la diode sera remplacée par une résistance  $R_i$  de grande valeur. Alors, elle se comporte comme un interrupteur ouvert.

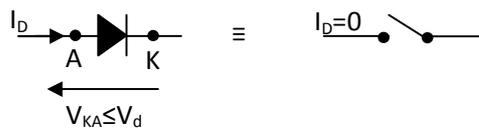


Figure III.13 : Schéma équivalent de la diode (état bloqué)

**b. Etat passant :**

A l'état passant ( $V_{KA} > V_d$  :  $V_{KA} > 0V$  pour le cas d'une diode idéale et  $V_{KA} > 0.7V$  pour le cas d'une diode parfaite ou réelle), la diode peut être modélisée par différent modèle :

- **1<sup>er</sup> modèle** : (diode idéale) : La diode sera remplacée par une résistance  $R_i$  de très faible valeur. Alors, elle se comporte comme un interrupteur fermé.
- **2<sup>ème</sup> modèle** : (diode parfaite) : La diode sera remplacée par un générateur de f.e.m  $V_d = 0.7V$ , seuil de la diode.
- **3<sup>ème</sup> modèle** : (diode réelle) : La diode sera remplacée par un générateur de f.e.m  $V_d$ , en série avec une résistance  $R_d$  de quelque Homs  $\equiv \frac{I}{tg\alpha}$ .

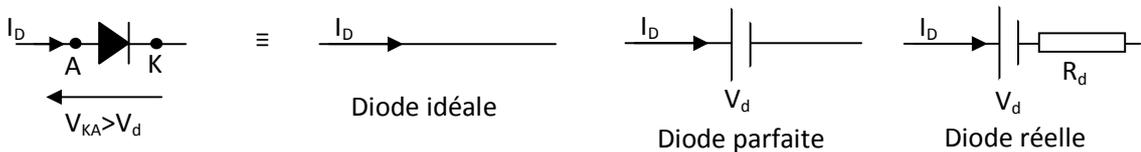


Figure III.14 : Schéma équivalent de la diode (état passant)

**III.3 Les applications des diodes :**

**III.3.1 Redressement simple alternance**

Le redressement est la conversion d'un signal bipolaire en un signal unipolaire. Il est défini 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 (figure III.15)
- Eliminer la partie positive et à laisser passer que la partie négative d'un signal alternatif (figure III.16)

Le principe de fonctionnement est illustré par le chronogramme des figures III.15 et III.16, où la diode utilisée est supposée idéale.

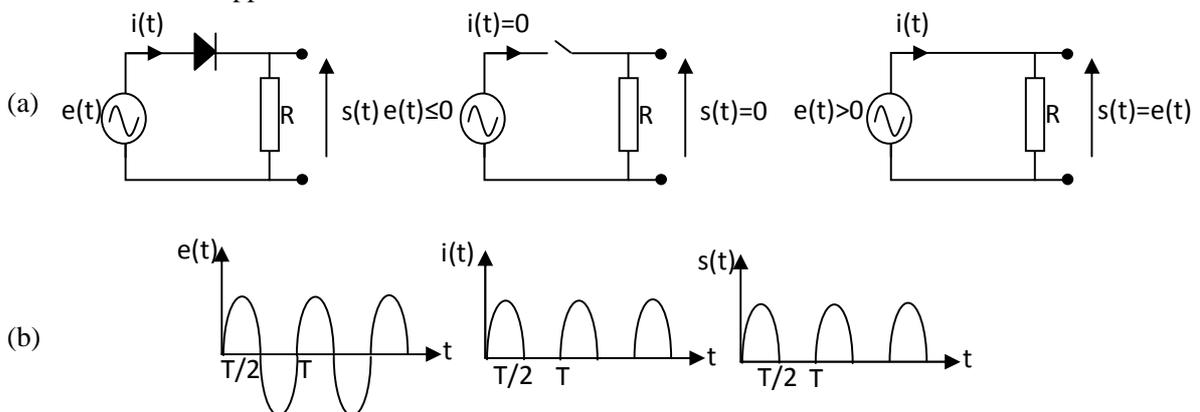


Figure III.15 : Redressement simple alternance (positive) : (a) circuit de base, schéma équivalent (b) chronogramme

La figure III.15 montre comment l'alternance négative est supprimée. Alors, on est passé d'un signal bipolaire à un signal unipolaire positif.

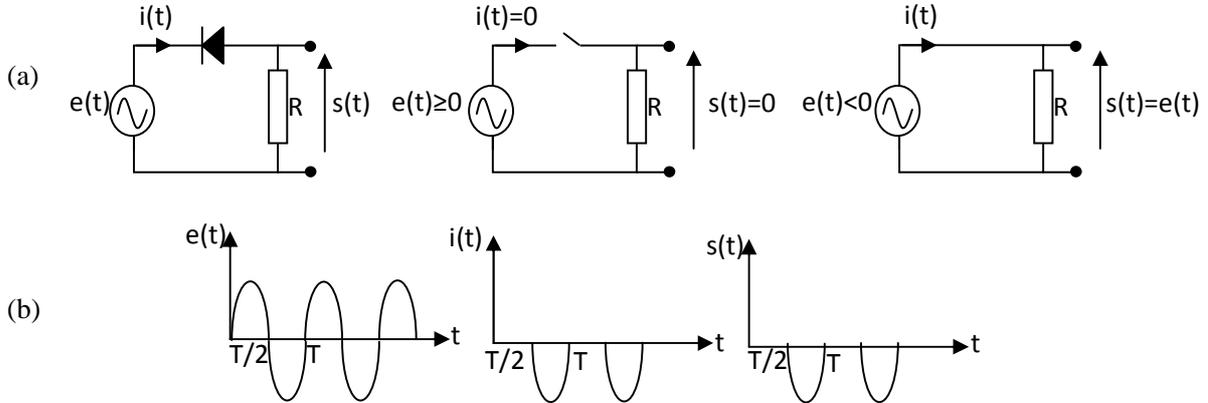


Figure III.16 : Redressement simple alternance (négative) : (a) circuit de base, schéma équivalent (b) chronogramme

La figure III.16 montre comment l'alternance négative est supprimée. Alors, on est passé d'un signal bipolaire à un signal unipolaire positif.

**Remarque :**

Dans le cas d'une diode parfaite ou réelle, cette diode ne peut conduire qu'à partir d'une tension de seuil  $V_\sigma$ , 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.

**III.3.2 Redressement double alternance**

Le redressement double alternance utilise un pont à quatre diodes D1, D2, D3 et D4. L'application d'une tension sinusoïdale à l'entrée du circuit de redressement permet d'obtenir un signal où l'alternance positive est restituée telle quelle, alors que la polarité de l'alternance négative est inversée.

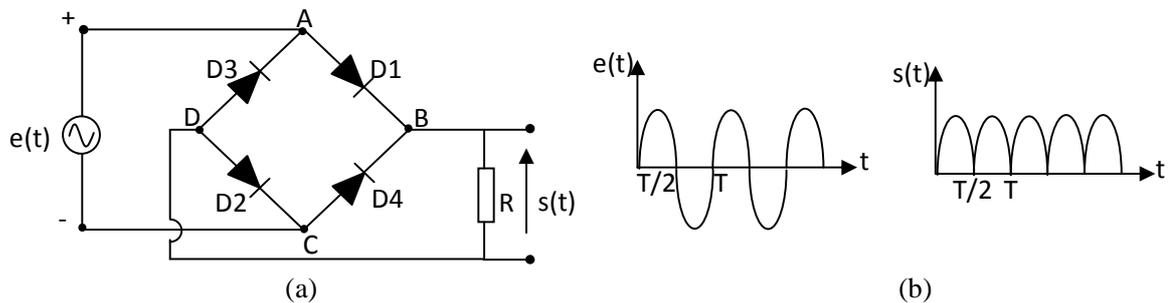


Figure III.17 : Redressement double alternance: (a) circuit à pont de diodes (b) chronogramme

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 (-) (figure III.17). 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 III.17 à celui schématisé à la figure III.18. De ce fait l'alternance positive est restituée à la sortie.

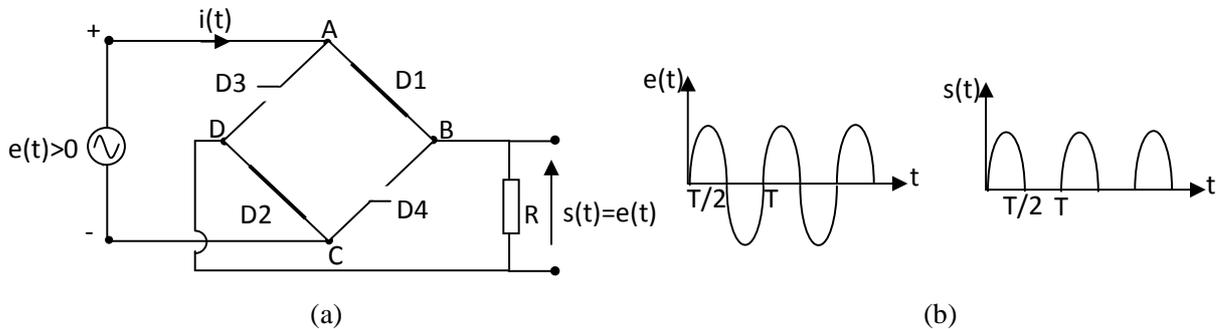


Figure III.18 : Restitution de l'alternance positive à la sortie (a) schéma équivalent (b) chronogramme

- Lorsque la tension d'entrée est négative, un courant négatif sort par la borne (-) et entre par la borne (+) (figure III.17). Ce qui provoque la conduction de D3 et D4 et le blocage de D1 et D2. Alors, on peut réduire le circuit de la figure III.17 à celui schématisé à la figure III.19. De ce fait l'alternance négative est inversée à la sortie.

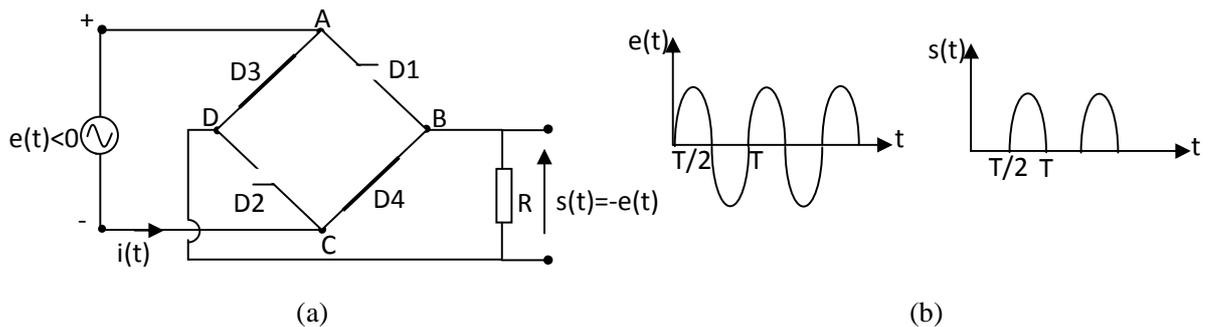


Figure III.19 : Inversion de l'alternance négative à la sortie (a) schéma équivalent (b) chronogramme

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

**Remarque :**

*Si on désire avoir une tension continue négative il suffit simplement de prendre la borne (+) comme référence*

**III.3.3 Ecrêtage**

La diode est un composant capable d'éliminer une partie positive ou une partie négative d'un signal. Par exemple, si on veut écrêter un signal sinusoïdal à deux niveaux donnés, on doit utiliser le circuit de la figure III.20. On peut régler les deux niveaux de tension  $V1$  et  $V2$  de telle sorte, l'amplitude du signal qui va être écrêté, soit supérieure à  $V1$  et  $V2$  pour que le circuit puisse fonctionner correctement.

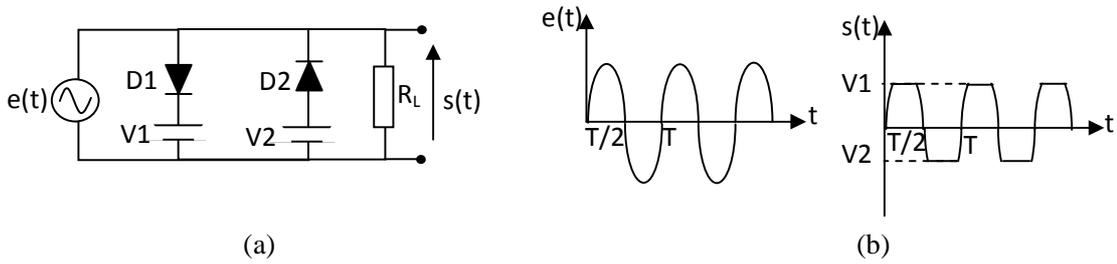


Figure III.20 : Ecrêtage d'un signal sinusoïdal à deux niveaux (a) circuit d'écrtage (b) chronogramme

Dans le circuit de la figure III.20,

- Lorsque la tension d'entrée  $e(t)$  est positive,  $s(t)$  ne prendra que les valeurs de la partie positive du signal  $e(t)$  alors que sa partie négative est écrêtée au niveau de la tension  $V2$ .  
De même, lorsque la tension d'entrée  $e(t)$  est négative  $s(t)$  ne prendra que les valeurs de la partie négative du signal  $e(t)$  alors que sa partie positive est écrêtée au niveau de la tension  $V1$ .

Finalement on obtient le signal de sortie  $s(t)$  de la figure III.20b.

### III.3.4 Détecteur de crête

Le détecteur de crête est un circuit à diode qui permet de rechercher la valeur maximale ou la crête d'un signal électrique et non pas sa forme.

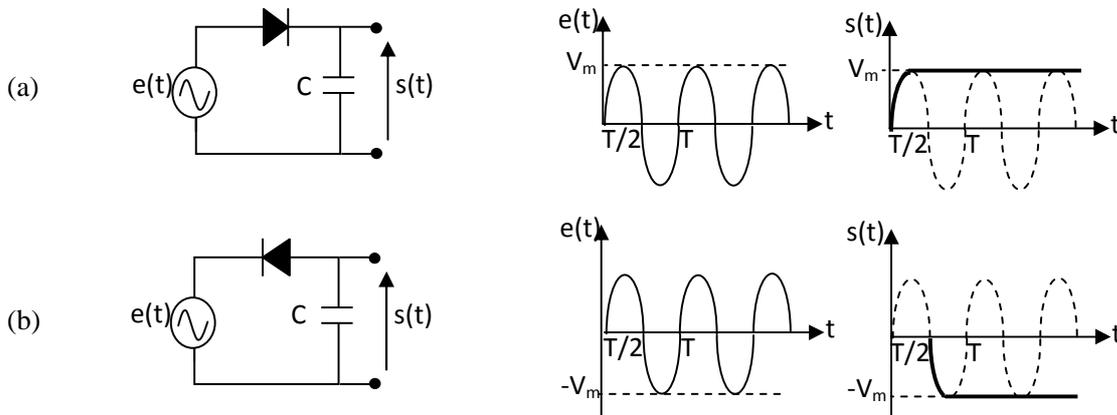


Figure III.21 : Détecteur de crête (a) crête positive, chronogramme (b) crête négative, chronogramme

Les circuits dans la figure III.21, permettent de détecter la crête positive et la crête négative respectivement comme suit :

- Au cours de l'alternance positive du signal d'entrée  $e(t)$ , la diode  $D$  est en état passant. Alors, le condensateur  $C$  se charge très rapidement et atteint à  $T/4$  la valeur  $V_m$  (crête positive de  $e(t)$ ). Au delà de  $T/4$ ,  $e(t)$  reste toujours inférieur ou égale à la tension de charge  $C$  se qui maintient la diode  $D$  bloquée.
- Au cours de l'alternance positif du signal d'entrée  $e(t)$ , la diode  $D$  est bloquée. Alors, le condensateur  $C$  reste déchargé. A  $T/2$ , le condensateur  $C$  commence à se charger et atteint à  $3T/4$  la valeur  $-V_m$  (crête négative de  $e(t)$ ). Au delà de  $3T/4$ ,  $e(t)$  reste toujours supérieur ou égale à la tension de charge  $C$  se qui bloque la diode  $D$ .

Finalement, les signaux de sortie  $s(t)$  de la figure III.21, montrent qu'une fois la diode devient passante, le condensateur commence à se charger jusqu'à il atteint une valeur crête (positive ou négative). Par contre, lorsque la diode se bloque, le condensateur conserve sa charge qui correspond à la valeur maximale du signal  $e(t)$ .

### III.3.5 Circuit de restauration

Ce circuit est appelé aussi circuit d'alignement. Il permet de rajouter des composantes continues positives ou négatives à des signaux alternatifs.

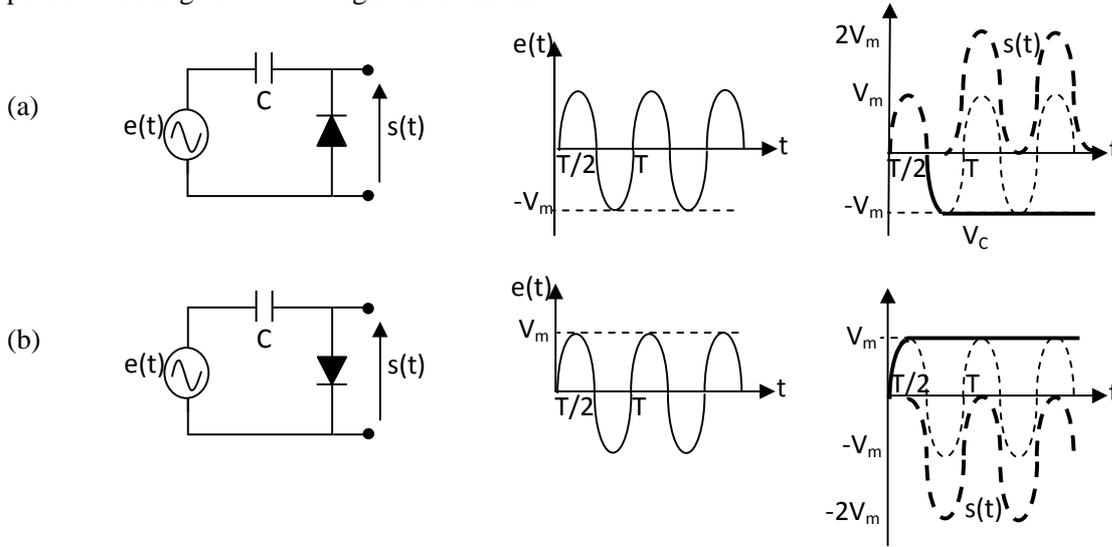


Figure III.22 : Circuit de restauration (a) positive, chronogramme (b) négative, chronogramme

Les circuits dans la figure III.22, représentent les circuits de restauration de composante positive et négative. Ils fonctionnent selon le même type comme suit :

- Au cours de l'alternance négative du signal d'entrée  $e(t)$ , la diode  $D$  est passante. Alors le condensateur  $C$  va se charger et atteint à  $3T/4$  la crête négative  $V_C = -V_m$ . Au delà de  $3T/4$ ,  $e(t)$  reste toujours supérieur ou égale à la tension de charge  $C$ , c-à-d, la diode  $D$  reste toujours bloquée. A cet instant, le signal de sortie  $s(t)$  est obtenu par la soustraction de  $-V_m$  à  $e(t)$  :  $s(t) = e(t) + V_m$ .
- Au cours de l'alternance positive du signal d'entrée  $e(t)$ , la diode  $D$  est passante. Alors le condensateur  $C$  va se charger et atteint à  $T/4$  la crête positive  $V_C = V_m$ . Au delà de  $T/4$ ,  $e(t)$  reste toujours inférieur ou égale à la tension de charge  $C$ , c-à-d, la diode  $D$  reste toujours bloquée. A cet instant, le signal de sortie  $s(t)$  est obtenu par la soustraction de  $V_m$  à  $e(t)$  :  $s(t) = e(t) - V_m$ .

On constate que la composante continue ajoutée au signal d'entrée représente la valeur de crête du signal  $e(t)$  positive  $V_m$  ou négative  $-V_m$ , par conséquent, le signal de sortie  $s(t)$  obtenu est aligné avec l'axe des temps et peut être déterminé par la relation :  $s(t) = e(t) - V_C$

### III.3.6 Multiplicateur de tension.

Un multiplicateur de tension est un circuit à base de diodes qui permet de produire en sortie une tension continue, multiple de l'amplitude du signal d'entrée.

Selon le nombre de cellule de base (diode-condensateur), on peut citer trois types de multiplicateur de tension : Doubleur de tension (constitué de deux cellules), Tripleur de tension (constitué de trois cellules) et Quadrupleur de tension (constitué de quatre cellules).

Pour bien comprendre le fonctionnement de ces circuits, on prend le doubleur de tension comme un exemple d'étude puis on déduit le cas du tripleur et du quadrupleur de tension.

**a. Doubleur de tension**

Le doubleur de tension est un circuit à deux diodes, constitué d'un circuit de restauration suivi par un détecteur de crête. Le premier (condensateur -diode) a pour objet d'aligner le signal d'entrée  $e(t)$  avec l'axe du temps, le deuxième (diode-condensateur), de détecter la crête du signal de sortie  $s_1(t)$  du premier circuit.

Donc, le signal de sortie  $s(t)$  obtenu est un signal continu égal à l'amplitude crête à crête du signal d'entrée où son signe dépend du montage utilisé comme l'indique la figure III.23

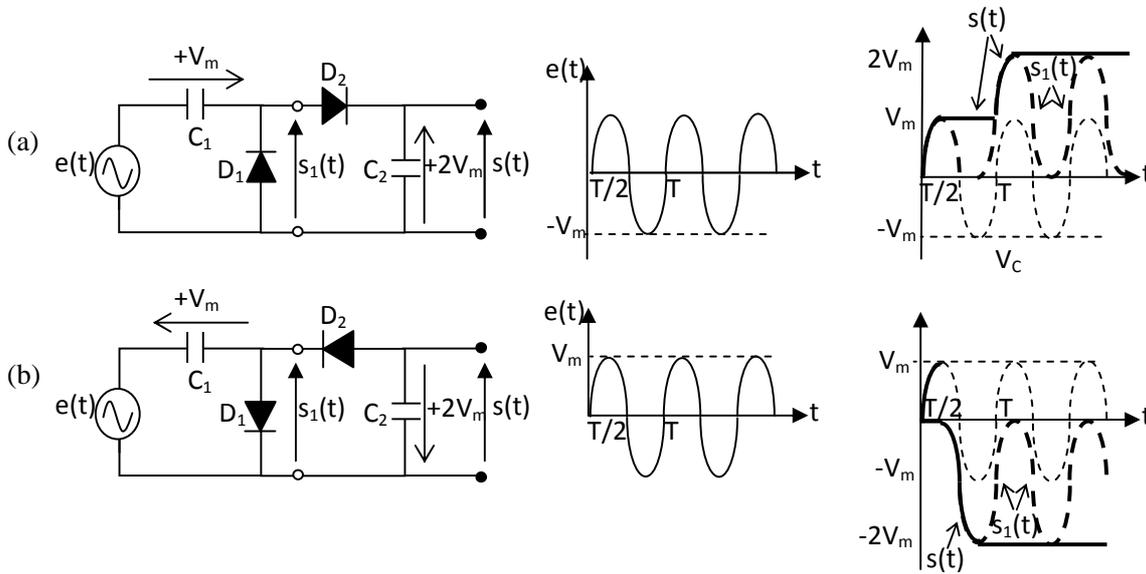


Figure III.23 : Doubleur de tension (a) positive, chronogramme (b) négative, chronogramme

Les circuits dans la figure III.23, représentent un doubleur de tension de composante (a) positive et (b) négative. Le fonctionnement de ce dispositif est basé sur l'emploi adéquat des circuits de restauration de la composante continue:

**Tripleur est quadrupleur de tension**

Pour passer du circuit doubleur à un tripleur, et du tripleur à un quadrupleur, on doit ajouter à chaque fois un circuit élémentaire (diode-condensateur). Les figures ci-dessous montrent respectivement un tripleur et un quadrupleur de tension.

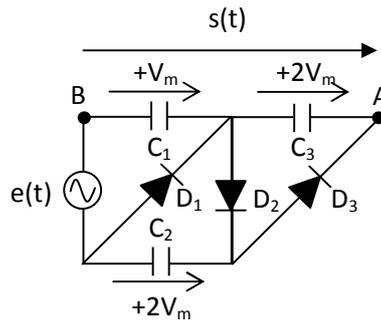


Figure III.24 : Tripleur de tension

- Au cours de l’alternance négative du signal d’entrée  $e(t)$  en série avec la composante continue  $+2V_m$  de la capacité  $C_2$ , la capacité  $C_3$  se charge à travers la diode  $D_3$  et atteint la crête positive  $V_{C3}=+2V_m$ . Au-delà de cet instant, toutes les diodes se bloquent et les capacités conservent leurs charges respectives. Le signal de sortie  $s(t)$  qui représente le triple de la crête positive de  $e(t)$  est prélevé entre les nœuds  $A$  et  $B$  tel que :  $s(t)=V_{AB}=+3V_m$ .

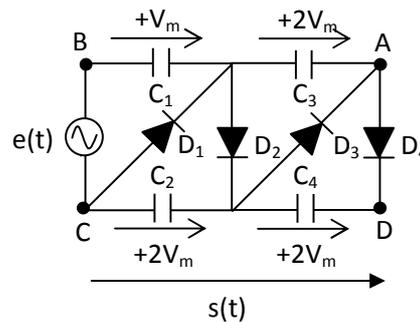


Figure III.25 : Quadrupleur de tension

- Au cours de l’alternance positive du signal d’entrée  $e(t)$  en série avec la composante continue  $+V_m$  de la capacité  $C_1$  et la composante continue  $+2V_m$  de la capacité  $C_3$ , la capacité  $C_4$  se charge à travers la diode  $D_4$  et atteint la crête positive  $V_{C4}=+2V_m$ . Au-delà de cet instant, toutes les diodes se bloquent et les capacités conservent leurs charges respectives. Le signal de sortie  $s(t)$  qui représente le quadruple de la crête positive de  $e(t)$  est prélevé entre les nœuds  $D$  et  $C$  tel que :  $s(t)=V_{DC}=+4V_m$ .

**Remarque :**

si on désire avoir un signal de sortie dont le triple ou le quadruple de la crête de  $e(t)$  est négative, il suffit simplement d’inverser les bornes du signal de sortie tel que :  $s(t)=V_{BA}=-3V_m$  (cas du tripleur)  $s(t)=V_{CD}=-4V_m$  (cas du quadrupleur) ou bien d’inverser le sens des diodes dans les circuits tripleur et quadrupleur de tension pour obtenir  $s(t)=V_{AB}=-3V_m$  (cas du tripleur)  $s(t)=V_{DC}=-4V_m$  (cas du quadrupleur).

### III.4 Stabilisation de la tension par la diode Zener.

#### III.4.1 Diode Zener :

La diode Zener est une diode à jonction PN exploitée en inverse où le phénomène de claquage par effet du champ ou d'avalanche est avantageux.

On peut citer trois catégories de diode Zener :

- Diode basse tension (pratiquement <5Volt), on dit que l'effet Zener est prédominant ou le claquage est obtenu par effet du champ.
- Diode moyenne tension (pratiquement de 5Volt à 7Volt), on dit que le claquage est obtenu par la combinaison des effets du champ et d'avalanche.
- Diode haute tension (pratiquement >7Volt), on dit que l'effet avalanche est prédominant ou le claquage est obtenu par effet d'avalanche.

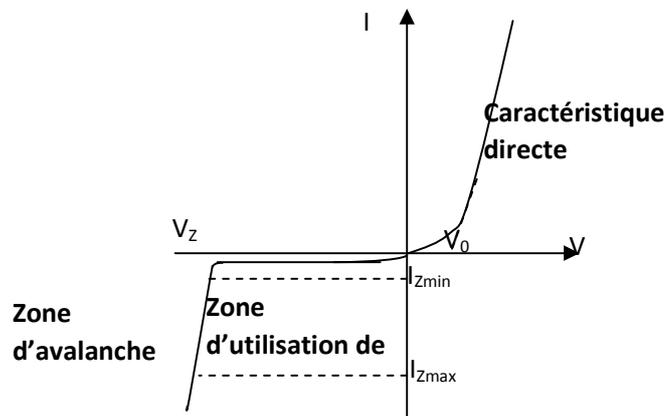


Figure III.26 : Caractéristique de la diode Zener

La diode Zener est conçue pour présenter, dans sa caractéristique inverse, une zone de « claquage contrôlé », dans laquelle le courant inverse augmente brusquement sans augmentation significative de la tension et sans endommager la diode.

Alors, pour ne pas détruire la diode et pour pouvoir exploiter le phénomène de Zener, il suffit de limiter le courant inverse dans un intervalle bien déterminé.

Le courant limite inférieur  $I_{min}$  permet de déterminer la valeur du courant  $I_Z$  pour laquelle la diode présente entre ses bornes la tension de Zener  $V_Z$ . Le courant limite supérieur  $I_{max}$  permet de déterminer la valeur maximale du courant que la diode peut supporter.

La diode Zener peut être modélisée par le 3<sup>ème</sup> modèle linéaire, présenté ci-dessous :

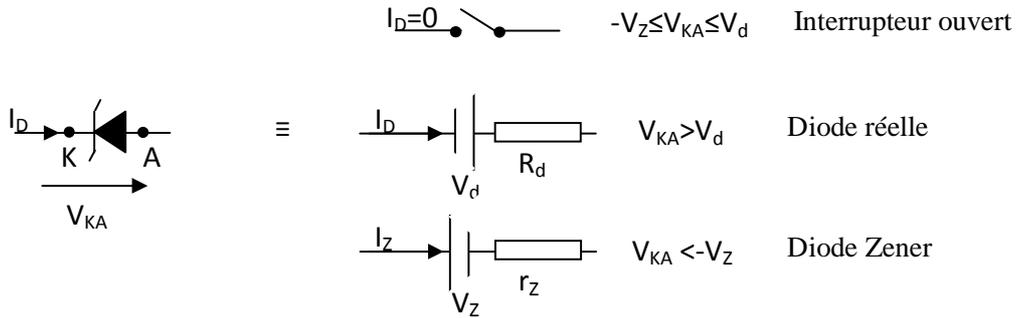


Figure III.27 : Schéma équivalent de la diode Zener

### III.4.2 Principe de 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 quelque soit le courant qui la traverse.

Selon la caractéristique représentée dans la figure III.26, on peut constater que un courant maintenu entre  $I_{Zmin}$  et  $I_{Zmax}$  la diode Zener peut être utilisé comme un stabilisateur de tension.

Dans le circuit de la figure III.28, la diode  $D_Z$  permet de fixer la tension de sortie à une valeur souhaitée pour la charge  $R_C$ . on considère le courant qui traverse la diode Zener  $I_Z$  satisfait la condition  $I_{Zmin} < I_Z < I_{Zmax}$  pour que la tension  $V$  soit constante et égale à  $V_Z$ .

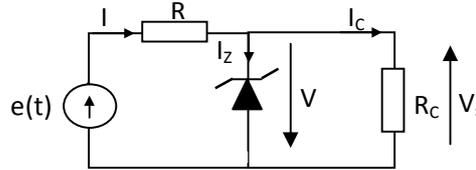


Figure III.28 : Stabilisation de la tension par la diode Zener

De la même manière, l'état de la diode se fait comme la diode normale, on calcul premièrement la tension  $V = V_{KA}$  de la diode Zener lorsqu'elle est déconnectée.

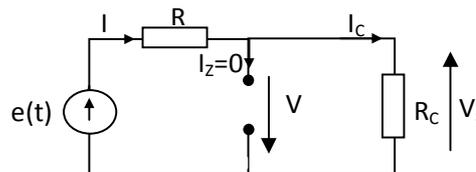


Figure III.29 : Etat de la diode Zener

En appliquant le diviseur de tension, on trouve :  $V = V_{KA} = -\frac{R_C}{R_C + R} e(t)$

Pour que la diode Zener fonctionne en mode stabilisation de tension, les deux conditions doivent être satisfaites :

$$V < -V_Z \Rightarrow -\frac{R_C}{R_C + R} e(t) < -V_Z \Rightarrow e(t) > \frac{R_C + R}{R_C} V_Z$$

Donc, la diode Zener est au claquage et peut être remplacée par une source de tension  $V_Z$  et une résistance Zener  $r_Z$  (cas réel). Dans le cas idéal  $r_Z$  tend vers à 0 ( $r_Z=0$ ). Le schéma équivalent est donné dans la figure III.30 :

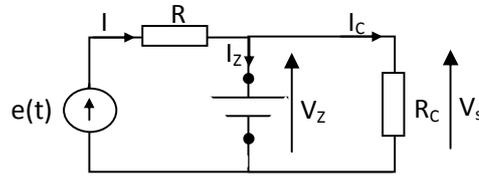


Figure III.30 : Schéma équivalent de la diode Zener au claquage

En appliquant la loi des mailles :  $V_s = V_Z$

$I_{Zmin} < I_Z < I_{Zmax}$ , avec  $I_Z = \frac{e(t) - V_Z}{R} - \frac{V_Z}{R_C}$ , pour cela on envisage deux cas d'étude pour déterminer la résistance série R.

- **1<sup>er</sup> cas :  $E_{min} \leq e(t) \leq E_{max}$  et  $R_C$  fixe**

Dans ce cas, lorsqu'il y a une stabilisation, le courant  $I_C$  reste constant puisque  $R_C$  constant. Cependant, le courant total  $I$  varie suivant la variation de  $e(t)$ .

- Si  $e(t)$  diminue,  $I$  diminue et  $I_Z$  diminue.
- Si  $e(t)$  augmente,  $I$  augmente et  $I_Z$  augmente.

De ce fait, la résistance série  $R$  doit être déterminée suivant la condition (b) comme suit :

$$I_{Zmin} < \frac{E_{min} - V_Z}{R} - \frac{V_Z}{R_C} \quad I_{Zmax} > \frac{E_{max} - V_Z}{R} - \frac{V_Z}{R_C} \Rightarrow R < \frac{E_{min} - V_Z}{V_Z + R_C I_{Zmin}} R_C \quad R > \frac{E_{max} - V_Z}{V_Z + R_C I_{Zmax}} R_C$$

- **2<sup>ème</sup> cas :  $R_{Cmin} \leq R_C \leq R_{Cmax}$  et  $e(t)$  fixé à E :**

Dans ce cas, lorsqu'il y a une stabilisation, le courant total  $I$  reste constant puisque  $e(t)$  constant. Cependant, le courant  $I_C$  varie suivant la variation de  $R_C$ .

- Si  $R_C$  diminue,  $I_C$  diminue et  $I_Z$  diminue.
- Si  $R_C$  augmente,  $I_C$  augmente et  $I_Z$  augmente.

De ce fait, la résistance série  $R$  doit être déterminée suivant la condition (b) comme suit :

$$I_{Zmin} < \frac{E - V_Z}{R} - \frac{V_Z}{R_{Cmin}} \quad I_{Zmax} > \frac{E - V_Z}{R} - \frac{V_Z}{R_{Cmax}} \Rightarrow R < \frac{E - V_Z}{V_Z + R_{Cmin} I_{Zmin}} R_{Cmin} \quad R > \frac{E - V_Z}{V_Z + R_{Cmax} I_{Zmax}} R_{Cmax}$$

### III.4.3 Protection par diode Zener

La diode Zener peut être exploitée comme un élément essentiel de protection des circuits dû à sa tension inverse qui ne dépasse pas une valeur donnée. Si en monte la diode Zener en parallèle avec le circuit de charge, la tension aux bornes de ce dernier ne dépasse pas un seuil correspond à la tension Zener de la diode.

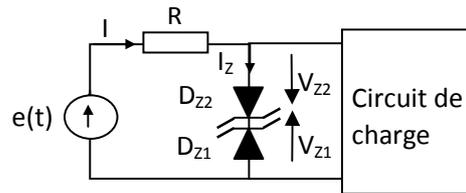


Figure III.31 : Circuit de protection par la diode Zener

La figure III.31 montre que la tension d'entrée  $e(t)$  est limitée à  $+V_{z1}$  et  $-V_{z2}$  au cours de son l'alternance positive et négative respectivement. Cependant, l'alternance positive de  $e(t)$  est écrêtée à  $+V_{z1}+V_d$  et l'alternance négative est écrêtée à  $-V_{z2}-V_d$  où  $V_d$  représente le seuil de la diode réelle polarisé en directe.

### III.5 Autres types de diodes :

#### III.5.1 Diodes Varicap (diodes à capacité variable):

La diode Varicap est une diode à jonction polarisée en inverse. Elle est équivalente à une capacité variable en fonction de la tension inverse appliquée. Grâce à ce type de diode, on peut réaliser une capacité variable commandée par une tension où la valeur de la capacité ne peut dépasser quelques 100 pF. Ces diodes sont utilisées dans les oscillateurs à hautes fréquences (à partir de 100 MHz). En outre, la diode Varicap peut être utilisée par exemple pour régler la fréquence de résonance d'un capteur (circuit RLC) de signaux radiofréquences de l'IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) en agissant sur la tension de commande.

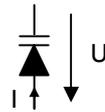


Figure III.32: Symbole d'une diode Varicap

#### III.5.2 Diode électroluminescente : LED

Les diodes électroluminescentes sont des diodes à jonction polarisées en direct. Elles peuvent émettre de la lumière avec différentes couleurs. La longueur d'onde de la lumière émise dépend du semi-conducteur utilisé dans la fabrication de la diode (particulièrement le Gap) et par fois de la tension appliquée sur la diode et/ou du courant. On distingue généralement: les diodes infrarouges qui émettent dans l'infrarouge (longueur d'onde autour de  $1\mu\text{m}$ ) et les diodes qui émettent de la lumière visible; lumière rouge, vert, bleue).

Ces dernières sont largement utilisées dans les afficheurs numériques des instruments de mesure ou des appareils domestiques par exemple : l'afficheur à 7 segments qui transforme un signal électrique en un signal optique. En outre, elles peuvent être utilisées pour la transmission par fibre optique par exemple : télécommandes infrarouges.

La caractéristique directe de la diode Electroluminescente ressemble à celle d'une diode classique, mais la seule différence réside dans la valeur de la tension de seuil. Par exemple : la DEL rouge a une tension de seuil de 1.6V à 2V où la DEL bleu a une tension de seuil peu élevée de 3.5V à 3.8V. En plus

des diodes électroluminescentes unicolores, il existe des diodes multicolores à deux ou à trois broches : bicolores et tricolore.

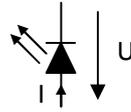


Figure III.33: Symbole d'une diode électroluminescente

### III.5.3 Photodiode

La photodiode fonctionne en polarisation inverse. Elle fournit un courant inverse  $I$  qui dépend de l'éclairement incident. Cette diode réalise la fonction inverse d'une LED. Une des applications majeures de la photodiode est la conversion d'un signal optique, par exemple : fourni par une fibre optique en un signal électrique, par exemple : récepteur des télécommandes infrarouges.

De ce fait, le circuit est dit un capteur de lumière qui se comporte comme un générateur de courant contrôlé par la lumière. Dû à la faiblesse du courant délivré par les photodiodes, elles ne sont jamais utilisées seules. Donc, elles ont besoin de les associer avec un amplificateur qui est généralement intégré à la même puce.

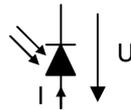


Figure III.34: Symbole d'une photodiode

### III.5.4 Diode Schottky

Dans les diodes Schottky, la jonction p/n est remplacée par la jonction d'un métal avec un semi-conducteur peu dopé de type n. le métal est de l'or, l'argent, le platine, le Titanium ou le Paladium. La jonction est conductrice lorsque la diode est polarisée en directe. Elle fonctionne comme une diode classique, ses caractéristiques principales sont :

- Une tension de seuil  $V_s$  faible ( $V_s = 0.3$  V).
- Un temps de commutation (le passage de l'état passant à l'état bloqué et inversement) très faible (de l'ordre de 10 ns)
- Une capacité beaucoup plus faible.

Elle est surtout utilisée dans les applications de commutation où le temps de commutation est critique comme dans les applications à hautes fréquences (à partir de 1 MHz).

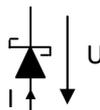


Figure III.35: Symbole d'une diode Schottky

### III.5.5 Diodes PIN (P-Isolant-N)

Une diode PIN est une diode constituée d'une zone intrinsèque, développée entre deux zones dopées p et n. lorsque la diode PIN est polarisée dans le sens direct (passante), elle offre une impédance dynamique extrêmement faible. Par contre, lorsqu'elle est polarisée dans le sens inverse (bloquée), elle offre une très grande impédance et une très faible capacité de quelques picofarads. Pour des fréquences supérieures à 1MHz, la diode PIN peut fonctionner comme un interrupteur dont l'ouverture et la fermeture sont commandées par un courant continu. Alors, ce type de diode est dit diode de commutation rapide, elle peut être utilisée pour les signaux de hautes fréquences.

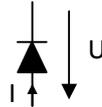


Figure 36: Symbole d'une diode PIN