

Cours Electronique fondamentale 1

Chapitre 3 : Les diodes à Jonction et ses applications

I. Notions sur les semiconducteurs

Pour comprendre comment les diodes, transistors et circuits intégrés fonctionnent, il faut d'abord étudier les semiconducteurs : matériaux qui ne sont ni conducteurs ni isolants. Ils contiennent des électrons libres mais aussi des trous, ce qui les rend particuliers. Ce chapitre est consacré aux semiconducteurs, la jonction PN et autres thèmes relatifs au sujet.

1- Définition :

Un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment important. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Selon celle-ci, un matériau semi-conducteur possède une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction. Si un potentiel électrique est appliqué à ses bornes, un faible courant électrique apparaît, provoqué à la fois par le déplacement des électrons et par celui des « trous » qu'ils laissent dans la bande de valence.

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, du fait de ses bonnes propriétés, et de son abondance naturelle même s'il existe également des dizaines d'autres semi-conducteurs utilisés, comme le germanium, l'arséniure de gallium ou le carbure de silicium.

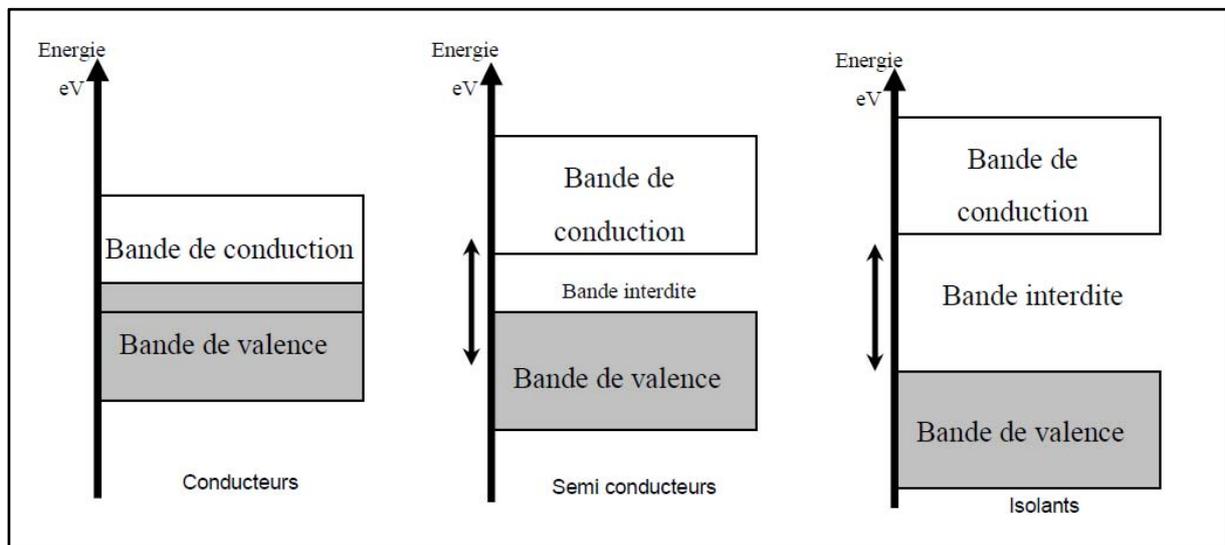
2- Notion des bandes d'énergie :

Selon la théorie des bandes d'énergie, à l'état fondamental de la matière, c'est-à-dire quand la température tend vers le zéro absolu (0 Kelvin ou $-273,15^{\circ}\text{C}$), deux bandes d'énergie sont à distinguer dans un atome et qui ont un rôle particulier :

➤ **la bande de valence** : c'est la dernière bande d'énergie complètement remplie d'électrons. Les électrons appartenant à la bande de valence permettent la cohésion locale d'un solide ou d'un matériau : ils interagissent avec les atomes voisins pour rendre la structure stable.

➤ **la bande de conduction** : c'est la bande d'énergie supérieure ou égale à celle de la bande de valence, mais qui n'est pas remplie. Les électrons de la bande de conduction sont eux dit délocalisés : ils peuvent se déplacer au sein du matériau, d'atome en atome, pour participer à la conduction électrique.

L'énergie qui sépare ces deux bandes est appelée **gap**, ou **band gap** ou encore **bande interdite**. La différence entre les trois types de matériaux réside dans la différence énergétique entre la bande de valence et la bande de conduction comme illustre la Figure suivante :



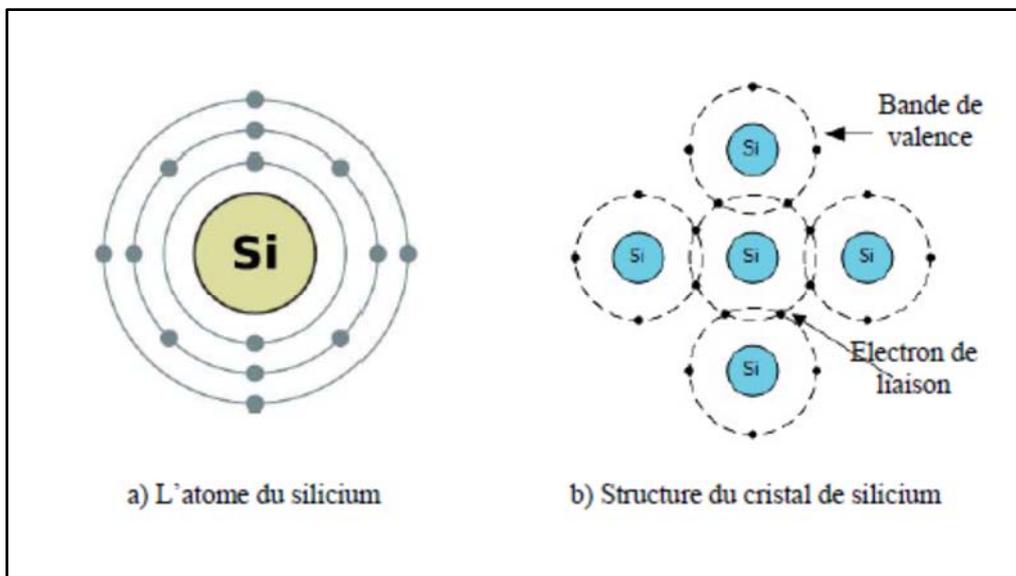
Les matériaux conducteurs : la bande de conduction chevauche avec la bande de valence, ce qui fait d'elle une bande partiellement remplie. Ces électrons qui sont déjà dans la bande de conduction donc ils sont responsables de la conduction électrique du conducteur.

Les matériaux isolants : la bande de conduction est vide, elle ne contient aucun électron. En plus de cela, le gap est grand, aucun électron du matériau ne peut participer à la conduction.

Les matériaux semi-conducteurs : la bande de conduction est vide, mais le gap est suffisamment petit, le matériau isolant est au repos. Mais la moindre excitation, thermique ou électrique, permet à certains électrons de la bande de valence de franchir le gap et le matériau devient conducteur.

3- Structure atomique d'un semi-conducteur :

Pour expliquer cette section, nous allons prendre l'exemple du silicium qui est un semi-conducteur comportant 14 électrons et dont la structure est $K^2L^8M^4$. Ce qui veut dire qu'il a 4 électrons dans sa bande de valence comme illustré par la Figure suivante. Le cristal de silicium se forme donc en associant chaque atome de silicium avec 4 autres tomes. Chaque deux atomes partageront un électron chacun pour former une paire de liaison. Il arrive qu'un électron quitte la bande de valence pour aller s'installer dans la bande de conduction, le vide qu'il laisse derrière lui s'appelle trou. Dans ce qui suit nous appellerons porteurs de charges l'électron et le trou. L'électron a une charge négative tandis que le trou possède une charge positive.

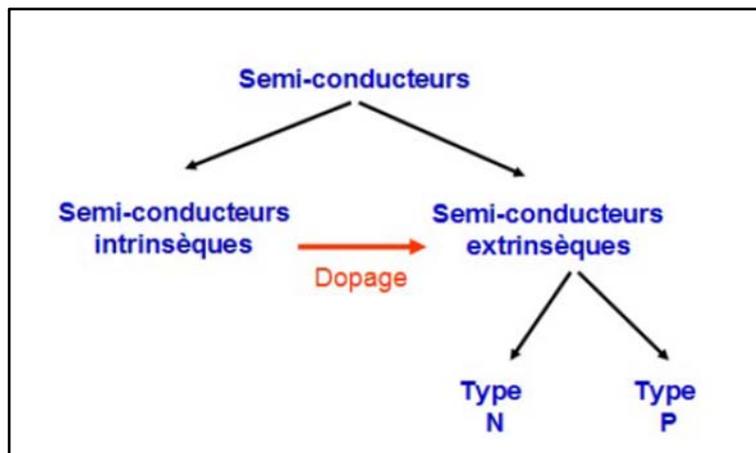


Il existe deux types de semi-conducteurs, les semi-conducteurs intrinsèques et les semi-conducteurs extrinsèques.

a) les semi-conducteurs intrinsèques : Un semi-conducteur est dit intrinsèque lorsqu'il est pur : il ne comporte aucune impureté et son comportement électrique ne dépend que de la structure du matériau. Un semi-conducteur réel n'est jamais parfaitement intrinsèque mais peut parfois en être proche comme le silicium monocristallin pur.

b) les semi-conducteurs extrinsèques : Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques lui conférant des propriétés

électriques adaptées aux applications électroniques pour augmenter sa résistivité par exemple, ou augmenter le nombre de porteurs de charge libres.



4- **Dopage** : le dopage c'est le procédé par lequel on introduit des impuretés dans un semi-conducteur intrinsèque pour augmenter ses porteurs de charges libres. Il consiste à injecter dans les cristaux du semi-conducteur intrinsèque des atomes bien choisis pour le rendre soit un peu plus conducteurs, soit un peu moins. En fonction de la propriété du dopant on peut avoir :

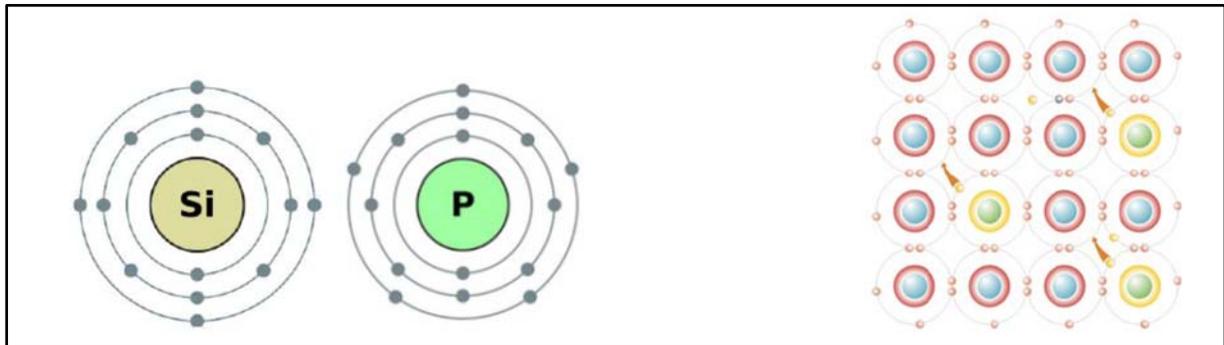
4-1- Dopage Type N :

Le dopage de type N consiste à augmenter la densité en électrons dans le semi-conducteur. Pour ce faire, on inclut un certain nombre d'atomes riches en électrons dans le semi-conducteur.

Par exemple, dans le cas du silicium (Si), les atomes de (Si) ont quatre électrons de valence, chacun étant lié à un atome O voisin par une liaison. Pour doper le silicium en N, on inclut un atome ayant cinq électrons de valence : le phosphore (P), l'arsenic (As) ou l'antimoine(Sb). etc.

Cet atome incorporé dans le réseau cristallin présentera quatre liaisons covalentes et un électron libre. Ce cinquième électron, qui n'est pas un électron de liaison, n'est que faiblement lié à l'atome et peut être facilement excité vers la bande de conduction. Aux températures ordinaires, quasiment tous ces électrons le sont. Comme l'excitation de ces électrons ne conduit pas à la formation de trous dans ce genre de matériau, le nombre d'électrons dépasse de loin le nombre de trous. Les électrons sont des porteurs majoritaires et les trous des

porteurs minoritaires. Et parce que les atomes à cinq électrons ont un électron supplémentaire à « donner », ils sont appelés atomes donneurs.



4-2- Dopage Type P :

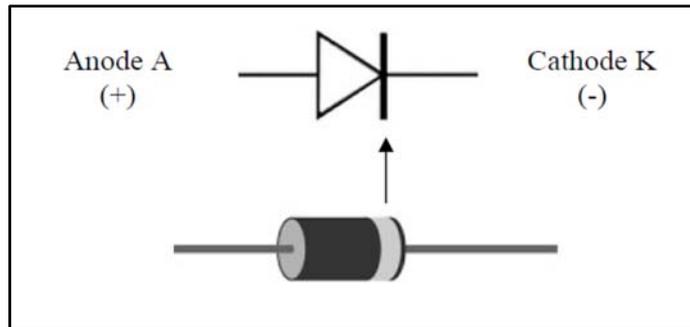
Le dopage de type P consiste à augmenter la densité en trous dans le semi-conducteur. Pour le faire, on inclut un certain nombre d'atomes pauvres en électrons dans le semi-conducteur afin de créer un excès de trous. Dans l'exemple du silicium, on inclura un atome trivalent (colonne III du tableau périodique), généralement un atome de bore. Cet atome n'ayant que trois électrons de valence, il ne peut créer que trois liaisons covalentes avec ses quatre voisins créant ainsi un trou dans la structure, ce trou qui pourra être rempli par un électron donné par un atome de silicium voisin. Quand le dopage est suffisant, le nombre de trous dépasse de loin le nombre d'électrons. Les trous sont alors des porteurs majoritaires et les électrons des porteurs minoritaires.

5- Théorie de la diode :

L'une des applications les plus importantes des semi-conducteurs est la diode. C'est un composant électronique qui se trouve dans la majorité des appareils électronique de notre quotidien. Dans cette deuxième partie du cours, nous allons découvrir son fonctionnement, sa caractéristique et ses principales applications.

5-1- Définition et symbole :

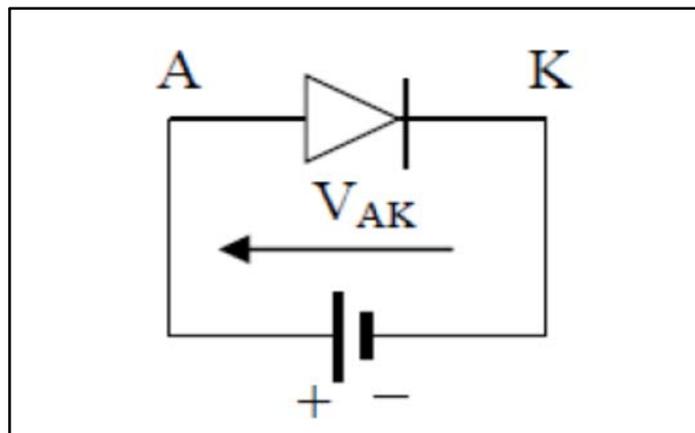
La diode est un dipôle passif non linéaire. Elle est polarisée. C'est un dipôle électrique unidirectionnel dont les bornes sont l'anode (A) et la cathode (K). La diode étant une jonction PN, son fonctionnement est similaire. L'intérêt principal de la diode, comme expliqué pour les jonctions PN, est de ne laisser passer le courant que dans un sens, et pas dans l'autre.



5-2- Polarisation de la diode :

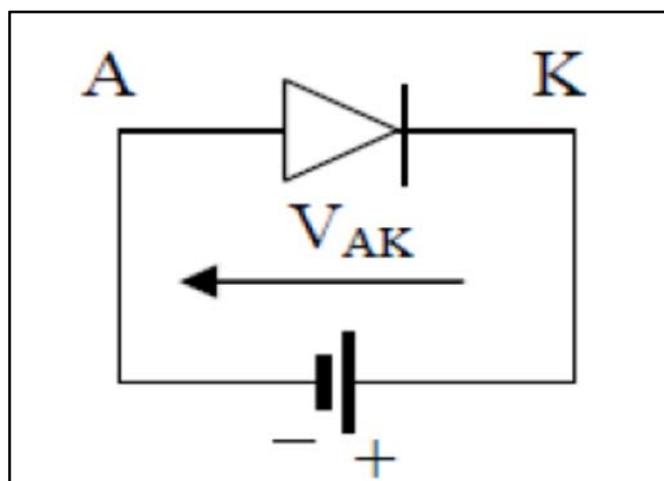
➤ Polarisation directe :

En polarisation directe, la tension appliquée ($V_{AK} > 0$) permet le passage du courant électrique de l'anode vers la cathode appelé **courant direct**.



➤ Polarisation inverse :

En polarisation inverse, la tension appliquée ($V_{AK} < 0$) empêche le passage du courant. Le courant inverse est pratiquement nul.



Type de diode		Diode réelle	Diode parfaite	Diode idéale
Schéma équivalent	Polarisation directe			
		$V_d = V_s + I_d \cdot r_d$	$V_d = V_s$	$V_d = V_s = 0$
	Polarisation inverse			
		La diode est bloquée		

5-3- Caractéristique statique courant-tension de la diode :

La caractéristique courant-tension de la diode est de forme exponentielle son équation est :

$$I_D = I_s \left[\exp \left(\frac{q V_D}{K_B T} \right) - 1 \right]$$

I_D : Courant dans la diode.

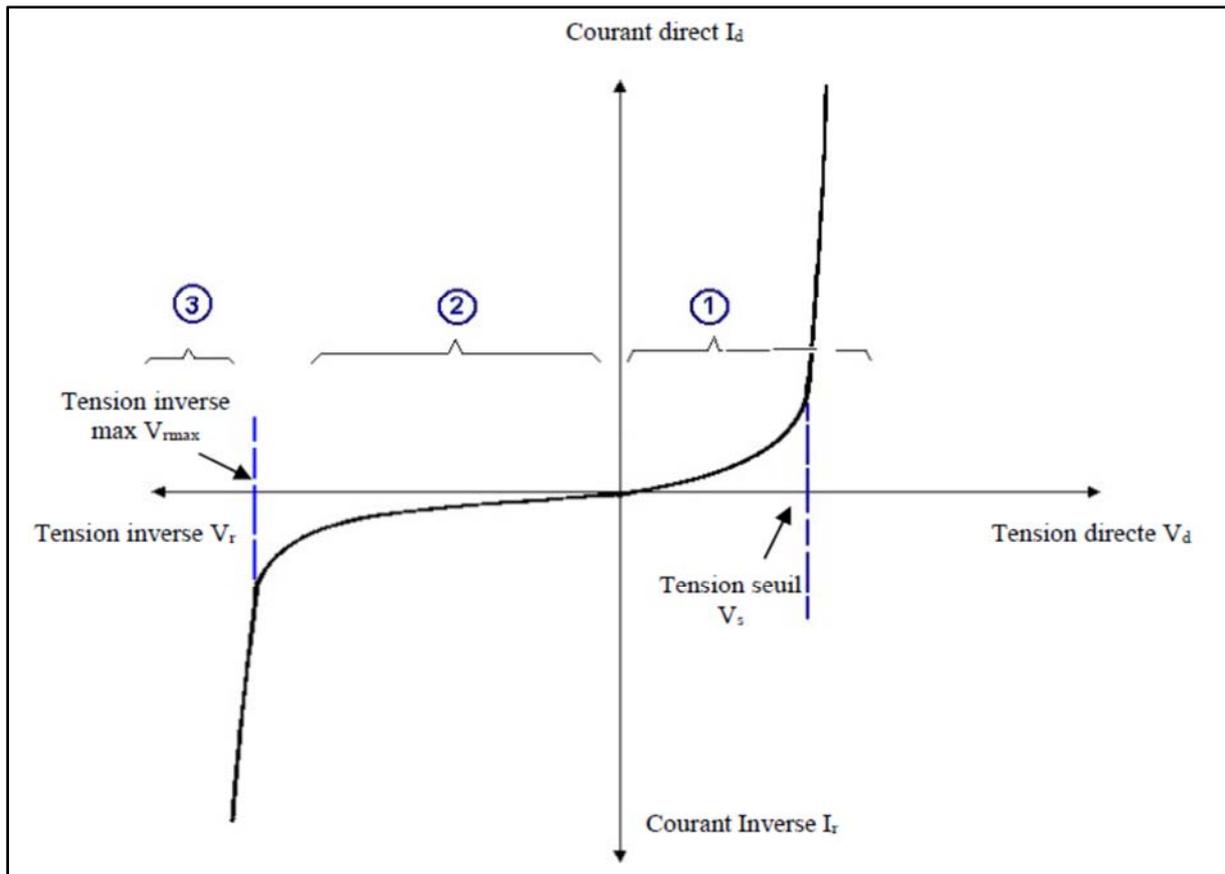
I_s : Courant de saturation de la diode.

q : Charge de l'électron, $q = 1,60219 \times 10^{-19}$ C. V_D : Tension aux bornes de la diode.

K_B : Constante de Boltzmann, $K_B = 1,38 \times 10^{-23}$ J.K⁻¹ = $8,62 \times 10^{-5}$ eV/K.

T : Température de la jonction en kelvin (°K).

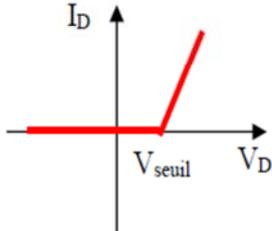
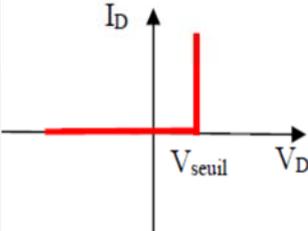
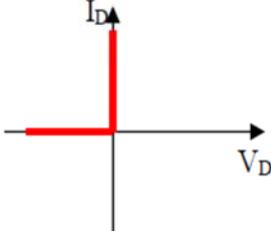
Le fonctionnement d'une diode D peut être analysé en étudiant la relation entre la tension à ses bornes V_{AK} et le courant qui la traverse I_D . cette relation est caractérisée par le graphe illustré dans la Figure.



Sur cette caractéristique on peut distinguer trois régions :

- **La région 1 :** la diode est polarisé en directe. Dans ce cas-là elle devient passante si la tension à ses bornes dépasse la tension seuil sinon, si $0 < V_{AK} < V_{seuil}$, la diode est bloquée.
- **La région 2 :** la diode est bloquée car elle est polarisée en inverse (V_{AK} inférieure à 0).
- **La région 3 :** au-delà d'une tension inverse max que peut supporter la diode lorsqu'elle est polarisée en inverse, la jonction PN et la diode sont détruites, par conséquence. Cette destruction est irréversible, la diode n'est plus en état de fonctionnement.

Pour des raisons de simplification, les caractéristiques suivantes sont utilisées pour les diodes réelle, idéale et parfaite.

Type de diode	Diode réelle	Diode parfaite	Diode idéale
Caractéristique de sortie			

5-4 Applications des diodes :

Les applications de la diode dans l'électronique sont diverses. Nous citons à titre d'exemple :

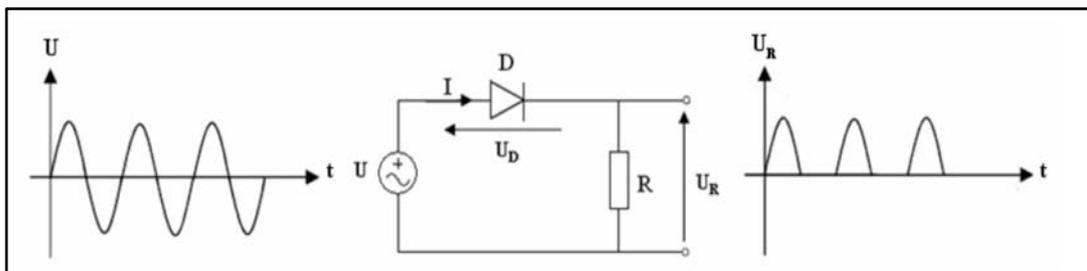
5-4-1- le Redressement : Le redressement est l'opération pour laquelle une tension alternative est convertie en une tension unidirectionnelle.

On distingue deux types de redresseurs : Simple alternance et double alternance.

a) Redressement simple alternance :

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

Hypothèse : On suppose que la diode D est idéale.

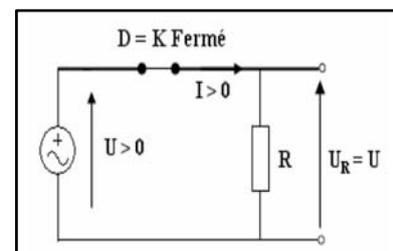


La tension U est sinusoïdale : $U = U_{Max} \sin(\omega t)$ et $\omega = 2\pi f$.

- Pendant l'alternance positive de la tension U ($U > 0$) :

La diode D est polarisée en direct donc elle est passante ($I > 0$ et $U_D = 0$) donc :

$$U_R = U - U_D = U$$

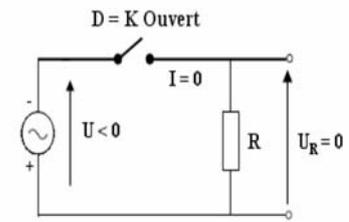


○ Pendant l'alternance négative de la tension U ($U < 0$) :

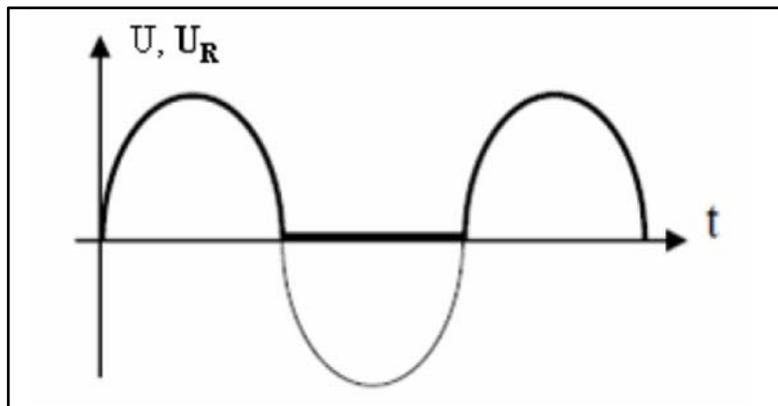
La diode D est polarisée en inverse donc elle est bloquée

($I = 0$ et $U_D < 0$) donc :

$$U_R = 0$$



Pendant la demi-période positive, la diode est conductrice ; elle est bloquée pendant la demi-période négative. De ce fait, le circuit élimine les demi-cycles négatifs, comme le montre la figure. On appelle cette forme de signal un signal simple alternance ; il donne un courant redressé dans la charge, ce qui veut dire que le courant ne circule que dans un sens.



b) Redressement double alternance :

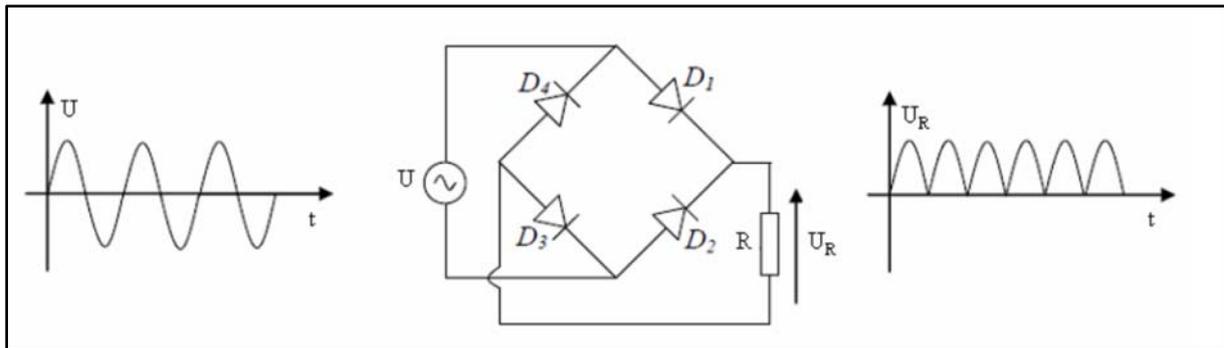
Contrairement au redressement simple alternance, le redressement double alternance utilise les deux alternances du signal alternatif de l'entrée V_e pour obtenir la tension DC à la sortie. L'un des circuits les plus utilisés pour le redressement double alternances est le pont de 4 diodes appelé aussi pont de Graetz.

Le pont de Graetz est constitué de quatre diodes montées en parallèle deux par deux. Les diodes D_1 et D_2 sont à cathodes communes et les diodes D_3 et D_4 sont à anodes communes.

Le pont est alimenté par une tension alternative sinusoïdale telle que :

$$U = U_{Max} \sin(\omega t)$$

Les diodes D_1 et D_3 conduisent pendant la demi-période positive, et D_2 et D_4 conduisent pendant la demi-période négative. Par conséquent, le courant redressé existe pendant les deux demi-cycles.



D'autres applications de la diode :

Redresseur avec filtrage

Stabilisation de la tension par la diode Zener

Ecrêtage

La diode Varicap

Les diodes électroluminescentes DEL

Les Photodiodes