

Chapitre 4

# **Diodes à Semi-conducteurs**

## 4.1 Introduction

la réunion de deux parties de semi-conducteurs construit ce qu'on appelle la jonction PN. Son étude est faite à l'équilibre et hors équilibre. La diode est le composant formé de la jonction PN. Une étude un peu exhaustive sur ce composant est présentée telle que sa polarisation en direct et en inverse et ses applications, en particulier le redressement et on va donner quelques types de diodes spéciales.

## 4.2 Création d'une jonction PN

Considérons tout d'abord une jonction PN à l'équilibre : la jonction est maintenue à une température constante (température ambiante). Elle est déconnectée de toute source extérieure de courant ou de tension.

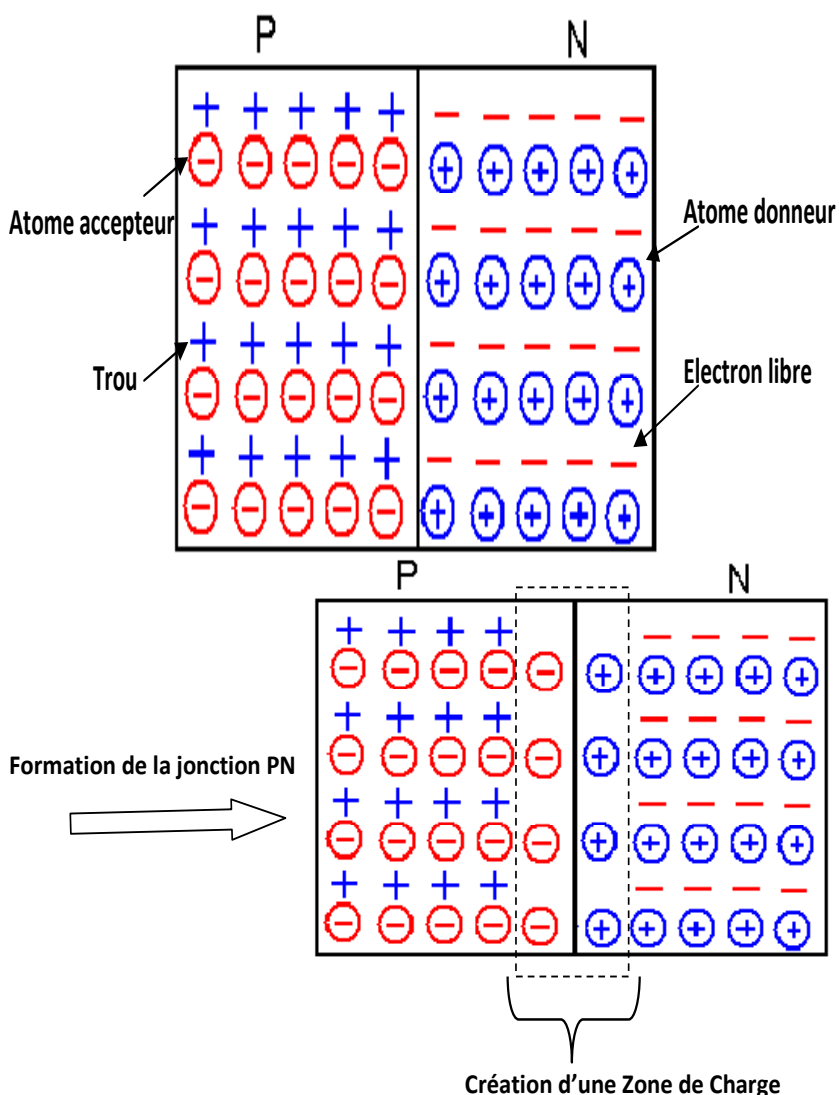
### 4.2.1 Définition

On appelle jonction PN, un monocristal semi-conducteur dans lequel existent deux régions dopées avec des impuretés de signe contraires de densité  $N_A$  côté P, et  $N_D$  côté N.

### 4.2.2 Formation de la jonction PN

Que se passe-t-il si l'on met en contact du Silicium dopé N et du Silicium dopé P ?

- A la limite des deux zones (P et N), il se produit des modifications dans une région de faible épaisseur ( $\sim \mu m$ ).
- ✓ il y a diffusion des charges : les trous, majoritaires dans P diffusent dans N et les électrons, majoritaires dans N diffusent dans P. c'est à dire les trous de la zone P vont neutraliser les électrons libres de la zone N.
- ✓ A la fin de ce processus de diffusion des porteurs de charges, une zone pauvre en porteurs libres est formée. Cette zone est appelée zone de charge d'espace ou aussi "zone de déplétion".

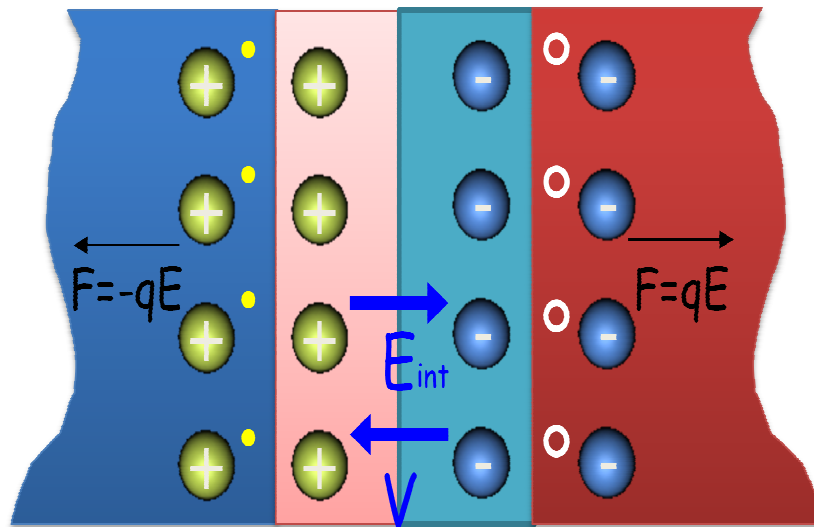


✓ les charges fixes (des ions négatifs ayant perdu leur trou (zone P) et celles des ions positifs ayant perdu leur électron (zone N) entraînent l'apparition d'un champ interne qui empêche la circulation des porteurs de charge majoritaires à travers la jonction.

✓ Ce champ électrique est équivalent à une différence de potentiel appelée barrière de potentiel définie par la relation  $E = -dV/dx$ . A 27 °C, elle vaut 0,6 V pour le silicium.

✓ Ce champ électrique n'interdit pas le passage des porteurs minoritaires, donnant naissance à un courant très faibles  $I_s$  appelé courant de saturation et ne dépend que de l'activité intrinsèque du SC, donc de la température.

✓ Pour une jonction non polarisée (sans énergie extérieure, le courant global doit être



nul)  $I = I_M - I_S = 0$ .

$$I_M = I_0 e^{qV/\eta kT} = I_S$$

$I_0$  : Le Courant qui traverserait la jonction s'il n'y a pas de barrière de potentiel (courant de diffusion libre).

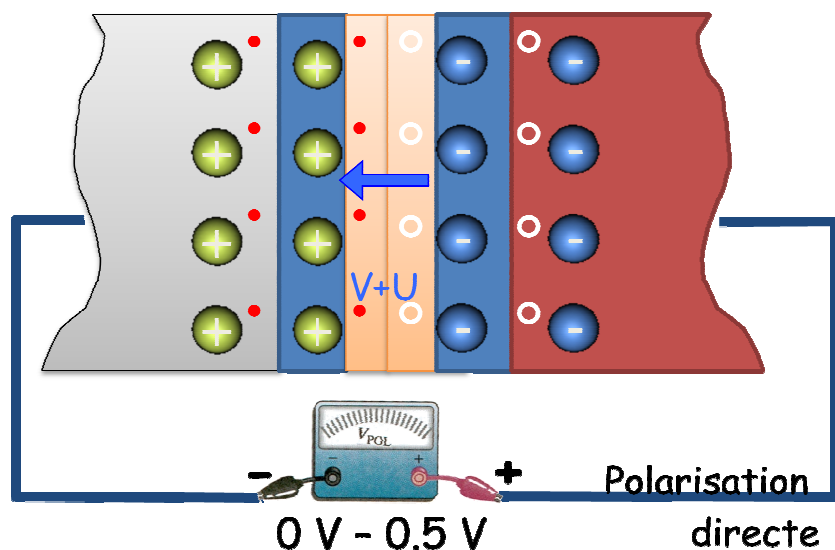
$\eta$  : Le coefficient technologique (ou le coefficient d'émission) tel que :  $1 \leq \eta \leq 2$  .Il dépend du matériau, voisin de 1 dans les diodes au Ge, et compris entre 1 et 2 dans les diodes au Si. Dans ce cas, on dit que la jonction PN est à l'équilibre et alors pas de conduction (les deux courants sont égaux).

## 4.3 Jonction PN hors l'équilibre

### 4.3.1 Polarisation d'une jonction PN en direct

On relie la région P au pôle + de la source d'alimentation, la région N au pôle -. ( $U_{ddp} > 0$ )

- La barrière de potentiel  $V$  est diminuée :  $V \rightarrow V - U$  par une source de tension extérieure continue  $U$ .
- ✓ Pour une tension appliquée faible ( $< 0.5$  V), rien ne se passe.
- ✓ A  $V = 0.6$  Volts, la barrière de potentiel s'annule.
- ✓ Pour une tension de polarisation supérieure à 0.6 V : La barrière de potentiel est vaincue, il y a redémarrage de la diffusion et donc de la conduction.



- Plus la tension  $U$  appliquée croit, plus la barrière de potentiel est diminuée et plus le courant croit.

### 4.3.2 Polarisation d'une jonction PN en inverse

Polarisation en inverse  $\equiv$  P au pôle - de l'alimentation et N au pôle + de l'alimentation. (correspond au cas Direct avec  $U < 0$ ).

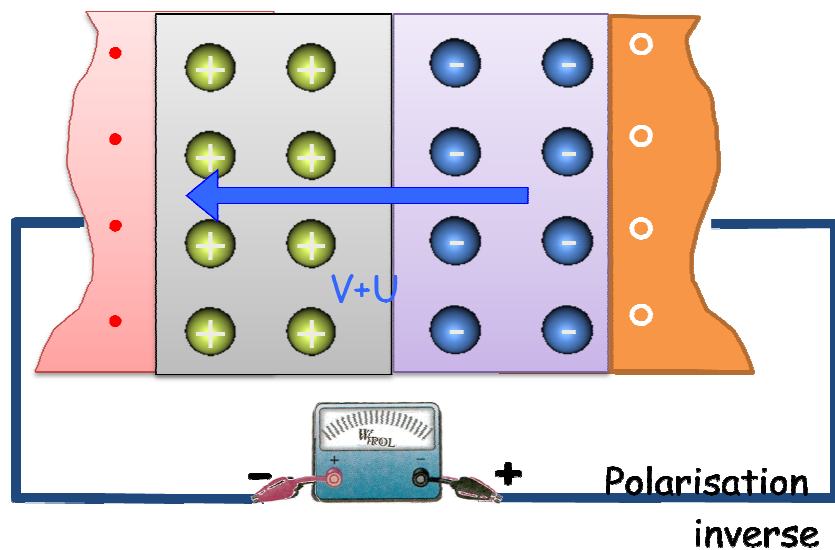
- La barrière de potentiel augmente :  $V \rightarrow V+U$  .  
 ✓ Il n'existe alors pratiquement aucun courant.
- Elargissement de la Zone de Charge d'Espace. Puisque les charges contraires s'attirent, la borne positive de la source « tire » les électrons libres, qui sont les porteurs majoritaires dans la région N, loin de la jonction PN.

### 4.3.3 Loi de conduction

L'intensité du courant qui traverse la jonction varie selon la loi :

$$I = I_S(e^{U/\eta V_T} - 1)$$

- $V_T$  représente la tension thermique qui vaut  $\frac{K_B T}{e} \approx 26mV$  à 300K (où  $K_B = 1.38 * 10^{-23} J/K$  et  $e = 1.6 * 10^{-19} C$ )



En polarisation directe ( $U > 0$ ) le terme exponentiel est rapidement prépondérant devant 1 donc  $I = I_S e^{U/\eta V_T}$

En polarisation inverse ( $U < 0$ ) le terme exponentiel est rapidement négligeable et  $I = -I_S$ .

Résumé de la polarisation de la jonction :

- Polarisation direct :
  - ✓  $0 < U < \text{barrière de potentiel}$  : L'énergie des électrons est insuffisante pour franchir la barrière de potentiel. Le courant est nul.
  - ✓  $U > \text{barrière de potentiel}$  : Les électrons ont assez d'énergie pour franchir la zone déplétée, un courant positif s'établit. C'est la polarisation directe. La jonction est passante.
- Polarisation inverse  $U < 0$  : La zone déplétée s'élargit. Il n'y a plus de porteurs dans la jonction, le courant est nul. La jonction est bloquée.

## 4.4 Diode à jonction

En pratique la jonction PN (en germanium ou en silicium) n'est que la diode.

### 4.4.1 Constitution et Symbole

La diode est un dipôle à semi-conducteur (jonction PN). Les 2 bornes sont repérées anode " A " (correspond à la zone P) et cathode " K " (correspond à la zone N). Une diode

## 4.4. DIODE À JONCTION

---

est un élément ayant la propriété d'être conducteur pour un certain sens du courant et non conducteur pour l'autre sens. La pointe du triangle indique le sens passant en direct du courant.

La diode PN est obtenue en dopant un monocristal semiconducteur, sur

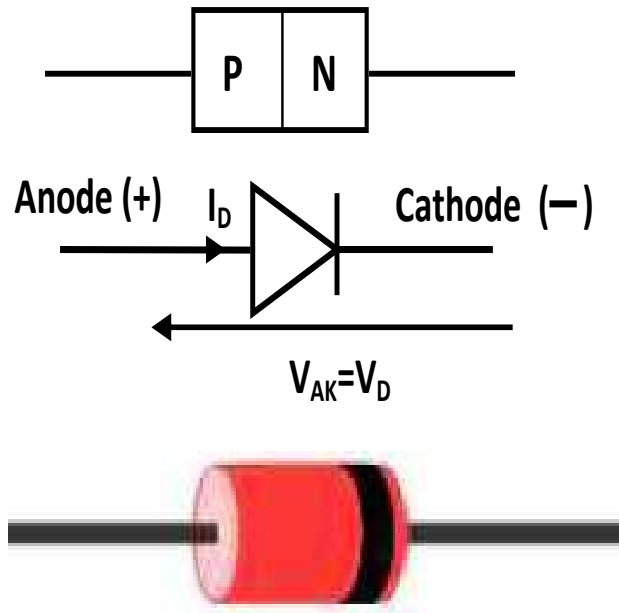


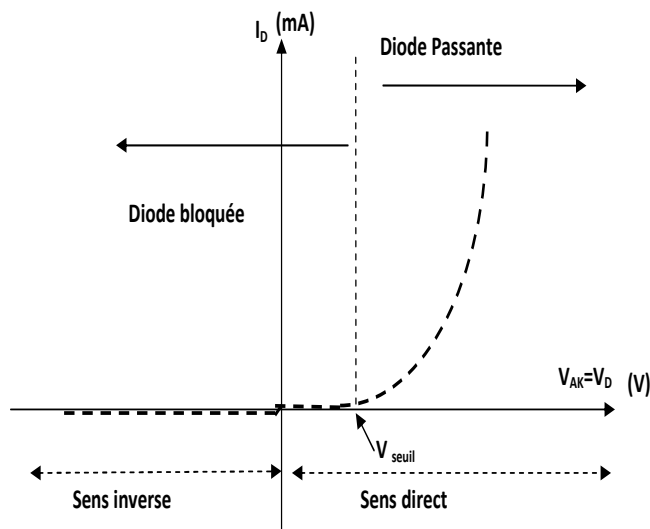
Schéma de principe d'une diode à jonction PN

- Si  $V_D > 0$  alors la diode est polarisée en directe sinon elle est polarisée en inverse.
- Si  $I_D \neq 0$ , on dit alors que la diode est passante sinon elle est bloquée.

### 4.4.2 Caractéristiques d'une diode

C'est le graphique qui donne l'intensité du courant qui traverse la diode en fonction de la tension à ses bornes. Un courant prend naissance suite à la tension directe appliquée. Ce courant, principalement dû aux porteurs majoritaires, est lié à la tension  $V$  par une relation exponentielle :

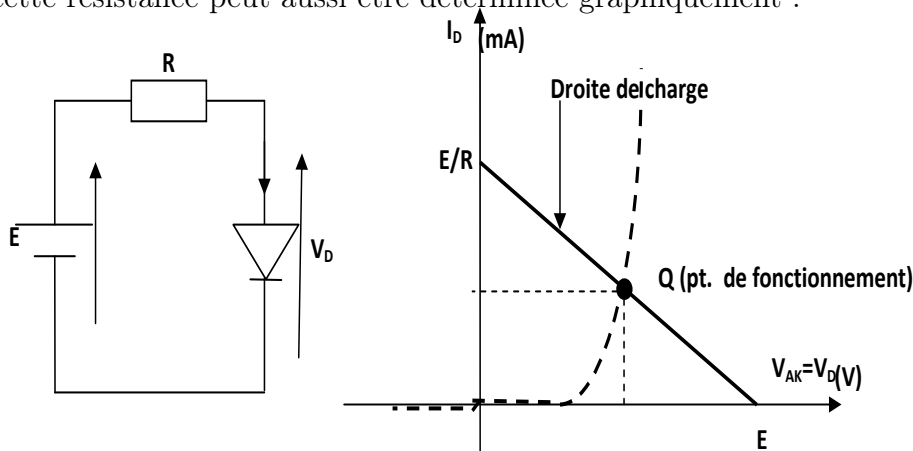
$$I = I_S(e^{U/\eta V_T} - 1)$$



- Cette caractéristique permet de distinguer deux regimes de fonctionnement :
  - ✓ Dans le sens direct ( $I_D$  et  $V_D$  positifs), la diode est passante ; la tension  $V_D$  est faible ( $\sim 1V$ ) et le courant croit tres rapidement avec la tension.
  - ✓ Dans le sens inverse ( $I_D$  et  $V_D$  negatifs), la diode est bloquée ; le courant est faible quelque soit la tension (courant de fuite, qlq nA).

### 4.4.3 Résistance statique

La résistance statique  $R_S$  d'une diode est définie comme étant la résistance équivalente de la diode lorsque cette dernière est parcourue par un courant constant :  $R_S = \frac{V}{I}$ . La valeur de cette résistance peut aussi être déterminée graphiquement :



Circuit contenant une diode et les coordonnées du point de fonctionnement

- Eq. droite de charge :  $E = RI_D + V_D$ .
- Les coordonnées du point d'intersection Q de la droite de charge représentée par



l'équation de droite de charge et la caractéristique de la diode déterminent la valeur de la résistance statique. Le pt. de fonctionnement Q ( $I_0, V_0$ ) : C'est l'intersection des deux courbes (la droite de charge et la caractéristique de la diode) :  $R_S = \frac{V_0}{I_0}$ .

#### 4.4.4 Résistance dynamique

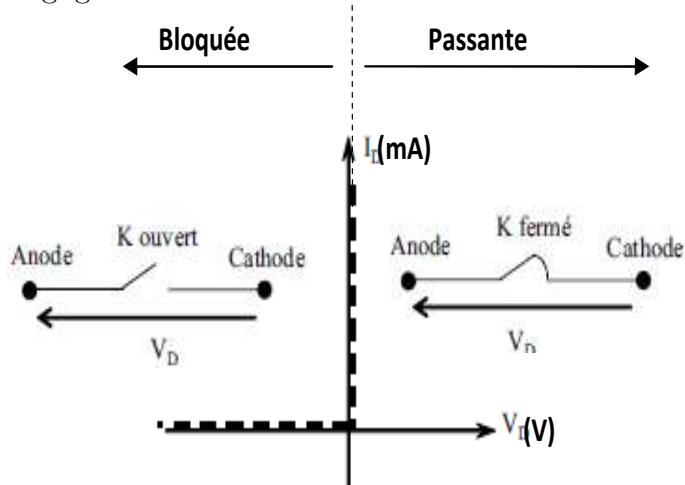
La résistance dynamique est la résistance équivalente de la diode en régime variable. Son expression est donnée par le rapport de la variation de la tension aux bornes de la diode à la variation du courant qui la traverse, soit :  $R_D = \frac{\Delta V}{\Delta I}$ .

#### 4.4.5 Modèles simplifiés de la diode à jonction PN

Un modèle consiste en une représentation simplifiée du fonctionnement de la diode en vue de faciliter l'analyse d'un phénomène ou l'étude d'un système. La diode est un élément non linéaire, or l'analyse d'un comportement non linéaire est assez difficile. On remplace donc les diodes par des modèles linéaires.

##### Modèle idéal

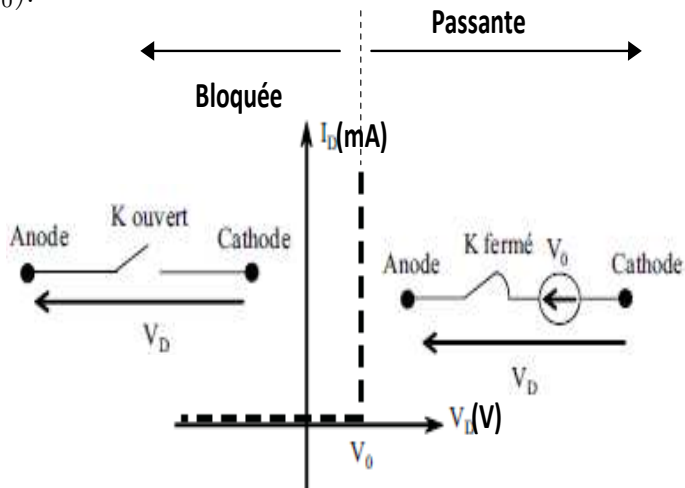
Dans ce cas, on néglige la tension de seuil et la résistance interne de la diode.



- Si  $V_d < 0$  : D bloquée, la diode est considérée comme un circuit ouvert :  $I_d=0$ .
- Si  $V_d \geq 0$  : D passante, la diode est considérée comme un court-circuit :  $V_d=0$ .

### Modèle à seuil

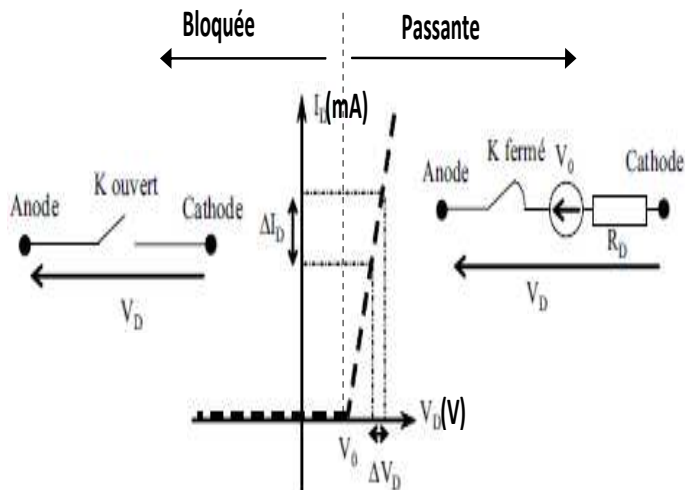
Dans ce cas, on néglige la résistance interne, mais tenir compte de la tension seuil de la diode ( $V_{seuil} = V_0$ ).



- Si  $V_d < V_0$  : D bloquée ; D  $\equiv$  interrupteur ouvert.
- Si  $V_d \geq V_0$  : D passante ; D  $\equiv$  interrupteur fermé avec tension seuil.

### Modèle à seuil et résistance

Dans ce cas, on prend en compte la résistance interne et e la tension seuil de la diode ( $V_{seuil} = V_0$ ).



- Si  $V_d < V_0$  : D bloquée ; D  $\equiv$  interrupteur ouvert.
- Si  $V_d \geq V_0$  : D passante ; D  $\equiv$  résistance ( $R_d$ ) + tension seuil ( $V_0$ ).

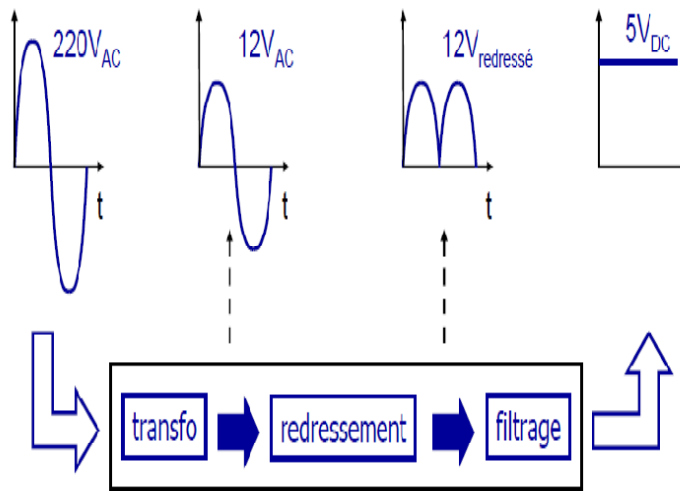
## 4.5 Diode : Application

### 4.5.1 Introduction

☛ La plupart des composants électroniques doivent être alimentés par des tensions continues de faible valeur (ex : 5VDC ou 12VDC).

☛ Les prises de courant délivrent bien entendu une tension alternative beaucoup plus élevée (220VAC).

Pour alimenter un récepteur en continu (téléphone mobile, ordinateur portable, Les lecteurs CD et DVD des ordinateurs ...) à partir d'un réseau de distribution alternatif, on utilise un équipement qui va convertir la tension alternative en tension continue de plus faible valeur.



On peut réaliser donc une alimentation simple en appliquant successivement les opérations suivantes :

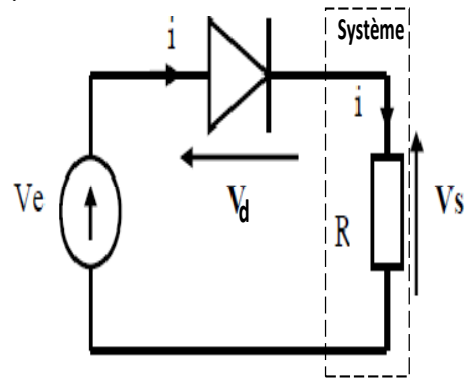
- Abaisser la valeur de la tension alternative par un transformateur.
- Redresser la tension (=supprimer les alternances négatives ou les transformer en alternances positives) par un redresseur. Le redressement est assuré par une ou plusieurs diodes.
- Filtrer la tension redressée.

### 4.5.2 Diodes de redressement

Une des principales applications donc de la diode est le redressement de la tension alternative en tension continue destiné à alimenter les montages électroniques

**Redressement simple alternance**

Soit le montage suivant :



- Alternance positive :  $V_e > 0$  pour  $0 < \omega t = \theta < \pi$ .
- Alternance négative :  $V_e < 0$  pour  $\pi < \omega t = \theta < 2\pi$ .

On considère la diode D parfaite. R représente la résistance d'entrée que l'on alimente. La tension  $V_e$  est sinusoïdale :  $V_e = V_M \sin(\omega t)$  de fréquence  $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T}$ . T est la période du signal.

Analyse de fonctionnement :

La loi des mailles donne :  $V_e = V_d + V_s$ .

- Lorsque  $V_e > 0$ , la diode D est passante. Elle est alors équivalente à un court circuit et donc  $V_d = 0$  et par la suite  $V_s = V_e$ .
- Lorsque  $V_e < 0$ , la diode D est bloquée. Elle est alors équivalente à un interrupteur ouvert et donc  $i=0$ , soit  $V_s = 0$  et par la suite  $V_d = V_e$ .

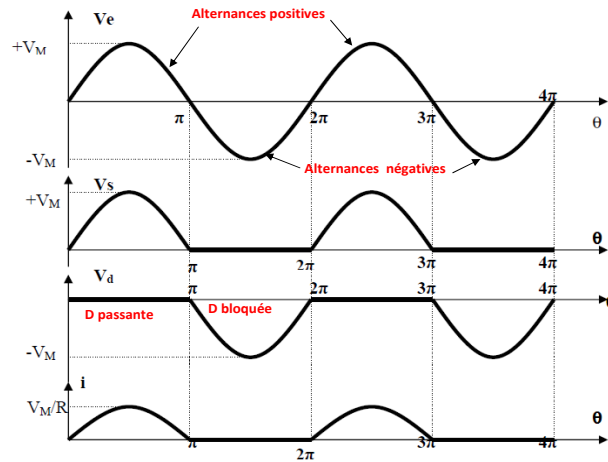
On obtient, en résumé, les résultats suivants :

$$V_e > 0 \quad V_s = V_e \quad V_d = 0 \quad i = \frac{V_s}{R}$$

$$V_e < 0 \quad V_s = 0 \quad V_d = V_e \quad i = 0$$

Oscillogrammes :

## 4.5. DIODE : APPLICATION



### Grandeurs caractéristiques du montage :

Soit  $s(t)$  un signal périodique de période  $T$ . Par définition :

• Valeur moyenne :

$$s_{moy} = \bar{s} \stackrel{\text{déf.}}{=} \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt$$

• Valeur efficace :

$$s_{eff} \stackrel{\text{déf.}}{=} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt}$$

Pour le signal redressé monoalternance :

la valeur moyenne de la tension  $V_s$  :

$$V_{smoy} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_M \sin\theta d\theta = \frac{V_M}{\pi}$$

la valeur efficace de la tension  $V_s$  :

$$V_{s,eff} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_M^2 \sin^2\theta(t) d\theta} = \frac{V_M}{2}$$

### Qualité d'un redressement :

Pour caractériser la qualité d'un redressement, on définit :

- Un paramètre appelé facteur de forme  $F = \frac{V_{eff}}{\langle V \rangle}$ . Plus  $F$  tend vers 1, plus la tension redressée peut être considérée comme continue.

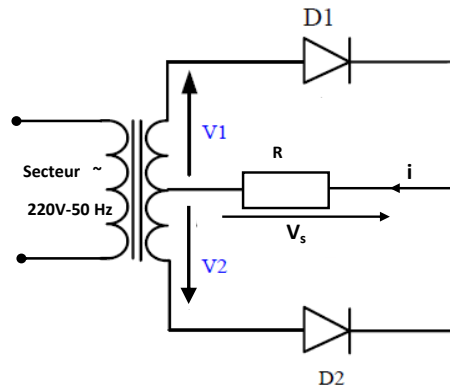
Pour le signal redressé monoalternance :

Calculons le facteur de forme  $F = \frac{V_{s,eff}}{V_{smoy}} = \frac{\frac{V_M}{2}}{\frac{V_M}{\pi}} \approx 1.57$ .

## Redressement double alternance

### Redressement par deux diodes et un transformateur à point milieu

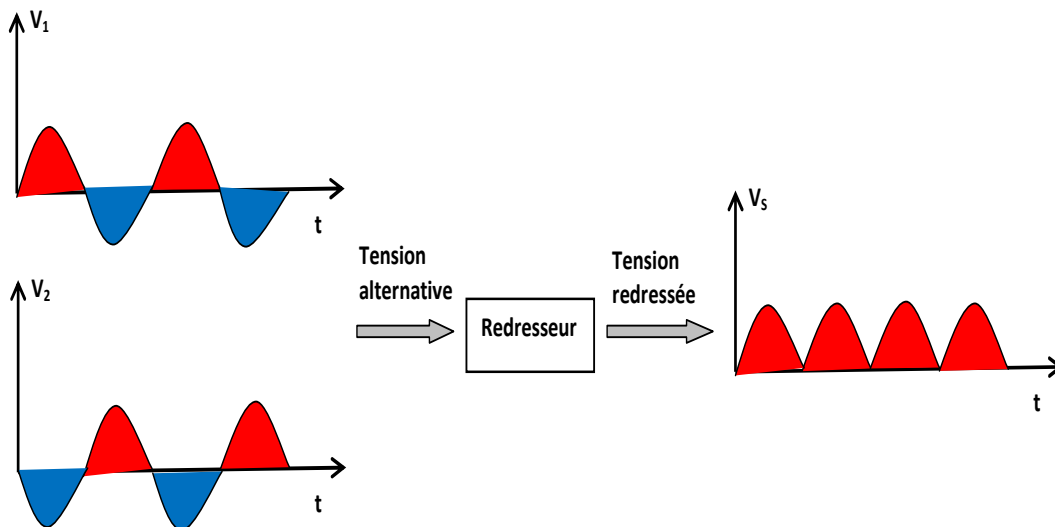
#### Montage et Fonctionnement :



Les deux tensions  $v_1$  et  $v_2$  obtenues sont en opposition de phase. La tension aux bornes de la charge est  $v_s$  :

- ✓ Lorsque  $v_1$  est positive,  $v_2$  est négative, D1 conduit, D2 est bloquée ;  $v_s = v_1$ .
- ✓ Lorsque  $v_1$  est négative,  $v_2$  est positive, D1 est bloquée, D2 conduit ;  $v_s = v_2$ .

- La tension aux bornes de la charge est toujours positive. La forme des signaux d'entrée et de sortie est la suivante :



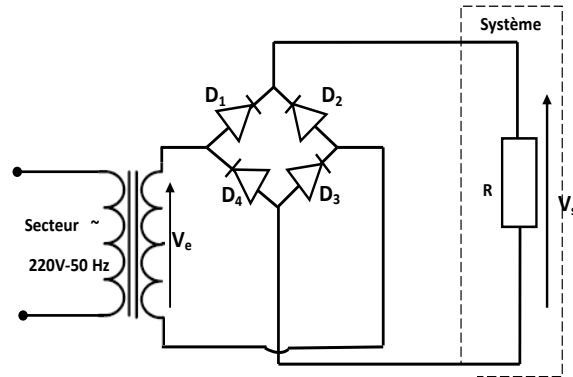
- La valeur moyenne de la tension  $V_s$  :  $V_{s,moy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_M \sin \omega t dt = \frac{2V_M}{\pi}$ .

- La valeur efficace de la tension  $V_s$  :  $V_{s,eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_M^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{V_M}{\sqrt{2}}$ .

- Le facteur de forme  $F = \frac{V_{s,eff}}{V_{s,moy}} = 1.11$ .

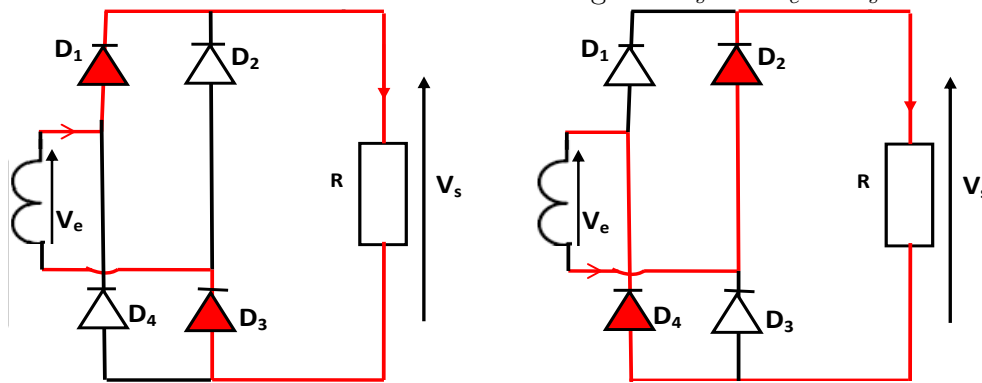
Redressement par pont de Graetz (pont à quatre diodes)

Montage et Fonctionnement :

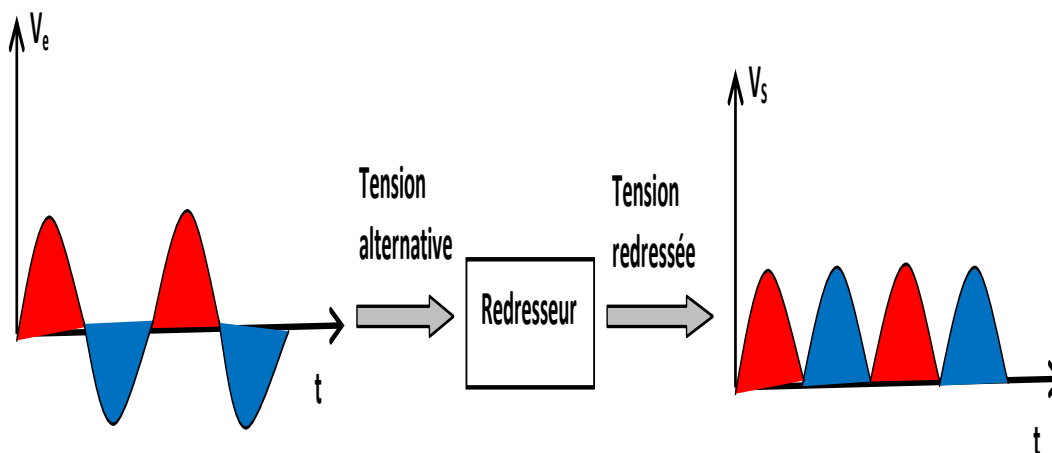


✓ Pendant l'alternance positive de  $v_e$  les diodes D1 et D3 conduisent, les diodes D2 et D4 sont bloquées. La tension aux bornes de la charge vaut pratiquement  $v_s = v_e \Rightarrow v_s > 0$ .

✓ Pendant l'alternance négative de  $v_e$ , l'inverse se produit : D1 et D3 sont bloquées, D2 et D4 conduisent. La tension aux bornes de la charge est  $v_s = -v_e \Rightarrow v_s > 0$



- La tension aux bornes de la charge reste toujours positive. La forme des signaux d'entrée et de sortie est la suivante :



- La valeur moyenne de la tension  $V_s$  :  $V_{s,moy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_M \sin \omega t dt = \frac{2V_M}{\pi}$ .
- La valeur efficace de la tension  $V_s$  :  $V_{s,eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_M^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{V_M}{\sqrt{2}}$ .
- Le facteur de forme  $F = \frac{V_{s,eff}}{V_{s,moy}} = 1.11$ .

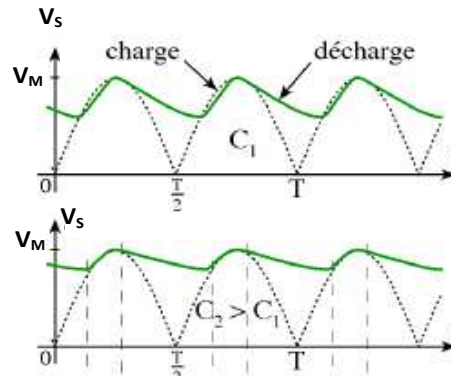
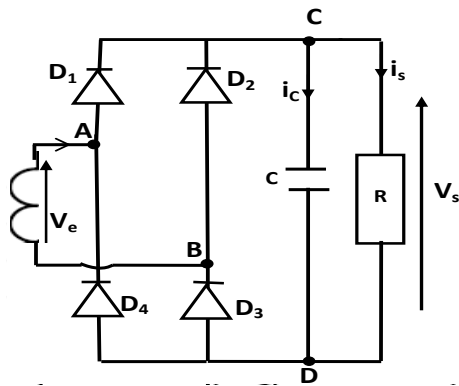
• Remarque : Le facteur de forme est plus proche de 1 pour un redressement double alternance qu'avec un redressement monoalternance.

## 4.6 Filtrage

Les montages précédents délivrent des tensions redressées continues mais ondulées (pas parfaitement constantes). Pour obtenir une tension quasiment lisse (c'est à dire éviter qu'elle passe par zéro plusieurs fois par seconde et réduire les ondulations), il suffit de mettre un gros condensateur en parallèle avec la charge (c'est la fonction de filtrage).

### Analyse de fonctionnement :

A  $t=0$ ,  $v_e = 0$  est C est déchargé  $\Rightarrow v_s = 0$ .



- ✓  $0 < t < \frac{T}{4}$  : La tension de la source  $V_e$  augmente, D1 et D3 sont passante et le condensateur se charge sous  $V_e$  jusqu'à atteindre  $v_s(T/4) = V_M$ .
- ✓  $\frac{T}{4} < t < \frac{T}{2}$  :  $V_e$  décroît rapidement et donc le condensateur s'oppose aux variations brusques de tension à ces bornes.  $V_C > V_A$ , D1 et D3 se bloquent  $\Rightarrow$  aucune diode conduit  $\Rightarrow$  le condensateur se décharge dans la résistance avec une constante de temps  $\tau = RC$ , cette décharge est très lente, de type exponentielle décroissante.
- ✓  $\frac{T}{2} < t < \frac{3T}{4}$  :  $V_e$  est négative, Une fois que  $V_B > V_C$  et D2 et D4 se mettent à conduire  $\Rightarrow$  le condensateur se chargera de nouveau rapidement à la valeur de crête de la source (



$$v_s(3T/4) = V_M).$$

✓  $\frac{3T}{4} < t < T$  :  $V_e$  croît rapidement et donc le condensateur s'oppose aux variations brusques de tension à ces bornes. Lorsque  $V_B < V_C$ , D2 et D4 se bloquent  $\Rightarrow$  aucune diode conduit  $\Rightarrow$  le condensateur se décharge dans la résistance avec une constante de temps  $\tau = RC$ . La tension  $v_s$  décroît exponentiellement.

• Remarque :

L'ondulation  $\Delta V_s = \frac{V_M}{2fRC}$  de la tension redressée dépend donc des valeurs de la charge R, de la capacité de filtrage C et de la période T.

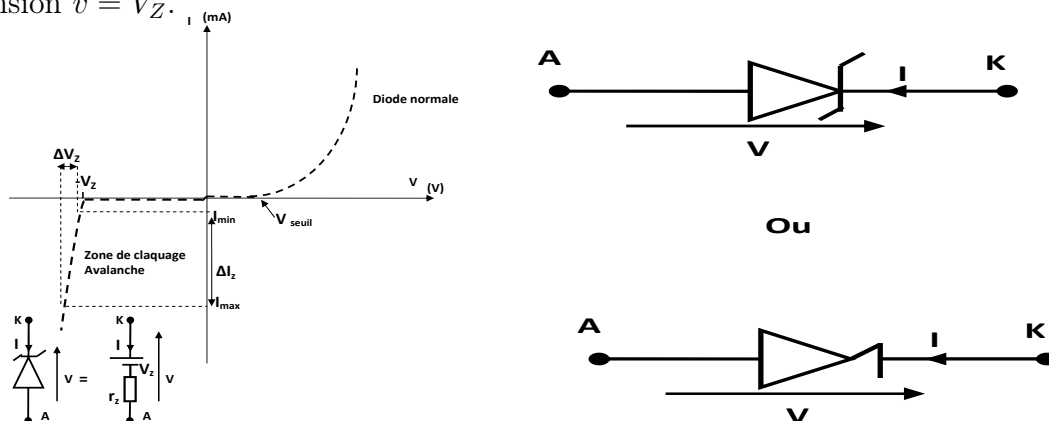
- L'ondulation est d'autant plus faible que le produit R.C est grand devant la période T.
- Pour diminuer l'ondulation il faudrait donc augmenter C.

## 4.7 Régulation

Malgré l'utilisation de la fonction filtrage, la tension obtenue n'est pas pratiquement continue. Pour éviter cela, on utilise une fonction stabilisation ou régulation. La fonction régulation est assurée par une diode Zéner.

### 4.7.1 Symbole et caractéristique de la Diode Zener

La diode Zener donc est utilisée en inverse. En direct, elle se comporte comme une diode normale. La tension Zener  $V_z$  caractéristique de la diode Zener, varie selon les types zener de quelques Volts à quelques dizaines de Volts. Pour  $i > I_{min}$  : il ya régulation de la tension  $v = V_Z$ .



Il faut que le courant traversant la diode Zener soit limité :  $i < I_{max}$ . Exemple : BZX845V6 une diode Zener au silicium de la série X84 (Tension Zener  $V_z = 5.6V$  ;  $I_{min} = 5mA$  et  $I_{max} = 50mA$ ). L'effet d'avalanche est le mode de claquage le plus courant dans les diodes. Ce phénomène résulte lorsqu'une forte tension inverse est appliquée aux bornes de la jonction. Le courant augmente très rapidement et provoque ainsi la destruction de la jonction par effet Joule.

Certaines diodes sont conçues de manière à ce que l'effet d'avalanche ne soit pas destructeur, mais soit au contraire maîtrisé et même utile. Dans ce cas, on parle de l'effet Zener. Donc, une diode Zener se polarise en sens inverse et présentée à ses bornes, quel que soit le courant qui le traverse, une tension quasiment constante appelée tension Zener.