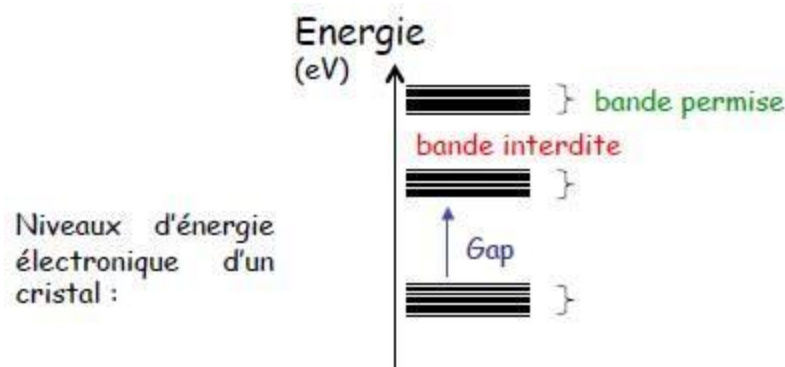


# CHAPITRE 3 : LES DIODES

## 1. Notions sur la théorie des bandes d'énergie :

### Définition :

Si on prend plusieurs atomes isolés et qu'on les rapproche pour former un édifice cristallin, les niveaux d'énergie vont se coupler pour former une succession de niveaux groupés en bandes d'énergie permises et des bandes interdites.



### Niveaux d'énergie dans les solides :

On distingue dans le réseau cristallin, dans le sens des énergies croissantes :

#### a) Bande de valence :

Elle est susceptible d'être occupée par les  $e^-$  de valence quand ils sont dans leur état d'énergie les plus faibles.

#### b) Bande interdite :

Où il n'y a aucun  $e^-$ . La largeur de la bande interdite appelée le **Gap**, joue un rôle dans les propriétés électriques des matériaux.

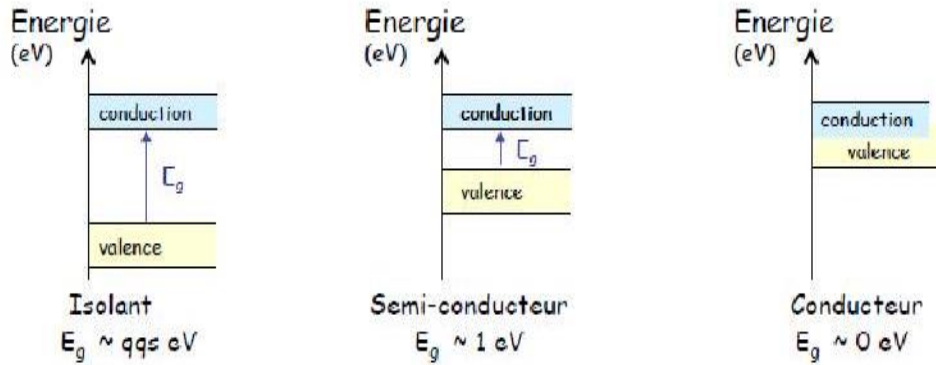
#### c) Bande de conduction :

Qui est susceptible d'être occupée par des  $e^-$  qui ont une énergie suffisante pour s'arracher à l'attraction du noyau.

-Si cette bande est vide on dit que le matériau est un isolant, sa largeur de BI est quelques eV.

-Si la bande de conduction est partiellement occupée, le matériau est appelé semi conducteur, son GAP est faible.

-Si le gap est très faible, le matériau est un conducteur.



## 2.Semi conducteurs :

### Définition

Le semi-conducteur est un composé solide, qui peut conduire l'électricité dans certaines conditions mais pas dans d'autres, ce qui en fait un bon moyen de contrôler un courant électrique.

### Semi conducteur intrinsèque :

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur pur (avant dopage) comme par exemple le Silicium (Si). Il est mauvais conducteur. Il contient autant d'électrons libres que de trous (un trou est un manque d'électron).

### Semi conducteur extrinsèque :

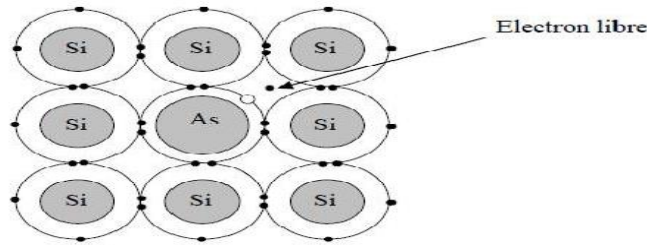
Un s.c extrinsèque (impur) est obtenu en ajoutant certains éléments étrangers dans le s.c pur, pour augmenter de façon importante le nombre de porteurs de charge mobile, cette opération est appelée « dopage ».

### Dopage :

L'addition d'impuretés dans le SC Intrinsèque (pur), ce procédé appelé dopage, augmente le nombre de porteurs de courant (électrons et trous). Les deux catégories d'impuretés sont le type N et le type P.

#### a) S.C de type N :

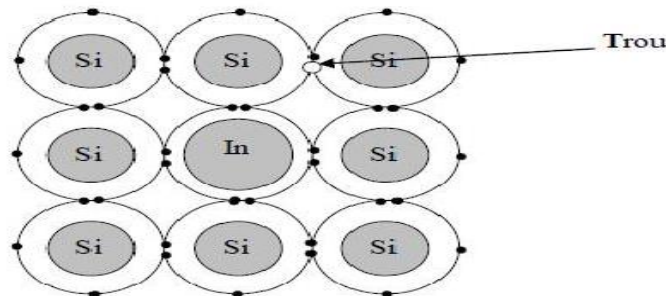
On dope le cristal intrinsèque avec des éléments ayant un  $e^-$  de valence de plus : on peut doper du Si ( $4e^-$ ) avec le phosphore (P), l'arsenic (As) qui possède  $5 e^-$  (atomes donneurs).  $4 e^-$  vont faire des liaisons covalentes avec les atomes de Si environnants, et les  $5 e^-$  sera un  $e^-$  libre, tous ces  $e^-$  libres seront les porteurs majoritaires. Il existera encore quelques trous, mais en très faible quantité.



**b) S.C de type P :**

On dope le cristal intrinsèque avec un élément possédant un nombre inférieur d'électrons de valence : on peut doper du silicium (4 électrons de valence) avec du Bore, de l'indium, du Gallium ou de l'Aluminium qui possèdent 3 électrons de valence(atome accepteur).

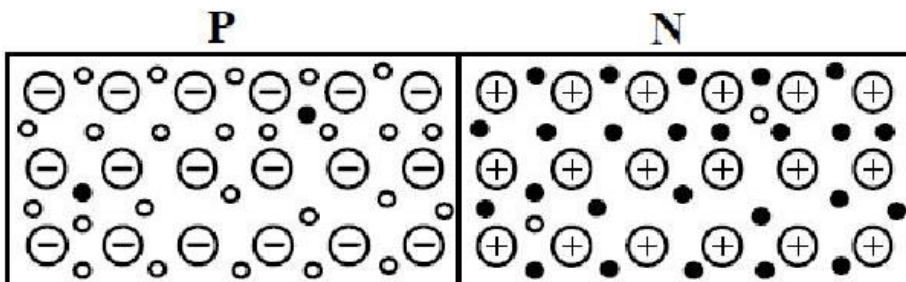
Ces atomes vont prendre la place d'atomes de silicium dans le cristal. Comme ils possèdent 1 électron de valence en moins, il va se créer des trous dans le semi- conducteur. Les trous deviennent porteurs de charges mobiles majoritaires : le semi conducteur est de type P. Il subsistera quelques électrons libres dans le cristal (porteurs minoritaires)



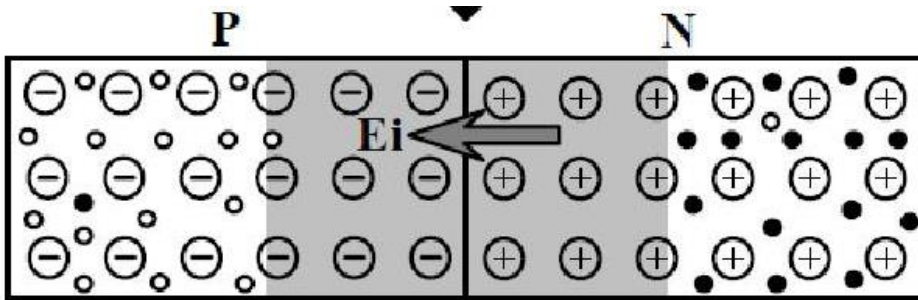
**3.La jonction PN :**

**Constitution :**

La jonction PN st obtenue par l'association d'un semi conducteur dopé N et d'un S.Cdopé P.



Après assemblage, il apparaît une zone dépourvue de porteurs libres au voisinage de la jonction.



Les trous du S.C de type P diffusent vers le SC de type N et réciproquement pour les  $e^-$  du S.C de type N. Il y a de nombreuses recombinaisons ce qui provoque la disparition des porteurs mobiles dans la zone centrale. Il ne reste que les ions fixes. C'est la zone de charge d'espace (ZCE).

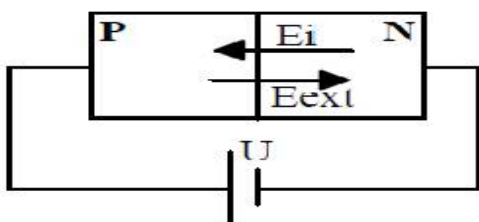
Les ions fixes de part et d'autre créent alors un champ électrique interne  $E_i$  qui s'oppose à la cause qui lui a donnée naissance c'est-à-dire la diffusion des porteurs majoritaires (force électrostatique en sens inverse) ce qui conduit à un état d'équilibre. Le champ interne crée une ddp entre la région N et La région P appelée **barrière de potentiel**.

**Jonction PN polarisée :**

**Jonction PN polarisée en direct :**

Si on applique à une jonction PN une différence de potentiel de telle manière : La borne de la région P est reliée à la borne (+) du générateur.

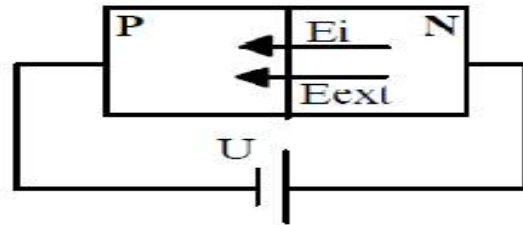
La borne de la région N est reliée à la borne (-) du générateur.



La source de tension  $V$  crée un champ électrique  $E$  externe qui s'oppose au champ interne  $E_{int}$ . Quand la source de tension atteint un seuil (0.3V pour le Ge et 0.7V pour le Si). Le champ externe devient plus grand que le champ  $E_{int}$  ce qui entraîne la diminution de la barrière de potentiel et l'accroissement de la diffusion des porteurs majoritaires.

### Jonction PN polarisée en inverse:

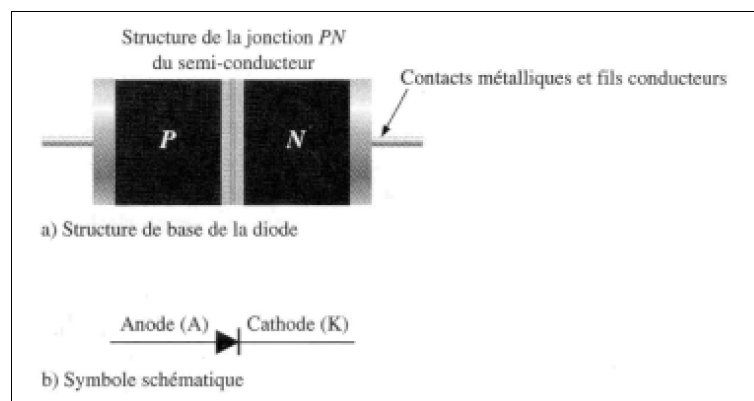
Les polarités de l'alimentation  $U$  sont cette fois-ci inversées (le pôle + est relié à N et le pôle (-) à P). Le champ électrique externe créé par la tension  $U$  renforce l'action du champ interne  $E_{int}$ . De ce fait les  $e^-$  et les trous ne peuvent diffuser d'une région à l'autre. Il y aura blocage de la jonction PN.



## 4. Théorie de la diode :

### 4.1 Constitution et fonctionnement d'une diode :

La diode d'usage général, ou diode utilisée comme redresseur de courant, est un composant à jonction PN simple muni de contacts conducteurs et de connexions à fils connectés sur chaque région. Une des moitiés de la diode est un semi-conducteur de type N et l'autre moitié est un semi-conducteur de type P. le symbole schématique de la diode est illustrée sur la figure la région N est la cathode et la région P est l'anode.



**Figure:** Structure de base de la diode et son symbole schématique.

#### 4.2 Schéma équivalent de la diode :

Plusieurs schémas équivalents simplifiés sont proposés :

##### a) Diode idéale :

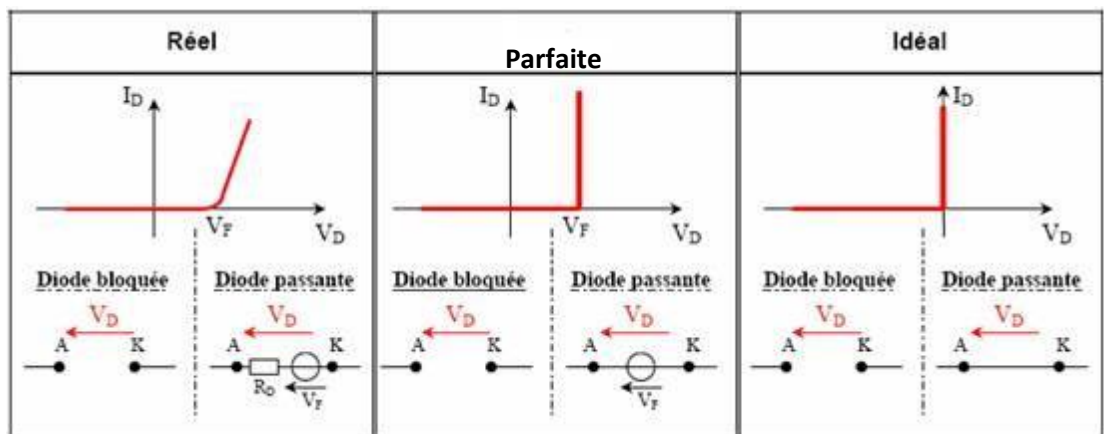
On néglige la tension de seuil et la résistance interne de la diode. La caractéristique est alors :

##### b) Diode parfaite (avec seuil) :

On néglige la résistance interne, mais tenir compte du seuil de la diode. La caractéristique devient :

##### c) Diode réelle :

Ici on prend en compte la résistance de la diode. Ceci peut être utile si on utilise la diode en petits signaux alternatifs et qu'on a besoin de sa résistance dynamique.



#### 4.3. polarisations directe et inverse :

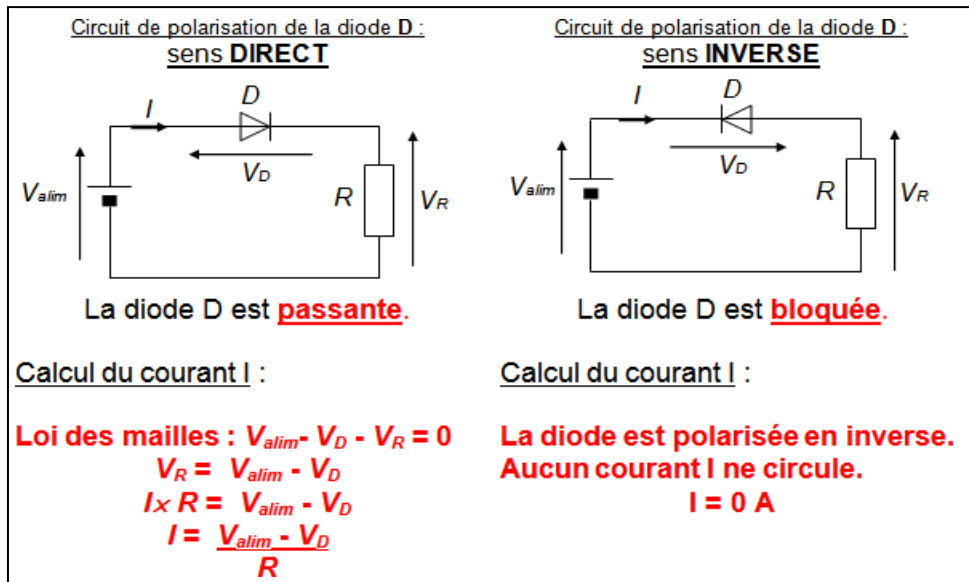
La discussion précédente au sujet de la polarisation d'une jonction PN s'applique aussi pour la diode puisque celle-ci est un composant à jonction PN.

##### Branchement de la polarisation directe :

Lorsqu'une source de tension est connectée tel que démontré à la figure. La borne positive de la source est connectée à l'anode à travers une résistance de limite de courant. La borne négative de la source est connectée à la cathode. Le courant ( $I$ ) passe de la cathode vers l'anode.

##### Branchement de la polarisation inverse :

Une diode est polarisée en inverse lorsqu'une source de tension est connectée tel que démontré à la figure. La résistance n'est pas nécessaire en polarisation inverse. Le courant est nul (en négligeant l'infime courant inverse). Notez que toute la tension de polarisation ( $V_{alim}$ ) apparaît aux bornes de la diode.



*Figure: Branchements de la diode pour la polarisation directe et la polarisation inverse.*

#### 4.4. Caractéristique courant-tension (I-V) :

##### -Caractéristique courant-tension en polarisation directe :

Nous avons vu qu'un courant traverse une diode (à base de jonction PN de Si) lorsqu'une tension de polarisation directe est appliquée à ses bornes. Ce courant avant s'appelle ( $I_D$ ). La résistance est utilisée pour limiter le courant avant afin de ne pas endommager la diode par une dissipation thermique excessive.

Lorsque la diode est à 0 V, il n'existe aucun courant avant, tel qu'illustré à la figure

3.15. A mesure que l'on augmente la tension de polarisation, le courant avant et la tension aux bornes de la diode augmentent graduellement. Une portion de la tension de polarisation appliquée se retrouve aux bornes de la résistance de limitation. Lorsque la tension aux bornes de diode atteint environ 0.7 V, le courant avant commence à augmenter rapidement.

Si l'on continue à augmenter la tension de polarisation, le courant continue de croître très rapidement, tandis que la tension aux bornes de la diode augmente très légèrement au-dessus de 0.7 V, cette faible augmentation est causée par la chute de tension aux bornes de la résistance dynamique du matériau semi-conducteur.

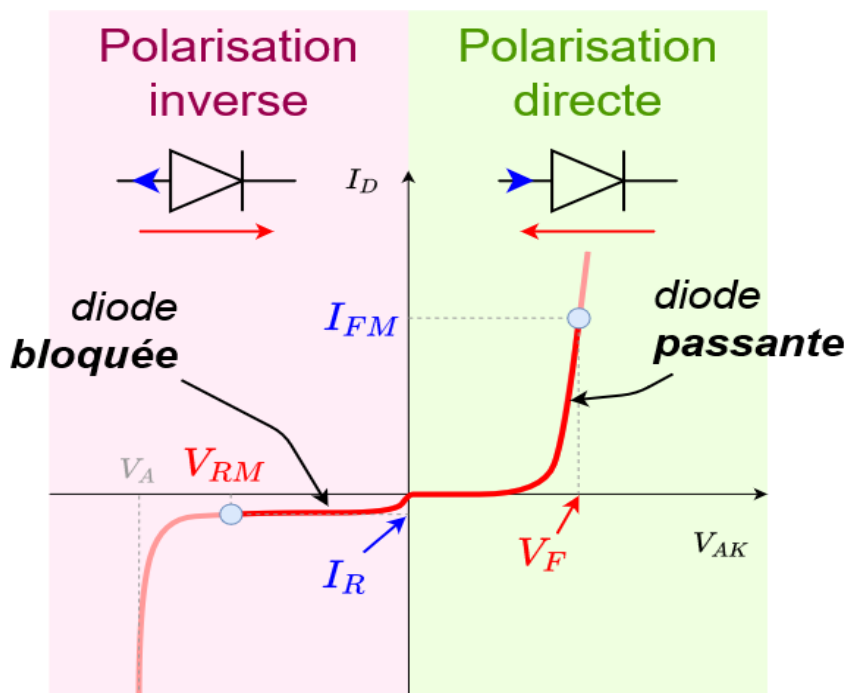
Comme nous pouvons le voir à la figure 3.15, le courant avant n'augmente que très peu tant que la tension aux bornes de la diode n'atteint pas environ 0.7 V au genou de la courbe.

### - Caractéristique courant-tension en polarisation inverse :

Lorsqu'une tension de polarisation inverse est appliquée sur une diode, il n'existe qu'un très faible courant inverse ( $I_D$ ).

Lorsque la tension sur la diode est de 0 V, il n'y a aucun courant inverse. A mesure que la tension négative augmente, il n'existe qu'un très faible courant inverse tandis que la tension aux bornes de la diode augmente (figure). Lorsque la tension est augmentée suffisamment et que la tension inverse aux bornes de la diode ( $V_{RM}$ ) atteint la valeur de claquage ( $V_A$ ), le courant inverse commence à augmenter rapidement.

Si l'on accroît encore la tension, le courant s'intensifie très rapidement tandis que la tension aux bornes de la diode surpasse à peine  $V_{RM}$ . Le claquage n'est pas un mode opérationnel normal pour la grande majorité des composants à jonction PN.



**Figure:** Courbe caractéristique I-V complète d'une diode



- $V_F$  (F pour *Forward*) : **tension de seuil**

*en pratique : de 0,3V à 0,7V*

- $V_{FM}$  : **tension directe Maximale**
- $I_{FM}$  : **courant direct Maximal**
- $V_{RM}$  : **tension inverse Maximale**

*en pratique : 100V à 1000V*

- $I_R$  : **courant inverse**

*en pratique : quelques  $\mu A$*

- $V_A$  est : **tension de *claquage* ou d'*avalanche***.

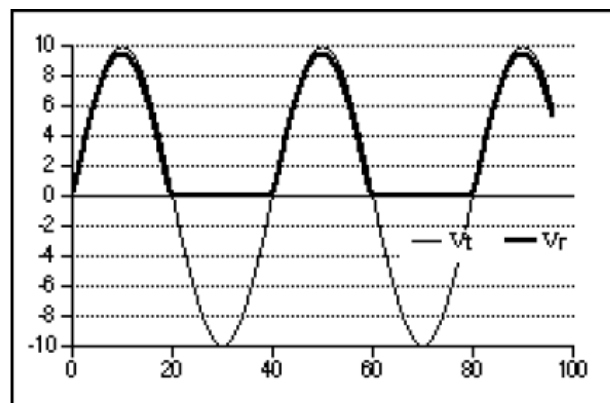
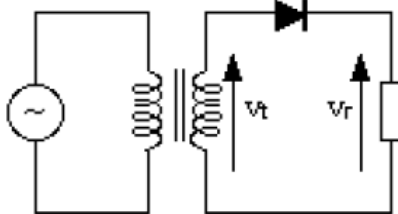
## 5. Les applications des diodes :

### Redressement simple et double alternance :

C'est la transformation d'un signal alternatif en tension continue.

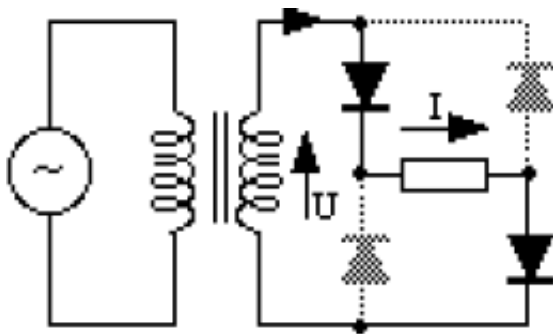
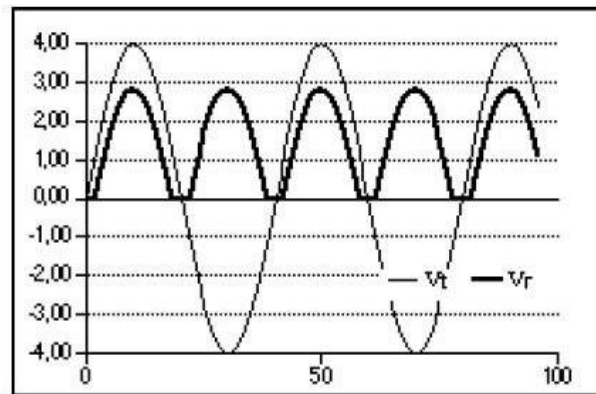
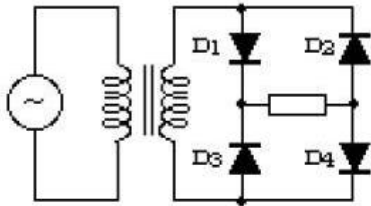
#### *Redressement monoalternance :*

Il admet l'alternance positive et annule l'alternance négative. Une simple diode en série avec la charge suffit à réaliser cette fonction.

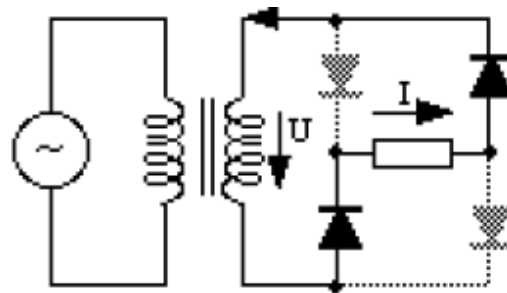


**Redressement double alternance avec pont de Graëtz :**

Lors de l'alternance positive de la tension d'entrée  $v_e$ , seules les diodes D1 et D4, ayant une tension d'anode supérieure à  $V_d$ , conduiront. Les diodes D2 et D3 sont bloquées. Pour l'alternance négative, ce sont les diodes D2 et D3 qui conduisent.



**Alternance positive**



**Alternance négativ**

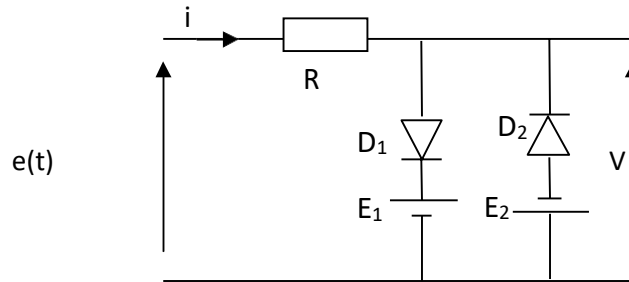
**Ecrêteurs (limiteurs de crête) :**

Ils sont utilisés pour couper des portions de tension de signaux au dessous ou au dessus de certains niveaux.

Dans le cas de la figure suivante les deux diodes  $D_1$  et  $D_2$  sont idéales et  $E_1 > E_2$ ,  $e(t) = E_m \sin \omega t$  ( $E_1 < E_m$ ).

Tracer  $i = f(e)$  ;  $v = g(e)$ .

Tracer  $v(t)$  et  $e(t)$  dans un même repère.



Pendant l'alternance positive :

$$e(t) > 0 :$$

pour  $e < E_1$ :

$D_1$  et  $D_2$  off

$$i = 0; v(t) = e(t)$$

$$e > E_1:$$

$D_1$  On et  $D_2$  off

$$e - Ri - E_1 = 0$$

$$Ri = e - E_1$$

$$i = \frac{e - E_1}{R}; v(t) = E_1$$

Pendant l'alternance négative :

$$e(t) < 0 :$$

$e < -E_2$ : parce que nous avons dans la pulsation négative et en valeur absolue on peut écrire :

$$|e| > |E_2|$$

$D_1$  Off et  $D_2$  On

$$-e - E_2 + Ri = 0$$

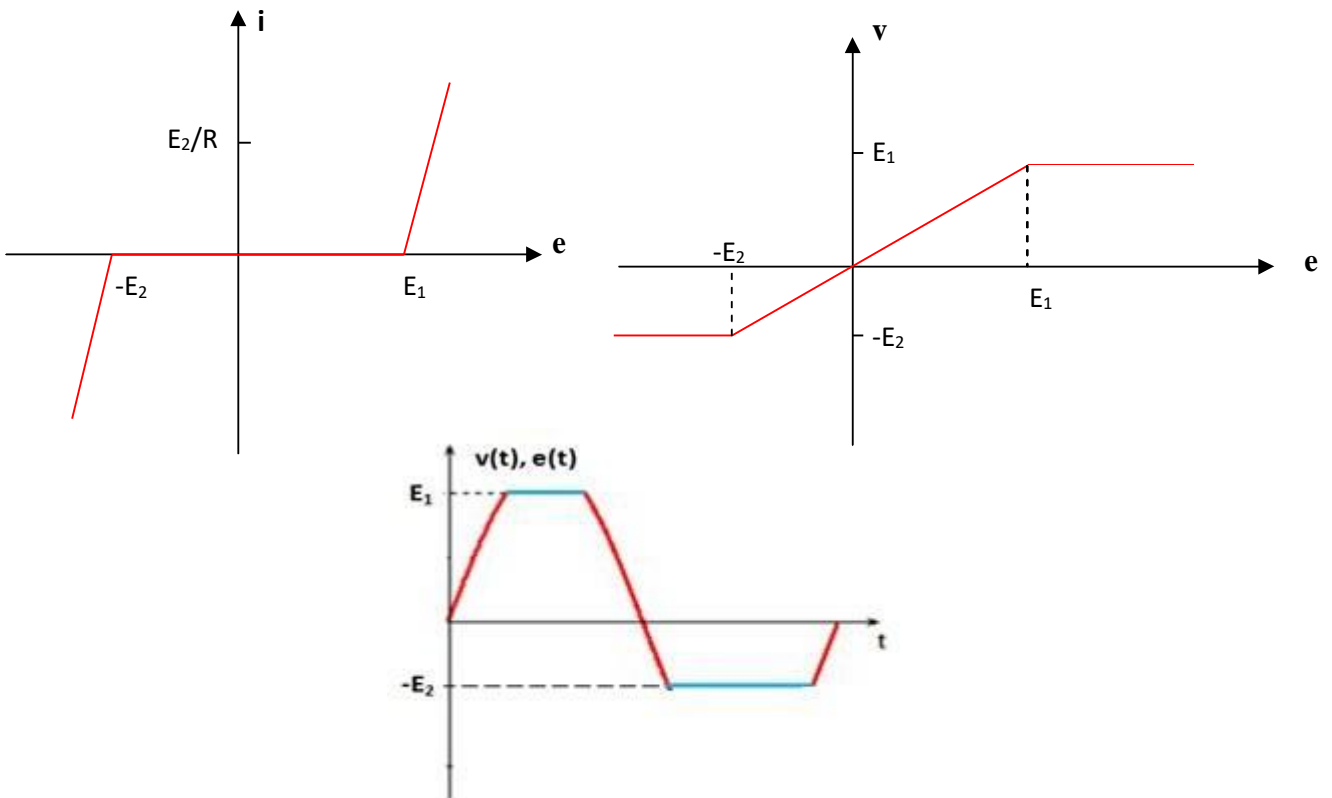
$$Ri = e + E_2$$

$$i = \frac{e + E_2}{R} ; v(t) = -E_2$$

$$e > -E_2$$

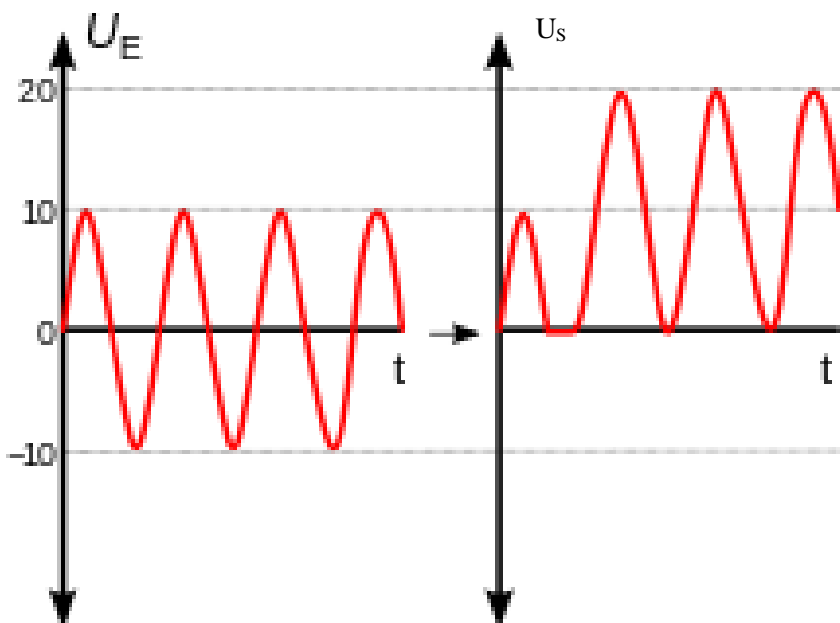
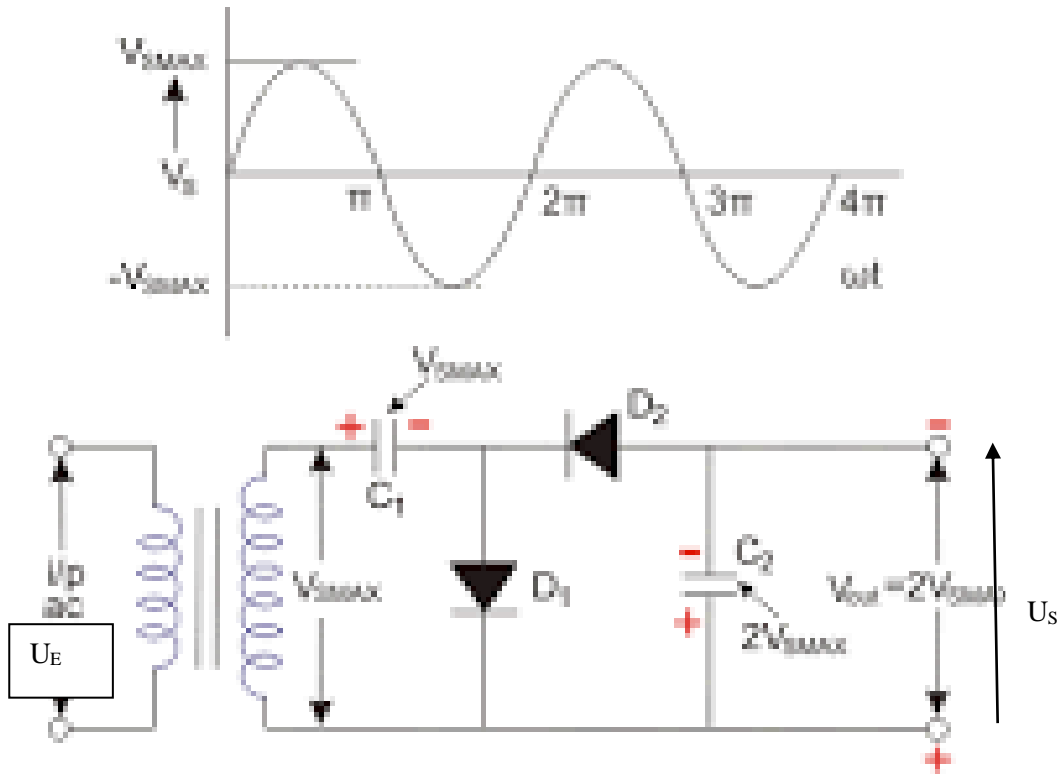
$D_1$  Off et  $D_2$  Off

$$i = 0 ; v(t) = e(t)$$



**Multiplicateurs de tensions :**

Ils utilisent la technique de fixation de niveau afin d'accroître les tensions crêtes redressées plutôt que d'augmenter la tension à l'entrée du transformateur. Utilisés dans les applications à haute tension et à faible courant comme les récepteurs de télévision.

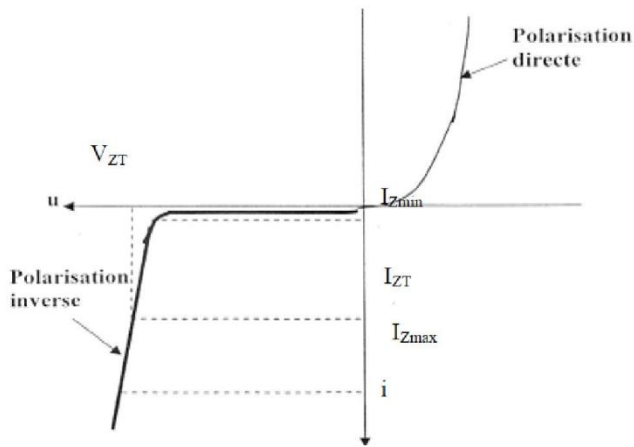


## 6. Diodes spéciales :

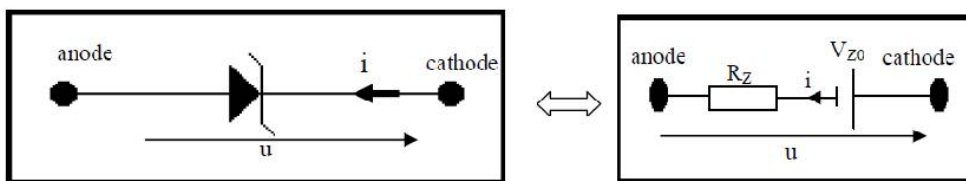
### Diode Zener :

#### \*Caractéristique:

C'est une diode conçue pour fonctionner dans la zone de claquage inverse, caractérisée par une tension de seuil négative ou tension Zener  $V_Z$ .



Caractéristique I-V d'une diode Zener avec les paramètres du modèle linéaire.



#### \*Utilisation

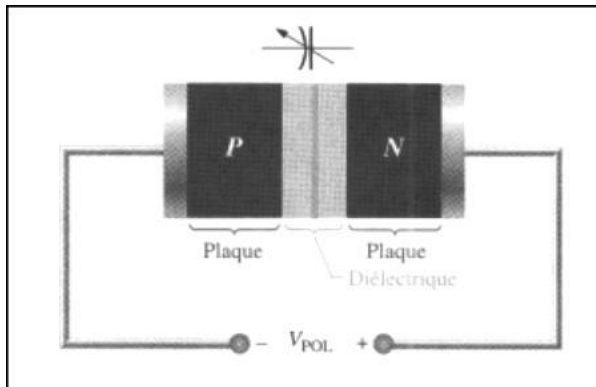
La diode Zener est donc utilisée pour sa propriété très spécifique lorsqu'un courant inverse la parcourt. Un usage classique consiste à utiliser la diode Zener dans un circuit électrique pour réguler la tension. Le composant peut également être utilisé comme référence de tension, écrêtage d'une tension ou pour l'alimentation continue de petite puissance.

-La diode Varicap : 

La diode à capacité variable est également appelée diode varactor. La capacité de sa jonction varie selon la tension de polarisation inverse. Ces diodes sont spécifiquement conçues pour profiter de la caractéristique de capacité variable. La capacité peut être changée en variant la tension inverse.

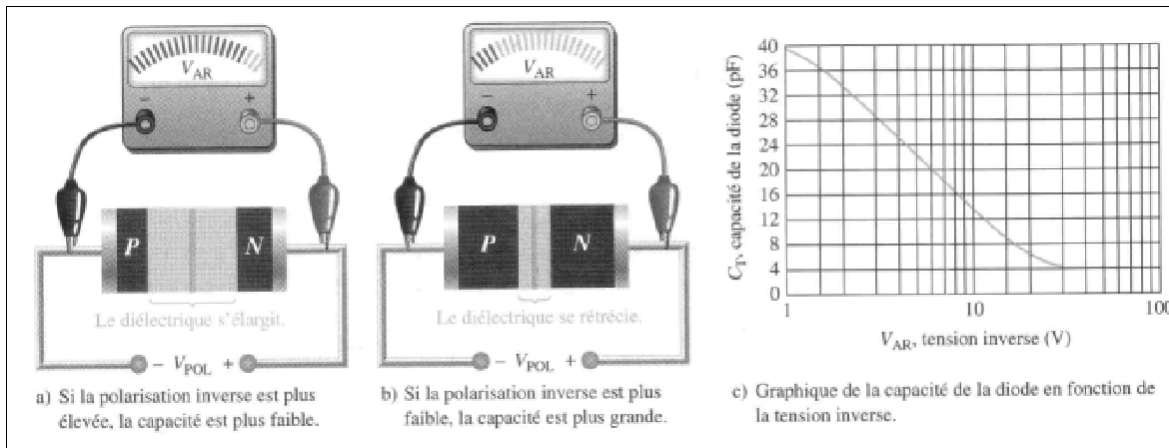
Ces composants sont principalement utilisés dans les circuits électroniques de syntonisation, employés dans les systèmes de communication.

La région d'appauvrissement créée par la polarisation inverse agit comme un condensateur diélectrique par ces caractéristiques non conductrices. Les régions P et N sont conductrices et jouent le rôle des plaques du condensateur (figure).



**Figure:** Action de la diode Varicap.

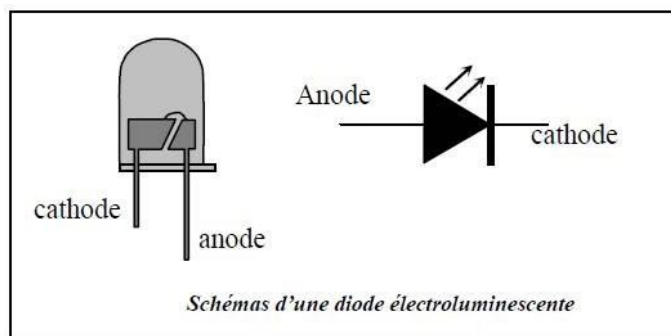
Lorsque la tension d'alimentation inverse augmente, la région d'appauvrissement s'élargit pour augmenter l'épaisseur du diélectrique et ainsi diminuer la capacité. Lorsque la tension de polarisation inverse diminue, la région d'appauvrissement devient plus étroite et par conséquent augmente la capacité (figure). Une courbe générale de la capacité de la diode ( $C_T$ ) en fonction de la tension inverse, Pour cette varicap particulière,  $C_T$  varie de 40 pF à un peu plus de 4 pF à mesure que VAR varie de 1 V à 40 V.



**Figure:** variation de la capacité de la diode Varicap en fonction de la tension inverse.

**Diodes électroluminescentes (DEL):**

Ces diodes spécifiques à base d'arséniure de gallium ont la propriété d'émettre de la lumière dans une bande de fréquence déterminée par les caractéristiques du matériau employé quand elles sont traversées par un courant direct. Une diode électroluminescente peut être schématisée par la figure.





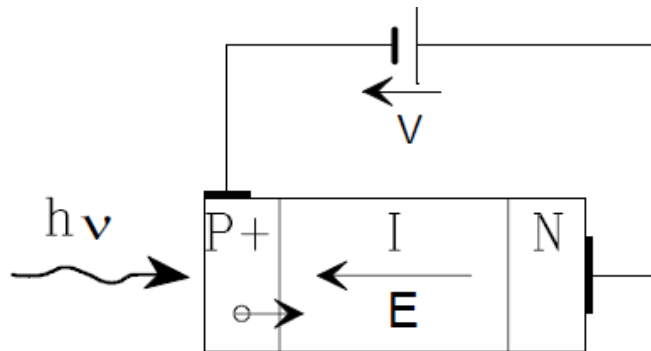
## Diodes Photodiodes :

Les photos détectrices transforment les radiations lumineuses (visible ou non) en signaux électriques. On les nomme aussi détecteur optiques, photo coupleurs ou capteur optiques. Le symbole d'une photodiode est celui d'une diode, auquel on a ajouté deux flèches pour symboliser l'action du rayonnement.



### Symbole d'une Photodiode

Une photodiode est constituée d'une jonction PN polarisée en inverse présentant une surface apte à recueillir le rayonnement lumineux. La structure d'une telle diode est représentée à la figure.



### Structure d'une Photodiode

En pratique les zones P et N sont séparées par une couche non dopée I dans laquelle un champ électrique **E** est établi à l'aide de la polarisation inverse.