

# **La Diode**

**Brahim HARAUBIA**

# 1) La diode

## 1.1) Présentation

La diode est une jonction « PN » qui est encapsulée dans un boîtier hermétique de protection. La diode est employée dans de nombreuses fonctions de l'électronique. Chaque type de boîtier (figure 1.1) est adapté à la fonction de la diode ou à la puissance qu'elle peut supporter.

La représentation électrique d'une diode classique est donnée à la figure 1.2a. Le branchement d'une diode doit respecter un certain sens. De ce fait les deux pôles (anode et cathode) d'une diode sont repérés grâce à un anneau peint sur le boîtier (figure 1.2b). L'anneau est toujours proche de la cathode. L'anode est relié à la région P de la jonction « PN » et la cathode est reliée à la région N (fig. 1.2c)

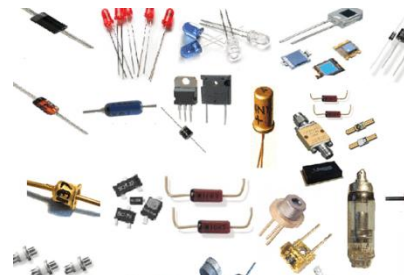
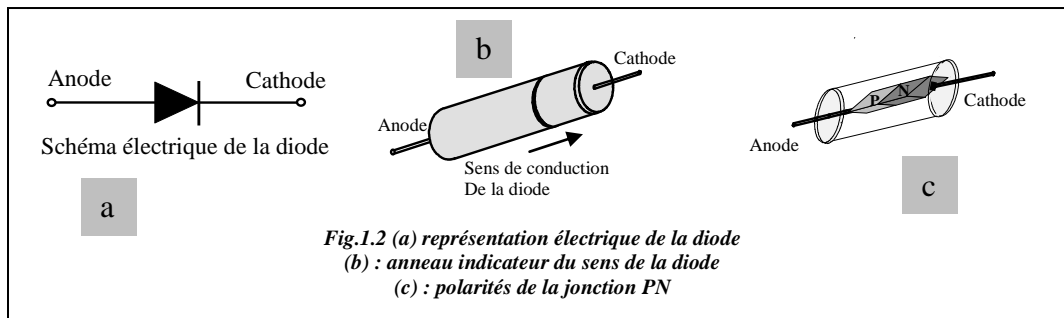


Fig.4.1 Les différents formes de boîtiers d'une diode à jonction

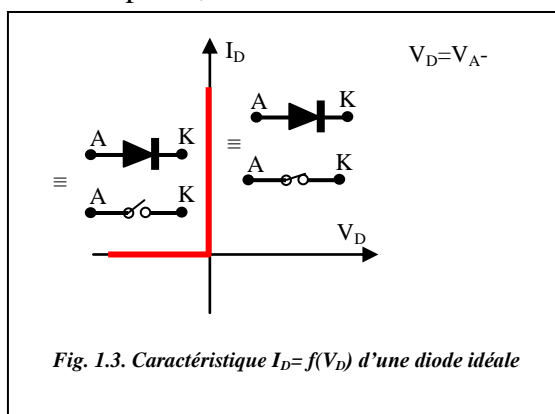


## 1.2) Caractéristique d'une diode

La caractéristique d'une diode c'est la représentation de la variation du courant  $I_D$  qui traverse cette diode en fonction de la tension  $V_D$  qui lui est appliquée. Pour mieux cerner le comportement de la diode dans un circuit électronique, on va approcher cette caractéristique à l'aide de plusieurs approximations

### 1.2.1) La diode en première approximation

Dans cette partie, la diode est considérée comme un composant idéal. En effet dans ce cadre,



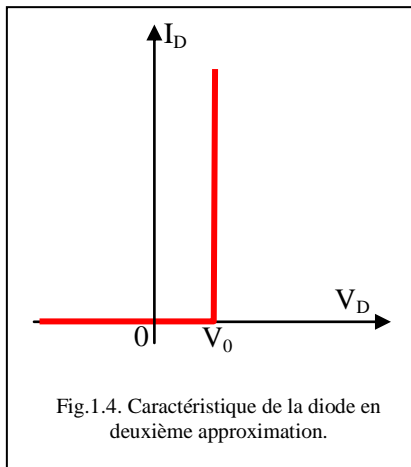
on suppose que la barrière de potentiel  $V_0$  créée par le champ interne est nulle. De même lorsque la diode conduit, on va considérer que la résistance  $R_d$  qu'elle oppose au passage du courant est nulle et que la résistance  $R_i$  qu'elle présente lorsqu'elle polarisée en inverse est infinie.

Dans ces conditions, la caractéristique de la diode idéale est représentée à la figure 1.3. Dans cette approximation, la diode

polarisée en direct se comporte comme un court-circuit ou un interrupteur fermé. A l'application d'une faible tension ( $V_D = V_A - V_K > 0$ ), la diode est traversée par un très fort courant. Par contre dans le sens inverse ( $V_D = V_A - V_K < 0$ ), aucun courant ne circule quelque soit la valeur de la tension inverse appliquée. La diode peut-être assimilée à un circuit ouvert.

### 1.2.2) La diode en deuxième approximation

Pour la caractéristique de la diode en deuxième approximation, on va tenir compte uniquement de l'existence de la barrière de potentiel. La résistance présentée par la diode dans le sens direct est considérée comme nulle, alors que la résistance dans le sens inverse est supposée infinie. Ce qui revient à dire que la conduction de la diode ne peut s'établir qu'à partir de l'application d'une tension  $V_D = V_0$  positive.



$$V_D = V_A - V_K = V_0$$

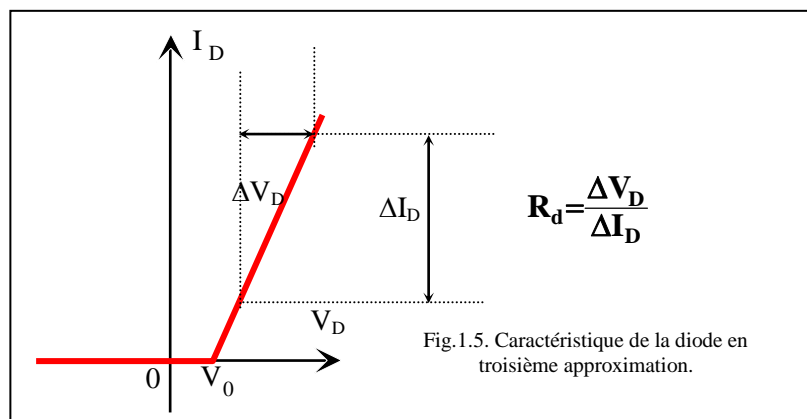
La tension  $V_0$  est la barrière de potentiel ou tension de seuil à partir de laquelle la diode commence à conduire. Pour le cas du silicium, cette tension de seuil  $V_0$  vaut environ 0,6V. A partir de ces données, on peut représenter la caractéristique  $I_D = f(V_D)$  de la diode en deuxième approximation à la figure 1.4.

Tant que la tension  $V_D$  appliquée aux bornes de la diode est inférieure à la tension de seuil  $V_0$  (barrière de potentiel), la diode se comporte comme un interrupteur ouvert. Dès que la tension  $V_D$  dépasse légèrement cette tension de seuil, la diode conduit et on peut l'assimiler à un interrupteur fermé.

### 1.2.3) La diode en troisième approximation

Dans ce cas, on va tenir compte pour le sens direct de deux paramètres que sont la tension de seuil ( $V_0$ ) et la résistance de conduction ( $R_d$ ). La représentation de  $I_D = f(V_D)$  est donnée à la figure 1.5.

En polarisation directe, et tant que la tension  $V_D = V_A - V_K$  est inférieure à la tension de seuil  $V_0$ , il n'y a aucun courant à travers la jonction. Dès que  $V_D$  dépasse cette tension de seuil, la croissance du courant traversant la diode en fonction de la tension appliquée  $V_D$  s'effectue selon une pente, qui dépend de la résistance dynamique  $R_d$  de la diode.



En polarisation inverse  $V_D < V_0$  il n'y a aucun courant de conduction. La diode est bloquée et elle est équivalente à un interrupteur ouvert.

### 1.2.4 Caractéristique réelle d'une diode

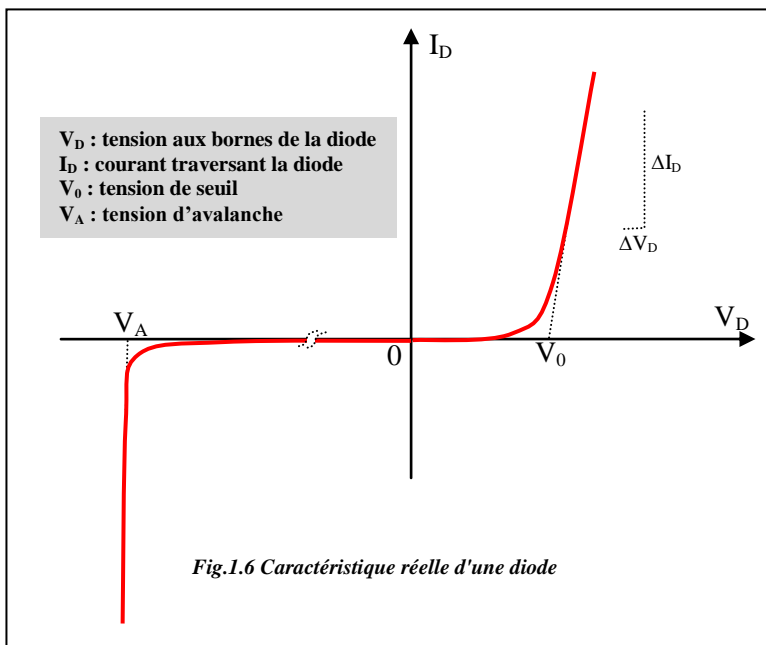
Les trois approximations qui ont été présentées vont rapprocher de la caractéristique réelle d'une diode. La caractéristique réelle ( $I_D = f(V_D)$ ) est plus complexe que les approximations qui ont été faites. Cependant, ces approximations sont utiles pour l'étude des fonctions électroniques à base de diodes. La caractéristique directe d'une diode peut être obtenue expérimentalement en faisant un tracé point à point ou de façon automatique.

L'expression mathématique relative à la caractéristique  $I_D = f(V_D)$  de la diode polarisée dans le sens direct est donnée par :

$$I_D = I_{DS} [e^{\frac{eV_D}{KT}} - 1]$$

$I_{DS}$ : courant de saturation inverse. Ce courant est dû au porteur minoritaires ;  $e$  : charge de l'électron  
 $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Coulomb ;  $K$  : constante de Boltzman ;  $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  ;  $T$  : température en degrés Kelvin  
 A la température ambiante  $T = 25^\circ\text{C}$  ( $KT/e$ ) = 26 mV =  $26 \cdot 10^{-3}$  V

La représentation de la caractéristique de la diode dans le sens direct et dans le sens inverse est donnée par la figure 1.6.



Il faut constater que la caractéristique de la diode peut être scindée en plusieurs parties. Pour la caractéristique de la diode dans le sens direct on peut constater que tant que la tension  $V_D$  est inférieure à la tension de seuil  $V_0$ , la caractéristique est une courbure. On est dans le domaine de la détection quadratique. La résistance que va présenter la diode va dépendre du point de fonctionnement qui est choisi ou fixé.

Quand la tension  $V_D$  est supérieure à la tension  $V_0$ , la caractéristique est proche d'une droite. C'est cette partie qui va être utilisée dans pratiquement toutes les applications qui sont présentées dans ce document.

La résistance dynamique  $R_d$  de la diode dans cette région a une valeur très faible (de l'ordre de quelques Ohms) et peut être calculée à l'aide de la relation :

$$R_d = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D}$$

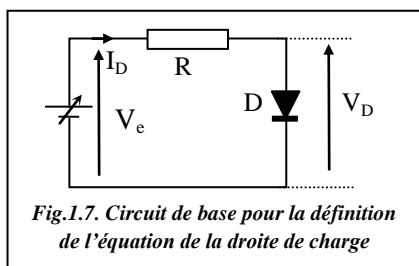
Pour la caractéristique dans le sens inverse, le courant qui circule est dû au porteur minoritaire et est très faible (de l'ordre d'une dizaine de nano-ampères). De ce fait la diode va présenter une résistance inverse très grande qui peut être considérée comme infinie. Cependant il faut constater que lors d'une polarisation inverse, il faut éviter d'appliquer une tension inverse qui

se rapproche de la tension  $V_A$  de claquage de la diode qui pourrait détruire celle-ci. Les paramètres importants à ne pas dépasser pour une diode sont :

- Le courant direct maximal autorisé (donnée du constructeur).
- La tension inverse maximale admissible.
- La puissance dissipée dans le sens direct :  $P_D = V_D \cdot I_D$

### 1.2.5) Droite de charge et point de fonctionnement

Dans un circuit électronique, il est important d'avoir une connaissance sur la tension  $V_D$  appliquée à la diode et également le courant qui la traverse lorsque la diode est polarisée dans le sens direct. Pour cela, on fait appel à l'équation de la droite de charge qu'on obtient à partir du circuit de la figure 1.7.



Au niveau de la maille du circuit de la figure 1.7, on peut écrire que :

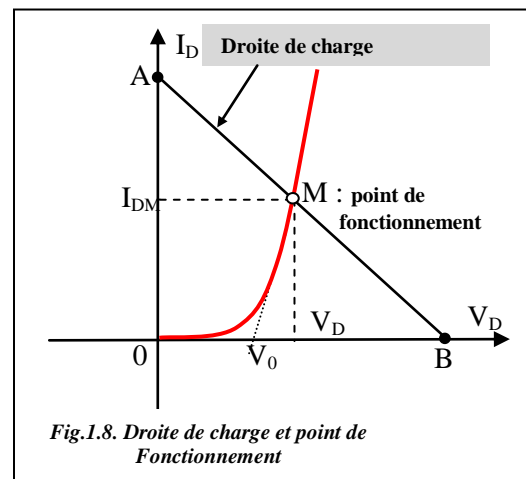
$$V_e = R \cdot I_D + V_D$$

L'équation de la droite de charge :

$$I_D = \frac{V_e - V_D}{R}$$

Si on considère que  $V_e$  et  $R$  sont des constantes, le tracé de  $I_D$  en fonction de la tension  $V_D$  aux bornes de la diode représente une droite à pente négative figure 1.8. C'est la droite de charge. Pour tracer cette droite, il suffit de voir qu'elle passe par les deux points A et B qui ont pour coordonnées respectives

$$A \left( \begin{matrix} I_D = \frac{V_e}{R_L} \\ V_D = 0 \end{matrix} \right) \quad \text{et} \quad B \left( \begin{matrix} I_D = 0 \\ V_D = V_e \end{matrix} \right)$$



L'intersection de cette droite de charge avec la caractéristique directe de la diode permet de définir le point de fonctionnement de la diode (point M).

## 2) Applications de la diode

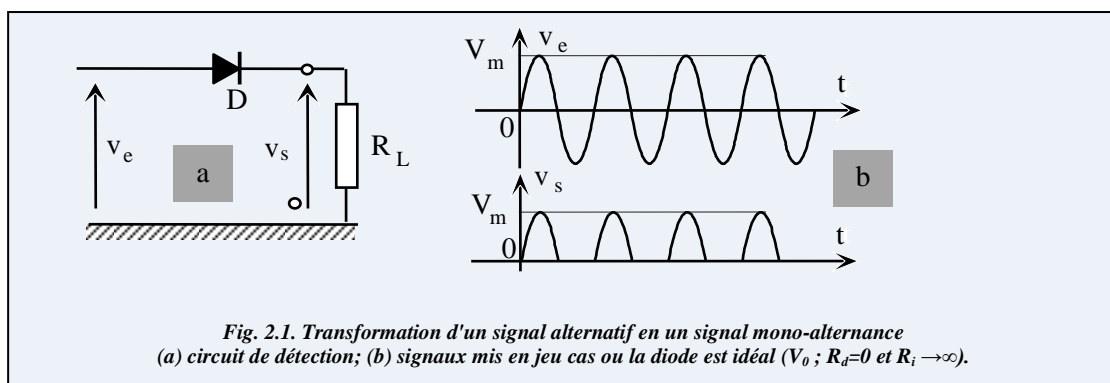
La diode est un composant électronique très intéressant. On peut l'employer dans une grande variété d'applications telles que :

- La détection, le redressement
- La régulation, la multiplication de fréquence
- La réalisation de porte logique
- L'oscillation...

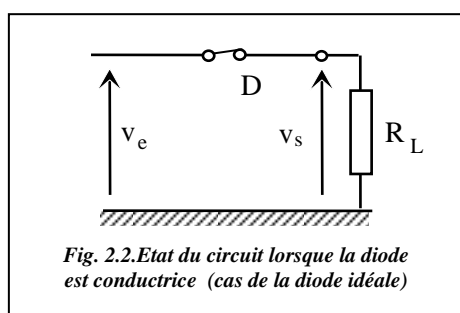
### 2.1) Redressement simple alternance

#### 2.1.1) Cas d'une diode idéale

Le circuit de la figure 2.1a, permet de récupérer uniquement une seule alternance d'un signal bi-alternances comme c'est le cas par exemple du signal sinusoïdal (figure 2.1b). Pour l'étude, la diode est considérée comme étant idéale ( $R_d = 0$  ;  $R_i$  infinie et  $V_0 = 0$ ). Cette approche théorique simplificatrice permet une compréhension aisée et n'est pas éloignée du fonctionnement réel d'une diode comme on le verra dans l'approche expérimentale.



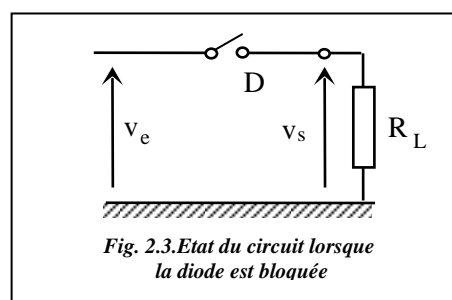
Il faut rappeler que la diode ne laisse passer le courant que dans un seul sens. Lorsque la tension qui est appliquée sur son anode est supérieure à celle qui est appliquée sur la cathode, alors la diode est conductrice.



Lorsqu'on applique un signal sinusoïdal à l'entrée d'un circuit redresseur mono-alternance, dès que la tension à l'entrée est positive, la diode conduit et le circuit équivalent dans ces conditions est donné par le schéma de la figure 2.2. Dans ces conditions la tension de sortie est identique à la tension appliquée à l'entrée.

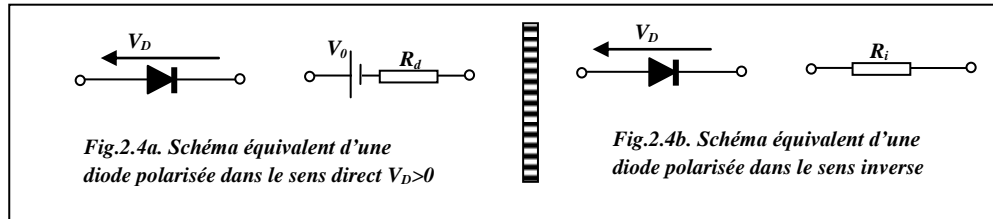
$$v_s = v_e$$

Lorsque le signal appliqué à l'entrée est de polarité négative, la diode se bloque et le circuit équivalent au circuit de redressement est donné par la figure 2.3. On constate que la résistance de charge  $R_L$  n'est parcourue par aucun courant :  $v_s = 0$

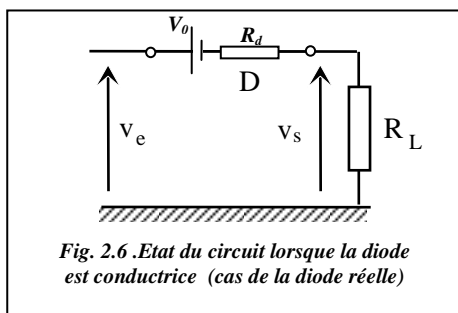
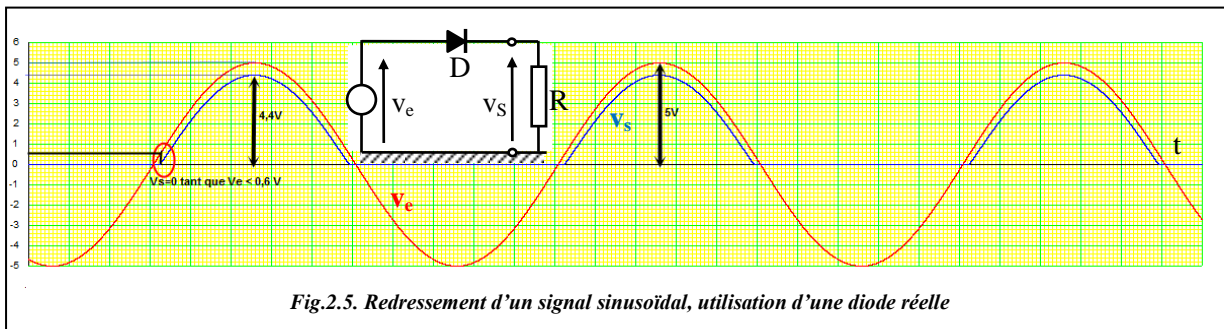


## 2.1.2) Cas d'une diode réelle

Une diode réelle présente une résistance dynamique  $R_d$  de conduction. Cependant cette résistance peut être négligée en faisant un choix approprié de la résistance de charge  $R_L$ . La résistance inverse peut ne pas être également prise en considération en considérant que sa valeur est très élevée par rapport à la résistance de charge. Reste la tension de seuil ou la barrière de potentiel, qu'on ne peut pas négliger surtout lorsqu'on est en présence de signaux de faibles niveaux à l'entrée. Ainsi, on peut donner un schéma équivalent de la diode comme l'indique la figure 2.4a (diode polarisée dans le sens direct) et la figure 2.4b (diode polarisée dans le sens inverse).



Lorsqu'on reprend le circuit de redressement mono-alternance et on l'expérimente pour voir la conformité du signal réellement obtenu (figure 2.5) avec le signal obtenu après l'analyse théorique faite autour d'une diode considérée idéale, on va faire ressortir les éléments de différences



On constate une légère différence au niveau du signal de sortie. Cette différence peut s'expliquer comme suit :

### a) La diode est polarisée dans le sens direct

La diode dans le sens direct est équivalente à une source de tension  $V_0$  en série avec une résistance  $R_d$ . De ce fait le circuit de détection lorsque la diode est passante est schématisé à la figure 2.6. L'écriture de l'équation régissant les tensions au niveau de la maille donne :

$$v_e = V_0 + R_d \cdot i_D + v_s \quad \text{et} \quad v_s = R_L i_D$$

Il faut rappeler que la résistance dynamique  $R_d$  de la diode est très faible, elle est de l'ordre de quelques dizaines d'ohms. La résistance  $R_L$  est égale dans le cas présent à  $10 \text{ K}\Omega$  ( $R_L \gg R_d$ ,  $\gg$  très grand). L'expression du courant  $i_D$  en fonction de la tension d'entrée est donnée par :

$$i_D = \frac{v_e - V_0}{R_L + R_d} \cong \frac{v_e - V_0}{R_L}$$

Dans ces conditions lorsque la diode conduit, la tension de sortie est définie par :

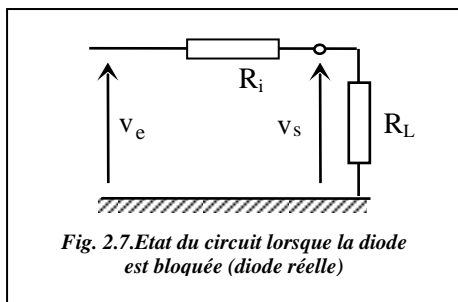
$$v_s = v_e - V_0$$

La tension de sortie  $v_s$  ne va exister que lorsque  $v_e > V_0$ .

Lorsque  $v_e = V_m$ ,  $v_s = V_m - V_0$ . On retrouve bien ces résultats sur les signaux obtenus expérimentalement (figure 2.5).

Lorsque  $v_e = 5V$ , on retrouve  $v_s = 4,4 V$  (une diminution de l'ordre de  $V_0 = 0,6V$  : barrière de potentiel dans une diode à jonction PN au silicium).

### b) La diode est polarisée dans le sens inverse



Lorsque la diode est polarisée dans le sens inverse, elle est équivalente à sa résistance inverse. Dans ces conditions, le schéma relatif au redressement simple alternance est représenté à la figure 2.7.

$$v_s = \frac{v_e \cdot R_L}{R_L + R_i}$$

Comme  $R_i$  est très élevée, on peut considérer que

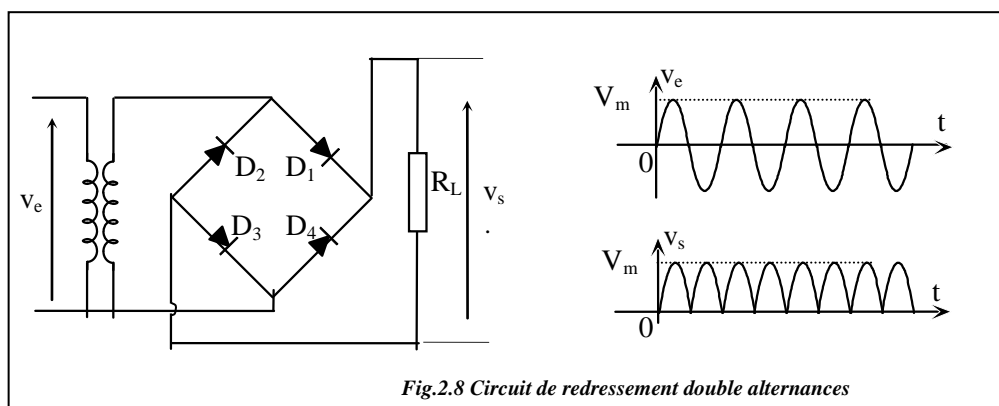
$$R_i \gg R_L \text{ et } v_s \cong 0$$

## 2.2) Redressement double alternances

### 2.2.1) Principe

Le circuit de redressement double alternances (figure 2.8) utilise un pont à diodes. L'application d'une tension sinusoïdale à l'entrée du dispositif de redressement permet d'obtenir un signal où l'alternance positive est restituée telle quelle, alors que la polarité de l'alternance négative est inversée.

Pour simplifier, on considère qu'on est en présence de diodes idéales (la tension de seuil et la résistance dynamique sont considérées comme nulles, la résistance inverse est considérée infinie).

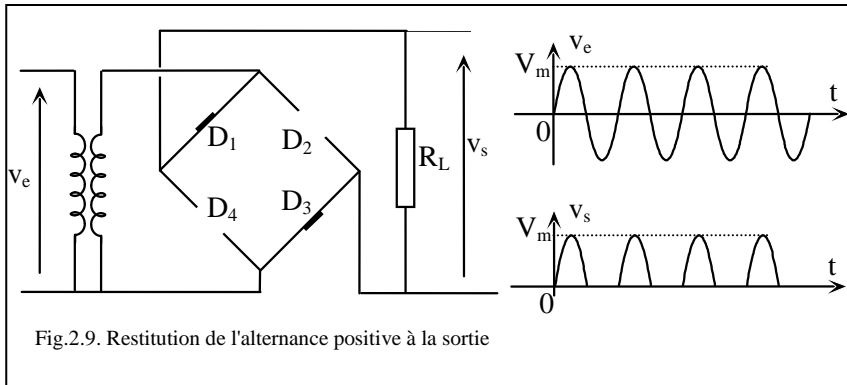




### 2.2.3) Fonctionnement

#### a) cas ou: $v_e > 0$

Au départ la tension de sortie est nulle. Lorsque la tension d'entrée est positive, les deux diodes  $D_1$  et  $D_3$  conduisent. Les diodes  $D_2$  et  $D_4$  sont bloquées. Le schéma équivalent du circuit de redressement double alternances peut être dans ces conditions représenté par la figure 2.9.



De ce fait, l'alternance positive est restituée à la sortie.

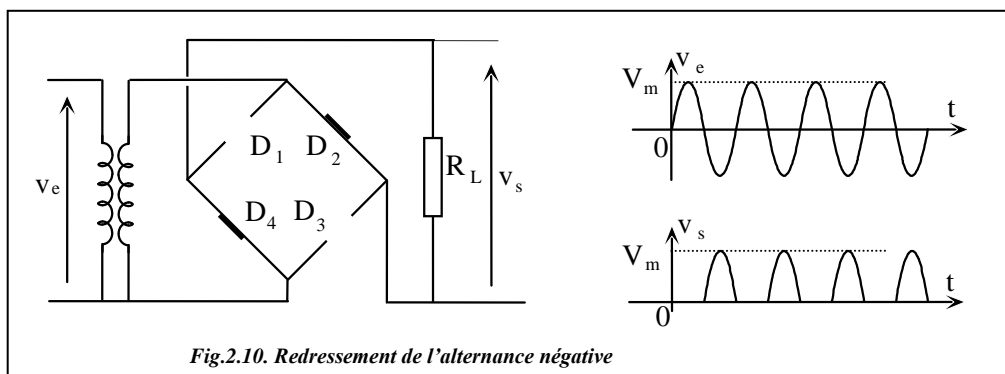
On peut constater sans grande difficulté que lorsque la tension d'entrée est positive, on a :

$$v_s = v_e$$

#### b) cas ou : $v_e < 0$

A l'arrivée de l'alternance négative de  $v_e$ , les deux diodes  $D_1$  et  $D_3$  se bloquent et les diodes  $D_2$  et  $D_4$  conduisent figure 2.10. On constate dans ces conditions que :

$$v_s = -v_e$$



#### **En résumé:**

Comme les diodes  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  et  $D_4$  travaillent simultanément, on obtient donc en sortie un redressement double alternances. Ce qui nous donne dans le cas idéal :

$$\begin{array}{l} v_e > 0 \quad v_s = v_e \\ v_e < 0 \quad v_s = -v_e \end{array} \quad \Rightarrow \quad v_s = |v_e|$$

## 2.2.2) Travail expérimental

La figure 2.11 reproduit le circuit de redressement double alternance en fonctionnement réel. Les signaux d'entrée (en bleu) et de sortie sont représentés en même temps. On constate que le signal de sortie est légèrement différent de celui obtenu théoriquement surtout du point de vue amplitude. Cela provient du fait qu'en théorie on idéalise la diode et on considère que la tension relative au seuil de conduction est nulle. Ce qui n'est pas vrai dans la réalité. On constate que l'amplitude des alternances du signal obtenu dans le cas expérimental est inférieure de 1,2 volts par rapport à l'amplitude des alternances du signal d'entrée. Cela est dû au fait, que les diodes travaillent par deux. A chaque fois, il y a une chute de potentiel de l'ordre de deux fois la tension de seuil des diodes qui constituent le pont de redressement double alternance.

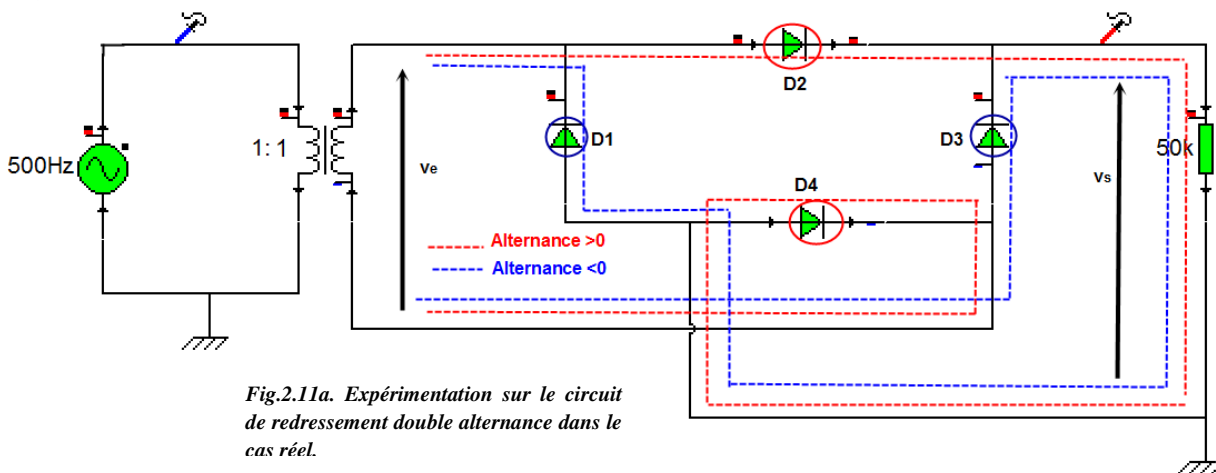


Fig.2.11a. Expérimentation sur le circuit de redressement double alternance dans le cas réel.

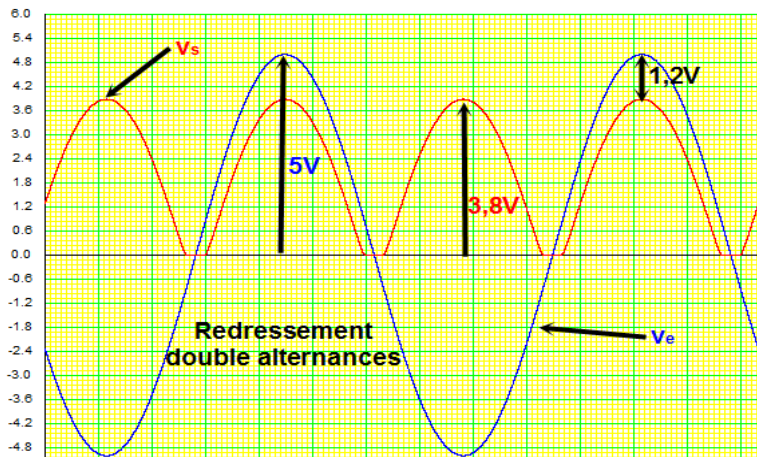
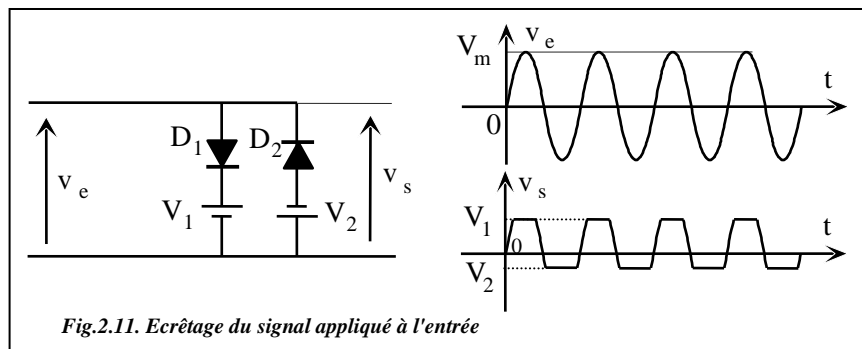


Fig.2.11b. Etat des signaux dans un circuit de redressement double alternance dans le cas réel.

## 2.3) Ecrêtage

### 2.3.1) Principe et approche théorique

Lorsqu'on souhaite éliminer une partie d'un signal, la diode est un composant capable de répondre à ce besoin spécifique. Lorsqu'on veut écrêter par exemple un signal sinusoïdal à un niveau donné, on peut employer le circuit de la figure 2.12. Les deux niveaux de tensions  $V_1$  et  $V_2$  sont réglables. Bien entendu, il est nécessaire que l'amplitude du signal à écrêter soit supérieure à  $V_1$  et  $V_2$  pour que le circuit puisse remplir correctement la fonction pour laquelle il a été conçu.

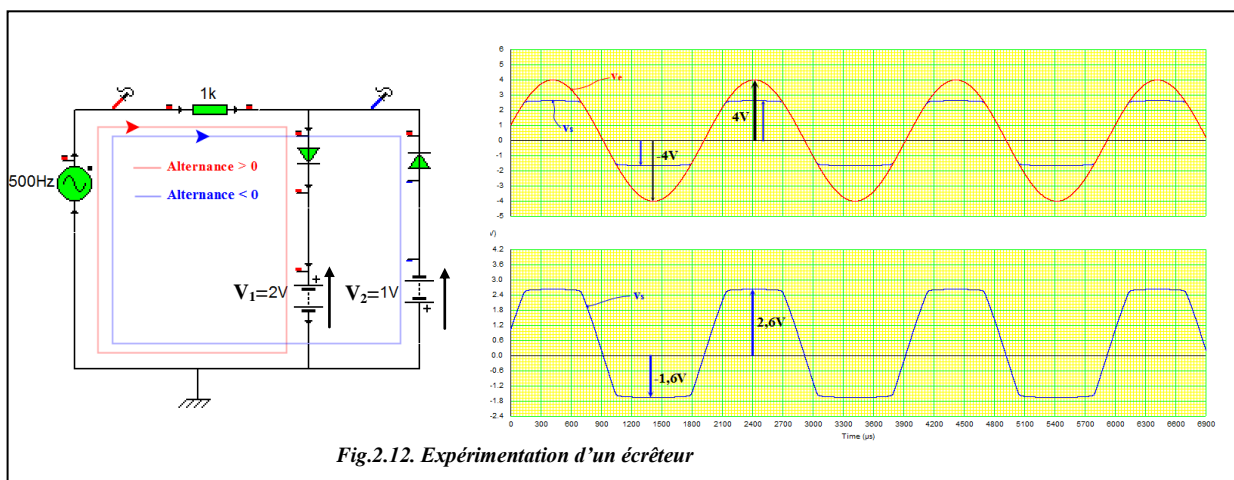


### 2.3.2) L'écrêtage en pratique

Dans l'approche théorique, les diodes sont considérées comme étant idéales. Ce qui n'est pas le cas dans le cas réel pratique. Il faut tenir compte de la barrière de potentiel et éventuellement de la résistance de conduction et de blocage.

Comme cela a été exposé précédemment, la résistance de conduction et de blocage des diodes ne posent pas un problème insurmontable. Cependant la tension de seuil reste un paramètre dont il faut absolument tenir compte comme on le verra dans l'exemple qui suit :

On reprend le même schéma que celui qui est exposé dans l'approche théorique (figure 2.12) avec les données suivantes :  $V_1 = 2V$ ,  $V_2 = -1V$  et  $v_e = 4.\sin(2\pi ft)$ .



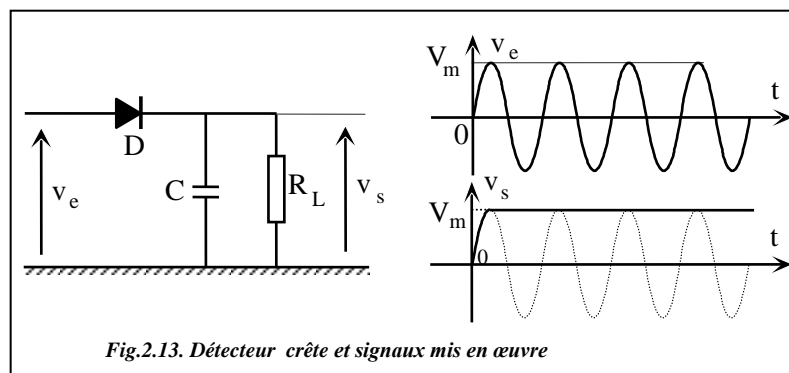
On constate que l'écrêtage ne s'effectue pas exactement à 2V et à -1V mais plutôt à 2,6V et -1,6V. Ceci est dû au fait que lorsque la diode conduit, elle va introduire une tension de seuil égale à 0,6V. D'où cette différence avec l'approche théorique.

## 2.4) Détecteur de crête

### 2.4.1) Approche théorique

Pour pouvoir détecter la valeur maximale d'un signal alternatif, le circuit de la figure 2.13 peut répondre de façon satisfaisante à ce besoin. Pour simplifier la compréhension, le signal d'entrée est choisi comme étant un signal sinusoïdal :  $v_e = V_m \cdot \sin(\omega t)$

Au cours de l'alternance positive, la diode est en état de conduction. Le condensateur C va se charger très rapidement à travers la résistance dynamique de la diode à la valeur crête  $V_m$ .



On obtient en sortie :

$$v_s = V_m$$

La diode a été considérée comme idéale. En réalité on obtient en sortie une tension continue, légèrement inférieure à  $V_m$ .

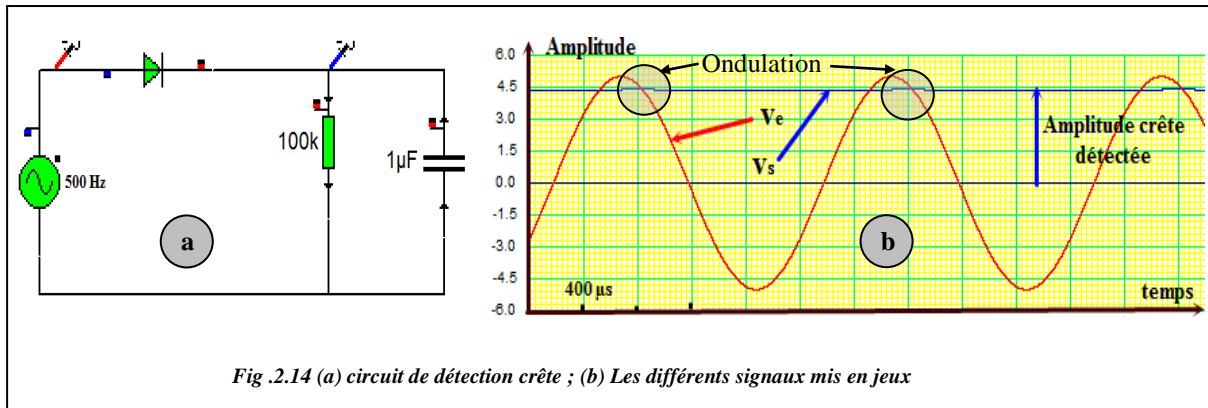
Au cours de la présence de l'alternance négative la diode est bloquée, le condensateur va essayer de se décharger à travers  $R_L$ . La valeur de cette résistance est choisie élevée pour éviter au condensateur de se décharger au cours de cette alternance négative. On obtient ainsi en sortie une tension continue d'amplitude égale à la valeur crête du signal d'entrée. L'arrivée de la deuxième alternance positive permet de régénérer le phénomène de charge du condensateur et compenser l'éventuelle décharge partielle qui peut exister.

Lorsqu'on désire détecter la valeur crête d'un signal qui possède une amplitude constante, Il faudrait que la constante de temps de décharge ( $\tau_d = R_L C$ ) soit très élevée par rapport à la période du signal d'entrée.

Cependant cette constante de temps, si elle est trop élevée et que l'amplitude du signal à l'entrée diminue, le circuit risque de ne pas suivre ce changement et la détection sera erronée. Une constante de temps trop faible ne va pas permettre la détection crête du signal à l'entrée. On va avoir des ondulations liées à la décharge et à la charge du condensateur C respectivement à travers la résistance de charge  $R_L$  et la résistance dynamique de la diode. De ce fait un compromis doit être fait sur la constante de décharge du condensateur comme on le verra dans la partie expérimentation qui va suivre. De plus dans la pratique, il y a lieu de tenir compte du seuil de conduction de la diode.

## 2.4.2) Expérimentation du circuit de détection crête

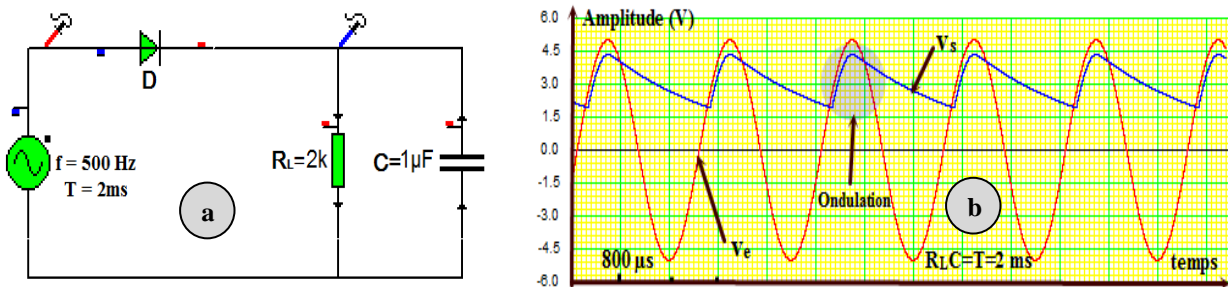
Le circuit de détection crête qui est expérimenté est schématisé à la figure 2.14a. Les signaux mis en œuvre en entrée et en sortie sont schématisés à la figure 2.14b. Il y a lieu de constater que la tension qui est détectée à la sortie ne représente pas réellement la tension crête du signal qui est appliqué à l'entrée.



Cette différence s'explique par le fait que la diode possède un seuil de conduction qui est de l'ordre de 0,6V. Cette chute de potentiel se retrouve au niveau du signal de sortie puisque l'amplitude de la tension de sortie est :  $v_s = V_m - 0,6 = 4,4V$  ( $V_m$  : amplitude crête du signal d'entrée).

On remarque également la présence d'une légère ondulation sur la tension de sortie. Cela est lié à la constante de décharge du circuit RC.

Lorsque la constante de décharge ( $\tau_d = RC$ ) est de l'ordre de la période du signal appliqué à l'entrée, on note la présence d'une ondulation non négligeable sur le signal qu'on récupère à la sortie (figure 2.15).



Pour éviter ce problème d'ondulation et récupérer une tension continue dont l'amplitude est proche de la valeur crête du signal d'entrée, on a tendance à penser à augmenter de façon exagérée la constante de temps  $\tau_d$ . Cela risque de poser un autre problème lorsque l'amplitude du signal d'entrée diminue, le condensateur ne peut évacuer rapidement la tension antécédente qui était à ses bornes et la tension détectée en sortie risque d'être erronée.

Il y a donc nécessité d'adopter un compromis pour la constante de décharge  $\tau_d$ . Une constante de temps  $\tau_d = 50T$  (T période du signal appliqué à l'entrée) serait un bon compromis.

## 2.5) Circuits de restauration

### 2.5.1) Principe

Par l'utilisation des circuits de la figure 2.16, on peut rajouter artificiellement des composantes continues positives ou négatives à des signaux alternatifs.

Pour simplifier l'explication du fonctionnement de ces circuits, on suppose que le signal appliqué à l'entrée est de type sinusoïdal et sa valeur moyenne est nulle.

Les circuits de restauration de composante positive et négative fonctionnent selon le même principe. A cet effet, on ne présentera que l'étude du fonctionnement de l'un d'eux.

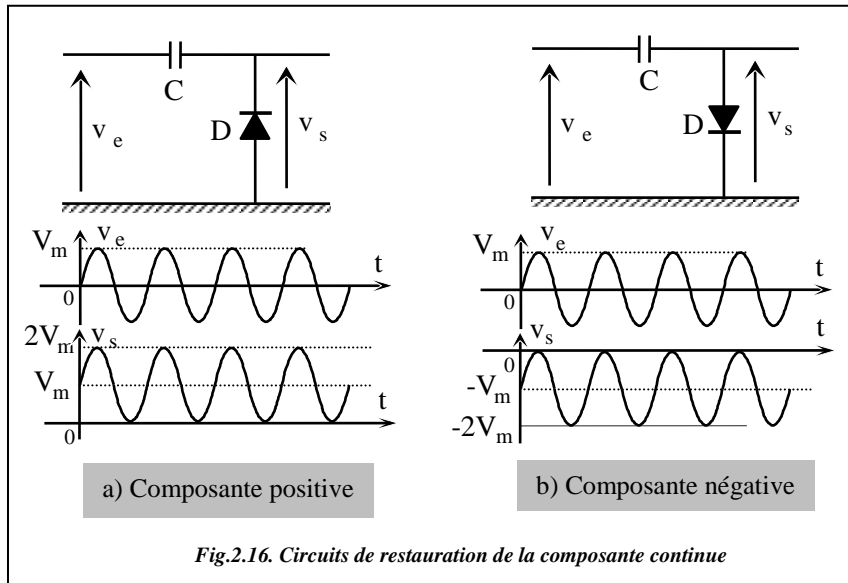


Fig.2.16. Circuits de restauration de la composante continue

### 2.5.2) Fonctionnement

On ne considère que le circuit relatif à la restauration de la composante positive. Le signal appliqué à l'entrée est de type sinusoïdal:

$$v_e = V_m \sin(\omega t).$$

Lorsque la tension  $v_e$  est négative, la diode est dans un état de conduction. On peut l'assimiler par souci de simplification à un court-circuit comme l'indique le circuit de la figure 2.17b.

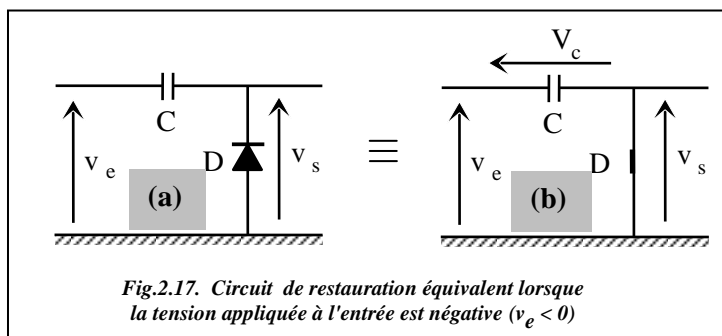


Fig.2.17. Circuit de restauration équivalent lorsque la tension appliquée à l'entrée est négative ( $v_e < 0$ )

$$\underline{v_e < 0} :$$

$$v_s = 0$$

$$v_e = V_C + v_s = V_C$$

$$v_s = v_e - V_C$$

Le condensateur C va se charger à la valeur crête  $V_m$  ( $V_c = -V_m$ ).

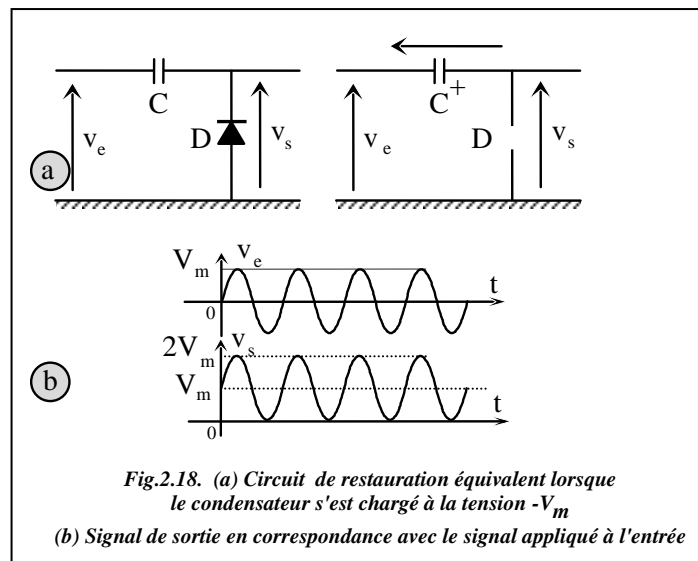
Lorsque la tension  $v_e$  devient légèrement supérieure à la valeur crête  $-V_m$ , la tension qui est appliquée sur l'anode de la diode (zéro volt) est inférieure à celle qui est appliquée sur sa cathode ( $v_e + V_m$ : valeur positive).

La diode se trouve donc bloquée. A ce moment, le circuit de restauration équivalent est schématisé par la figure 2.18a. On peut alors écrire dans ces conditions:

$$v_s = v_e - V_C ; \quad V_C = -V_m$$

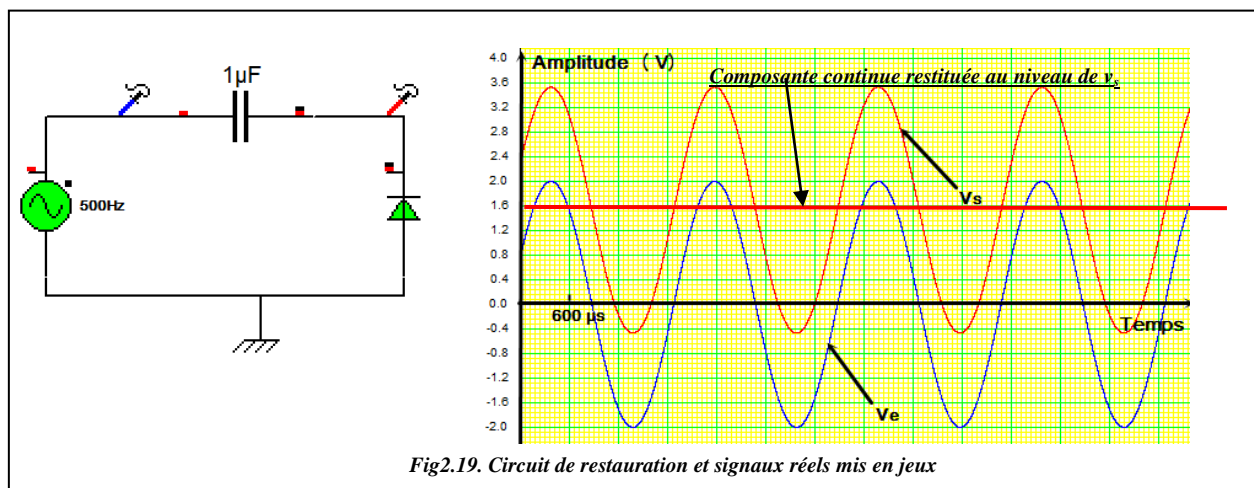
$$v_s = v_e + V_m$$

On constate ainsi que le signal de sortie n'est autre que le signal appliqué à l'entrée, auquel on a rajouté une tension continue d'amplitude égale à  $V_m$  (voir la figure 2.18b).



## 2.5.2) Expérimentation du circuit de restauration

On ne va traiter que l'aspect pratique relatif à la restauration de la composante continue positive. Le traitement de la restitution de la composante négative reste similaire ? Dans ce contexte, il y a lieu de tenir compte du problème relatif à la barrière de potentiel de la diode. Ainsi le circuit pratique qui permet de restaurer la composante continue positive et les différents signaux mis en jeu sont schématisés à la figure 2.19.



On constate une légère différence avec ce qui a été avancé dans l'approche théorique pour le signal récupéré à la sortie. Il y a eu certes la restauration d'une composante continue mais son amplitude n'est pas la valeur crête ( $V_m$ ) du signal appliquée à l'entrée. La diode présente un seuil de conduction égal à  $V_0$ . La composante continue restaurée est égale à :

$$V_m - V_0.$$

De ce fait l'expression qui définit la tension de sortie est donnée par :

$$v_s = v_e + V_m - V_0$$

Ce qui explique la partie négative du signal de sortie qui a une l'amplitude qui est égale à  $V_0$ .

## 2.6) Détecteur crête à crête

La diode combinée à certains composants passifs permet de réaliser des fonctionnalités telles que le détecteur crête à crête schématisé à la figure 2.20. L'adjonction d'un circuit de restauration de composante continue et d'un détecteur crête permet d'arriver à ce résultat. L'explication du fonctionnement de ce circuit peut s'établir comme suit :

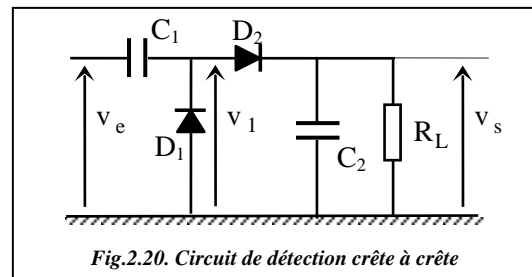
Lors de l'alternance négative de la tension d'entrée, la diode  $D_1$  conduit et le condensateur  $C_1$  se charge instantanément jusqu'à la tension crête  $-V_m$  (comme cela a été décrit dans le cas du circuit de restauration de la composante positive).

$$v_{C1} = -V_m$$

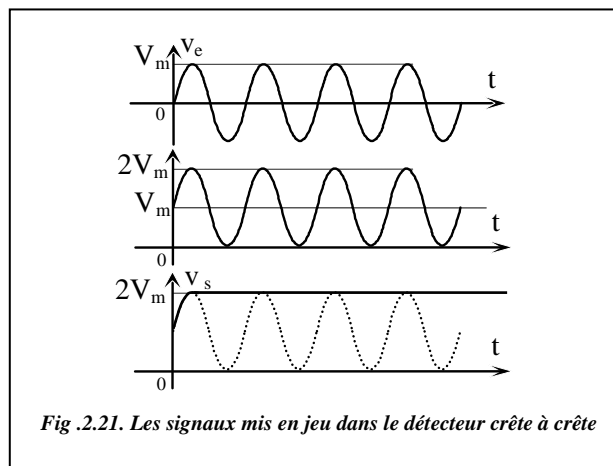
Au cours de l'alternance positive, la diode  $D_2$  conduit et le condensateur  $C_2$  se charge à la tension  $v_1 = V_m + v_e(t)$  en un temps correspondant à la constante de temps du circuit de charge. Après plusieurs cycles, la tension de sortie se stabilise à :

$$v_s = V_m + V_m = 2V_m$$

$2V_m$  étant l'amplitude crête à crête



Les différents signaux mis en jeu dans le cadre de ce circuit sont schématisés à la figure 2.21.





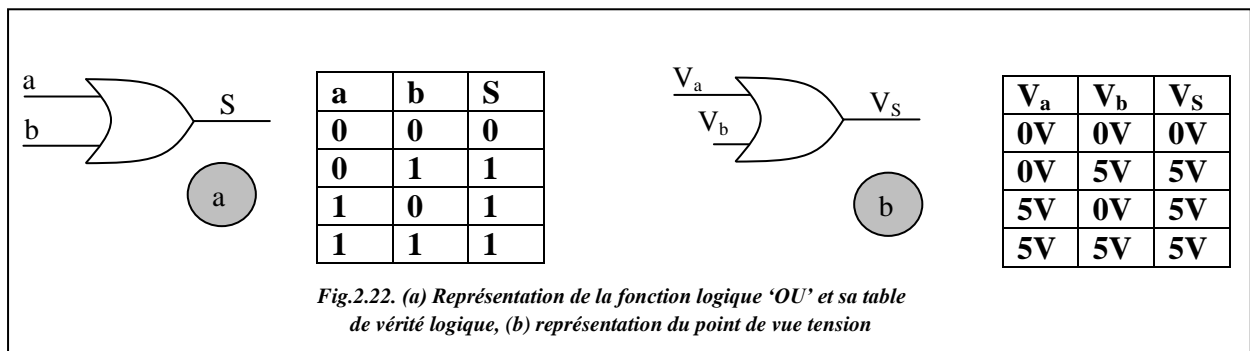
## 2.7) Fonctions logiques à diodes

On peut aisément bâtir des fonctions logiques en utilisant uniquement des diodes. Dans ce contexte on va s'intéresser à quelques fonctions simples telles que la fonction « OU » ou la fonction « ET »

### 2.7.1) Fonction logique OU (OR)

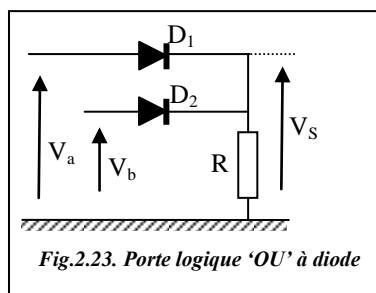
#### a) Principe

La fonction logique 'OU' est représentée par le schéma électrique et sa table de vérité à la figure 2.22a. La représentation d'un point de vue potentiel est indiquée à la figure 2.22b.



#### b) Réalisation d'une fonction logique 'OU' à base de diodes

Le circuit de la figure 2.23 peut jouer le rôle d'une porte logique 'OU'.



En effet, on peut constater que lorsque  $V_a=0V$  et  $V_b=0V$ , les deux diodes  $D_1$  et  $D_2$  sont bloquées et aucun courant ne circule à travers  $R$  :

$$V_S = 0V.$$

Lorsque  $V_a=5V$  et  $V_b=0V$ , La diode  $D_1$  conduit et la diode  $D_2$  est bloquée :  $V_S=5V$

Lorsque  $V_a=0V$  et  $V_b=5V$ , La diode  $D_1$  est bloquée et la diode  $D_2$  conduit :  $V_S=5V$ . Lorsque  $V_a=5V$  et  $V_b=5V$ ,

$V_a$	$V_b$	$V_S$
0V	0V	0V
0V	5V	5V
5V	0V	5V
5V	5V	5V

Les deux diodes  $D_1$  et  $D_2$  conduisent et on a :  $V_S=5V$ . A partir de la, on peut dresser le tableau récapitulatif ci-contre, qui indique bien que le circuit à diodes est bien représentatif d'une fonction logique 'OU'.

### 2.7.1) Fonction logique ET (AND)

#### a) principe

La représentation du schéma électrique d'une porte AND ainsi que la table de vérité relatif au fonctionnement de cette porte sont décrits par la figure 2.24.

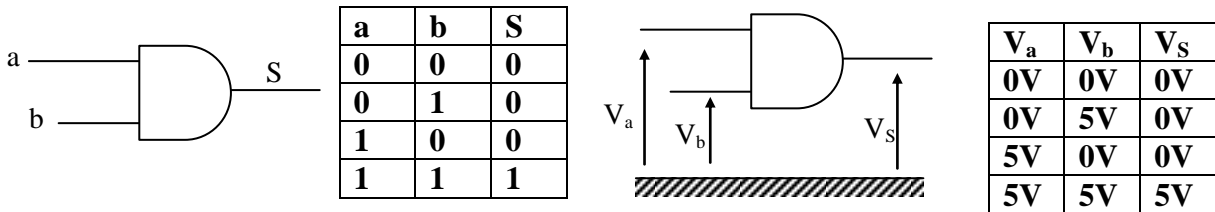


Fig.2.24. (a) Représentation de la fonction logique 'AND' et sa table de vérité logique (b) représentation du point de vue tension

#### b) Réalisation d'une porte 'AND' à base de diodes

Le circuit à étudier est représenté à la figure 2.25. Pour simplifier la compréhension du fonctionnement du circuit, on considère que les diodes utilisées sont considérées comme étant idéales.

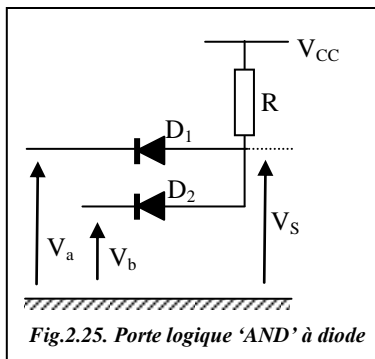


Fig.2.25. Porte logique 'AND' à diode

Lorsqu'on a  $V_a = V_b = 0$ , les deux diodes  $D_1$  et  $D_2$  sont conductrices. On aura alors  $V_S = 0$  (figure 2.26)

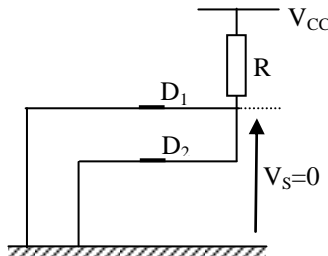


Fig.2.26. Etat du circuit lorsque  $V_a = V_b = 0$

Lorsque  $V_a = 0$ ,  $V_b = V_{CC}$ , ( $V_a = V_{CC}$ ,  $V_b = 0$ ), la diode  $D_1$  est conductrice et  $D_2$  est bloquée, (la diode  $D_1$  est bloquée et  $D_2$  est conductrice). On aura :

$$V_S = 0$$

Lorsque  $V_a = V_{CC}$ ,  $V_b = V_{CC}$ , les deux diodes  $D_1$  et  $D_2$  est sont conductrices (figure 2.27). Dans ces conditions, on constate qu'il n'y a aucun courant qui circule à travers la résistance R. On aura alors :

$$V_S = V_{CC}$$

A partir de ce qui a précédé, on peut déduire le tableau suivant :

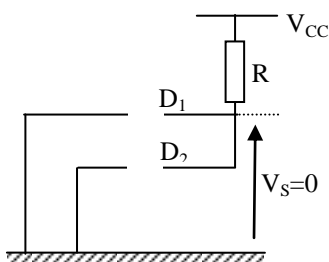


Fig.2.27. Etat du circuit lorsque  $V_a = V_b = V_{CC}$

V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>S</sub>
0V	0V	0V
0V	5V	0V
5V	0V	0V
5V	5V	5V

Ce tableau est bien conforme à celui d'une porte AND.

### 3) Etude de quelques diodes spéciales

Il existe d'autres types de diodes qui sont utilisées soit pour les mêmes fonctions soit pour d'autres telles que :

- La régulation, l'oscillation, les circuits d'accord,

#### 3.1) Diodes Zener

La représentation électrique d'une diode Zener (figure 3.1) est légèrement différente d'une diode normale. Lorsqu'une diode Zener est polarisée en direct, elle se comporte comme une diode normale.

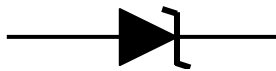


Fig.3.1. Schéma électrique d'une diode zener

L'intérêt d'une diode Zener réside dans le fait quand elle est branchée en sens inverse. Lorsque la tension appliquée à une diode Zener dépasse la tension de claquage, la diode Zener devient conductrice et la tension à ses bornes est égale à la tension de claquage (figure 3.2). Quand on parle normalement de claquage, cela sous entend que la diode est détruite. Cela n'est pas le cas pour une diode Zener où le claquage est contrôlé. Le phénomène de claquage par effet Zener (effet de champ ou d'avalanche) pour ce type de diodes n'est pas destructif.

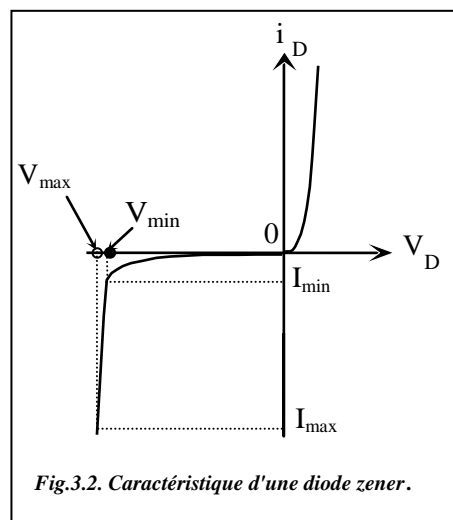


Fig.3.2. Caractéristique d'une diode zener.

En polarisation inverse, on constate qu'au niveau de la tension Zener (après claquage de la jonction), il n'existe plus de dépendance entre le courant et la tension appliquée à la jonction. La tension reste sensiblement constante et égale à la tension Zener.

La tension inverse aux bornes de la diode, dans la zone de claquage varie peu. A cet effet, on peut écrire que la tension Zener  $V_z$  est :

$$V_z \cong V_{\max} \cong V_{\min}$$

$I_{\min}$  est l'intensité au dessous de laquelle la tension n'est plus stabilisée.  $I_{\max}$  est l'intensité maximale que peut supporter la diode avant sa destruction.

L'inclinaison de la caractéristique de la diode Zener dans la région de claquage est en relation avec la résistance présentée par la diode Zener dans sa zone de fonctionnement.

Plus cette résistance est faible, plus le rôle de stabilisation de la diode est assuré.

La relation qui définit la résistance différentielle de la diode Zener est donnée par :

$$r_z = \frac{\Delta V_D}{\Delta i_D} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}$$

La valeur de  $r_z$  est en général de l'ordre de quelques ohms.

On trouve trois catégories de diodes Zener :

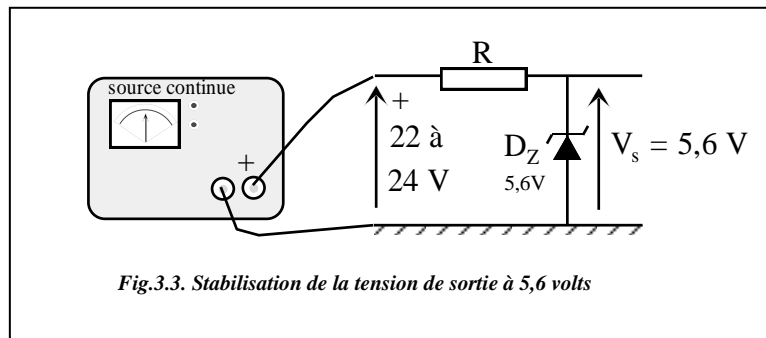
- diodes basse tension [ $< 5$  Volts ], le claquage est obtenu par effet de champ.
- diodes moyenne tension [ de 5V à 7V ], le claquage est obtenu par la combinaison des effets de champ et d'avalanche.

- diodes haute tension [ $> 7$  Volts]. Le claquage obtenu par effet d'avalanche.

Les diodes Zener peuvent être utilisées dans :

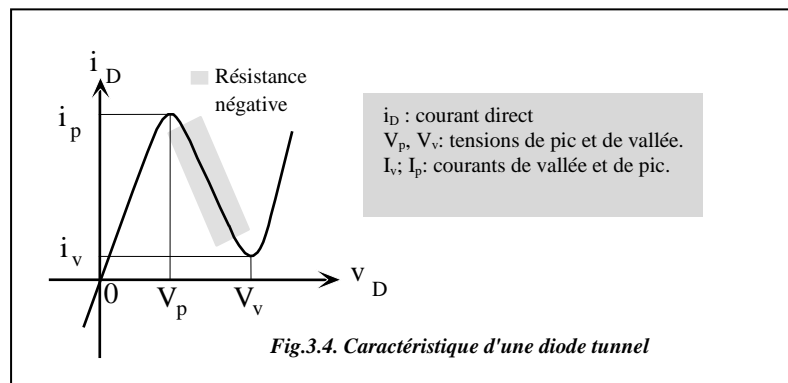
- les alimentations stabilisées
- les sources de tensions de références
- la protection des circuits etc...

Ainsi lorsqu'on dispose d'une alimentation qui délivre une tension qui oscille entre par exemple 10 et 20 volts et on a besoin uniquement d'une tension stable de l'ordre de 5,6 Volts, il suffit d'utiliser le circuit de la figure 3.3. La diode Zener permet de fixer la tension de sortie à la valeur souhaitée. Il est important de noter que pour arriver à réguler une tension par l'emploi d'une diode Zener, la tension appliquée à l'entrée doit être supérieure à la tension Zener.

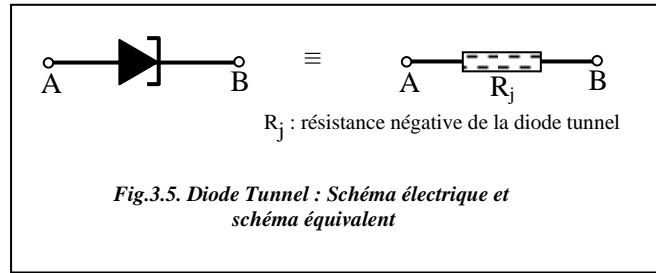


### 3.2) Diodes tunnel

Ce sont des diodes à semi-conducteur fortement dopé. La caractéristique directe d'une diode tunnel (figure 3.4) montre une plage (zone grisée) où la résistance présentée par cette diode est négative. Cet effet remarquable, permet d'utiliser la diode tunnel plus particulièrement dans les circuits oscillateurs comme élément actif. Ces diodes doivent impérativement travailler à bas niveau.



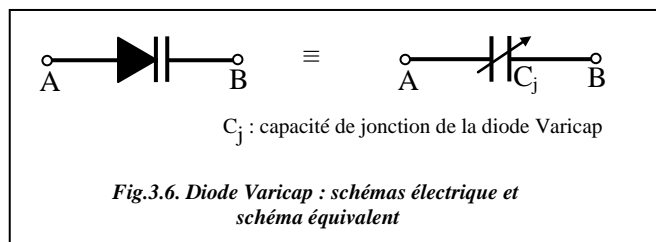
Le schéma équivalent le plus simple de la diode tunnel en conduction négative est donné par la figure 3.5.



### 3.3) Diodes à capacité variable ou "varicap"

C'est une diode à jonction. Elle présente une capacité variable en fonction de la tension inverse qui lui est appliquée. Ce composant est très employé dans les oscillateurs à fréquence contrôlée par une tension externe (V.C.O : voltage controlled oscillator).

La représentation électrique et le schéma équivalent d'une diode varicap sont donnés par la figure 3.6.



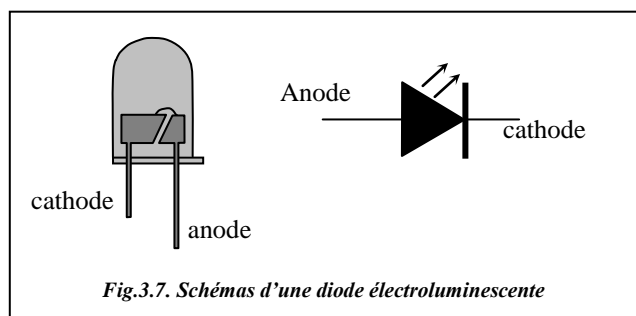
La valeur de la capacité  $C_j$  dépend de la tension inverse ( $V_R = V_B - V_A$ ) appliquée :

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{V_R}{V_0}\right)^n}$$

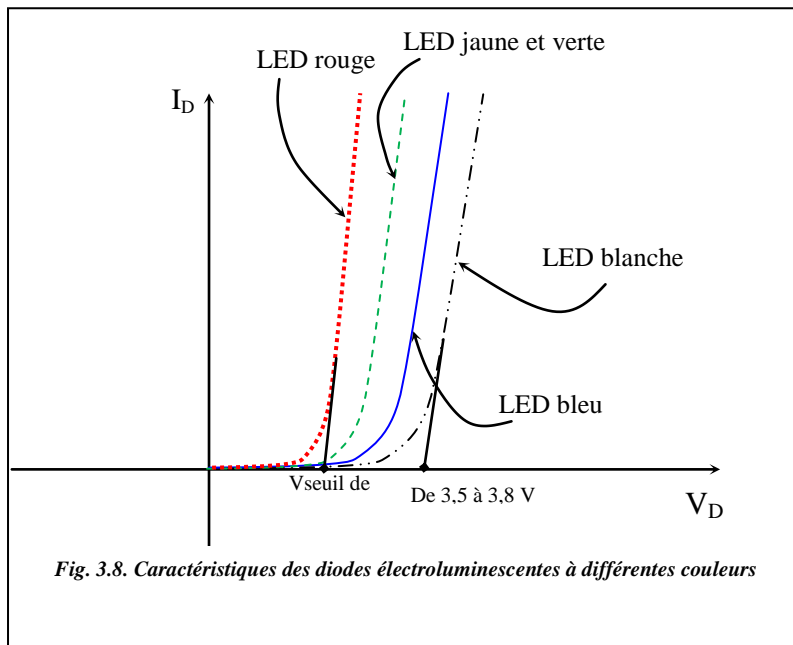
$C_{j0}$ : capacité de la jonction sans tension extérieure.  
 $V_0 \cong 0,6V$  (pour le silicium).  
 $n$  : constante qui dépend du procédé de fabrication de la diode.  
 $n = 0,36$  (diodes à diffusion)  
 $n = 0,50$  (diodes planar)  
 $n > 0,50$  (diodes obtenues par des procédés spéciaux de diffusion)

### 3.4. Diodes électroluminescentes (LED)

L'abréviation LED (LED : **L**ight **E**mitting **D**iode) est fréquemment employée pour parler des diodes électroluminescentes. Une diode électroluminescente peut-être schématisée à l'aide de la figure 3.7.



Ces diodes « LED » ont la propriété lorsqu'elles sont polarisées dans le sens passant (tension de l'anode supérieure à la tension de la cathode) d'émettre un rayonnement visible. Ce rayonnement peut avoir différentes couleurs : rouge, verte, jaune, bleue ou blanche... La caractéristique directe d'une diode « LED » figure 3.8 ressemble à celle d'une diode classique à jonction PN. La différence essentielle réside dans la valeur de la tension de seuil.



En plus des diodes électroluminescentes unicolores, il existe des diodes multicolores (bicolores et tricolores) à deux ou à trois broches.

### Bibliographie :

- 1- Electronique analogique, Stéphane Volkov, Editions, ELeducative, collection A. CAPLIEZ 1994.
- 2- Electronique générale, Brahim Haraoubia, Editions, Office des Publications Universitaires (OPU), 2006, 3<sup>ème</sup> éditions.
- 3- Microelectronics, Digital and analog circuits and systems, J. Millman, Editions McGraw Hill, 1979.
- 4- Principes d'électronique, A.P Malvino, Edition, McGraw Hill, 1980