

Les diodes

Avec le transistor, la diode est la figure emblématique de toute l'électronique. En effet le développement de l'industrie électronique prend son départ avec l'invention des diodes à vide et à galène. C'est grâce à sa fonction de valve électrique que la diode a été utilisée pour détecter et démoduler les ondes radio.

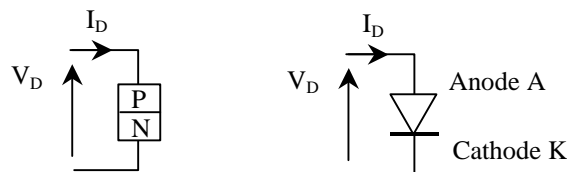
Comme son nom l'indique, la diode est un élément actif comportant deux électrodes désignées généralement par anode et cathode. Plusieurs catégories de composants appartiennent à la famille des diodes :

- Les diodes de redressement et de détection : jonction PN, diodes Schottky
- Les diodes à capacité variable : diodes varicap
- Les diodes de régulation : diodes Zener
- Les diodes électroluminescentes : LED (Light Emitting Diode)
- Les photodiodes (PD)
- Les diodes laser
- Les diodes à effet tunnel

I - La jonction PN

1) Constitution et principe de fonctionnement simplifié

La diode PN résulte de la jonction de deux éléments semi-conducteurs généralement en silicium. L'un des éléments a subi un dopage type P, l'autre un dopage type N.



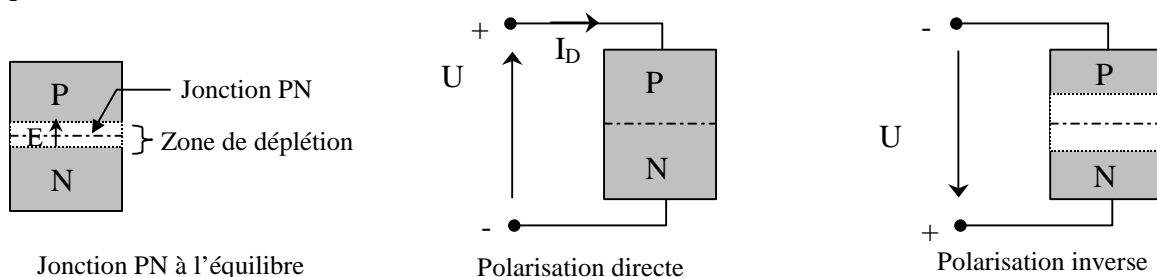
Constitution et symbole d'une diode à jonction PN

La mise en contact des deux zones semi-conductrices engendre une diffusion de porteurs – vers la zone P et de porteurs + vers la zone N.

Il en résulte à la jonction une zone vide de porteurs mobiles appelée zone de déplétion. Cette zone est le siège d'un champ électrique d'équilibre

L'application d'une polarisation directe supérieure à environ 0,6 V permet de vaincre le champ électrique de la zone de déplétion créant ainsi la circulation du courant électrique → la diode devient passante.

L'application d'une polarisation inverse accroît l'épaisseur de la zone de déplétion → la diode est bloquée



2) Courbe caractéristique

En examinant en détail la relation courant-tension d'une jonction PN polarisée, on constate que le courant obéit à la tension appliquée selon la loi exponentielle suivante :

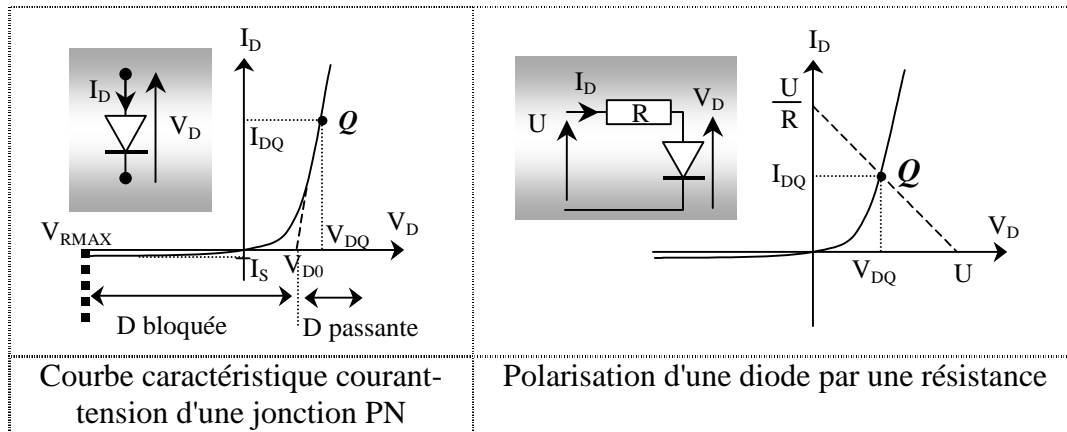
$$I_D = I_S \left[\exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

avec $V_T = \frac{kT}{q} \approx 25 \text{ mV}$ à $T = 300 \text{ K}$ ($27 \text{ }^\circ\text{C}$) ; $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

Ordre de grandeur du courant I_S de 10^{-14} à 10^{-8} A pour les composants discrets.

Dans le cas d'une diode polarisée par une tension V_D supérieure à 100 mV, la relation précédente peut être réduite à :

$$I_D = I_S \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) \quad (2)$$



croissance exponentielle du courant est fortement marquée après une tension de seuil V_{D0} . Pour une jonction en silicium V_{D0} s'établit environ entre 0,6 et 0,7 volt. On considère alors la diode passante.

Sous une polarisation inverse ($V_D < 0$) le courant circulant dans le sens $N \rightarrow P$ est extrêmement faible et vaut $-I_S$. On considère alors la diode bloquée.

V_{RMAX} est la tension inverse maximale admissible

Note dans un état passant et pour un courant I_D constant, la tension V_D est sensible à la température. Elle accuse une variation $\frac{\Delta V_D}{\Delta T} = -2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Cette propriété peut être mise à profit pour réaliser un capteur thermométrique.

3) Polarisation d'une diode à l'aide d'une résistance

Compte tenu de sa caractéristique abrupte, une diode PN doit être polarisée sous une tension d'environ V_{D0} pour être passante. L'attaque directe de la diode par un générateur de tension est délicate et risquée. En effet tout dépassement de la valeur V_{D0} engendre la circulation d'un courant

I_D élevé pouvant entraîner la destruction du composant. La méthode la plus simple est de mettre une résistance de limitation de courant en série avec la diode.

Dans ce cas nous avons :

$$I_D = \frac{U - V_D}{R} \tag{3}$$

Le point de polarisation Q (encore appelé point de fonctionnement) est caractérisé par le couple (I_{DQ}, V_{DQ}) . Il correspond ici au point d'intersection entre les fonctions (2) et (3).

4) Résistance dynamique d'une diode passante

Considérons le point Q caractérisé par le couple (I_{DQ}, V_{DQ})

La relation (2) devient : $I_{DQ} = I_S \exp(\frac{V_{DQ}}{V_T})$

En considérant de très faibles variations de tension autour de V_{DQ} nous pouvons écrire :

$$\frac{\Delta I_D}{\Delta V_D} \approx \frac{dI_D}{dV_D} = \frac{I_S}{V_T} \exp(\frac{V_{DQ}}{V_T}) = \frac{I_{DQ}}{V_T}$$

Nous en déduisons l'expression de la résistance dynamique de la diode autour de son point de

polarisation : $r_d = \frac{V_T}{I_{DQ}}$

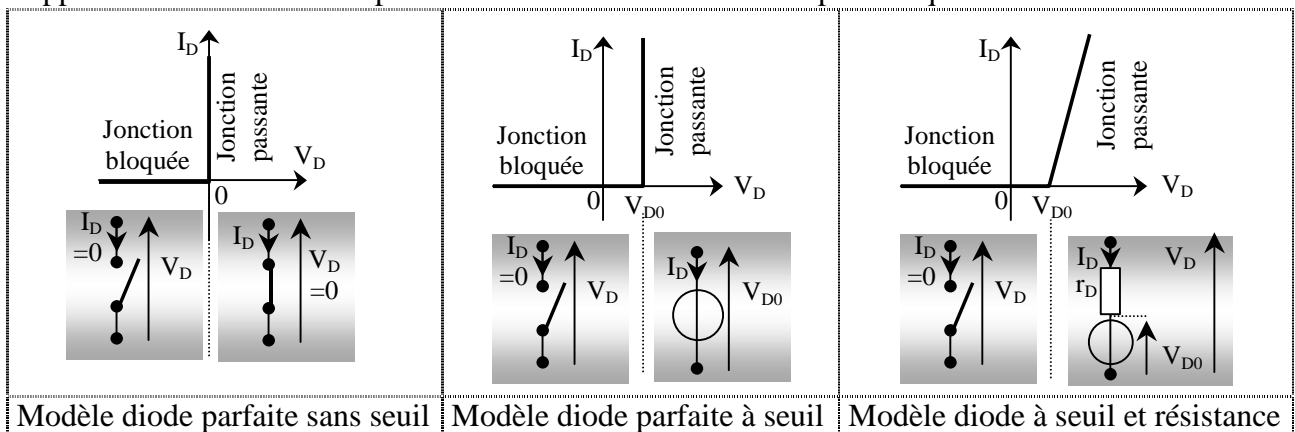
Notes

- Pour un courant de polarisation I_{DQ} de 1 mA, la résistance dynamique est d'environ 25 Ω .
- La résistance dynamique d'une diode diminue lorsque le point de fonctionnement s'élève. Elle doit être prise en compte dès lors que l'on cherche à superposer un signal variable sur la tension de fonctionnement.

5) Caractéristiques simplifiées – Modèles électriques

La détermination mathématique du point de polarisation précédent nécessite de rechercher la solution V_D qui satisfait l'équation $\frac{U - V_D}{R} = I_S \exp(\frac{V_D}{V_T})$

Cette détermination n'est pas aisée car d'une part la solution analytique n'est pas triviale et d'autre part le paramètre I_S est rarement connu avec précision. Fort heureusement il est possible d'approcher la solution en exploitant une des modélisations simplifiées qui suivent.



a) *Modèle diode parfaite sans seuil*

- Sous polarisation négative, elle se comporte en interrupteur ouvert pour lequel $I_D = 0, \forall V_D < 0$
- Dans le sens passant, elle n'oppose aucune résistance à la circulation du courant et une tension nulle est relevée à ses bornes : $V_D = 0, \forall I_D > 0$. Elle est dans ce cas assimilable à un interrupteur fermé.

b) *Modèle diode parfaite avec seuil*

Il s'agit du modèle le plus utilisé car il prend en compte le défaut principal d'une diode réelle, à savoir la chute de tension que celle-ci engendre à l'état passant.

- Pour $V_D < V_{D0}$ le modèle électrique associé est un interrupteur ouvert
- V_D reste égale à V_{D0} à l'état passant

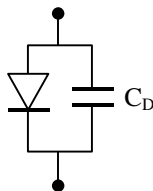
c) *Modèle diode avec seuil et résistance dynamique*

On peut exploiter ce modèle si il est nécessaire de tenir compte de la résistance dynamique de l'état passant

- Pour $V_D < V_{D0}$ le modèle électrique associé est toujours un interrupteur ouvert
- Pour $V_D \geq V_{D0}$ la diode en conduction engendre une chute de tension égale à $V_D = V_{D0} + R_D I_D$

6) **Modèle d'une jonction PN en hautes fréquences (HF)**

Tous dipôle constitué d'éléments en regard présente un effet capacitif. La jonction PN n'échappe pas à cette loi physique. Le modèle prenant en compte l'effet capacitif est représenté en figure ci après.

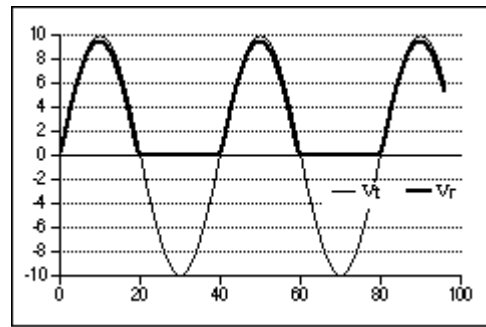
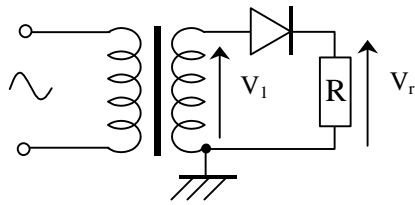


Modèle d'une jonction PN en HF

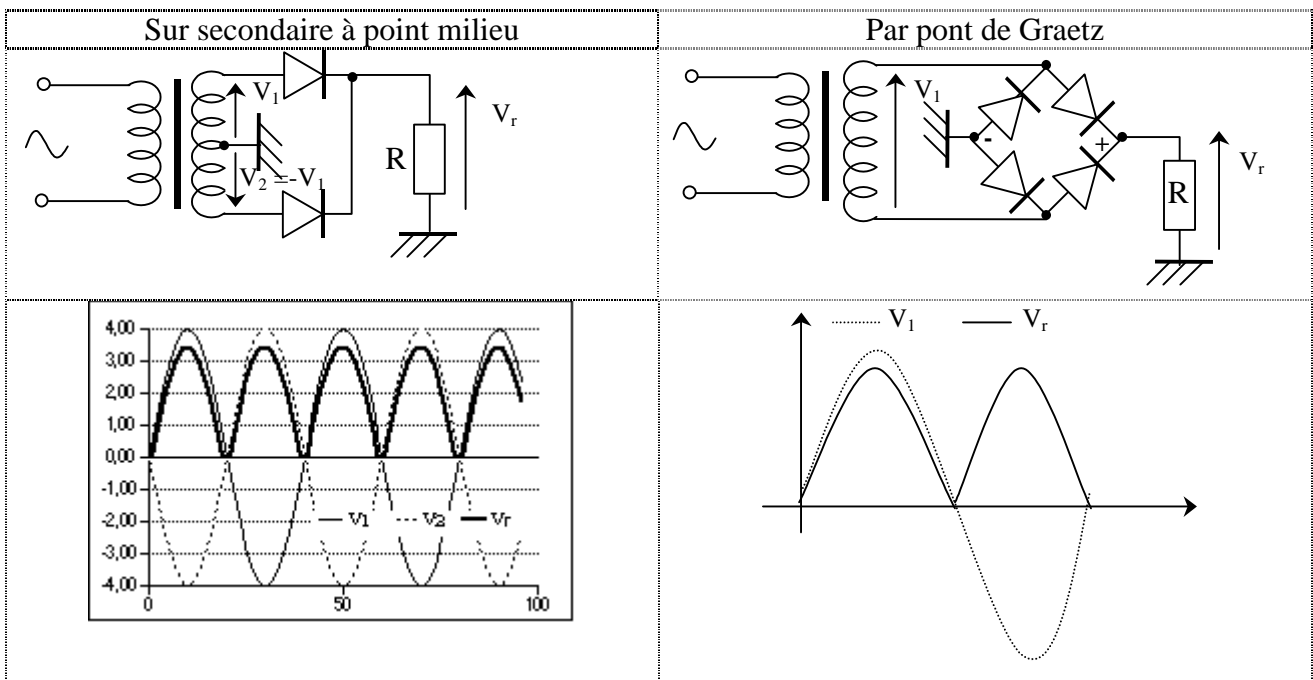
En régime de hautes fréquences, l'impédance capacitive intervient et rend partiellement conductrice la diode en inverse.

7) **Application au redressement de signaux alternatifs**

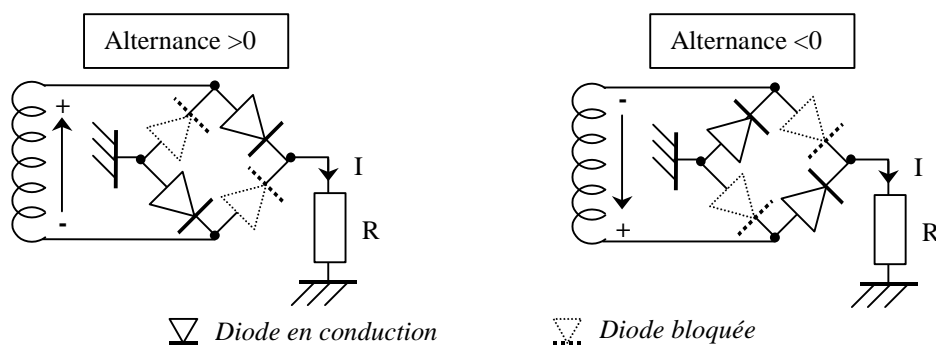
a) *Redressement monoalternance*



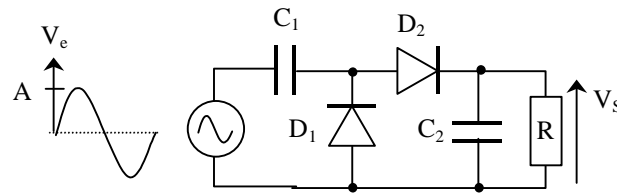
b) Redressements double alternance



Principe de fonctionnement du pont de Graetz



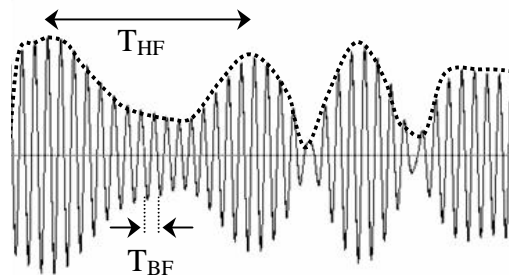
8) Doubleur de tension à diodes



9) Application à la détection de l'enveloppe d'un signal variable

a) Enveloppe d'un signal variable – Définition

L'enveloppe d'un signal correspond à la forme prise par son amplitude maximale au cours du temps.



— Valeur instantanée du signal
 Enveloppe (supérieure) du signal

Définition graphique de l'enveloppe d'un signal variable

b) Détecteur d'enveloppe simple

Le détecteur d'enveloppe simple consiste en un redresseur à diode associé à un condensateur (fig x).

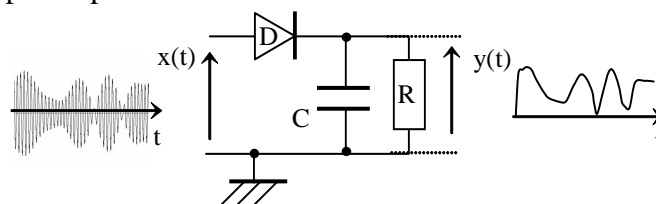


Fig. x. Détecteur d'enveloppe simple

Le circuit R//C « mémorise » l'amplitude crête du signal avec une constante de temps $\tau = RC$
 Cette constante doit être choisie :

- ni trop courte sinon la décharge du condensateur apparaît à chaque alternance du signal $x(t)$
- ni trop longue afin de suivre l'évolution de l'enveloppe.

→ On choisit $T_{HF} \ll \tau \ll T_{BF}$

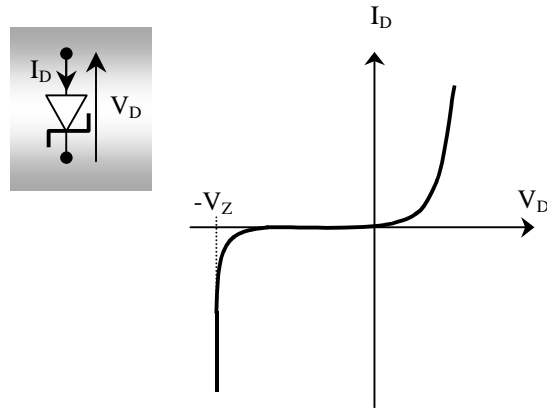
Soit par exemple la moyenne géométrique donnée par $\tau = \sqrt{T_{HF} T_{BF}}$

Une application courante de la détection d'enveloppe concerne la démodulation d'amplitude.

II - La diode Zener

1) Courbe caractéristique

La particularité de la diode Zener réside dans le quadrant négatif de sa courbe caractéristique.



Courbe caractéristique d'une diode Zener

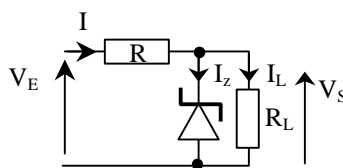
Dans le sens direct la diode Zener se comporte comme une jonction PN classique.

En sens inverse, elle reste bloquée tant que $V_R (= -V_D)$ reste inférieure à un seuil noté V_Z . A partir de ce seuil la diode Zener conduit en inverse de façon très abrupte : la tension inverse mesurée à ses bornes est stabilisée à V_Z . Elle est pratiquement indépendante du courant.

2) Application à la régulation de tension

a) Montage de base

Pour être utilisée en stabilisateur de tension, la diode Zener doit être polarisée en mode inverse. Le montage de base est représenté en figure ci-après.



Stabilisation d'une tension par une diode Zener – Montage de base

R est appelée la résistance ballast

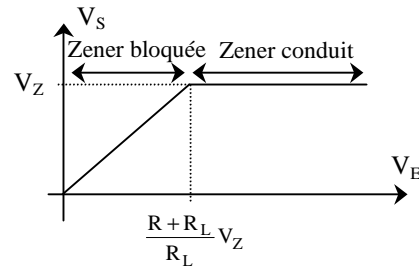
b) Caractéristique de transfert $V_S = f(V_E)$ du montage

V_E est ici une tension positive

Lorsque la Zener ne conduit pas, c'est à dire lorsque V_E est de valeur insuffisante, le montage se comporte comme un pont diviseur de tension $\rightarrow V_S = \frac{R_L}{R + R_L} V_E$

Le montage reste dans ce mode de fonctionnement jusqu'à ce que V_S atteigne V_Z . Cette limite est atteinte lorsque $V_E = \frac{R + R_L}{R_L} V_Z$

A partir de cette tension d'entrée, la tension de sortie reste stabilisée à V_Z



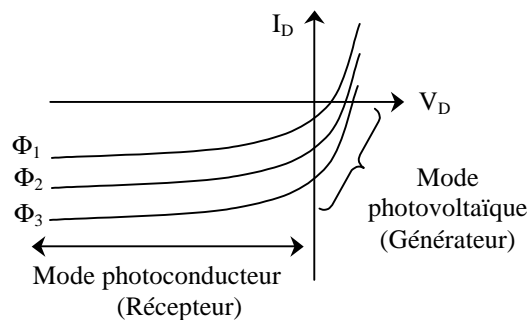
III - La photodiode

1) Constitution et caractéristiques de fonctionnement

Sous polarisation inverse, le courant circulant dans une jonction PN classique est très faible. Dans ce cas en effet, les porteurs électriques, électrons et trous, attirés respectivement par l'électrode de polarité contraire s'éloignent de la jonction. Il se crée une zone isolante vide de porteurs appelée zone de déplétion.

La photodiode est conçue pour permettre la réception du flux lumineux Φ . Lorsque la longueur d'onde λ du rayonnement est inférieure au seuil photoélectrique λ_S du matériau constituant la jonction, il se forme des paires électrons-trous dans la zone de déplétion qui contribuent à la création d'un courant inverse. Ainsi le courant circulant dans une photodiode polarisée en inverse est proportionnelle au flux lumineux reçu ; il est pratiquement indépendant de la tension de polarisation. On améliore les performances d'une photodiode en insérant une couche de semi-conducteur intrinsèque (non dopée) entre les couches P et N ; la structure est appelée PIN.

Les courbes caractéristiques d'une photodiode en fonction du flux sont reproduites Φ en figure ci-après.

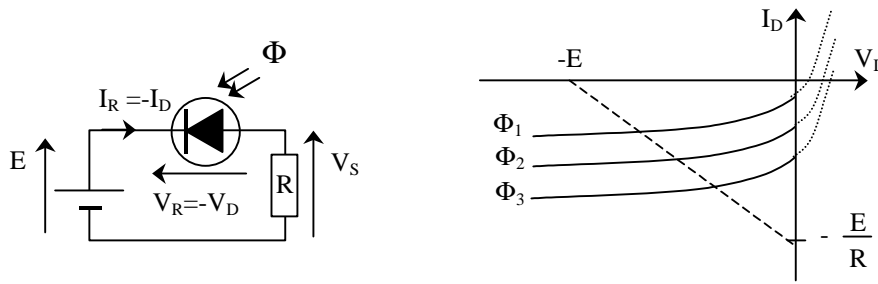


Courbes caractéristiques d'une photodiode en fonction du flux incident

2) Modes d'utilisation

Nous pouvons considérer deux modes d'utilisation selon que l'on polarise ou non la photodiode par une tension externe.

- En **mode photoconducteur** une source de tension E polarise la photodiode en inverse. Celle-ci est en mode récepteur. Le courant I_R , proportionnel au flux, est converti en tension par la résistance R .

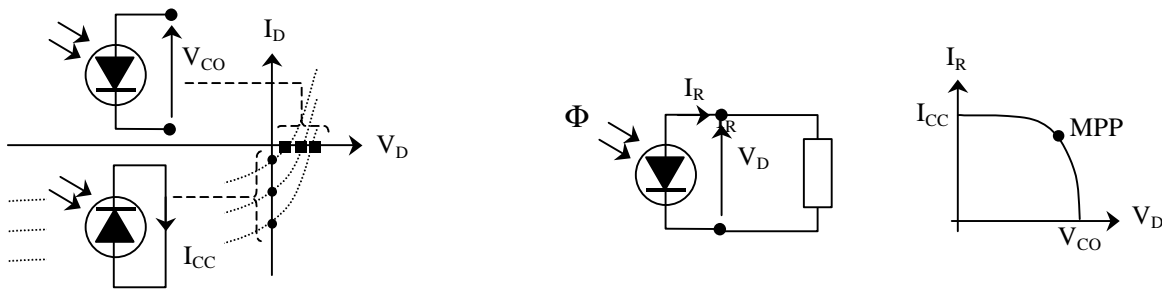


Photodiode utilisée en mode photoconducteur

$$I_R = \frac{V_S}{R} = \frac{E - V_R}{R} \rightarrow I_D = -\frac{E + V_D}{R}$$

Note : le mode photoconducteur étant linéaire et rapide, il est adapté pour réaliser la mesure de flux lumineux .

- En **mode photovoltaïque**, aucune source externe de polarisation n'est utilisée. La photodiode fonctionne en générateur électrique autonome. Les cellules photovoltaïque utilisées pour produire de l'électricité sont des photodiodes de grande surface de réception lumineuse (15 cm*15 cm environ).



Photodiode utilisée en mode photovoltaïque

IV - Autres types de diodes

1) La LED

a) Présentation

On appelle électroluminescence l'émission d'un rayonnement lumineux due à une excitation électronique dans un matériau. Dans le cas d'une diode électroluminescente (LED), il s'agit de l'émission spontanée de lumière provoquée par l'injection des électrons à travers une jonction PN particulière polarisée en direct. Les semi-conducteurs utilisés pour réaliser la conversion de l'énergie électrique en énergie lumineuse sont souvent des composés à base de gallium. La tension de seuil d'une LED est supérieure à celle d'une diode classique (environ 1,6 V pour de l'arséniure de gallium). Elle est en relation directe avec l'énergie (donc la fréquence) du photon émis.

Dès son développement dans les années 1970 la LED a révolutionné le monde de l'affichage lumineux. Ce succès est dû à une très bonne fiabilité, une faible consommation électrique et une grande facilité d'emploi. Les nombreuses applications des LED concernent principalement :

- les voyants, témoins et indicateurs lumineux ;

- les afficheurs et les panneaux de signalisation ;
- les télécommandes infrarouges ;
- les émetteurs optiques pour transmission par fibre optique ;
- les optocoupleurs qui assurent une transmission avec isolation galvanique ;
- l'éclairage ;
- les fourches et capteurs optiques, les détecteurs de passage ...

b) Caractéristiques électriques principales d'une LED

La LED a un comportement électrique sensiblement identique à celui d'une jonction PN. Son seuil de conduction V_{D0} est cependant plus élevé et dépend de la longueur d'onde lumineuse dominante.

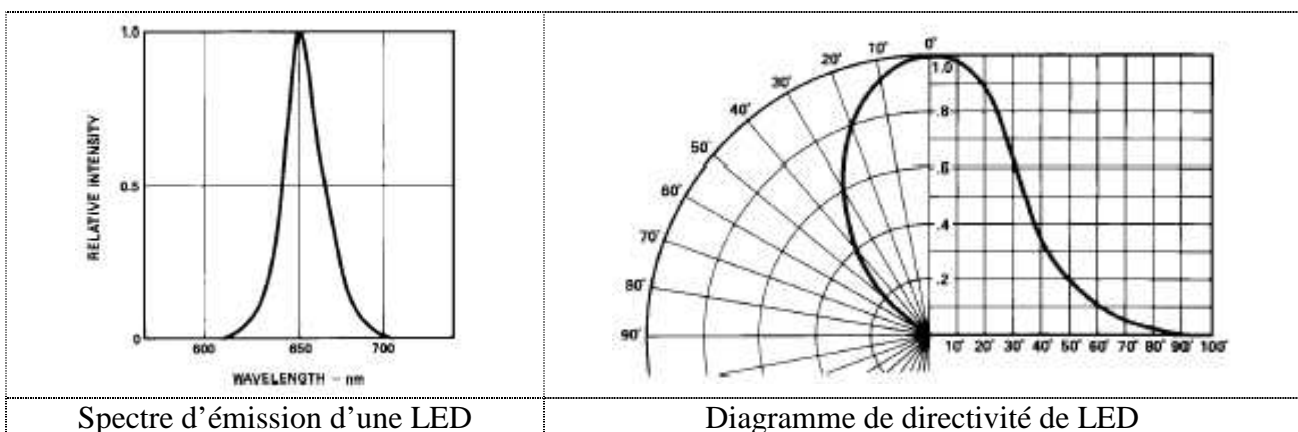
Les autres caractéristiques électriques importantes sont :

- le courant direct moyen qu'elle peut supporter en permanence. Il est compris entre 10 et 50 mA pour une LED à usage général ;
- le courant direct crête qu'elle peut supporter en régime impulsionnel ;
- la tension inverse maximale V_{Rmax} admissible sans dommage. Vis à vis de la tension inverse, la LED est plus fragile qu'une jonction PN et la limite courante de V_{Rmax} est de -5 volts.

c) Caractéristiques optiques

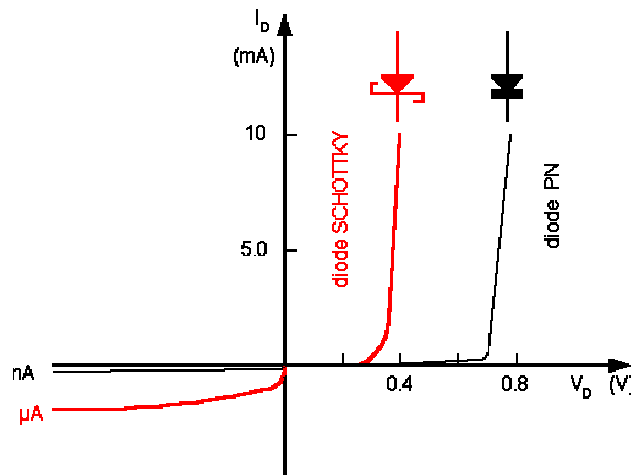
En pratique, les trois caractéristiques optiques que l'on doit prendre en compte pour choisir une LED sont :

- La couleur liée à la longueur d'onde dominante du spectre d'émission lumineuse
On trouve des LED à usage général dans les teintes bleue, verte, jaune, orange, rouge et proche infra rouge. On construit également des LED à émission ultraviolette et à spectre blanc.
- Le diagramme de directivité. Il traduit la distribution angulaire du faisceau d'émission. Dans une application de signalisation, on préférera un cône d'émission large.



2) La diode Schottky

La diode Schottky est réalisée à partir d'une jonction métal-semiconducteur. Elle doit sa popularité à son faible seuil de tension directe et à sa rapidité de commutation. Ces particularités la destinent en priorité à la détection des signaux radiofréquence. La figure ci-après établit la comparaison entre la courbe caractéristique d'une diode Schottky et celui d'une jonction PN classique.



Comparaison des caractéristiques d’une diode Schottky et d’une jonction PN

On constate les différences suivantes :

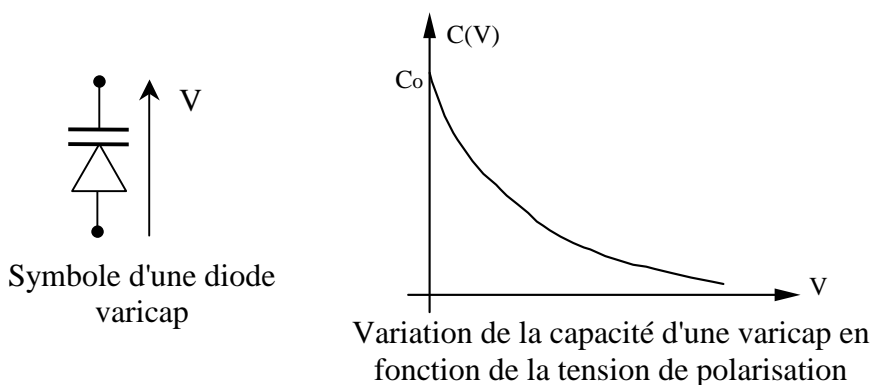
- La tension de seuil d’une diode Schottky (0,3 V) est plus faible que celui d’une jonction PN (0,6 V)
- Le courant inverse de la jonction PN est plus faible que celui de la diode Schottky

3) La diode Varicap

La diode varicap doit être polarisée en inverse. Elle présente dans ce cas une capacité qui décroît avec la tension selon une loi approchée du type :

$$C = \frac{C_0}{\left[1 + \frac{V}{V_0}\right]^n} ; C_0 \text{ et } V_0 \text{ sont des constantes.}$$

L’exposant $n = 0,5$ est valable pour les diodes varicap de type planar-épitaxial.



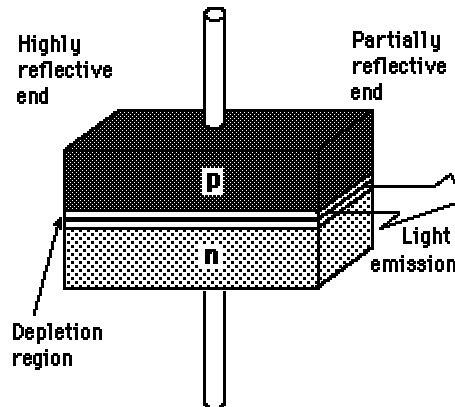
Ordre de grandeur des valeurs courantes rencontrées : $V_{\min} < V < V_{\max}$

$$V_0 = 0,7 \text{ volt} ; V_{\min} = 2 \text{ volt} ; V_{\max} = 20 \text{ volt} ; C_0 = 30 \text{ pF}$$

La diode varicap est utilisée dans de nombreuses applications radiofréquence. Elle sert notamment à réaliser des oscillateurs à fréquence variable (VCO).

4) La diode laser (DL)

Pour simplifier, la diode laser est une LED structurée en cavité résonante. 2 cotés latéraux parfaitement parallèles sont dotés de miroirs réfléchissants et orientés vers l'intérieur. L'une des surfaces réfléchissante est quasiment parfaite, la seconde transmet partiellement la lumière.



Structure d'une diode laser

Comme pour la LED, la circulation d'un courant dans le sens direct produit l'émission spontanée de lumière dans la jonction. Au dessus d'un certain seuil de courant, les photons engendrés par électroluminescence stimulent à leur tour l'émission cohérente d'autres photons créant ainsi une amplification laser.

La longueur de la jonction détermine la longueur d'onde du flux émis.

5) La diode à effet tunnel

Il s'agit d'une diode dont la courbe caractéristique présente une partie à pente décroissante (résistance dynamique négative). Cette particularité est exploitée pour réaliser des oscillateurs HF.