

### III.3. Diodes dans les circuits

#### III.3.1. Caractéristique statique d'une diode

La caractéristique  $I(V)$  d'une diode est dissymétrique et admet 3 zones comme le montre la figure III.4.

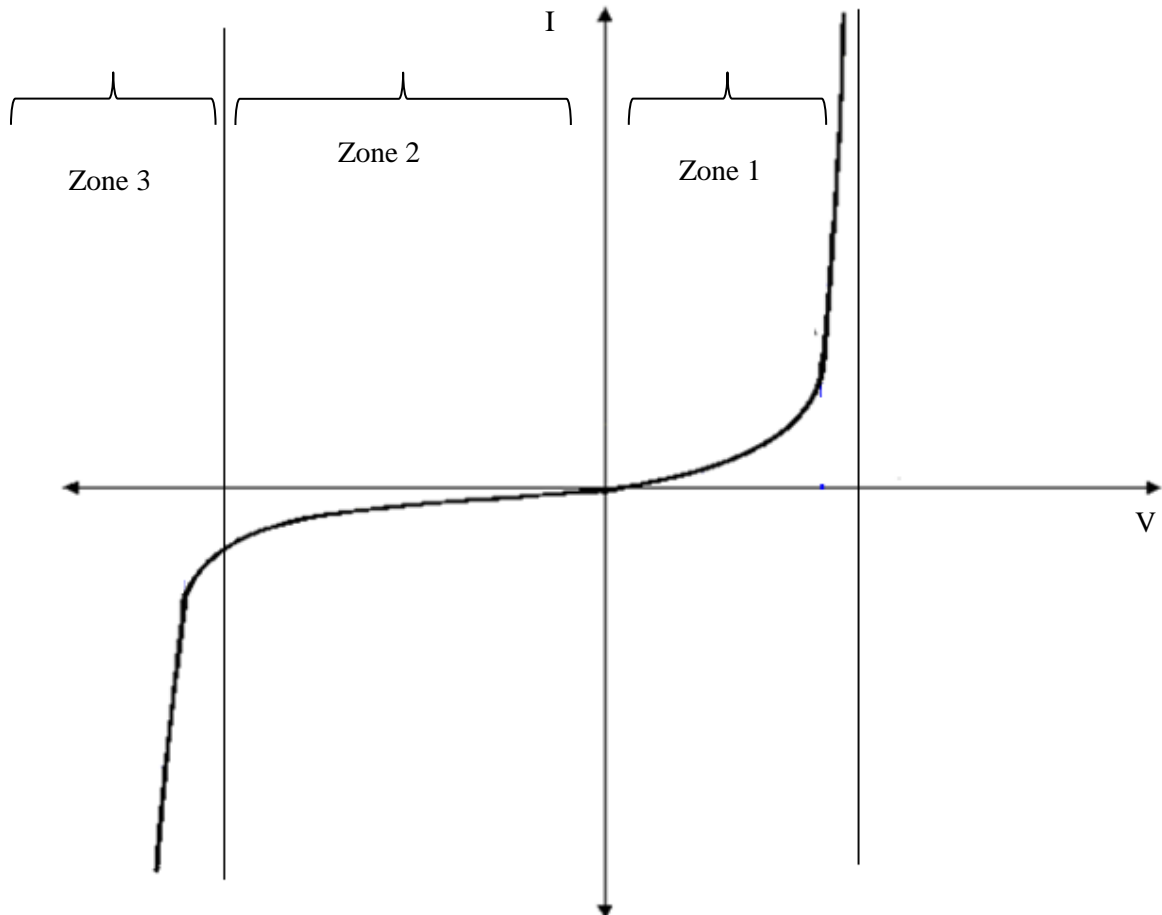


Figure III.4 : Caractéristique  $I(V)$  d'une diode

Les zones 1 et 2 présentent comme caractéristique électrique la courbe dont l'équation est :

$$I = I_{sat} \cdot \left( \exp\left(\frac{V}{U_T}\right) - 1 \right)$$

$I_{sat}$  : Courant de saturation de la diode, le courant de saturation est très faible de l'ordre de  $10^{-11} \text{ A}$

$U_T$ : Tension thermodynamique,  $U_T = k_B T / q$

$k_B$ : Constante de Boltzmann,  $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

$q$  : Charge de l'électron,  $q = 1.60219 \times 10^{-19} \text{ C}$

T : température en kelvin, à 300K  $U_T=26\text{mV}$

V : tension appliquée.

- Lorsque la tension appliquée est directe et supérieur à  $3k_B T$ , on néglige 1 devant

l'exponentielle et le courant varie exponentiellement avec V :  $I = I_{sat} \exp \frac{V}{U_T}$

- Par contre quand une tension inverse  $V_R$  est appliquée ( $V_R=-V$ ), pour  $V_R \gg 3k_B T$ ,

alors  $\exp \frac{V}{U_T} \ll 1 \Rightarrow I \approx -I_{sat}$ , le courant dans ce cas est très faible, et de l'ordre

du courant de saturation.

La zone 3 est la zone d'avalanche, les électrons qui contribuent au courant inverse  $I_s$ , sont accélérés par le champ électrique qui règne dans la zone de transition. Si ce champ devient important, les électrons peuvent arracher, par collision, des électrons aux atomes du réseau. Ces porteurs secondaires s'ajoutant aux porteurs primitifs, contribuent à libérer d'autres électrons, par collisions avec les atomes du réseau. Ce phénomène d'avalanche, rapidement cumulatif, conduit à un courant important qui détériore la jonction.

Pour relever la caractéristique directe d'une diode, on utilise le circuit figure III.5. Pour relever la caractéristique inverse il suffit d'inverser la polarité de l'alimentation E.

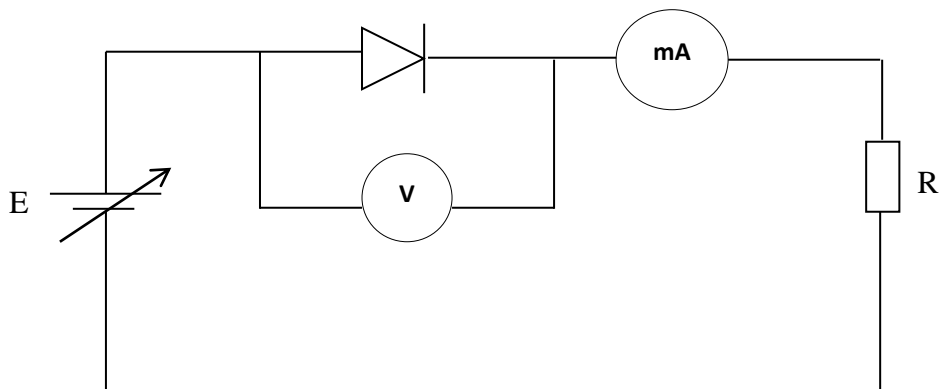


Figure III.5

### III.3.2. Droit de charge et point de fonctionnement

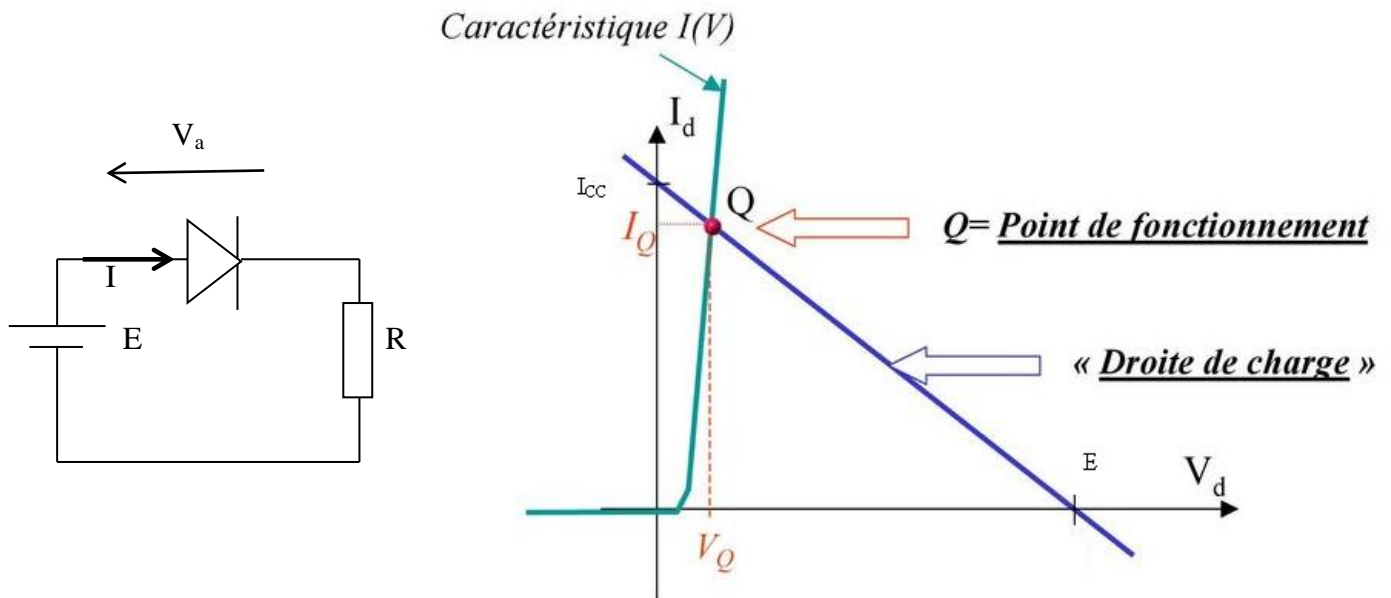


Figure III.6 : Droit de charge et point de fonctionnement

Le schéma de la figure III.6 représente une diode polarisée par une tension continue  $E$ , à travers une résistance  $R$ . le courant  $I$  qui traverse la diode et la tension  $V_a$  à ses bornes, vérifient la relation de la maille :  $E = RI + V_a$ . Cette relation est celle d'une droite dans le système de coordonnées  $(V_a, I)$ . Cette droite de charge, de pente  $(-1/R)$ , coupe les axes du système aux points de coordonnées  $(E, 0)$  et  $(0, I_{CC})$ , avec  $I_{CC} = E/R$ . l'intersection de la droite de charge et la caractéristique de la diode déterminent le point de fonctionnement  $Q$  de la diode. Le courant  $I_Q$  et la tension  $V_Q$  aux bornes de la diode sont déterminés graphiquement.

### III.3.3. Schéma équivalent à une diode

#### a) Diode idéal

La figure III.7 donne la caractéristique dans le cas idéal de la diode, et son équivalent dans un circuit polarisation directe et sous polarisation inverse.

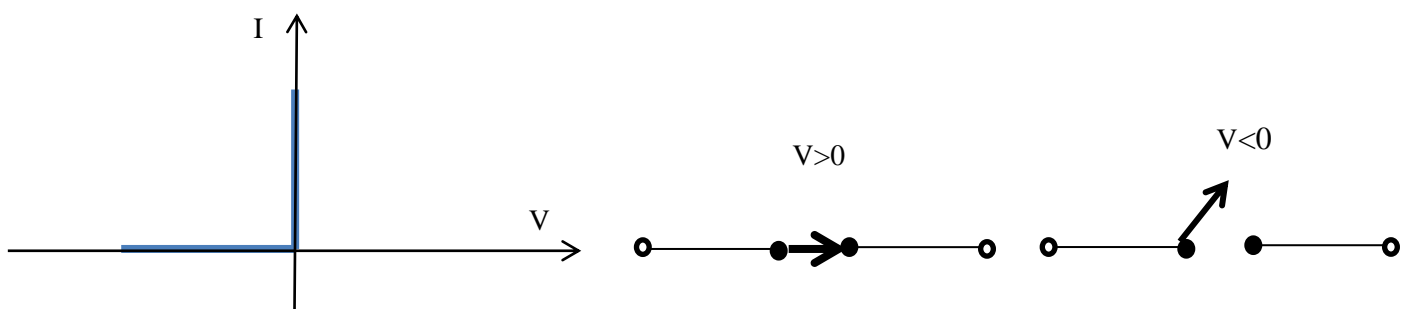


Figure III.7 : Diode idéal

La diode dans le cas idéal se comporte comme un interrupteur électronique

### b) Diode réelle :

La diode dans les réseaux électriques est substituée par son schéma équivalent. Ce dernier est déduit de son état de blocage ou son état de conduction :

- Une diode passante est remplacée par un générateur de f.e.m, seuil de la diode, en série avec une résistance  $r_d$  (résistance dynamique),
- Alors qu'à l'état bloqué, la diode sera remplacée par une résistance  $R_i$  de grande valeur (figure III.8).

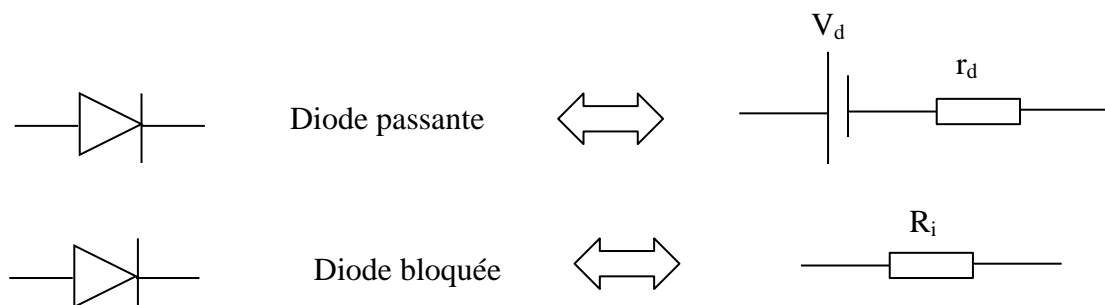


Figure III.8 : Schéma équivalent à une diode réelle.

La figure III.9 représente la caractéristique d'une diode réelle quand est polarisée en direct

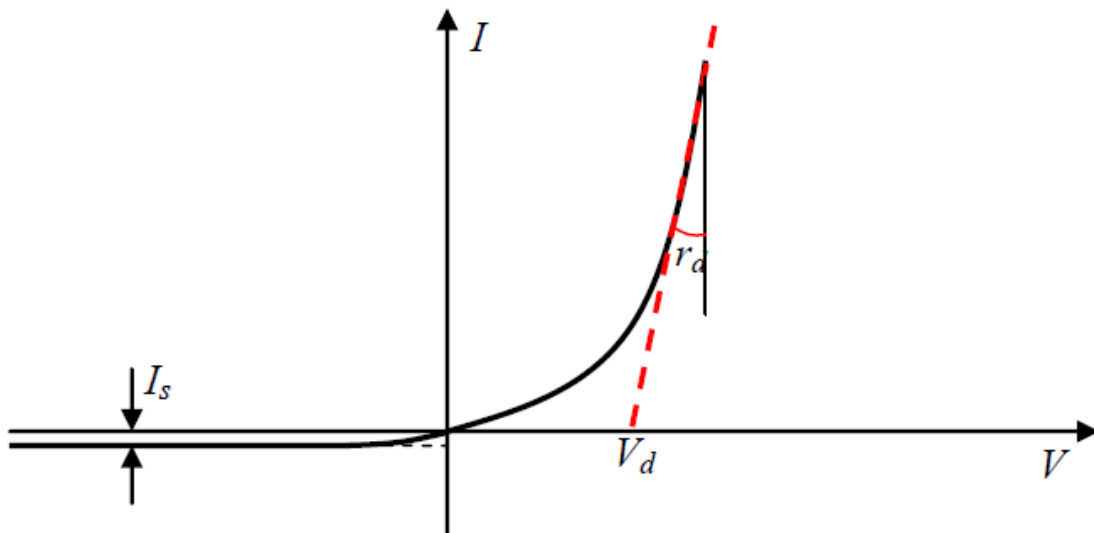


Figure III.9 : Caractéristique I-V d'une diode

-  $V_d$  est la tension de seuil de la diode. Généralement, elle est inférieure à 1 V.

**-La résistance dynamique  $r_d$**  : La résistance dynamique est la résistance équivalente de la diode en régime variable et appelée aussi résistance différentielle. Son expression est donnée par le rapport de la variation de la tension aux bornes de la diode à la variation du courant qui la traverse, soit :

$$r_d = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \cot ga$$

Ou  $a$  est l'angle que fait la droite de charge avec l'axe horizontal.

Sous polarisation directe, le courant traversant la diode peut être mise sous la forme :

$$I = I_{sat} \exp \frac{V}{U_T}$$

Donc :

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{I}{U_T} \Rightarrow r_d = \frac{U_T}{I}$$

$$r_d = \frac{U_T}{I}$$

Sous polarisation inverse :

$$I \approx -I_{sat}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \Rightarrow r_d \rightarrow \infty$$

Nous pouvons donc conclure que sous polarisation inverse, la diode comporte comme circuit ouvert car elle présente une résistance dynamique infinie.

Trois cas de simplification sont généralement utilisés dans les calculs de circuit à diodes

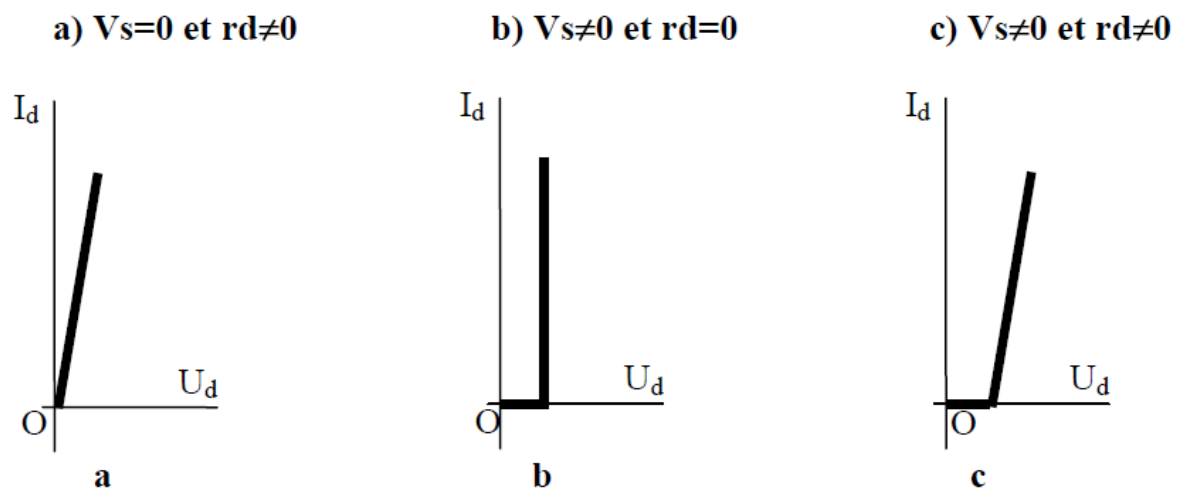


Figure III.10 : Caractéristiques I-V simplifiées d'une diode

### III.3.4. Redressement :

Une des principales applications de la diode est le redressement de la tension alternative du secteur pour faire des générateurs de tension continue destinés à alimenter les montages électroniques (entre autres).

#### a) Redressement simple alternance.

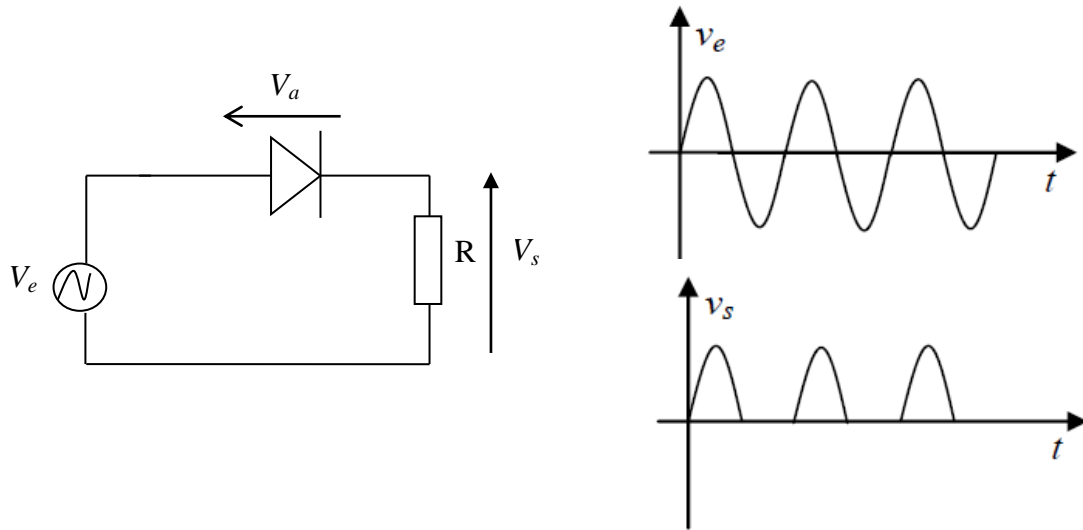


Figure III.11 : Circuit de base d'un redressement simple alternance

La figure III.11 représente un montage de base d'un redressement simple alternance. Le circuit constitué d'une diode, en série avec une résistance  $R$ , est alimenté par une source de tension sinusoïdale. La diode ne conduit que pendant l'alternance positive du signal appliqué, lorsque la tension  $V_a$  à ses bornes, est positive. Si  $V_d$  est la tension de seuil de la diode et  $r_d$ , sa résistance dynamique, le courant dans le circuit sera tel que :

$$i(t) = \frac{V_e - V_d}{R + r_d} \geq 0 \quad \text{si} \quad V_e(t) \geq V_d \quad \text{et} \quad i(t) = 0 \quad \text{si} \quad V_e(t) \leq V_d$$

- La valeur moyenne du courant traversant la charge est donnée par :

$$I_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_{\text{max}} \sin(\omega t) dt = \frac{I_{\text{max}}}{T\omega} [\cos(\omega t)]_0^{\frac{T}{2}} = \frac{I_{\text{max}}}{\pi}$$

- La valeur efficace du courant traversant la charge est donnée par :

$$I_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} [I_{\max} \sin(\omega t)]^2 dt = \frac{I_{\max}^2}{2T} \int_0^{\frac{T}{2}} (1 - \cos(2\omega t)) dt = \frac{I_{\max}^2}{2T} \left[ t - \frac{1}{2\omega} \sin(2\omega t) \right]_0^{\frac{T}{2}}$$

$$I_{eff} = \frac{I_{\max}}{2}$$

### b) Redressement double alternance

Il est évident que si on utilise les deux alternances, l'efficacité de redressement sera meilleure. Deux solutions peuvent être mises en œuvre pour procéder à un redressement double alternance : soit on utilise le transformateur à point milieu ou pont de diodes.

#### ➤ Montage à base de transformateur à point milieu

Si on prend le point milieu du transformateur comme référence, les tensions de sortie du transformateur  $V_1$  et  $V_2$  sont en opposition de phase (figure III.12). Pendant l'alternance positive de  $V_1$ , (négative de  $V_2$ ), la diode  $D_1$  conduit et alimente la charge alors que la diode  $D_2$  est bloquée (Figure III.13) donc  $V_L = V_1$ . Pendant l'alternance négative de  $V_1$ , (positive de  $V_2$ ), la diode  $D_1$  est bloquée alors que la diode  $D_2$  conductrice, alimente la charge (Figure III.14) donc  $V_L = V_2$ . La charge se trouve ainsi alimentée pendant les deux alternances. La tension  $V_L$  est représentée sur Figure III.15.

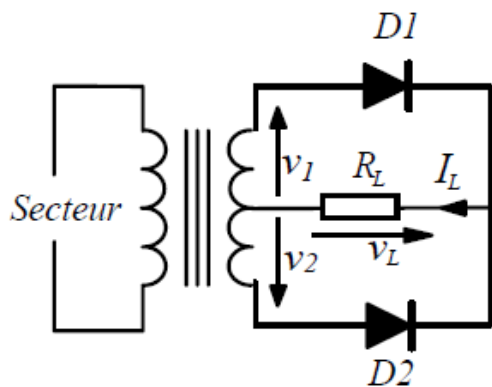


Figure III.12 : redresseur double alternance à point milieu

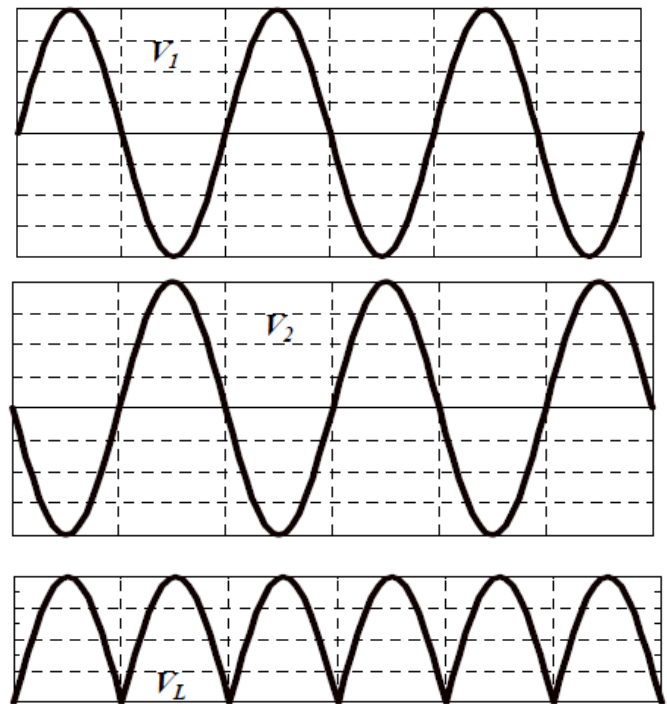


Figure III.15 : signaux d'un redresseur double

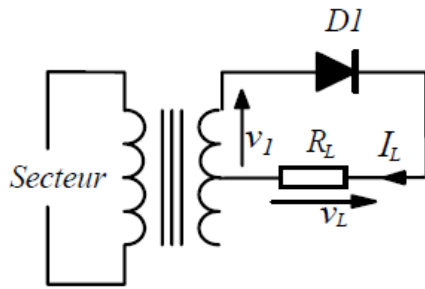


Figure III.13 : première alternance

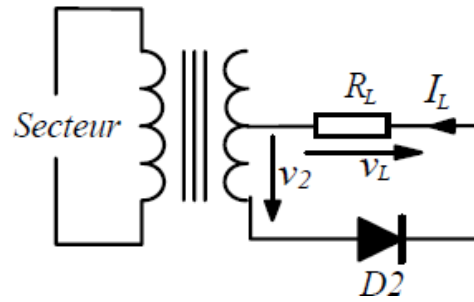


Figure III.14 : deuxième alternance

### ➤ Redresseur double alternance: Le montage en pont de Graëtz

On peut utiliser pont à diode appelé aussi pont de Graëtz pour faire un redressement double alternance. Ce pont formé de quatre diodes disposées comme cela est montré sur la figure III.16.

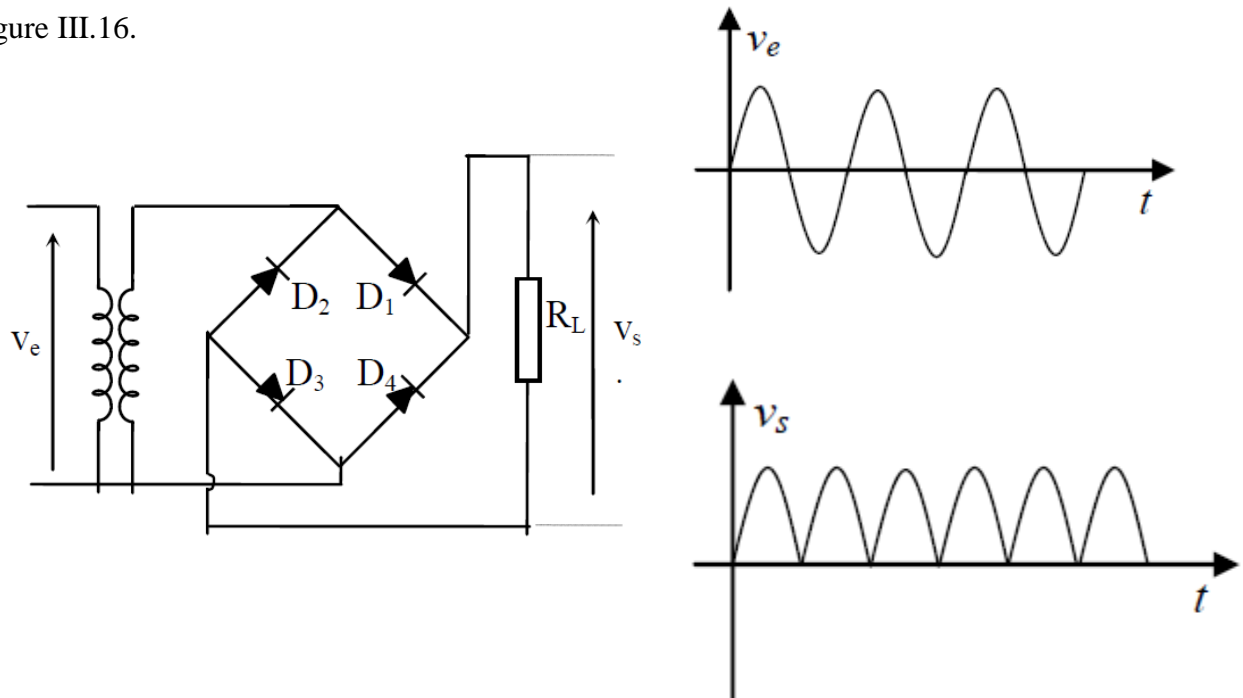


Figure III.16 : redresseur double alternance : pont de Graëtz

### -Fonctionnement

Pendant l'alternance positive, les diodes D2 et D3 conduisent alors que D4 et D1 sont bloquées. Le sens de circulation du courant est indiqué par la flèche dans la figure III.17.



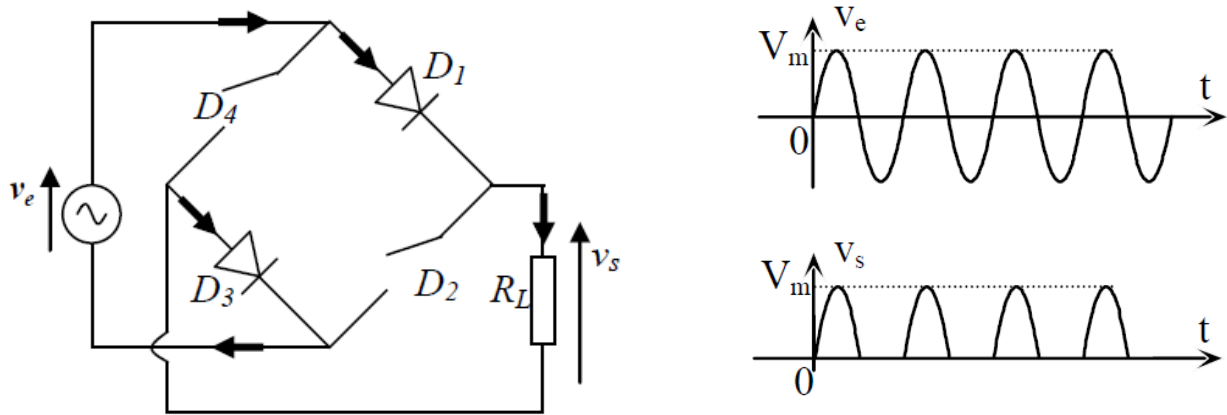


Figure III.17 : alternance positive

Pendant l'alternance négatives ce sont les diodes D4 et D2 qui conduisent, les deux autres sont bloquées (voir figure III.18).

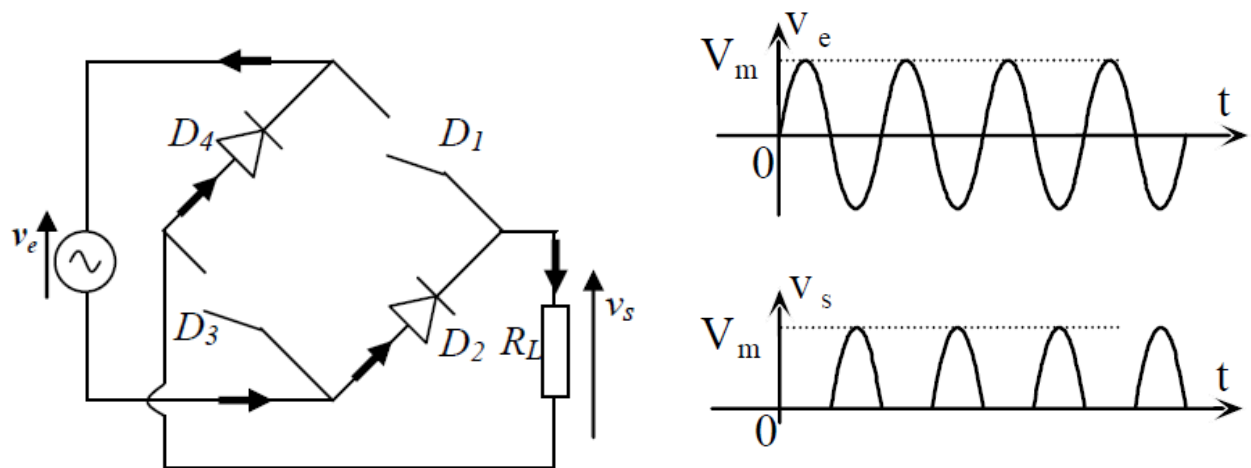


Figure III.18 : alternance positive

Pour les deux alternances, le courant garde un sens constant dans la charge  $R_L$ . La forme du signal aux bornes de  $R_L$  est celle de la figure xx :

La valeur moyenne du courant redressé est:

$$I_{eff} = \frac{2I_{max}}{\pi}$$

La valeur efficace du courant est:

$$I_{eff} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

### III.3.5. Filtrage

Nous allons étudier dans ce paragraphe le filtrage d'un signal redressé mono alternance puis on déduira les caractéristiques du filtrage d'un signal double alternance. Plaçons à la sortie d'un redresseur mono alternance un condensateur  $C$  comme cela est indiqué sur la figure III.19 (a).

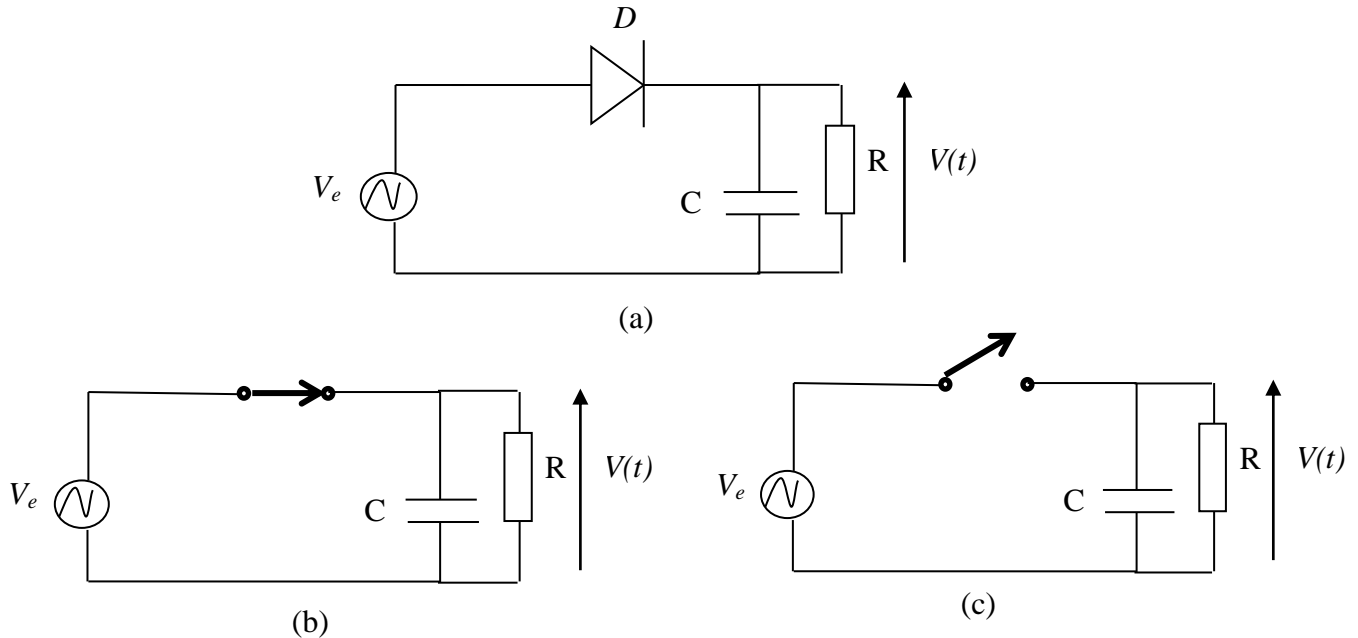


Figure III.19 : filtrage d'un signal redressé mono alternance

Pour l'alternance positive du signal d'entrée la diode  $D$  conduit, elle se comporte comme un court-circuit et transmet le signal à la capacité qui se charge avec une constante de temps  $r_d \cdot C$ , Faible à cause de la valeur de la résistance  $r_d$  de la diode.

A l'instant  $t_1$  ou la tension de sortie devient égale ou supérieure à la tension d'entrée, la diode cesse de conduire et la capacité se décharge dans la résistance  $R$  avec une constante de temps  $R \cdot C$ .

La diode  $D$  se remet à conduire à l'instant  $t_2$  ou  $V_e(t) = V(t)$  et le processus recommence. Le fonctionnement peut être représenté par les courbes données en figure xx. Nous voyons que la tension de sortie s'approche d'une valeur constante avec une ondulation.

**a) Détermination de la tension d'ondulation  $\Delta V$ :**

Nous supposons que  $r_d \ll R$ . dans ce cas la constante de temps de charge étant très faible, la charge suit pratiquement le signal d'entrée.

En régime permanent, le condensateur se charge de  $V_{moy} - \Delta V$  à  $V_{moy} + \Delta V$  pendant le temps  $t_0$  et se décharge pendant le temps  $T - t_0$  avec  $t_0 \ll T$ .

La conservation de la quantité d'électricité pendant le temps  $T - t_0$  implique :

$$C.2\Delta V = I_{moy} \cdot (T - t_0)$$

Avec

$$V_{moy} = R.I_{moy}$$

D'où

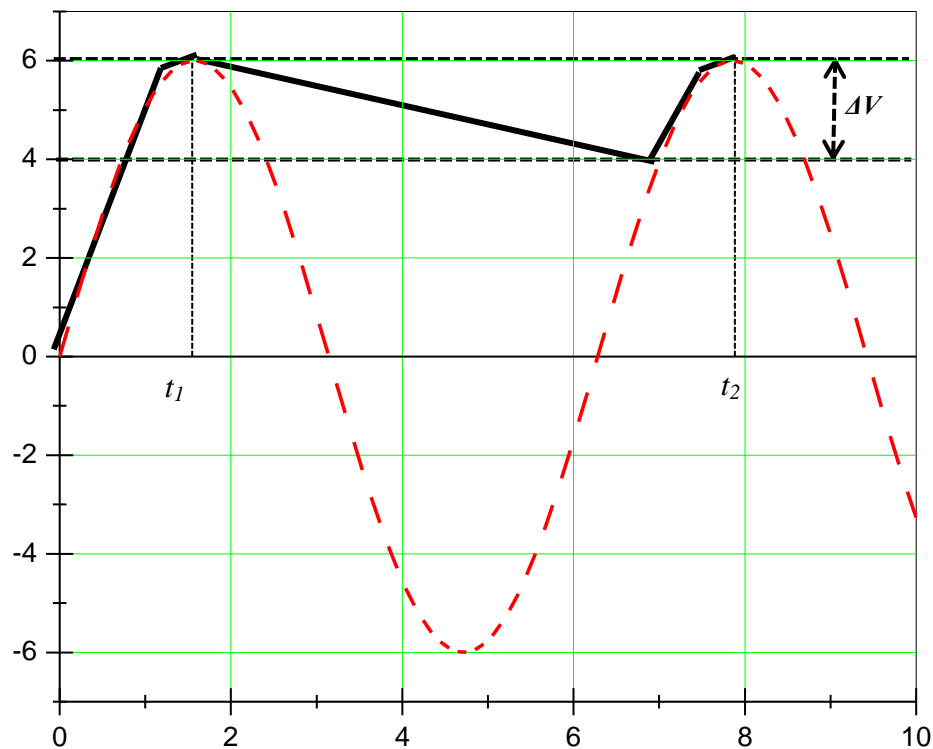
$$\frac{\Delta V}{V_{moy}} = \frac{1}{2.R.C.f} \cdot \left[ 1 - \frac{t_0}{T} \right]$$

Si on admet  $t_0 \ll T$ , on obtient :

$$\frac{\Delta V}{V_{moy}} = \frac{1}{2.R.C.f}$$

Dans le cas du redressement double alternance, il suffit de remplacer la fréquence  $f$  par  $2f$

$$\frac{\Delta V}{V_{moy}} = \frac{1}{4.R.C.f}$$



### III.3.6. Diodes spéciales :

#### a) Diodes Zener

Une diode Zener a un comportement en direct identique à celui d'une diode classique. C'est dans le sens inverse que son comportement présente sa spécificité. Le comportement en inverse est semblable au comportement en direct, mais la tension de seuil notée  $V_Z$  (tension Zener) peut aller de 2,7V à plusieurs dizaines de Volts.

#### ➤ Symbolisations et caractéristique

La caractéristique de la diode Zener est donnée par la figure III.20

- En direct, une diode Zener se comporte comme une mauvaise diode normale.
- En inverse, La caractéristique de la diode Zener présente l'allure d'un générateur de tension à faible résistance interne.

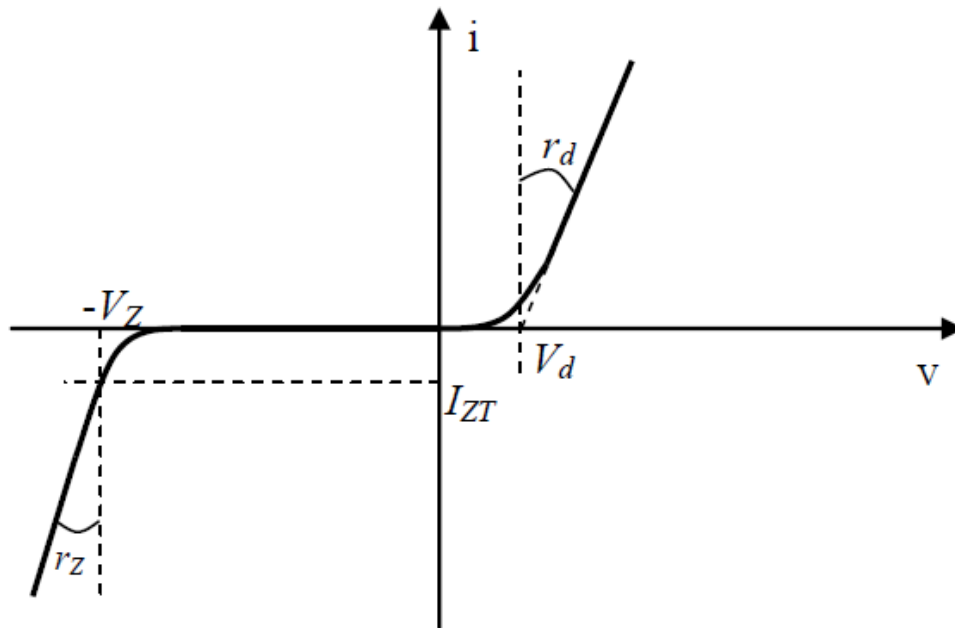
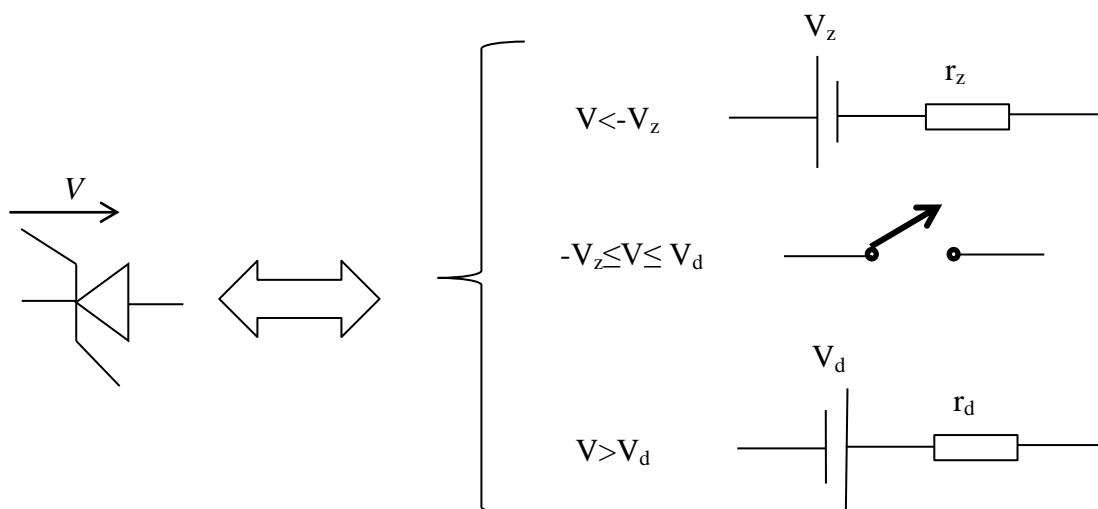


Figure III.20 : caractéristique de la diode Zener

En général, les constructeurs spécifient:

- La tension d'avalanche  $V_Z$  pour un courant déterminé  $I_{ZT}$  (les valeurs de tension sont normalisées).
- A ce point de fonctionnement ( $V_Z, I_{ZT}$ ) on donne la résistance dynamique de la diode  $r_Z$ .

➤ **Schéma équivalent :**



➤ **Stabilisation de tension :**

Les diodes Zener sont utilisées pour leur propriété de maintenir une tension constante a leurs bornes : Les circuits de stabilisation de tension ou "régulateur Zener" ou les circuits

générateurs de tension de référence. Le schéma est toujours semblable et consiste à relier une résistance en série avec la Zener et de se connecter aux bornes de celle-ci pour obtenir une tension fixe. Le montage de la figure III.21 est un stabilisateur de tension. Il permet de maintenir la tension  $U$ , aux bornes de la charge  $R_u$ , c'est le cas des tensions redressées filtrées cette tension possède une ondulation  $\Delta E$ .

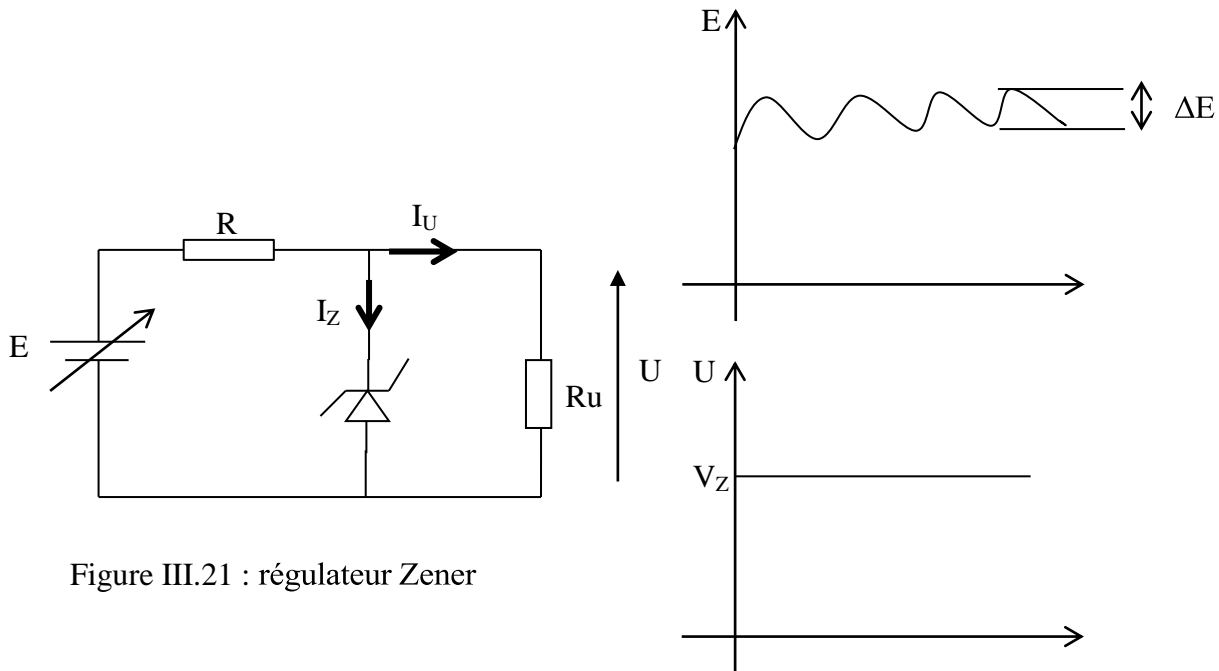


Figure III.21 : régulateur Zener

Tant que le courant  $I_Z$  satisfait la condition :  $I_{Zmin} < I_Z < I_{Zmax}$ , la tension  $U$  sera constante et égale à la tension de la diode Zener  $V_Z$ . La valeur de la résistance série  $R$  joue un rôle important. Elle limite le courant maximum  $I_{Zmax}$  à ne pas dépasser.

### b) Diodes électroluminescentes

Les diodes électroluminescentes : DEL ou LED (Light Emitting Diode) Lorsqu'elle est passante, la diode électroluminescente convertit une intensité de courant en une lumière d'une longueur d'onde (couleur) précise (rouge, vert, jaune, bleu,...). Lorsqu'elle est bloquée la diode est éteinte. Les constructeurs précisent la valeur de la tension directe  $V_F$  ( $V_F$  = tension de seuil de la LED) et du courant  $I_F$  nécessaire à un bon éclairage. Dans ces diodes, le passage d'électrons de la bande de valence à la bande de conduction nécessite l'apport d'une certaine énergie et le changement d'état inverse s'accompagne évidemment de la restitution de la même énergie. Celle-ci apparaît sous la forme d'un rayonnement lumineux.

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 ...

### c) La photodiode :

Une photodiode est un composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique. Le courant total qui parcourt une photodiode est la somme du courant due à la polarisation  $I = I_{sat} \left( \exp\left(\frac{V}{U_T}\right) - 1 \right)$  et le photo-courant due à la lumière  $I = I_{ph} + I_{sat} \left( \exp\left(\frac{V}{U_T}\right) - 1 \right)$

Sous polarisation inverse  $I_{sat} \cdot \left( \exp\left(\frac{V}{U_T}\right) - 1 \right) \approx 0$  la photodiode polarisation en inverse pour réduire l'effet du courant due à la polarisation. En association avec une LED infrarouge, les utilisations les plus courantes sont dans la robotique avec le cas du suiveur de ligne (ligne noire sur fond blanc) ou de la détection d'obstacle sur de courtes distances. En mode photoconducteur une source de tension E polarise la photodiode en inverse. Le courant  $I_R$  proportionnel au flux est converti en tension par la résistance R. En mode photovoltaïque, aucune source externe de polarisation n'est utilisée. La photodiode fonctionne en convertisseur d'énergie. Elle est alors équivalente à un générateur autonome.