

Chapitre2

Contact entre semi-conducteurs Jonction P-N (Diode)

On sait réaliser expérimentalement, dans un même monocristal d'un semi-conducteur deux régions de type P et N en contact à l'échelle atomique. La surface de séparation entre ces deux régions s'appelle la **jonction P-N**.

On rappelle les caractéristiques des deux régions:

Zone P:

- Les trous sont porteurs majoritaires,
- Les électrons sont porteurs minoritaires,
- Les atomes accepteurs forment un réseau d'ions négatifs fixes.

Zone N:

- Les électrons sont porteurs majoritaires
- Les trous sont porteurs minoritaires,
- Les atomes donneurs forment un réseau d'ions positifs fixes.

1. Jonction P-N non polarisée

En raison de la différence marquée en porteurs libres entre les différentes régions, les trous proches de la jonction (majoritaires dans la région P) diffusent vers la région N (où ils sont minoritaires) et piègent des électrons (phénomène de recombinaison).

De même, les électrons diffusent de la région N vers la région P et y sont piégés par les trous.

En conséquence, de part et d'autre de la jonction, il se crée une mince **zone de transition** appelée aussi **zone de déplétion** ou **zone de charge d'espace** (d'épaisseur $\approx 1 \mu m$) pratiquement dépourvue de porteurs libres mais contenant toujours des ions fixes provenant des atomes dopeurs:

- ions négatifs du côté P: \ominus ,
- ions positifs du côté N: \oplus .

L'excédent de charge négatives immobiles situées entre A et J ainsi que l'excédent de charges positives immobiles situées entre K et J créent un champ électrique interne \vec{E}_i orienté de la région N vers la région P. Il apparaît ainsi une différence de potentielle $V_d = V_K - V_A$ qui constitue une barrière d'énergie potentielle.

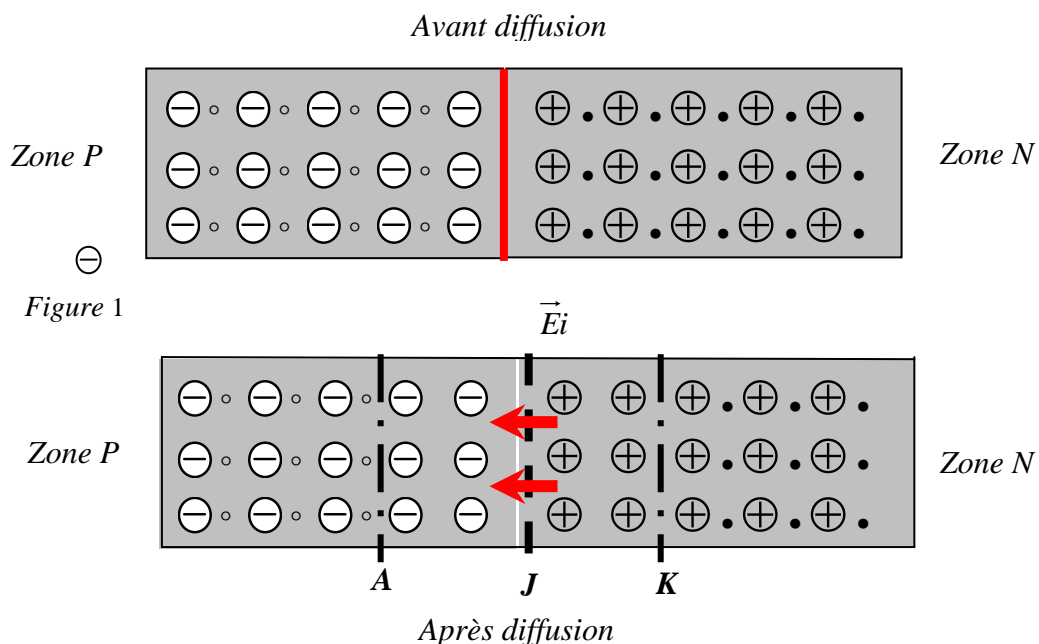


Figure 1

1.1. Courant de diffusion dû aux porteurs majoritaires

Région N:

Les électrons majoritaires arrivent par agitation thermique en K:

- la plus part sont repoussés par le champ interne \vec{E}_i vers la région N d'où ils proviennent.
- seuls quelque porteurs ayant acquit une énergie thermique suffisante peuvent franchir la barrière d'énergie créée par \vec{E}_i et passent vers la région P.

Le déplacement de ces quelques porteurs crée un courant compté positivement de P vers N.

Région P:

De façon similaire, les trous majoritaires arrivent par agitation thermique en A:

- la plus part sont repoussés par le champ interne \vec{E}_i vers la région P d'où ils proviennent.
- quelques un ont acquit par agitation thermique une énergie suffisante pour passer dans la région N. Ils contribuent à créer un courant compté positivement de P vers N.

Il existe donc au niveau de la jonction P-N un courant appelé **courant de diffusion** noté I_d correspondant au déplacement des charges majoritaires et qui est dirigé de la région P vers la région N.

Remarque: I_d • augmente avec la température de la jonction.

- augmente si la d.d.p. de diffusion V_d diminue.

1.2. Courant de saturation dû aux porteurs minoritaires

Région N:

Les trous minoritaires (très peu nombreux), dont une partie encore plus faible arrivant en K par effet d'agitation thermique, sont accélérés par \vec{E}_i et de ce fait sont propulsés dans la région P.

Région P:

Les électrons minoritaires qui arrivent en A, sous l'effet de l'agitation thermique, sont propulsés par le champ interne \vec{E}_i dans la région N.

Il existe donc au niveau de la jonction P-N un courant appelé **courant de saturation** noté I_s (opposé au sens du courant de diffusion) et qui est:

- lié au déplacement des porteurs de charges minoritaires,
- dirigé de la région N vers la région P.

Remarque:

- 1) La jonction P-N se trouve en circuit ouvert, le courant global dans la jonction est nul: $I = I_d + I_s = 0$ et $I_d = I_s$.
- 2) I_s dépend uniquement de la température. I_d dépend de la température et de V_d . Si l'on modifie V_d au moyen d'une d.d.p. extérieure, on pourrait faire varier fortement I_d sans modifier I_s .

2. La jonction P-N sous tension. Jonction P-N polarisée

2.1. Polarisation en sens direct

Lorsque l'extrémité de la région P est portée à un potentiel supérieur à celui de l'extrémité de la région N, on dit que la jonction P-N est **polarisée en directe**.

En polarisation directe, l'application de la tension V aux bornes de la jonction (figure 2) revient au fait à superposer au champ électrique interne \vec{E}_i un champ \vec{E}_a de sens opposé.

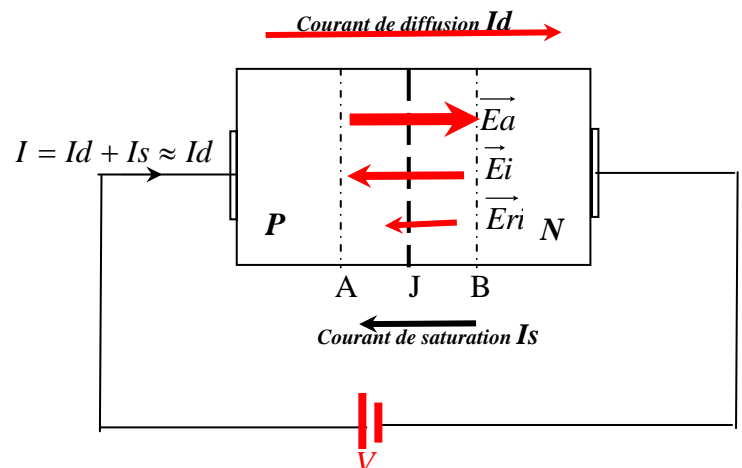


Figure 2

Le champ résultant $\vec{E}_r = \vec{E}_i + \vec{E}_a$ est inférieur en module à \vec{E}_i . Ceci revient à diminuer la d.d.p. entre les zones P et N donc entre les points A et K. Il en résulte qu'il faut moins d'énergie aux porteurs majoritaires pour traverser la zone de transition. Le courant de diffusion I_d augmente considérablement.

Le passage des porteurs minoritaires est favorisé par \vec{E}_r et le courant de saturation I_s reste inchangé et peut même être négligé devant le courant de diffusion I_d .

Le courant résultant, appelé courant direct de la jonction est pratiquement égal à I_d ($I_d = I_d + I_s \approx I_d$)

2.2. Polarisation en sens inverse

Lorsque l'extrémité de la région N est portée à un potentiel supérieur à celui de l'extrémité de la région P, on dit que la jonction est en **polarisation inverse**.

Dans ce cas, la tension V appliquée produit un champ électrique \vec{E}_a de même sens que \vec{E}_i . Il faut cette fois beaucoup d'énergie aux porteurs majoritaire pour traverser la zone de transition. La zone de transition s'élargit et dans la pratique une d.d.p. inverse de quelque volt suffit à rendre négligeable le courant de diffusion I_d .

Le courant de saturation devient prépondérant mais reste faible à température ordinaire puisqu'il est dû au déplacement des porteurs minoritaires peu nombreux ($I \approx I_s$)

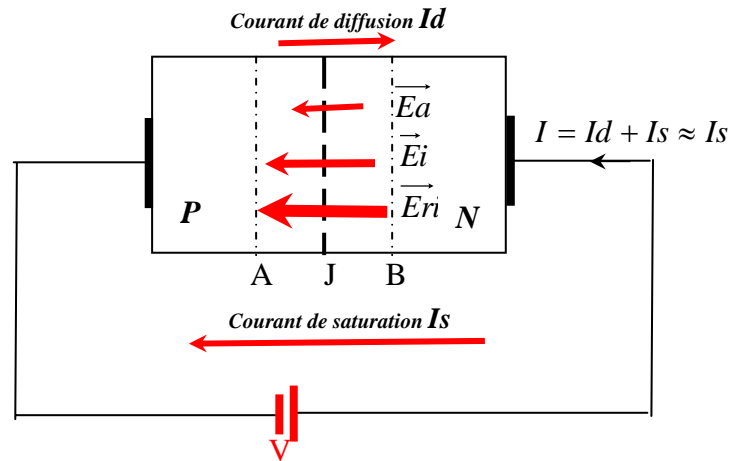


Figure 3

Exemple:

Pour une jonction de silicium, I_s est inférieur à 10^{-9} ampère lorsque la température de la jonction n'excède pas 25°C . On dit que **la jonction est bloquée**.

Remarque:

Par analogie avec les propriétés de la **diode à vide**, une application directe des propriétés de la jonction P-N est **la diode à semi-conducteur**.

3. Caractéristique courant-tension $I=f(V)$

On montre que l'équation de la caractéristique $I=f(V)$ d'une diode solide est donnée par:

$$I = I_s \left(\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right)$$

V est la tension de polarisation, T la température absolue et k la constante de Boltzmann.

Le graphe de la caractéristique $I=f(V)$ est donnée dans la figure suivante.

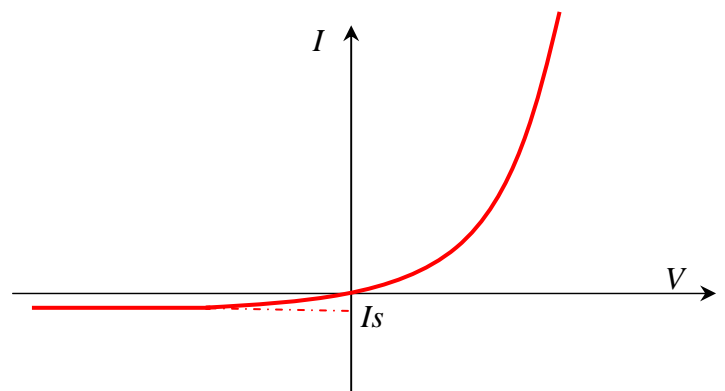


Figure 4

- En **polarisation directe** $V > 0$, le courant augmente exponentiellement avec V . Le terme constant I_s devient très vite négligeable. Le courant direct résulte essentiellement du courant de diffusion (dû aux porteurs majoritaires): $I = I_d = I_s \exp \frac{eV}{kT}$

$$I = I_d = I_s \exp \frac{eV}{kT}$$

- En **polarisation inverse** $V < 0$, le courant inverse tend vers le courant de saturation I_s (dû aux porteurs minoritaires): $I = I_s$.

4. Claquage d'une jonction

Lorsque la d.d.p. inverse V (négative) devient importante (le champ \vec{E}_r est important), les électrons minoritaires en traversant la jonction acquièrent une énergie importante proportionnelle à la tension appliquée V . Deux phénomènes se produisent à la suite:

i) Pour $|V| > |V_Z|$, ils ionisent par choc les atomes de la zone de transition. Il y a alors augmentation importante de la concentration en porteurs minoritaires: c'est l'**effet Zener**.

ii) Un électron obtenu par effet Zener va être accéléré et va à son tour ioniser un autre atome qui libérera un autre électron. Les deux électrons ainsi libérés ionisent à leur tour d'autres atomes: il y a une véritable réaction en chaîne. Le phénomène est appelé **effet d'avalanche**.

La diode se chauffe ce qui accroît le courant inverse. La courbe $I=f(V)$ devient sensiblement verticale (figure 5). Des échauffements localisés se produisent au niveau de la jonction qui mettent la diode hors d'usage. On dit qu'il y a **claquage irréversible**.

Le seuil de tension V_Z , pour lequel se produit le claquage, dépend essentiellement du dopage en impuretés du semi-conducteur.

On peut régler par dopage les seuils de claquage en fonction de l'utilisation:

- **diode de redressement** (très bonne tenue en polarisation inverse) : elle est peu dopée et la tension de claquage peu dépasser les 100 volts.

- **diode Zener** : obtenue par dopage convenablement variable. Elle a la particularité de supporter sans dommage un courant inverse relativement important dès que $|V| \geq |V_Z|$ (V_Z est appelée **tension Zener**). Le claquage est réversible et l'application de tensions $|V| \geq |V_Z|$ peut être répéter sans inconvénient à condition qu'il n'y ait pas de surchauffement du semi-conducteur.

- **diode Backward** : très dopée et caractérisée par une très faible tenue en polarisation inverse.

- **diode tunnel** : excessivement dopée et ne tient pas en polarisation inverse. Elle est exploitée dans certains générateurs de fréquence.

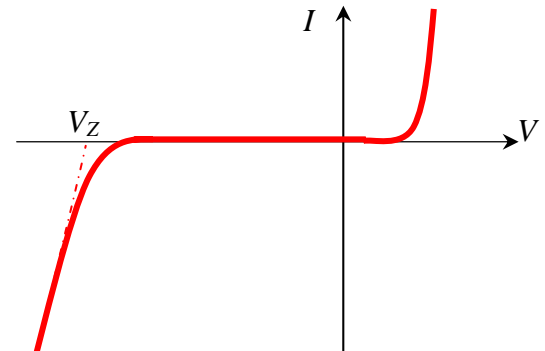


Figure 5

5. Modélisation de la diode à semi-conducteur

La représentation symbolique d'une diode à jonction P-N est donnée par la figure suivante:

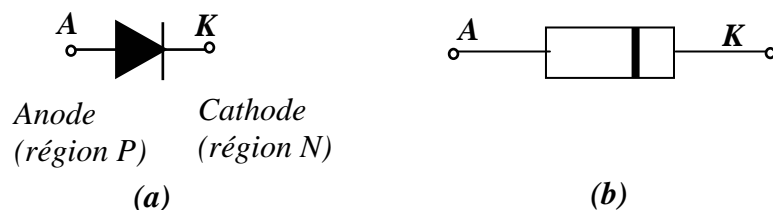


Figure 6: (a) représentation symbolique de la diode. (b) représentation réelle du boîtier de la diode (le trait est du côté de la cathode)

5.1. Interprétation de la caractéristique courant-tension

D'une façon générale, la caractéristique d'une diode est représentée par la figure 5 dans les deux cas : polarisation directe et inverse.

a. Tension de coude (où tension seuil)

C'est la tension directe au voisinage de laquelle, la caractéristique directe $I=f(V)$ subit un changement notable (croissance exponentielle du courant puis tendance vers un comportement linéaire).

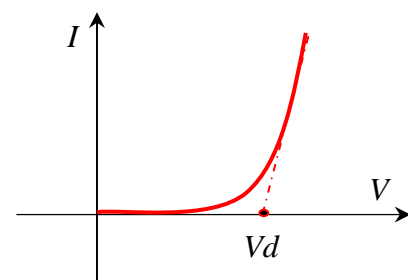


Figure 7

Ce seuil généralement déterminé à partir de l'intersection V_d de l'axe des tensions avec la partie rectiligne de la caractéristique (figure 7).

V_d correspond au fait à la tension en dessous de laquelle la diode ne conduit pas bien ($I \approx 0$).

V_d est de l'ordre de :

- 0,7 volt pour une diode au silicium (Si);
- 0,4 à 0,5 volt pour une diode au germanium (Ge)

b. Résistance statique d'une diode

C'est le rapport V/I en un point donné de la caractéristique. Elle varie avec la tension appliquée à la diode (elle diminue au fur et à mesure que la tension appliquée à la diode augmente).

c. Résistance dynamique d'une diode

La *résistance dynamique* r_d en un point de la caractéristique directe est définie par l'inverse de la pente de la droite qui est tangente à la courbe en ce point.

$$r_d = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{1}{g}$$

avec $g = \frac{\Delta V}{\Delta I}$ pente de la tangente au point M.

c. Résistance inverse

Sous polarisation inverse, une diode laisse passer un courant inverse très faible. La diode peut être assimilée à une *résistance inverse* R_i très grande. Elle est définie par:

$R_i = V_i / I_i$ où I_i est le courant inverse et V_i est la tension inverse.

e. Capacité d'une diode

Comme chaque composant muni de connexion, une diode a une capacité parasite. Elle peut affecter son utilisation aux fréquences élevées. Cette capacité externe est habituellement inférieure ou égale à 1pF . La capacité interne due à la jonction d'une diode est nettement plus importante. On l'appelle capacité de transition de jonction de barrière ou de zone de déplétion. On sait que plus la tension inverse est élevée, plus la zone de déplétion est étendue. La zone de déplétion n'ayant pratiquement pas de charge libres se comporte comme un isolant.

Les régions P et N sont bons conducteurs. On peut les assimiler aux armatures d'un condensateur dont le diélectrique est constitué par la zone de déplétion.

En définitive, une diode sous polarisation inverse est équivalente à une résistance en parallèle avec une capacité.

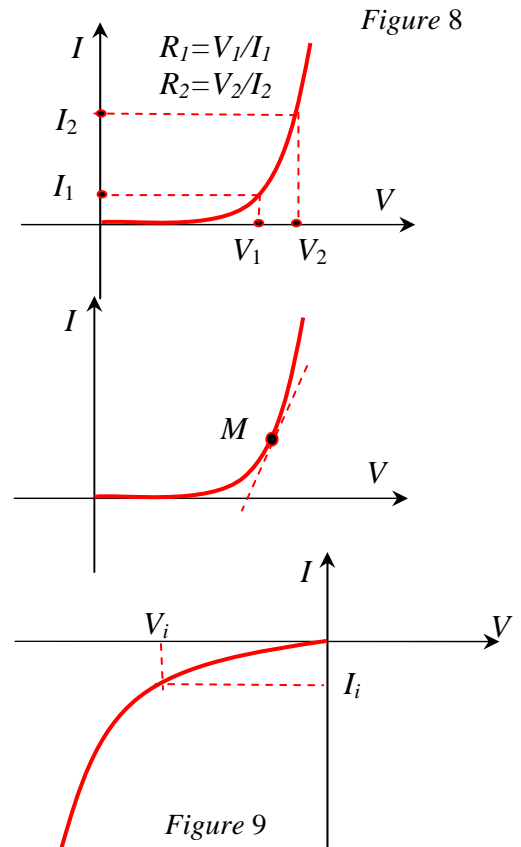
Pour les diodes courantes, cette capacité est de l'ordre de **1 à 5 pF**. Elle est donc faible et n'intervient qu'à hautes fréquences (ordre de **100 Mhz**).

5.2. Les approximations pratiques d'une diode à semi-conducteur

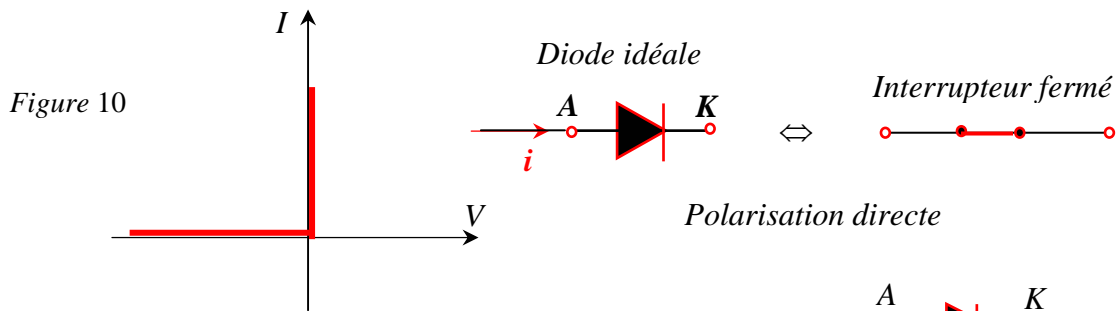
La diode est un composant actif non linéaire (pas de linéarité entre le courant et la tension appliquée à la diode). Pour pouvoir prévoir les formes des signaux issus des montages incluant des diodes, il est nécessaire de représenter les diodes par des équations approchant les courbes réelles de la caractéristique $I=f(V)$.

a. Première approximation – Diode idéale

• En *polarisation directe*, la diode se comporte comme un conducteur parfait. La *diode est passante* : $V_d = 0$, $i > 0$ et $r_d = 0$.



• En **polarisation inverse**, la diode se comporte comme un isolant parfait. La **diode est bloquée** : pour $V < 0$, $i = 0$ et R_i est infinie.



Application 1:

Déterminer la tension de sortie V_R du circuit suivant en utilisant la première approximation de la diode (diode idéale).

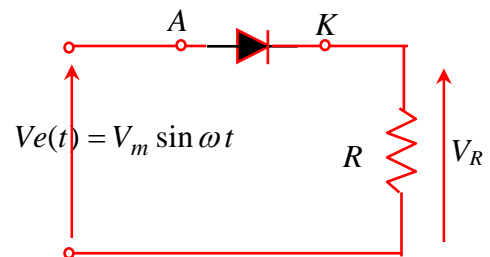
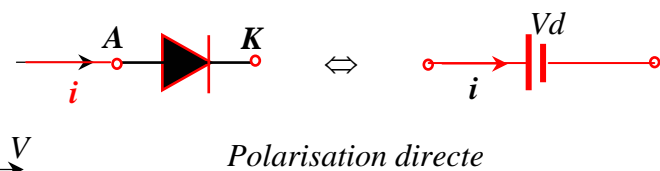
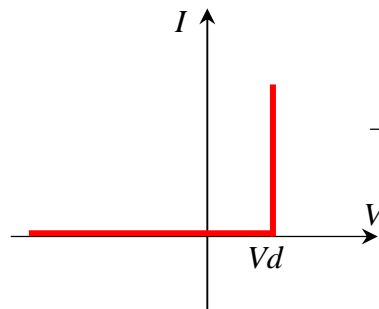


Figure 11

b. Deuxième approximation

Le schéma équivalent de la diode est donné par la figure suivante.

• En polarisation directe, il faut environ $V_d = 0,7$ volt pour qu'une diode au silicium (0,4 volt pour une diode au germanium) conduise le courant: pour $V > V_d$, $i > 0$ et $r_d = 0$ (pente de la tangente infinie).



Polarisation directe

Figure 12

Application 2:

Représenter la tension de sortie V_R du circuit de la figure 11 en utilisant la deuxième approximation.

c. Troisième approximation

Le schéma équivalent de la diode est donné par la figure suivante.

• En **polarisation directe** et pour $V > V_d$, la diode est passante et conduit le courant. Elle est équivalente à un récepteur de f.c.e.m. V_d et résistance interne r_d qui s'oppose au générateur qui alimente la

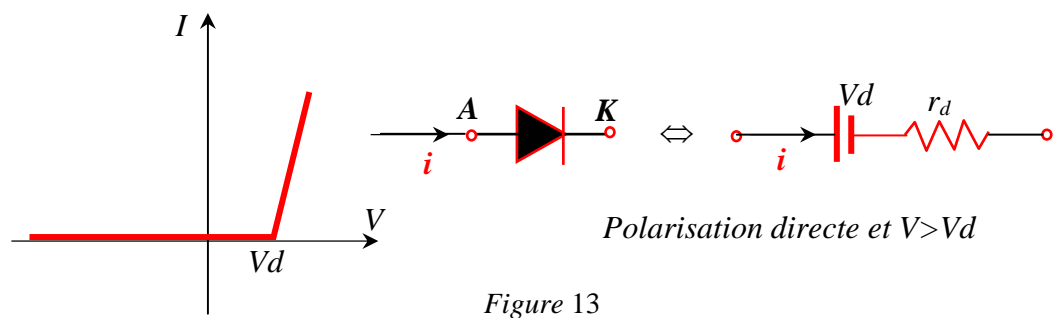


Figure 13

diode. $V_{AK} = r_d i + V_d$

• Pour $V < V_d$, la **diode est bloquée** et $i = 0$. Elle est équivalente à une résistance de très grande valeur souvent assimilée à une résistance infinie ($R_i = \infty$).

Application 3:

Représenter la tension de sortie V_R du circuit de la figure 11 en utilisant la troisième approximation.

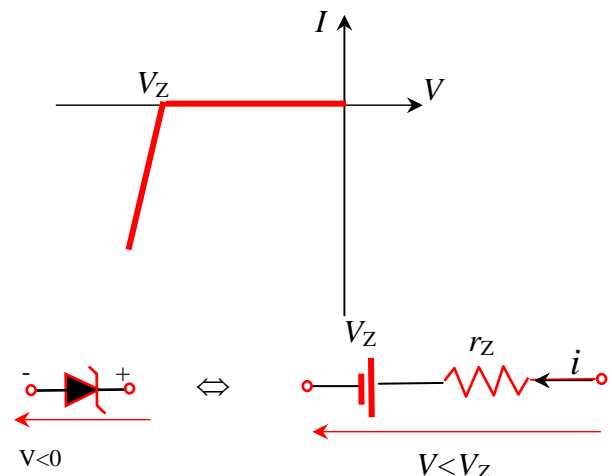


Figure 14

Remarque:

La caractéristique courant-tension d'une diode Zener est identique à celle d'une diode de redressement.

- Après claquage ($V < V_Z$ en polarisation inverse), la tension aux bornes de la diode est pratiquement constante.

La diode Zener est équivalente à un récepteur de f.c.e.m. V_Z et de résistance interne r_Z (inverse de la pente de la droite).

La diode Zener peut être utilisée en polarisation directe, mais elle est souvent utilisée en *polarisation inverse comme stabilisateur de tension*.