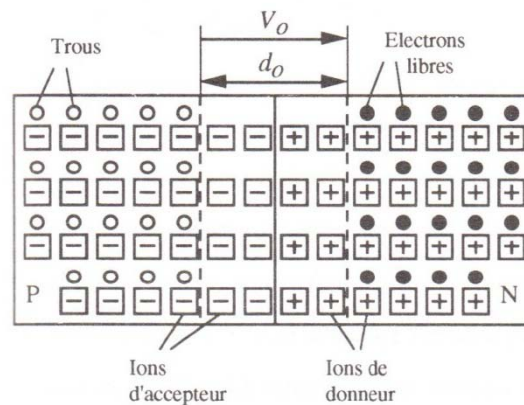


# Les Diodes

## I. La jonction PN



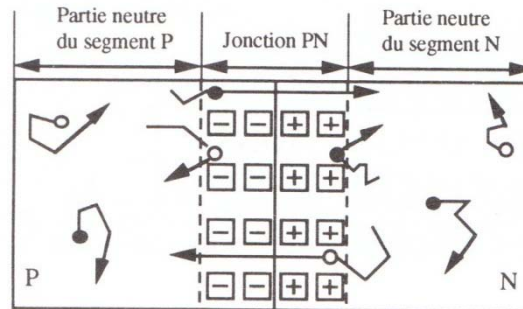
(Valkov)

Soit un cristal de silicium composé d'un segment de type P et d'un segment de type N. Au moment même de la création de la jonction entre les deux segments un processus de diffusion se déclenche : les trous en excès du segment P commencent à pénétrer dans le segment N et les électrons libres en excès du segment N commencent à pénétrer dans le segment P. La diffusion est due aux différences de concentration des électrons libres et des trous dans chacun des segments.

En arrivant dans le segment N, les trous recombinent avec les électrons, et réciproquement, en arrivant dans le segment P, les électrons recombinent avec les trous. Conséquence : les couches d'atomes de donneurs les plus proches de la limite métallurgique entre les deux segments sont démunies d'électrons libres et se transforment en une charge positive immobile composée d'ions de donneurs et d'atomes de silicium (neutres). Et, inversement, les couches d'atomes de receveurs les plus proches de la limite sont démunies de trous et se transforment en une charge négative immobile, composée d'ions accepteurs et d'atomes de silicium (neutres). On appelle cette zone de charges + et - immobiles la **jonction PN**.

Entre ces deux charges égales en valeur absolue et opposées, se crée un champ électrique dont l'intensité est proportionnelle à leur quantité. La direction de ce champ est telle qu'il s'oppose à la diffusion des trous et des électrons par laquelle il a été créé. Au fur et à mesure que le champ électrique s'intensifie, la diffusion diminue.

En même temps, dans les deux segments du cristal, le processus de thermogénération de paires électrons/trous par les atomes de silicium existe.



(Valkov)

Pendant leur mouvement chaotique, certains trous du segment P entrent dans la zone de charges immobiles (la jonction PN), mais sont repoussés par le champ électrique et retournent dans la zone P. A l'inverse, certains électrons libres du segment P peuvent entrer dans la jonction et sont, en revanche, accélérés par le champ électrique jusqu'à entrer dans la partie neutre du segment N.

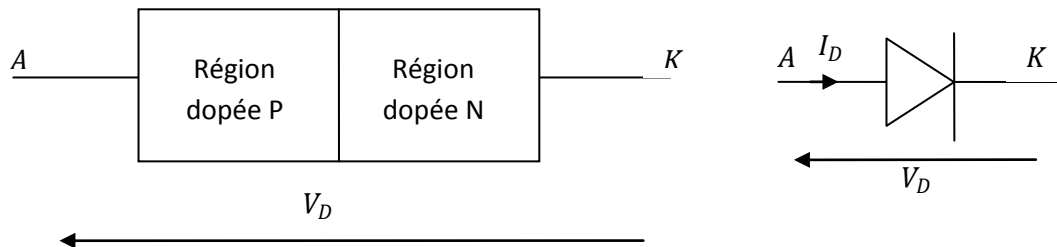
De la même manière, les électrons de la zone N qui entrent dans la jonction PN sont repoussés vers le segment N et les trous sont quant à eux accélérés jusqu'à entrer dans la partie neutre du segment P.

Les directions de déplacement des électrons et des trous de thermogénération sous l'influence du champ électrique de la jonction PN sont opposées à celles des électrons et des trous de diffusion. Leur quantité ne dépend pas de l'intensité de champ, mais de la température et de la surface transversale de la jonction. Comme la diffusion diminue quand l'intensité du champ augmente, un équilibre va se créer : la quantité de charges immobiles et le champ cessent d'augmenter. Un équilibre dynamique s'installe dans la jonction. Cet équilibre se caractérise par une intensité  $E_0$  du champ, une largeur  $d_0$  de la jonction et une différence de potentiel  $V_0$  entre les 2 charges immobiles et opposées dans la jonction, aussi appelé potentiel de contact.

Ex :  $V_0 = 0,5$  à  $0,7V$  pour le Silicium  
 $V_0 = 0,2$  à  $0,3V$  pour le Germanium

## II. La diode à jonction PN

Si on munit le cristal de silicium précédent de deux électrodes, il devient une diode à jonction PN. Les électrodes s'appellent anode (A) et cathode (K). Le symbole d'une diode est donné ci-dessous :



Quand la tension  $V_D$  appliquée entre l'anode et la cathode est positive, la diode est polarisée en direct.

Quand la tension  $V_D$  appliquée entre l'anode et la cathode est négative, la diode est polarisée en inverse.

Le comportement de la diode polarisée en direct et en inverse est décrit par une seule équation :

$$I_D = I_s (e^{\frac{V_D}{mV_T}} - 1)$$

avec :  $V_T$  = potentiel thermique = 26 mV,  $m$  = coefficient empirique = 1 à 2

$I_s$  = courant inverse (ou courant de saturation ou courant thermique) C'est le courant traversant la diode quand elle est polarisée en inverse. Parce que son origine est thermique,  $I_s$  est fortement dépendant de la température. On utilise souvent l'expression empirique

$$I_s = I_{s0} \cdot e^{a(T-T_0)}$$

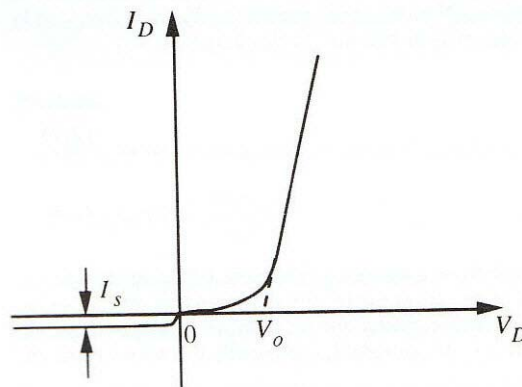
où  $I_s$  = courant de saturation à la température  $T$

$I_{s0}$  = courant de saturation à  $T_0$

$a$  = coefficient empirique ( $a \approx 0,1$  pour les diodes au silicium ,  
 $a \approx 0,07$  pour le germanium)

Pour calculer  $I_s$ , il suffit donc de connaître  $I_{s0}$  à  $T_0$ . Ces valeurs sont normalement données dans les databooks.

Caractéristiques de la diode.



(Valkov)

L'équation  $I_D$  est ci-représenté graphiquement. C'est la caractéristique de la diode :

- ✓ En polarisation directe ( $V_D > 0$ ), la caractéristique est exponentielle et prend une allure presque linéaire pour des valeurs de  $V_D$  proches de  $V_0$ . Pour les calculs pratiques, on obtient la valeur approximative de  $V_0$  en prolongeant la partie linéaire de la caractéristique directe jusqu'à l'intersection avec l'abscisse.
- ✓ En polarisation inverse ( $V_D < 0$ ), la caractéristique devient vite horizontale. Etant donné que le courant inverse  $I_s$  est beaucoup plus petit que le courant direct, son échelle sur la caractéristique doit être beaucoup plus grande que celle du courant direct, sinon il ne pourrait pas être distingué de l'abscisse.

### III. Modèles statiques de la diode à jonction PN.

Un modèle est une représentation simplifiée d'une chose complexe. Les modèles sont utilisés pour faciliter l'analyse des phénomènes, des systèmes.

La diode, par exemple, est un élément non linéaire parce que l'équation  $I_D = f(V_D)$  est non linéaire. L'analyse d'un circuit électrique comportant des diodes est difficile parce que le système d'équations décrivant le circuit est non linéaire. Pour faciliter cette analyse, on remplace les diodes par des modèles linéaires.

Les modèles linéaires de composant et de circuits électriques sont composés exclusivement d'éléments linéaires : générateurs de tension, de courant idéaux, courts-circuits, circuits ouverts, résistances, capacités, inductance...

Cette simplification se fait au détriment de la précision selon la complexité du circuit et la précision des analyses, on utilise des complexes ± complexes.

Il y a aussi différents modèles selon le but poursuivi, le régime considéré.

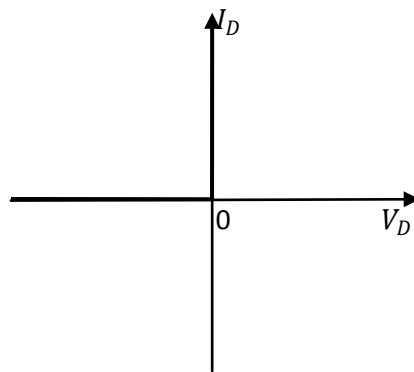
Les modèles des composants et des circuits électriques peuvent être représentés sous forme graphique, sous forme analytique, ou sous forme de schéma équivalent.

### 1. Le modèle idéal.

#### Forme analytique :

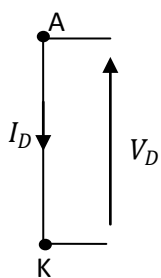
- ✓ En direct, la diode est considérée comme un court-circuit :  $V_D = 0$  pour  $I_D \geq 0$ .
- ✓ En inverse, la diode est considérée comme un circuit ouvert  $I_D = 0$  pour  $V_D \leq 0$ .

#### Forme graphique du modèle idéal d'une diode :

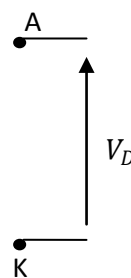


#### Schéma équivalent

Diode en direct



Diode en inverse



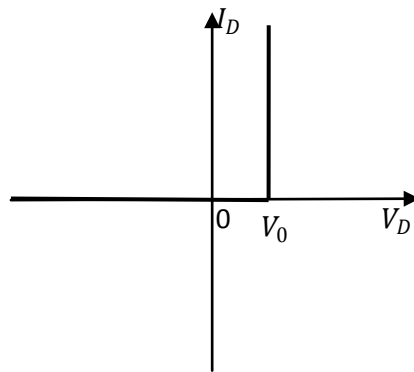
Ce modèle est le plus simple, mais le moins précis. Il est utilisé pour des estimations rapides, ou des analyses de circuit complexe.

## 2. Le modèle à seuil, ou modèle pratique.

### Forme analytique.

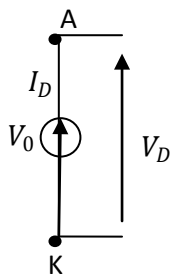
- ✓ -  $V_D = V_0$  pour  $I_D \geq 0$
- ✓ -  $I_D = 0$  pour  $V_D \leq V_0$  avec  $V_0$  = tension de seuil

### Forme graphique.

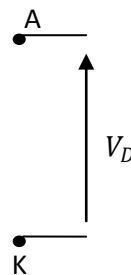


### Schéma équivalent

Diode en direct



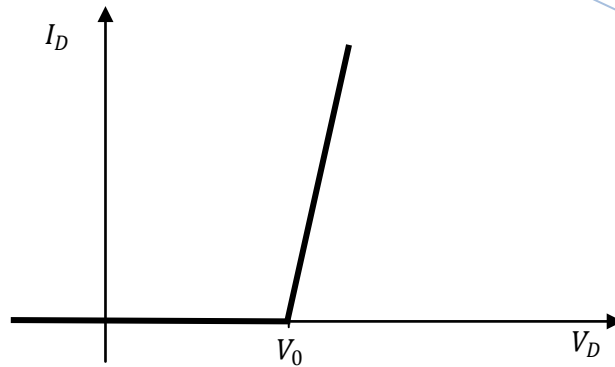
Diode en inverse



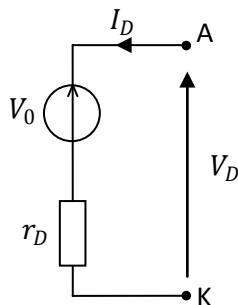
## 3. Le modèle linéaire, ou modèle réel

### Forme analytique

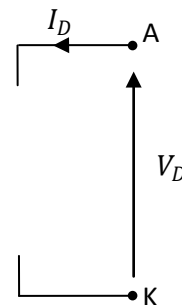
- ✓  $V_D = V_0 + r_d I_D$  pour  $I_D \geq 0$   $r_d$  = résistance dynamique. Elle est déterminée par la pente moyenne de la partie utilisée de la caractéristique de la diode.
- ✓  $I_D = 0$  pour  $V_D \leq V_0$

Forme graphiqueSchéma équivalent

Diode en direct



Diode en inverse

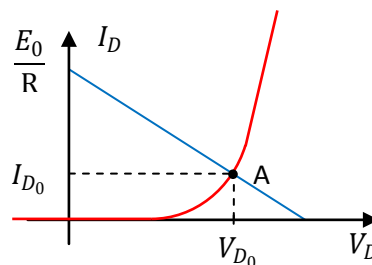
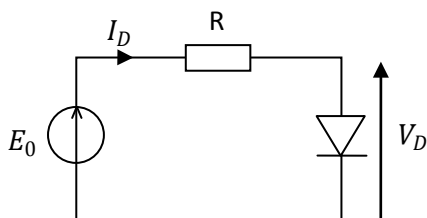


Les 3 modèles statiques de la diode sont linéaires. Parmi eux, le modèle linéarisé est le plus précis, mais le plus complexe. Il représente une très bonne approximation linéaire de la caractéristique d'une diode réelle.

IV. Modèles dynamiques de la diode (régime petits signaux)

Quand on fait passer un courant variable (par exemple, sinusoïdal)  $i_d$  à travers la diode, si la tension  $v_d$  est de la même forme, on dit que la diode fonctionne en régime linéaire.

Circuit de polarisation

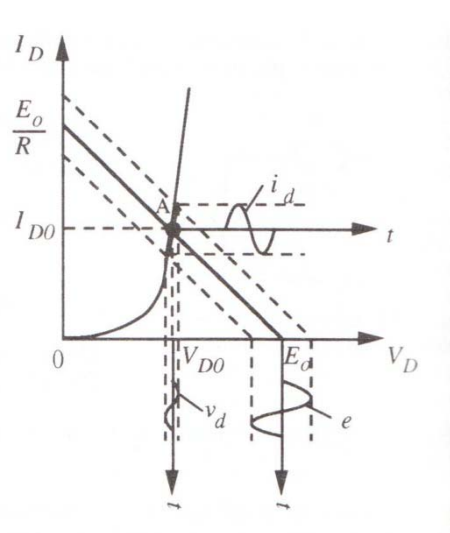
On a :  $V_D = E - RI_D$ On ajoute une tension sinusoïdale  $e$  à la tension  $E_0$ .

Pour  $I_D = 0$ ,  $V_D = E = E_0 + e$

Pour  $V_D = 0$ ,  $I_D = \frac{E}{R} = \frac{E_0}{R} + \frac{e}{R}$

Ce qui signifie que la droite de charge se déplace parallèlement à elle-même suivant les changements de  $e$ . Le point d'intersection de la droite de charge et de la caractéristique de la diode se déplace donc autour du point de repos, aussi appelé point de polarisation.

On verra donc apparaître une composante sinusoïdale  $i_d$  autour de  $I_D$  ainsi qu'une composante sinusoïdale  $v_d$ .



(Valkov)

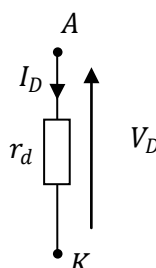
Si la section de la caractéristique sur laquelle se déplace le point d'intersection est linéaire, alors  $e$ ,  $i_d$  et  $v_d$  peuvent être considérés comme de petits signaux.

$\frac{v_d}{i_d} = \frac{dV_D}{dI_D} = r_d$ : détermine la pente de la caractéristique de la diode au point de fonctionnement A. C'est une résistance appelée résistance dynamique ou résistance différentielle de la diode. Comme la pente aux différents points de repos est différente, la résistance  $r_d$  n'est pas constante.

La résistance dynamique  $r_d$  est déterminée de la même manière à n'importe quel point.

Pour les points situés sur la partie linéaire de la caractéristique,  $r_d = r_D$ .

Schéma équivalent petit signaux





## V. La diode Zéner

### 1. Phénomène de claquage: Caractéristique inverse ( $V_d < 0$ ) :

En polarisation inverse, quand la tension appliquée dépasse une valeur spécifiée par le fabricant, le courant décroît très rapidement. (Ce courant est déjà négatif). S'il n'est pas limité par des éléments externes, il y a destruction rapide de la diode.

Deux phénomènes sont à l'origine de ce résultat :

- ✓ Phénomène d'avalanche : Quand le champ électrique au niveau de la jonction devient trop intense, les électrons accélérés peuvent ioniser les atomes par les atomes, ce qui libère d'autres électrons qui sont à leur tour accélérés, et qui ioniseront à leur tour d'autres atomes...  
Le phénomène devient incontrôlable, comme la création d'une avalanche, et le courant devient important.
- ✓ Phénomène Zéner<sup>1</sup> (effet tunnel) : Les électrons sont arrachés aux atomes directement par le champ électrique dans la zone de transition et créent un courant qui devient vite intense quand la tension devient inférieure à  $V_d$  (= tension Zéner).

Si on construit la diode pour que le phénomène Zéner l'emporte sur le phénomène d'avalanche (en s'arrangeant pour que la largeur de la jonction PN soit petite), on obtient une diode Zéner.

### 2. La diode Zéner

#### a. Définition :

Nous avons déjà parlé de l'effet Zéner. Il concerne la caractéristique inverse de la diode.

Une diode Zéner est donc une diode à jonction qui, sous une tension inverse supérieure à une tension de claquage, supporte sans dommage un courant inverse relativement important. Autrement dit, le claquage pour cette diode est non destructif et réversible. Cette propriété est obtenue par un dopage convenable du semi-conducteur.

---

<sup>1</sup> Zéner = nom du savant qui a étudié l'effet tunnel.

Représentation symbolique : 2 symboles permettent de représenter la diode Zéner.

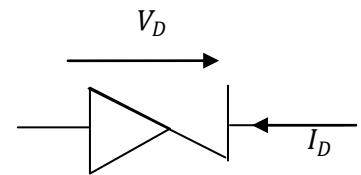


### b. Caractéristique

En direct, une diode Zéner se comporte comme une diode normale.

En inverse, on fait en sorte que, par construction, l'effet Zéner se produise à une tension bien déterminée, notée  $V_Z$ , et appelée tension Zéner, et qu'il ne soit pas destructif. La caractéristique inverse présente alors l'allure d'un générateur de tension à faible résistance interne, à condition de ne pas dépasser le courant  $I_{Z_m}$  pour lequel la puissance dissipée dans la diode sera le maximum admissible.

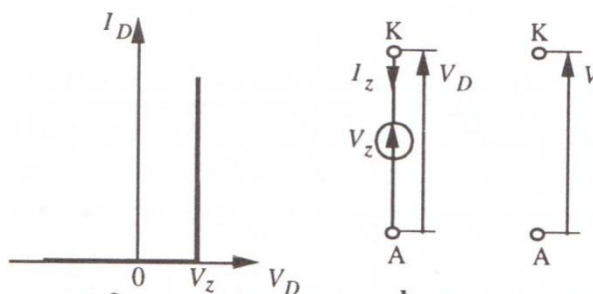
Rq : L'intérêt d'une diode Zéner résidant dans ses caractéristiques inverse, on flèche généralement le courant et la tension en sens inverse par rapport au fléchage d'une diode "normale", et ce, afin de travailler avec des courants et des tensions positifs en inverse. On utilisera donc, pour la suite du cours, les conventions ci-contre :



### c. Schémas équivalents (Modèles)

Remarque : Pour le fonctionnement en direct, la diode Zéner est une diode ordinaire qui peut être substituée par l'un des modèles statiques précédemment.

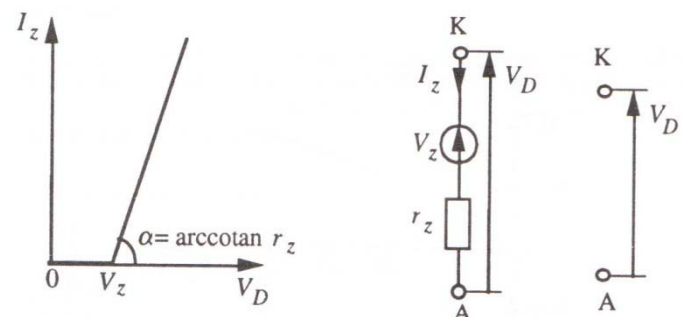
#### α. Modèle à Seuil :



$$U_D = V_Z \text{ pour } I_D \geq 0$$

$$I_D = 0 \text{ pour } V_D \leq V_Z$$

#### β. Modèle linéarisé :



$$V_d = V_Z + r_Z I_Z \text{ pour } I_d \geq 0$$

$$I_Z = 0 \text{ pour } V_d \leq V_Z$$