

Diodes

Objectifs

La jonction PN, autrement dit la diode, constitue la brique de base de l'électronique moderne. Il s'agit du composant à semi-conducteur le plus simple. A partir d'une simple diode et de quelques composants électriques passifs, il est possible de réaliser des montages fort utiles tels que : redresseurs, écrêteurs, régulateurs,....

I. Introduction

La diode est le semi-conducteur de base. Son fonctionnement est assimilable à celui d'un interrupteur qui ne laisse passer le courant que dans un seul sens. C'est la diode qui va permettre de redresser le courant alternatif issu du secteur et autoriser la fabrication d'alimentations stabilisées.

En transmission de données, elle nous permet de démoduler simplement un signal modulé en amplitude.

Dans la catégorie des diodes, on trouve aussi des diodes de régulation (diodes Zener) qui ont un comportement de source de tension.

Dans ce cours, nous n'étudierons que les diodes à jonction dites de signal. Nous aborderons les notions de point de polarisation, droite de charge statique et fonctionnement dynamique.

II. Les semi-conducteurs en bref

II-1 Rappels sur la structure de la matière

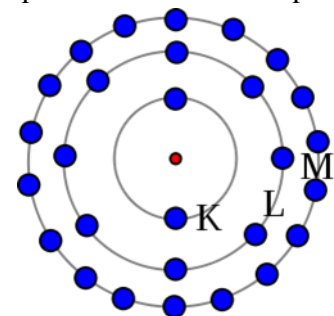
L'atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons de charge électrique q négative ($-1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb). Le noyau contient deux types de particules :

- Les neutrons qui ne sont pas chargés
- Les protons qui portent une charge électrique $+q$

L'atome étant électriquement neutre, le nombre de protons est égal au nombre d'électrons.

Les électrons d'un atome gravitant autour du noyau sont assujettis à occuper des niveaux d'énergie discrets E_1, E_2, \dots, E_n , définissant chacun une couche électronique. Plus le niveau est élevé, plus la couche qui lui correspond est éloignée du noyau. Chaque couche électronique occupe $2n^2$ électrons d'après le **principe de Pauli**, par exemple :

- $n = 1$, la première couche occupe 2 électrons nommé : couche K
- $n = 2$, la première couche occupe 8 électrons nommé : couche L
- $n = 3$, la première couche occupe 18 électrons nommé : couche M



Exemple : Atome de Silicium

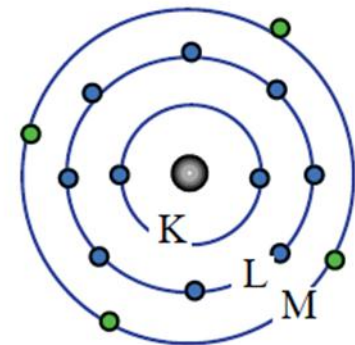
L'atome de silicium possède 14 électrons ($Z = 14$). Ces électrons sont répartis sur trois couches électroniques :

- K (2 électrons)
- L (8 électrons)

- M (4 électrons)

On distingue :

- ❖ Les **électrons** internes qui occupent les premières couches.
Ils sont alors **très fortement liés** au noyau
- ❖ Les **électrons** de valence (ou périphériques) qui occupent la couche la plus externe. Ces électrons de valence sont **peu liés** au noyau.



Atome de silicium

Contrairement aux deux premières couches (K et L), la dernière couche (M) est incomplète, elle peut accueillir 4 électrons supplémentaires. **En effet, Il faut savoir que tous les atomes tendent à avoir huit électrons sur leur couche périphérique.**

Les électrons se placent successivement sur les différentes couches (ils remplissent une couche avant de passer à la suivante): on dit que l'atome est dans son état fondamental.

Lorsqu'un électron appartenant à une couche donnée dans l'état fondamental passe sur une couche plus éloignée du noyau, on dit que l'atome est dans un état excité qui est instable. (Ex: ceci se produit si on fournit de l'énergie à l'atome par une élévation de température par exemple).

- Liaison covalente :

Deux atomes s'associent en mettant en commun deux électrons périphériques.

- Conducteur :

Il permet un passage facile du courant électrique. Ceci est dû au fait que les électrons des couches externes se libèrent très facilement de cette couche pour circuler de façon désordonnée à travers le réseau d'ions fixes du cristal.

- Isolant :

Il interdit le passage du courant. Ceci est dû au fait qu'il n'y a aucun électron libre dans l'édifice. Seul un champ électrique intense permet la libération des électrons: on dit qu'il y a claquage de l'isolant.

- Semi-conducteurs intrinsèques :

Les corps simples semi-conducteurs sont obtenus dans le groupe IV de la classification périodique des éléments (voir le tableau 1.1). Ce sont le germanium, et surtout le silicium.

	III	IV	V	
	5 B (Bore)	6 C (Carbone)	7 N (Azote)	
	13 Al (Aluminium)	14 Si (Silicium)	15 P (Phosphore)	16 S (Soufre)
30 Zn (Zinc)	31 Ga (Gallium)	32 Ge (Germanium)	33 As (Arsenic)	34 Se (Sélénium)
48 Cd (Cadmium)	49 In (Indium)	50 Sn (Etain)	51 Sb (Antimoine)	

Intrinsèque = corps parfaitement pur

Extrinsèque = corps qui comporte des impuretés

➤ Notion de trou :

Lorsqu'une liaison covalente entre deux atomes se rompt, l'électron libéré laisse à sa place un vide appelé trou. Ainsi, un électron voisin peut venir combler ce trou. Le trou est donc appelé porteur positif.

Ainsi, toute rupture de liaison covalente donne naissance à deux mouvements désordonnés d'électrons :

- celui de l'électron libéré au sein du cristal,
- celui des électrons de liaisons covalentes circulant de trou en trou.

On dit qu'on a un « déplacement de trou » pour ne pas confondre avec le déplacement de l'électron libre.

➤ Semi-conducteur extrinsèque :

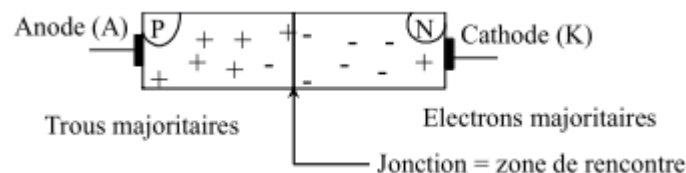
C'est donc un semi-conducteur qui comporte des impuretés. Il a subi ce que l'on nomme dopage: c'est à dire qu'on a rajouté des atomes d'impureté au cristal pour augmenter le nombre d'électrons ou de trous, ceci afin d'augmenter la conduction au sein du semi-conducteur (la conductivité est donc due majoritairement aux impuretés).

On distingue deux types de semi-conducteurs:

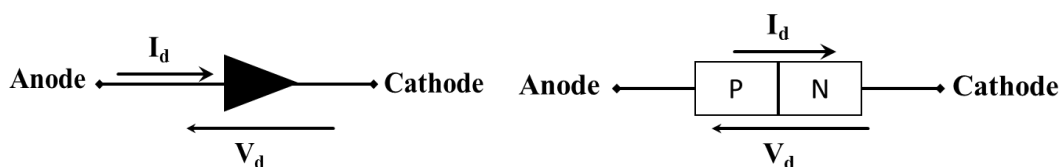
- **type N** : Il y a eu ajout d'atomes d'impureté afin d'avoir un excès d'électrons. Ainsi, les électrons sont dits porteurs majoritaires. Les dopeurs utilisés pour le germanium et le silicium sont des éléments voisins : azote, phosphore, arsenic, antimoine.
- **type P** : Il y a eu ajout d'atomes d'impureté afin d'avoir un excès de trous. Ainsi, les trous sont dits porteurs majoritaires. Les dopeurs utilisés pour le germanium et le silicium sont des éléments voisins : bore, aluminium, gallium, indium.

III. La jonction P-N : diode à jonction

La diode est un composant non linéaire (relation entre le courant et la tension est donnée par une équation non linéaire). Elle représente la juxtaposition de deux semi-conducteurs, l'un de type P et l'autre de type N:



Symbole électrique :



Convention récepteur : V_d et I_d sont positifs.

Nous allons étudier le comportement électrique de la diode : que se passe-t-il lorsqu'on applique une tension aux bornes de la diode ?

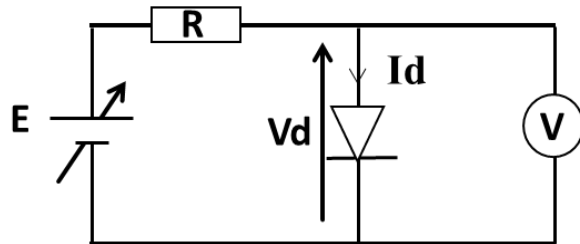
Le comportement d'une diode peut se déduire de sa caractéristique électrique courant – tension.

III-1 Caractéristique statique d'une diode

Relevé expérimental

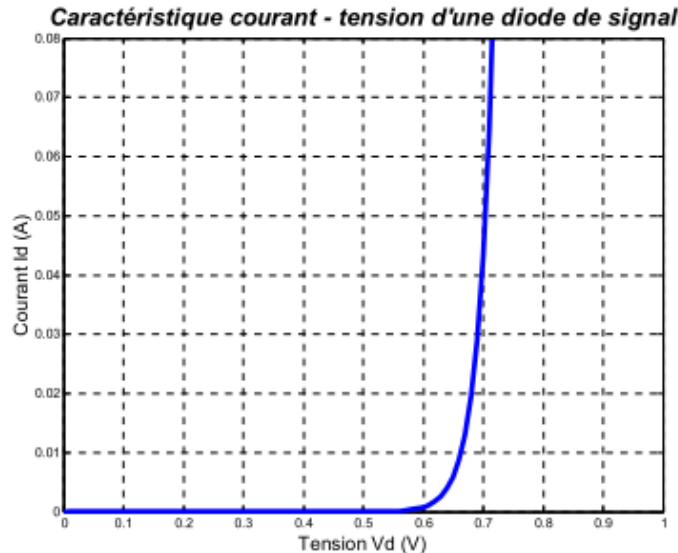
On observe l'évolution du courant traversant la diode en fonction de la tension à ses bornes à l'aide du montage expérimental suivant :

La tension continue E est variable.



❖ En polarisation directe :

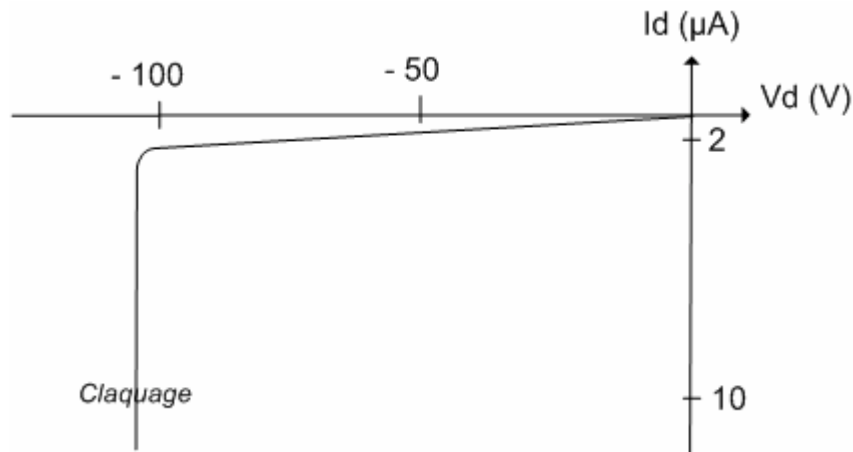
La tension varie de 0 à $+E_{\max}$. Les mesures nous donnent :



Première constatation: la caractéristique est non linéaire

❖ En polarisation inverse :

La tension E varie de $-E_{\max}$ à 0.

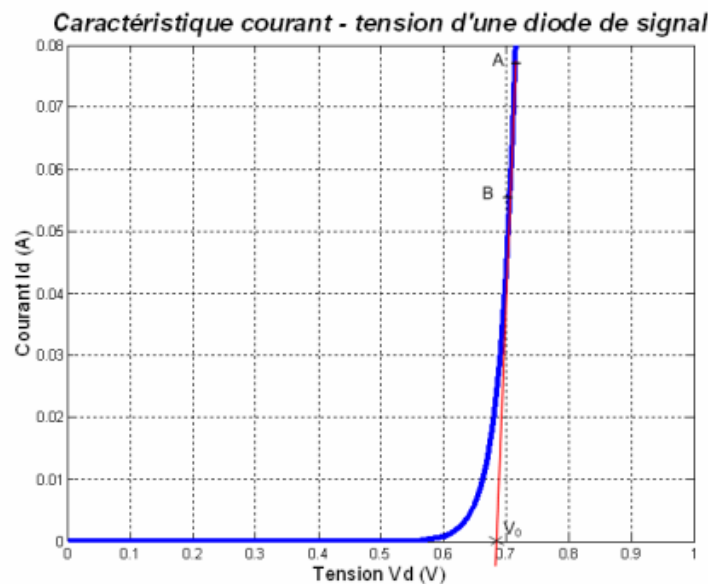


III-2 Interprétation de la caractéristique

La caractéristique nous indique que la diode est un dipôle non linéaire.
On ne pourra donc pas utiliser le théorème de superposition !

En polarisation directe:

La croissance du courant en fonction de la tension est d'abord exponentielle, puis elle tend à devenir linéaire : en prolongeant la partie rectiligne AB, cette droite coupe l'axe des tensions en un point d'abscisse V_0 (voir figure ci-après) :



Pour une diode au silicium $V_0 = 0,6V$ à $0,7V$.

Pour une diode au germanium $V_0 = 0,3V$.

On constate la présence d'un seuil réel de tension V_s au-dessous de laquelle le courant I_D reste nul. Pour la diode 1N914, on a $V_s = 0,5V$.

On préfère utiliser le seuil pratique de tension qui est l'abscisse V_0 définie précédemment. Cette valeur est plus importante que V_s : elle va nous permettre de linéariser la caractéristique.

On dit que la diode est passante ou conductrice (elle laisse passer le courant) dès que la tension V_D aux bornes de la diode devient supérieure ou égale à V_0 . La diode est alors polarisée en directe et le courant croît assez rapidement au-delà de la tension V_0 .

En polarisation inverse :

Le courant croît très lentement avec la tension inverse. Cet effet est dû à un mauvais isolement de la jonction donnant naissance à des courants de fuite. Le courant inverse est très faible (de l'ordre du nano ampère) et on pourra le négliger ($I_d = 0$).

On dit que la diode est bloquée : elle ne laisse pas passer le courant, $I_d=0$. La diode est alors polarisée en inverse.

Claquage d'une jonction (polarisation en inverse) :

Le courant inverse augmente très fortement au delà d'une certaine tension inverse, appelée tension de claquage (elle varie entre 10 et 1000 Volts suivant le type de diode).

L'emballement thermique qu'entraîne la tension de claquage détruit la diode dans la plupart des cas.

III-3 Équation de la caractéristique $I_d=f(V_d)$

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right) \text{ avec } V_T = \frac{kT}{q}$$

T = température en Kelvin

q = charge de l'électron = $1,6 \cdot 10^{-19}$ C

k = constante de Boltzman = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

I_s = courant inverse de jonction = courant de fuite (de l'ordre de 10 nA)

A la température ambiante (26°C), on a $V_T \approx 26\text{mV}$.

En directe, on peut écrire : $I_d = I_s * e^{\frac{V_d}{V_T}}$

En inverse, on peut écrire: $I_d = -I_s$

IV. Modélisation de la diode en régime statique

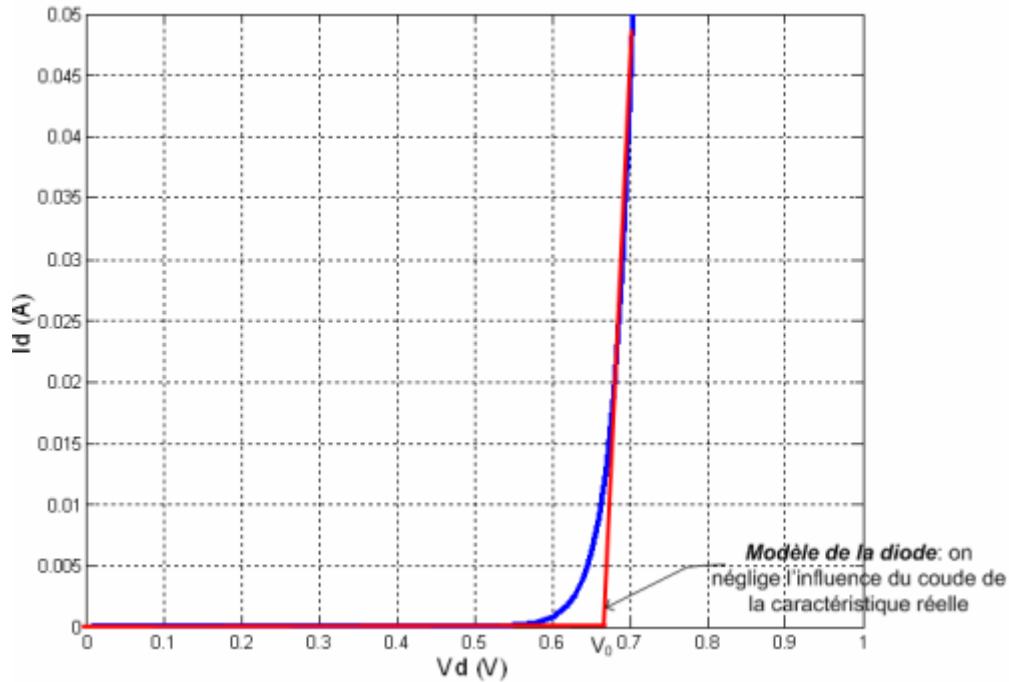
L'équation de la caractéristique statique de la diode n'est pas très simple ni très pratique. On va donc chercher à modéliser la diode. Le modèle doit être un compromis entre la simplicité et la fidélité.

- ✓ Simple : on ne retient que les caractéristiques, grandeurs importantes pour le montage étudié.
- ✓ Fidèle : le modèle utilisé doit fournir des résultats valables, réalistes.

IV-1 Diode avec seuil et résistance (diode réelle)

En directe, la caractéristique est une exponentielle au départ, puis elle tend à devenir linéaire.

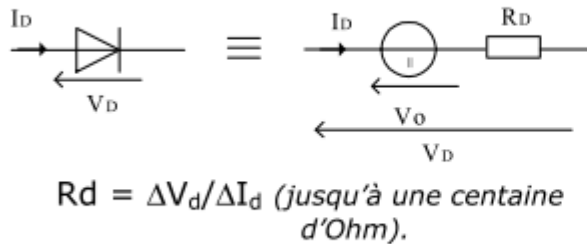
On peut donc assimiler la caractéristique à une droite à partir de $V_d = V_o$.



On prend donc en compte la résistance interne statique R_D de la diode.

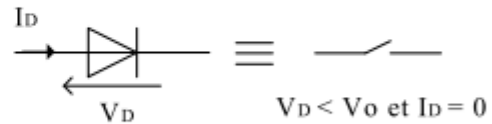
En inverse, on néglige le courant qui est très faible : $I_D = 0$

⇒ **En directe:**

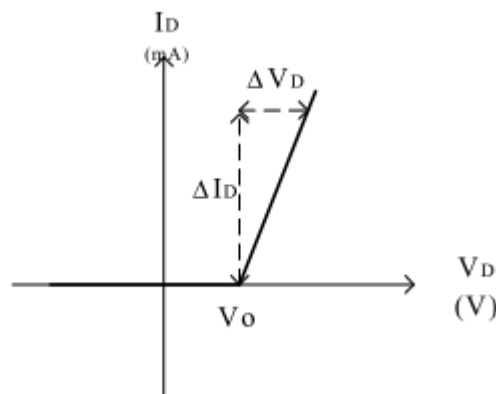


La diode conduit dès que $V_d \geq V_0$

⇒ **En inverse:**



Caractéristiques Td- V_d :

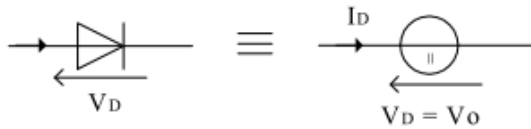


IV-2 Diode avec seuil (diode semi-réelle)

On néglige la résistance interne de la diode et on ne tient compte que de sa tension de seuil.

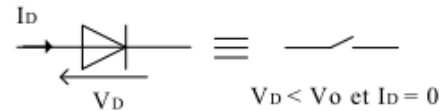
La diode est alors équivalente à une source de tension continue idéale V_0 (en directe) : $V_D = V_0$ quel que soit la valeur du courant I_D .

⇒ **En directe:**

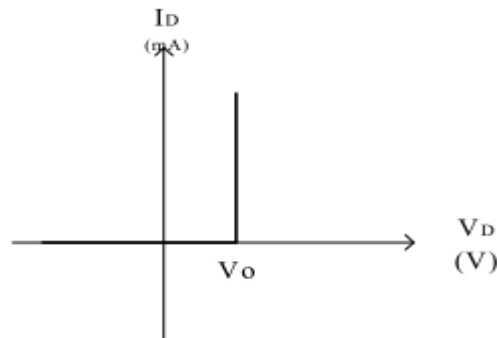


La diode conduit dès que $V_D \geq V_o$

⇒ **En inverse:**



Caractéristiques Td-Vd :



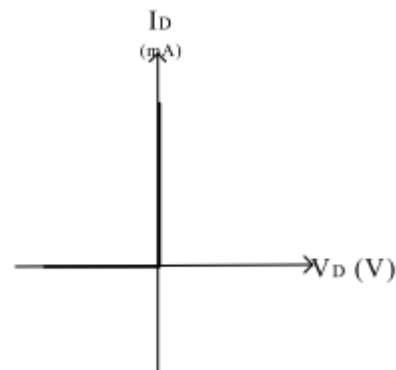
IV-3 Diode idéale

On néglige la tension de seuil et la résistance interne de la diode. Ce modèle est utile pour des pré-calculs, surtout si les diodes sont dans des circuits où les tensions sont élevées (V_o est alors négligeable devant les autres tensions du circuit).

La diode est assimilée à un court-circuit en polarisation directe et à un circuit ouvert en polarisation inverse.

Diode passante : $V_D = 0$ et $I_D > 0$

Diode bloquée : $V_D < 0$ et $I_D = 0$



V. Point de polarisation, droite de charge

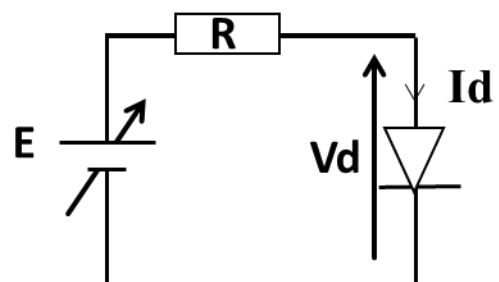
V-1 : Droite de charge statique

Soit le montage suivant :

Le courant I_D et la tension V_D sont imposés par le circuit électrique placé autour de la diode. En effet, nous avons:

$$E - V_D = R \cdot I_D$$

La droite d'équation $V_D = E - R \cdot I_D$ représente la droite de charge statique du montage.



L'intersection entre la droite de charge statique et la caractéristique de la diode représente le point de fonctionnement du circuit encore appelé point de polarisation.

