

## **Chapitre II : Circuits A Diodes**

### **II.1 Introduction**

A la différence des dipôles passifs étudiés précédemment, la diode est un dipôle dont la caractéristique n'est pas linéaire. Autrement dit, la relation qui lie le courant qui la traverse à la tension présente à ses bornes n'est pas régie par une équation différentielle linéaire. Ce qui lui donne une particularité intéressante dans la transformation des signaux électriques. Par ailleurs, la diode est la brique de base de toute l'électronique moderne, autrement dit la branche de l'électricité fondée sur les composants à semi-conducteurs.

### **II.2 Les semi-conducteurs**

Un semi-conducteur est un élément qui présente une conductivité électrique intermédiaire entre celle des conducteurs (métaux) et celle des isolants. On trouve parmi les semi-conducteurs le Silicium et le Germanium.

Ces différents éléments peuvent être classés en fonction de leurs résistivité  $\rho$  [ $\Omega \cdot m$ ], tel que:

- Isolant :  $\rho > 10^6 \Omega \cdot m$
- Conducteurs:  $\rho < 10^{-6} \Omega \cdot m$
- Semi-conducteur: Intermédiaire.

Le comportement des semi-conducteurs, comme celui des métaux et des isolants est décrit par la théorie des bandes.

#### **II.2.1 Bandes d'énergie**

Les électrons évoluent sur des orbites stables correspondant à des niveaux d'énergie discrets (séparés les uns des autres).

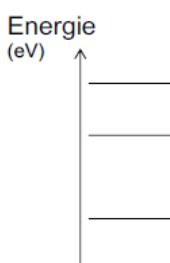


Figure II.1 Niveaux d'énergie électronique d'un atome isolé

Deux électrons ne peuvent occuper le même état quantique. En conséquence, si deux atomes identiques sont approchés à une distance de l'ordre de leur rayon atomique, les niveaux d'énergie se dédoublent.

Bandes de valence:

Contient les états électroniques des couches périphériques des atomes du cristal (les  $e^-$  de valence, ex: 4 pour le silicium)

Bandes de conduction:

C'est la bande permise immédiatement supérieure en énergie à la bande de valence. Les  $e^-$  y sont quasi-libres, puisque ils ont rompu leur lien avec leur atome d'origine, ce qui permet la conduction d'un courant.

$E_g$ : représente l'énergie minimale nécessaire pour rompre la liaison.

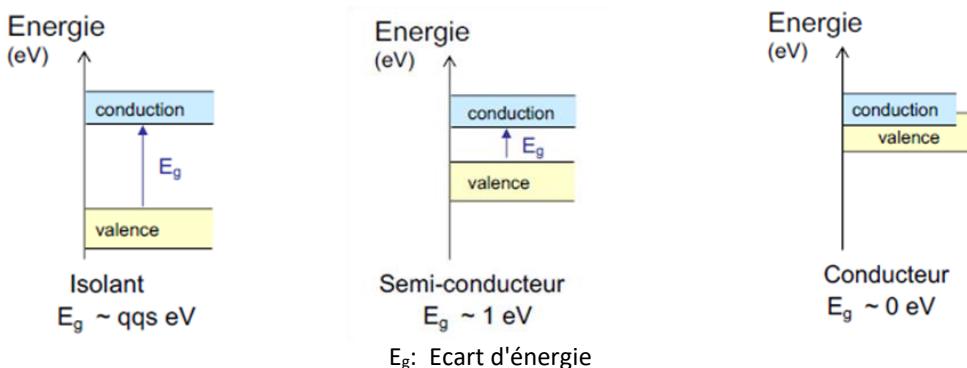


Figure II.2 Niveaux d'énergie électronique d'un atome isolé

### II.2.2 Semi-conducteurs intrinsèques (purs)

Prenant l'exemple les atomes de silicium qui possèdent 4 électrons sur leur dernière couche, et qui se regroupent entre eux en échangeant leurs électrons de valence (liaison de covalence). Chaque électron est mis en commun par deux atomes voisins de manière à ce que le noyau se trouve entouré par une couche de 8 électrons. Ce qui donne une structure est très stable.

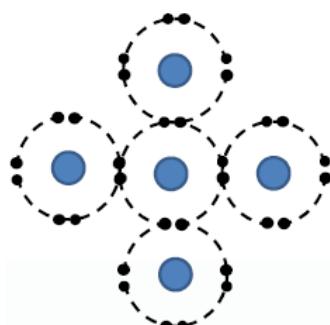


Figure II.3 Semi-conducteur intrinsèque

À la température 0K, tous les électrons de valence sont utilisés dans des liaisons de covalence, d'où aucun électron n'est libre (pas de conduction: le cristal est un isolant). Quand la température augmente, l'agitation thermique donne à certains électrons un supplément d'énergie suffisant pour briser la liaison de covalence. Ces électrons libres peuvent alors se déplacer sous l'action d'un champ électrique extérieur, et donc le cristal devient conducteur.

### II.2.3 Semi-conducteurs extrinsèques (dopage)

Le dopage d'un cristal intrinsèque consiste à substituer des atomes de semi-conducteurs du réseau par des atomes étrangers. Ainsi deux cas peuvent se présenter:

#### Semi-conducteurs de type P:

L'introduction d'atomes trivalents (3 électrons dans la bande de valence), fait qu'il manque un électron à l'atome pour qu'il puisse s'entourer d'un octet complet donc chaque impureté crée un trou (absence d'électron) qui ne demande qu'à être comblé par un électron libre.

#### Semi-conducteurs de type N:

L'introduction d'atomes possédant 5 électrons sur la dernière couche (dans la bande de valence), permet à l'atome d'impureté d'avoir un électron de plus pour constituer un octet. Cet électron excédentaire est libre dans le cristal.

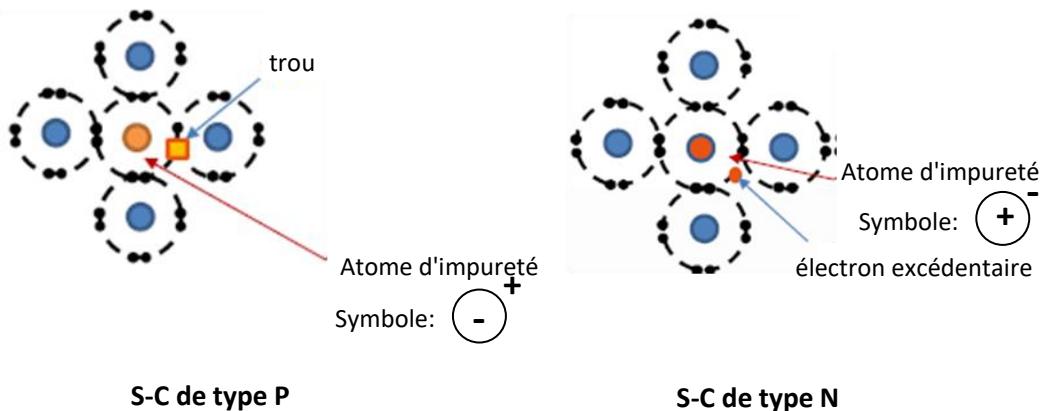


Figure II.4 Semi-conducteurs extrinsèques P et N

### II.3 La Jonction P-N

Un semi-conducteur seul (N ou P), présente peu d'intérêt, c'est l'association de plusieurs SC dopés qui permet de créer les composants semi-conducteurs. Le plus simple d'entre eux est la jonction PN (ou diode).

La mise en contact d'un semi-conducteur de type P et d'un semi-conducteur de type N, génère les phénomènes suivants:

- Diffusion: les électrons de la zone N viennent combler les trous dans la zone P;
- Création d'une zone dépourvue de porteur mobile (zone de charge d'espace: ZCE), d'où l'existence d'une différence de potentiel et donc d'un champ interne  $\overrightarrow{E_{int}}$  qui s'oppose à la diffusion des électrons de la zone N vers la zone P.
- Ce champ électrique est équivalent à une différence de potentiel appelée barrière de potentiel ( $V_0 = 0.7 V$  pour le silicium;  $0.3 V$  pour le Germanium)

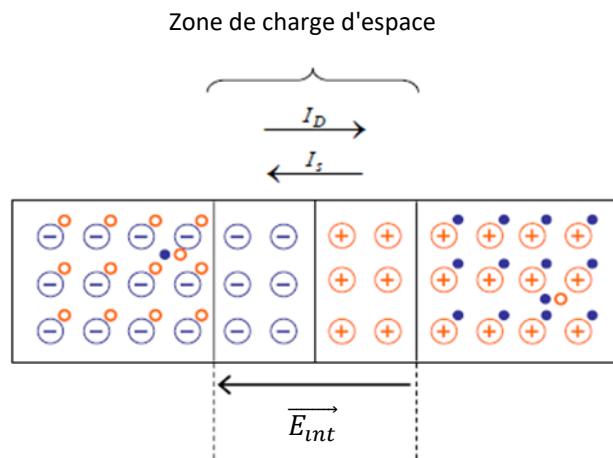


Figure II.5 Jonction PN non polarisée

Un état d'équilibre est atteint, pour lequel:

Seuls quelques porteurs majoritaires ont une énergie suffisante pour franchir la ZCE et contribuer au courant de diffusion  $I_D$ , il est compensé par,

Un courant de saturation inverse  $I_s$ , créé par les porteurs minoritaires lorsqu'ils sont capturés par le champ électrique de la ZCE.

Une polarisation de la jonction PN peut être effectuée à travers une f.e.m extérieure, soit d'une façon directe ou inverse.

a. Jonction PN polarisée dans le sens direct:

Dans ce cas, la borne négative du générateur est reliée à la zone N et la borne positive à la zone P, comme représenté sur la figure II.6. Ceci entraîne une réduction de la ZCE et le champ électrique extérieur  $\overrightarrow{E_{ext}}$  s'oppose au champ interne  $\overrightarrow{E_{int}}$ .

Si la valeur absolue du champ extérieur est supérieure à celle du champ interne alors un courant important peut traverser la jonction.

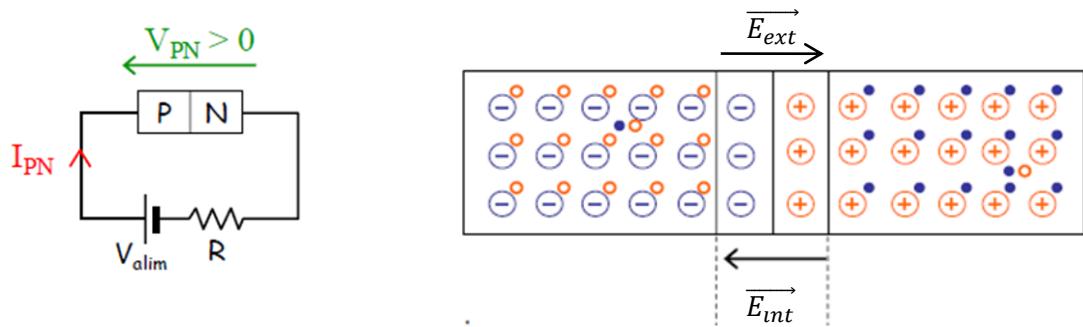


Figure II.6 Jonction PN polarisée en direct

b. Jonction PN polarisée dans le sens inverse:

Dans ce cas, la borne négative du générateur est reliée à la zone P et la borne positive à la zone N, comme représenté sur la figure II.7. Ceci entraîne une augmentation de la ZCE et le champ électrique extérieur  $\overrightarrow{E_{ext}}$  appliqué par le générateur a le même sens que le champ interne de la jonction  $\overrightarrow{E_{int}}$ .

Si la valeur absolue du champ externe est supérieure à celle du champ interne alors un courant important peut traverser la jonction, dont il renforce l'action. Ainsi, aucun courant ne circule (très faible de l'ordre du nano-ampère).

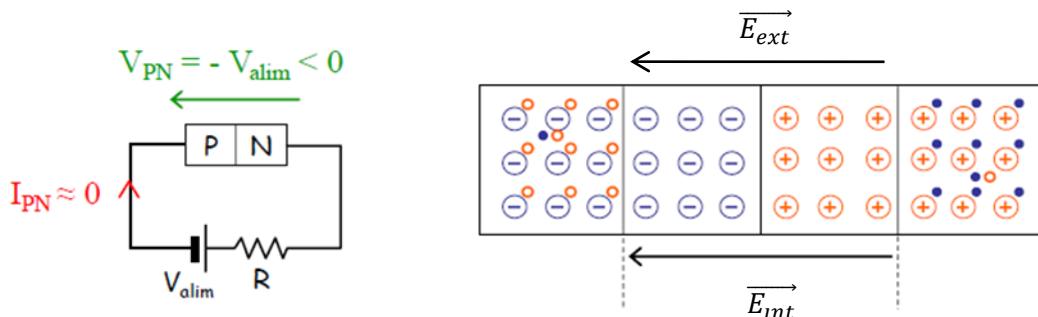


Figure II.7 Jonction PN polarisée en inverse

## II.4 La diode à jonction P-N

La diode à jonction est constituée par la juxtaposition de deux régions d'un même semi-conducteur, l'une dopée de type P (défaut d'électrons) et l'autre de type N (excès d'électrons). La diode est un dipôle non linéaire, qui laisse passer le courant dans un sens (dit "passant") et pas dans l'autre sens (dit "bloqué"). Le courant circule en polarisation directe de l'anode (A) vers la cathode (k). La diode et sa représentation symbolique sont données sur la figure II.8.



Figure II.8 Diode à Jonction PN et son symbole

#### II.4.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la diode à jonction peut être expliqué en se basant sur la caractéristique courant-tension (I-V) de la diode représentée sur la figure II.9.

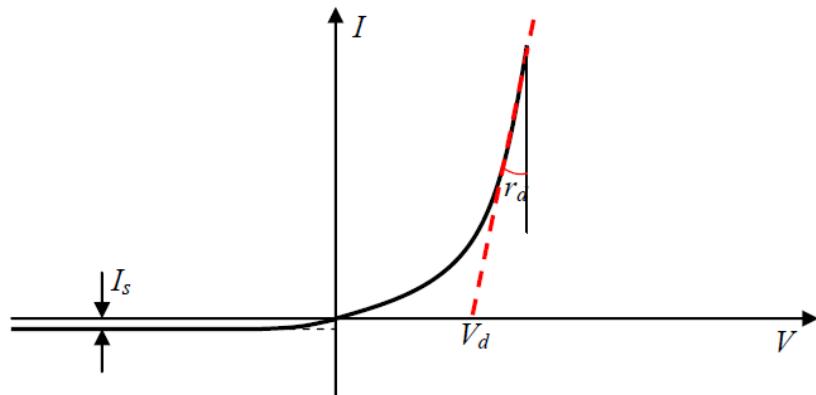


Figure II.9 Caractéristique I-V de la diode à Jonction

$V_d$ : est la tension de seuil de la diode.

$r_d$ : est la résistance dynamique de la diode. Elle est donnée par:  $r_d = \frac{dV}{dI}$

##### Fonctionnement en sens directe:

Si la tension appliquée entre l'anode et la cathode de la diode est positive, la diode est polarisée en direct. Une analyse expérimentale montre que l'équation de la caractéristique peut se mettre sous la forme approchée suivante:

$$I = I_s \cdot \left( e^{\frac{V}{nV_T}} - 1 \right)$$

Avec:

$I_s$ : Courant de saturation de la diode

$n$ : Coefficient d'idéalité de la diode  $1 \leq n \leq 2$

$V_T$ : Tension thermique,  $V_T = \frac{kT}{q}$

$k$ : Constante de Boltzman,  $k = 1.38 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$

$T$ : Température

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

Fonctionnement en sens inverse:

Lorsque la diode fonctionne en inverse, la tension  $U$  est négative dans l'expression caractéristique  $I(U)$ . Dès que  $|U|$  devient inférieure à quelques dixièmes de volt, le terme exponentiel est négligeable. Il en résulte que  $I \approx -I_s$  avec  $I_s \sim 10nA$ .

En polarisation inverse ( $V < 0$ ), le courant qui parcourt la diode de la cathode vers l'anode est négligeable ( $I_s \approx 0$ ).

Lorsque ( $V > V_d \gg V_T$ ), la résistance dynamique peut être approximée par :  $r_d = \frac{\Delta V}{\Delta I}$ ;

Les équations décrivant les circuits à diode sont non linéaires d'où la difficulté de leur analyse.

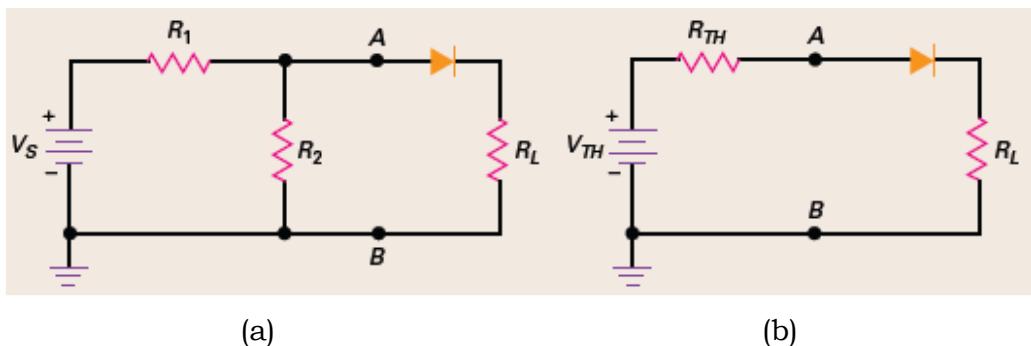
## II.4.2 Concepts fondamentaux

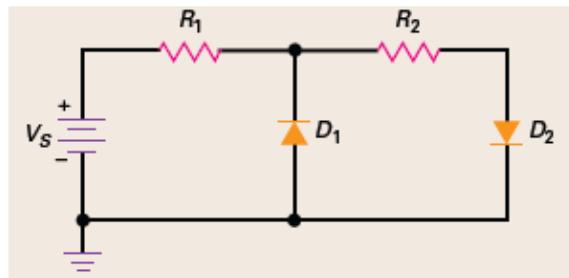
### a. Circuit élémentaire de la diode:

La figure II.6 illustre le circuit de polarisation directe de la diode, puisque le pôle positif de la source est relié au côté  $P$  de la diode et le pôle négatif au côté  $n$  de celle-ci. Avec cette connexion, le circuit essaie de pousser les trous et les électrons libres vers la jonction.

Afin de déterminer si une diode est polarisé en directe ou en inverse dans un circuit complexe, il suffit de déterminer le sens naturel du courant. Le théorème de Thévenin permet de résoudre le problème et ainsi déterminer le sens de polarisation d'une diode.

### Exemple





(c)

Figure II.10

Dans le circuit (a), la tension aux bornes de  $R_2$  est positive; de ce fait, le circuit pousse le courant dans la direction naturelle. On peut aussi prendre le circuit équivalent de Thévenin, représenté sur la figure (b) tel que:

$$V_{Th} = \frac{R_2}{R_1+R_2} (V_s) \text{ et } R_{th} = \frac{R_1}{R_2}$$

Dans le circuit série, la source continue impose un courant dans le sens naturel de la diode, elle est polarisée en direct.

Pour la figure (c), la diode  $D_1$  est polarisée en inverse car le circuit impose un courant dans la mauvaise direction. Par contre, la diode  $D_2$  est polarisée en direct car le circuit impose le courant dans le bon sens.

*b. Tension de seuil:*

Pour une polarisation en directe, la tension pour laquelle le courant commence à augmenter rapidement s'appelle la tension de seuil de la diode. Elle est égale à la barrière de potentiel. Pour une diode en Silicium la tension de seuil est  $V_d = 0,7 V$ , pour celle en Germanium elle est égale à  $V_d = 0,3 V$ . Cette faible tension de seuil est un avantage à prendre en compte pour certaines applications.

*c. La résistance série:*

Les régions  $p$  et  $n$  sont deux morceaux de semi-conducteurs séparés ayant chacun une résistance classique mesurable. La somme de ces résistances s'appelle la résistance série de la diode. Elle définie par:

$$R_{série} = R_p + R_n$$

La résistance série dépend de la taille et du dopage des régions  $p$  et  $n$ . Elle est souvent inférieure à  $1 \Omega$

*d. Le courant continu direct maximal*

Si le courant dans la diode est trop important, la chaleur excessive peut la détruire. Pour cette raison, les fiches techniques indiquent le courant maximal que la diode peut supporter sans réduire sa durée de fonctionnement ou dégrader ses caractéristiques.

*e. La dissipation de puissance*

Le calcul de la puissance dissipée est le même que pour la résistance. Elle est égale au produit du courant dans la diode par la tension à ses bornes:

$$P_D = V_D \cdot I_D$$

Exemple

Une diode appartient à la gamme des 5 W. Si la tension à ses bornes est égale à 1,2 V pour un courant direct de 1,75 A, quelle est la puissance dissipée? La diode sera t-elle détruite?

$$P_D = 1,2 \text{ V} \times 1,75 \text{ A} = 2,1 \text{ W}$$

C'est inférieur à la puissance maximale, la diode n'est pas détruite.

**II.4.3 Modélisation de la diode à jonction PN:**

D'après la caractéristique courant-tension nous constatons que la diode est un dipôle non linéaire. Nous savons que les théorèmes généraux sont valables uniquement pour les réseaux électriques linéaires, d'où la nécessité de linéariser la diode. Un modèle consiste en une représentation simplifiée du fonctionnement de la diode en vue de faciliter l'analyse des circuits.

Il existe différentes représentations d'une diode, suivant la zone de la caractéristique considérée et du niveau d'approximation souhaité. On présentera trois types d'approximation:

*a. Première approximation: Le modèle idéale:*

On retrouve la caractéristique de la diode en négligeant le courant inverse, ainsi que la tension de seuil et en assimilant l'exponentielle à une droite parallèle à l'axe des intensités.

La diode idéale se comporte comme un conducteur parfait (résistance nulle) en direct et un isolant parfait (résistance infinie) en inverse. La figure II.11, représente la caractéristique d'une diode idéale.

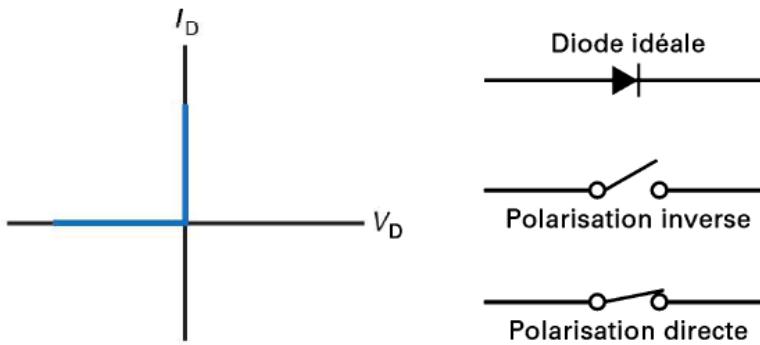


Figure II.11

Exemple:

Utiliser l'hypothèse de la diode idéale pour calculer la tension et le courant dans la charge sur la figure II.12

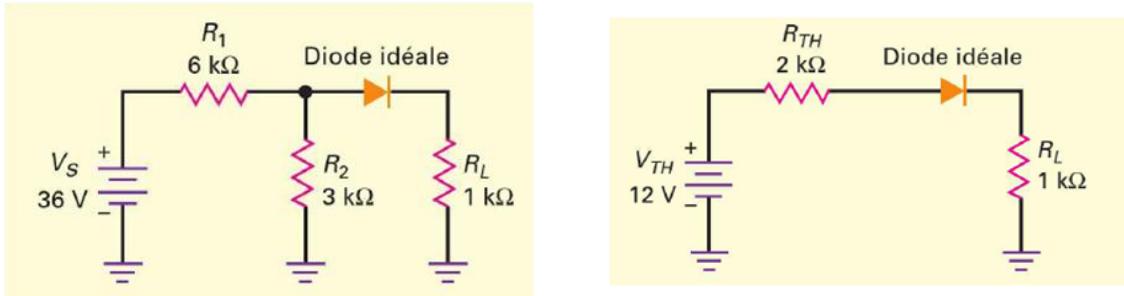


Figure II.12

En appliquant le théorème de Thévenin sur la partie à gauche de la diode, la résistance de Thévenin est égale à  $2\text{ k}\Omega$  et la tension de Thévenin égale à  $12\text{ V}$  (figure II.12).

Ainsi, le circuit série montre que la diode est polarisée en direct; Elle se comporte comme un interrupteur fermé. On a donc:

$$I_D = \frac{12\text{ V}}{3\text{ k}\Omega} = 4\text{ mA}$$

$$V_D = 4\text{ mA} \times 1\text{ k}\Omega = 4\text{ V}$$

Sans l'utilisation du théorème de Thévenin, on peut assimiler la diode à un court-circuit, ce qui donne  $3\text{ k}\Omega$  en parallèle avec  $1\text{ k}\Omega$ , soit  $750\Omega$ . Le résultat de la loi d'Ohm est une chute de tension de  $32\text{ V}$  sur les  $6\text{ k}\Omega$  et le reste de l'analyse fournit les mêmes valeurs.

*b. Deuxième approximation: Le modèle à seuil*

La figure II.13 illustre la caractéristique  $I(V)$  en deuxième approximation. Il n'existe pas de courant pour des tensions appliquées sur la diode inférieures à  $0,7\text{ V}$ . A cette valeur, la diode conduit et la tension reste constante quel que soit le courant qui la traverse.

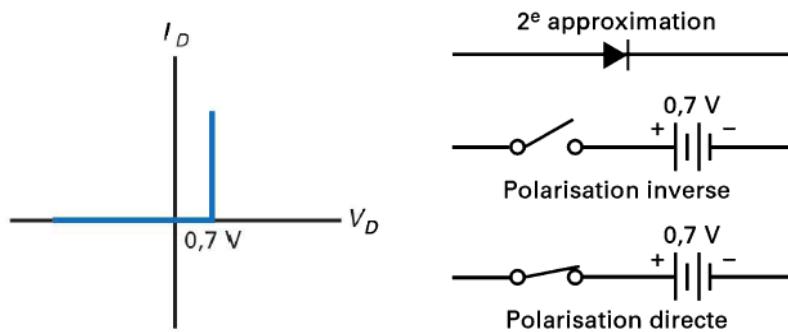


Figure II.13

On assimile ce circuit à un interrupteur en série avec une barrière de potentiel égale à 0,7 V. Si la tension de Thévenin devant la diode est supérieure à 0,7 V, l'interrupteur est fermé et la tension sur la diode est 0,7 V quel que soit le courant.

Pour les tensions de Thévenin inférieures à 0,7 V, l'interrupteur est ouvert et il n'y a pas de courant dans la diode.

Exemple:

Calculer la tension, le courant et la puissance sur la charge et la puissance sur la diode de la figure II.14 en utilisant la deuxième approximation.

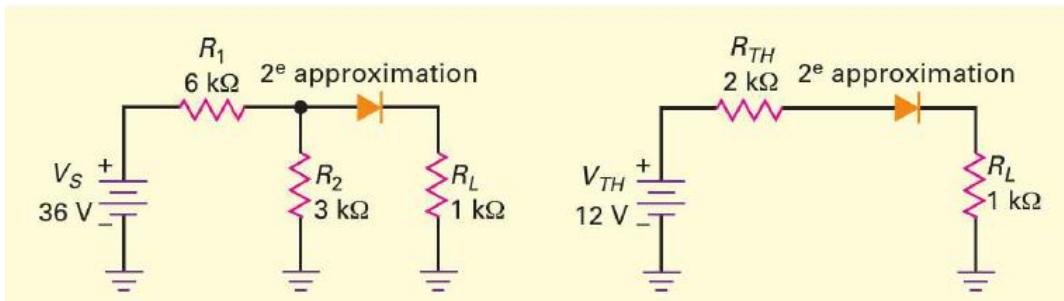


Figure II.14

En utilisant le théorème de Thévenin pour le circuit à gauche de la diode. La tension de Thévenin est égale à 12 V et la résistance de Thévenin est égale à 2 kΩ

La tension sur la diode est 0,7 V donc le courant dans la charge vaut:

$$I_D = \frac{12 V - 0,7 V}{3 k\Omega} = 3,77 mA$$

La tension sur la charge est :

$$V_L = 3,77 mA \times 1 k\Omega = 3,77 V$$

La puissance dans la diode est:

$$P_D = 0,7 V \times 3,77 mA = 2,64 mW$$

c. Troisième approximation: Le modèle linéarisé

Dans la troisième approximation,  $R_{\text{série}}$  est incluse. La figure II.15 illustre l'effet qu'elle a sur la caractéristique de la diode. Si l'on tient compte de la tension de seuil, et que l'on assimile l'exponentielle à une droite faiblement inclinée par rapport à l'axe des intensités, la diode est un coupe-circuit tant que  $V < V_D$ . Pour  $V > V_D$ , elle se comporte comme un générateur en opposition, de f.e.m  $V_D$ , en série avec sa résistance interne.

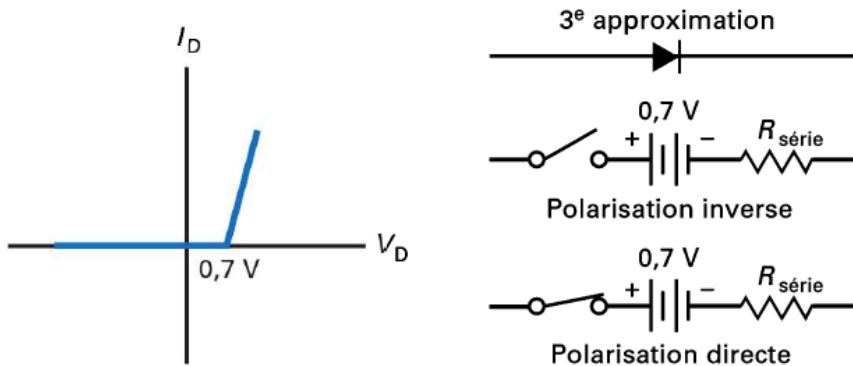


Figure II.15

Le schéma équivalent dans la troisième approximation comprend un interrupteur en série avec une barrière de potentiel de 0,7 V, la diode est passante et la tension à ses bornes est:

$$V_D = 0,7 \text{ V} + I_D \cdot R_{\text{série}}$$

Souvent, la résistance série est inférieur à  $1 \Omega$ , et elle est ignorée dans les calculs.

**II.4.4 La droite de charge:**

La droite de charge est considérée comme un outil pour déterminer la valeur exacte du courant et de la tension sur la diode.

a. Equation de la droite de charge:

Si on prend le circuit de la figure (II.16), le courant à travers la résistance et la diode est:

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

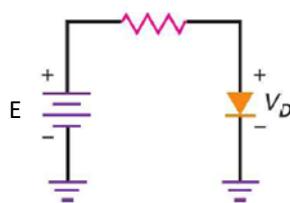


Figure II.16

Cette équation représente une relation linéaire entre le courant et la tension. Pour tracer la droite représentative, il faut deux points; Pour  $V_D = 0$  on obtient  $I_D = \frac{E}{R}$ . Le point  $(0, \frac{E}{R})$  est sur l'axe vertical appelé saturation, car c'est le courant maximal.

Pour obtenir le deuxième point, on pose  $I_D = 0$  et on obtient  $V_D = V$ ; Ce point sur l'axe horizontal est appelé blocage, car il indique le courant minimal.

Avec d'autres tensions, on obtient des points supplémentaires. La relation précédente est linéaire, ils sont tous sur une même droite appelée droite de charge (figure II.17).

*b. Point de fonctionnement:*

La figure II.17 montre la caractéristique de la diode et la droite de charge. Leur intersection est le point de fonctionnement statique ( $Q$ ). Il est le point d'intersection entre la courbe de la diode et la droite de charge, qui représente le point de repos.

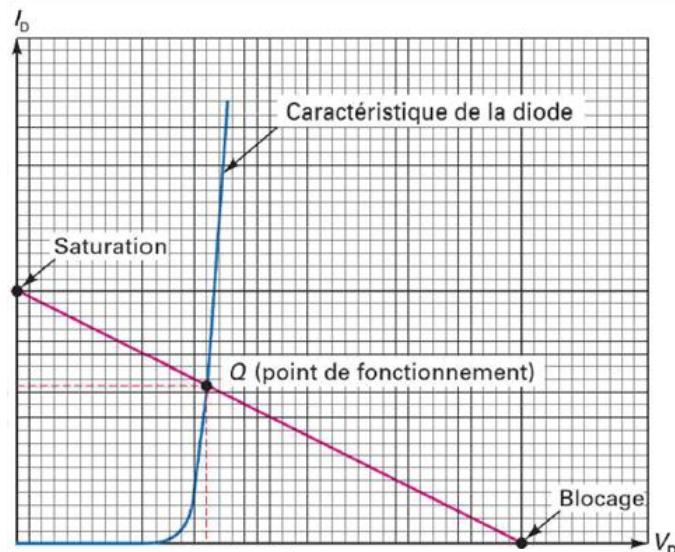


Figure II.17

#### II.4.5 La diode Zener :

Il existe d'autres types de diode, parmi lesquels on trouve la diode Zener.

*a. Effet Zener:*

En polarisation inverse, dans certaines conditions, des électrons dans la bande de valence du côté  $P$  peuvent passer directement dans la bande de conduction du côté  $N$ , par un processus quantique appelé "effet tunnel". Cet effet, donnant naissance à une augmentation du courant inverse, est appelé effet Zener.

*b. Avalanche:*

L'effet d'avalanche est le mode de claquage le plus courant dans les diodes et dans les transistors.

Lorsqu'une forte tension inverse est appliquée aux bornes de la jonction, le champs électrique interne peut être tel que l'énergie cinétique acquise par les porteurs minoritaires soit suffisante pour créer des paires électrons-trous dans la zone de transition. Ces nouveaux porteurs, après accélération par le champ interne peuvent à leur tour créer de nouvelles paires électrons-trous, d'où le nom d'avalanche donné au phénomène. Le courant peut alors augmenter rapidement, et provoquer la destruction de la jonction par effet joule.

c. Diode Zener:

Ces deux effets sont utilisés pour réaliser des diodes de référence dites diodes Zener. En fait, lorsque le claquage se produit pour  $|V| < 5V$ , c'est l'effet Zener qui est en cause, alors que pour  $|V| > 8V$ , c'est l'effet d'avalanche. La caractéristique  $I_D = f(V_D)$  d'une diode Zener est donnée à la figure II.18.

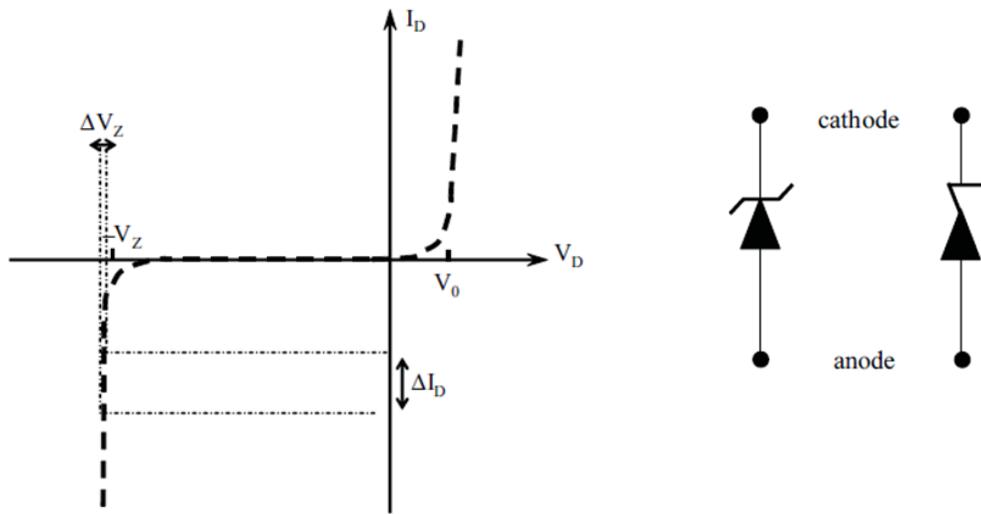


Figure II.18

Une diode Zener est un dipôle non linéaire ayant la courbe caractéristique précédente:

- En polarisation directe, la diode Zener se comporte comme une diode à jonction;
- En polarisation inverse la diode Zener est de nouveau conductrice pour une tension  $|V| \geq V_Z$ ; De plus quelque soit le courant  $I$ , la tension aux bornes de la diode est presque constante, d'où l'intérêt de la diode Zener pour stabiliser une tension.

En conduction inverse, la diode Zener peut être modélisée par le circuit de la figure II.19.

$R_z$ : est une résistance très faible.

Pour une tension inférieure à  $V_Z$  (en valeur absolue), la diode se comporte comme un interrupteur ouvert.

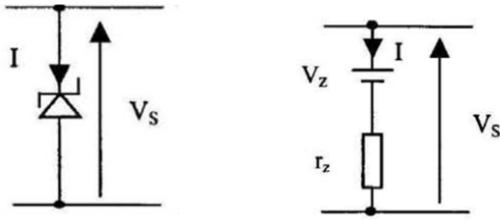


Figure II.19

## II.5 Les circuits à diodes

Les circuits à diodes (à jonction ou Zener) sont utilisés pour assurer les fonctions suivantes:

- Redressement;
- Ecrêtage;
- Stabilisation (diode Zener).

### II.5.1. Redressement simple et double alternance:

La plupart des circuits électroniques ont besoin d'une tension continue pour fonctionner. Puisque la tension du réseau électrique est alternative (AC), on la transforme en tension continue (DC) par un montage appelé alimentation. Le premier étage de cette alimentation est le redresseur.

#### a. Redresseur simple alternance:

Il admet l'alternance positive et annule l'alternance négative. Une simple diode en série avec la charge suffit pour réaliser cette fonction.

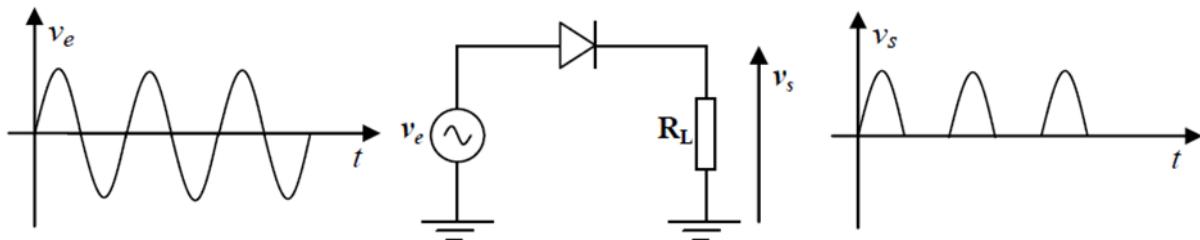
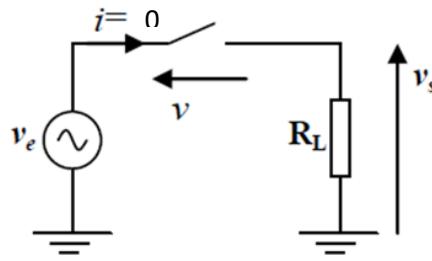


Figure II.20

Pour simplifier l'analyse du circuit, on commence par débrancher la diode et calculer sa tension  $V = V_{AK}$



$$v_e - V - R_L i = 0 \text{ et } i = 0 \Rightarrow V = v_e$$

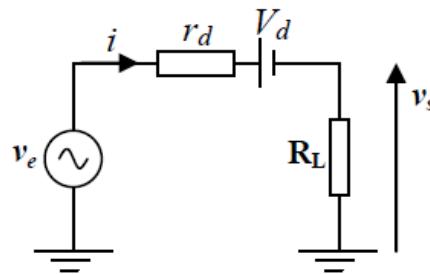
On compare la tension  $V$  à la tension de seuil  $V_d$ :

- $V = v_e \leq V_d$ :

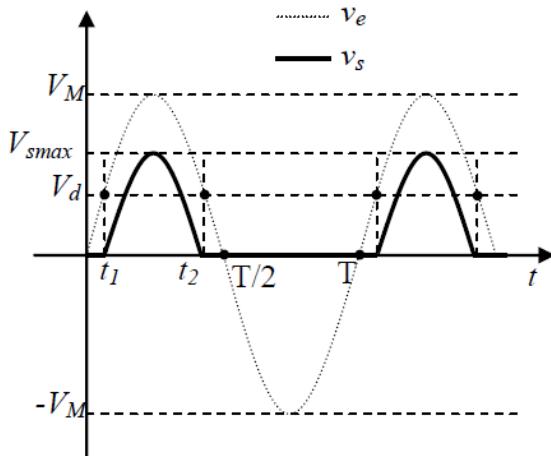
La diode est bloquée  $\Rightarrow v_s = R_L i \Rightarrow v_s = 0$

- $V = v_e > V_d$ :

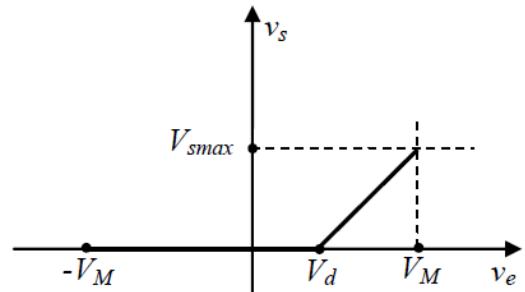
La diode conduit et est remplacée par son modèle linéaire ( $r_d, V_d$ )



$$v_s = \frac{R_L}{R_L + r_d} (v_e - V_d), \text{ diviseur de tension}$$



Tracé de  $v_s(t)$  et  $v_e(t)$



Caractéristique de transfert  $v_s = f(v_e)$

Figure II.21

$$v_{smax} = \frac{R_L}{R_L + r_d} \cdot (V_M - V_d)$$

b. Redresseur double alternance: Le montage en pont de Graëtz

Lors de l'alternance positive de la tension d'entrée  $v_e$ , seules les diodes  $D_1$  et  $D_3$ , ayant une tension d'anode supérieure à  $V_d$ , conduiront. Les diodes  $D_2$  et  $D_4$  sont bloquées.

Pour l'alternance négative, ce sont les diodes  $D_2$  et  $D_4$  qui conduisent.

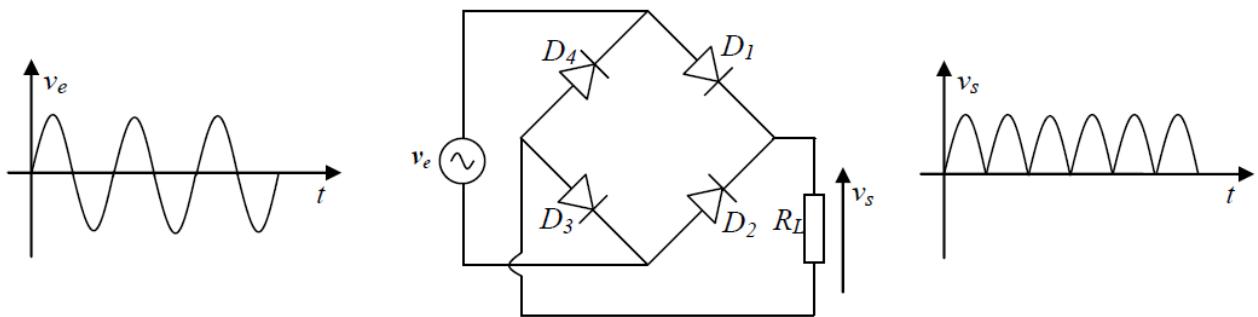


Figure II.22

Lors de l'alternance positive ( $v_e \geq 0$ ) de la tension d'entrée, les diodes  $D_2$  et  $D_4$  se bloquent et le circuit se simplifie comme représenté à la figure ci-dessous.

L'analyse est la même que pour le redressement simple alternance, ce qui donne:

- $0 \leq v_e \leq 2V_d$ : les diodes  $D_1$  et  $D_3$  ( $D_{13}$ ) sont bloquées  $\Rightarrow v_s = 0$
- $v_e > 2V_d$ : les diodes  $D_1$  et  $D_3$  ( $D_{13}$ ) conduisent  $\Rightarrow v_s = \frac{R_L}{R_L+r_d} (v_e - 2V_d)$

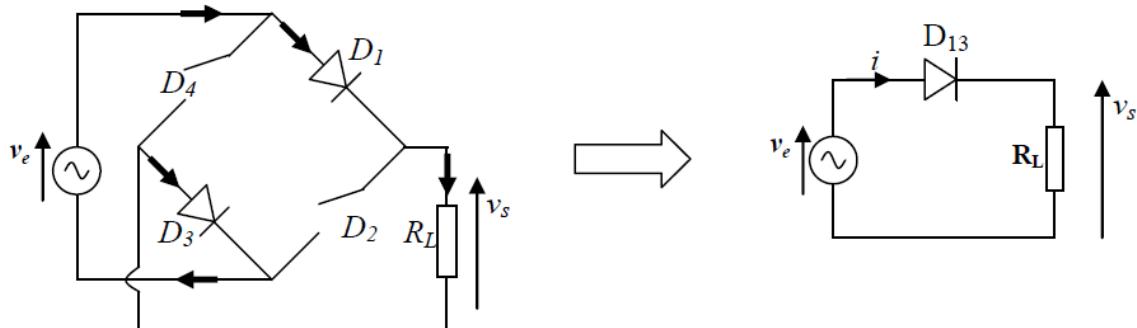


Figure II.23

Lors de l'alternance négative ( $v_e \leq 0$ ) de la tension d'entrée, les diodes  $D_1$  et  $D_3$  se bloquent et le circuit se simplifie comme représenté sur la figure ci-dessous.

L'analyse est la même que celle du redressement simple alternance, ce qui donne:

- $-2V_d \leq v_e \leq 0$ : les diodes  $D_2$  et  $D_4$  ( $D_{24}$ ) sont bloquées  $\Rightarrow v_s = 0$
- $v_e < -2V_d$ : les diodes  $D_2$  et  $D_4$  ( $D_{24}$ ) conduisent  $\Rightarrow v_s = -\frac{R_L}{R_L+r_d} (v_e + 2V_d)$

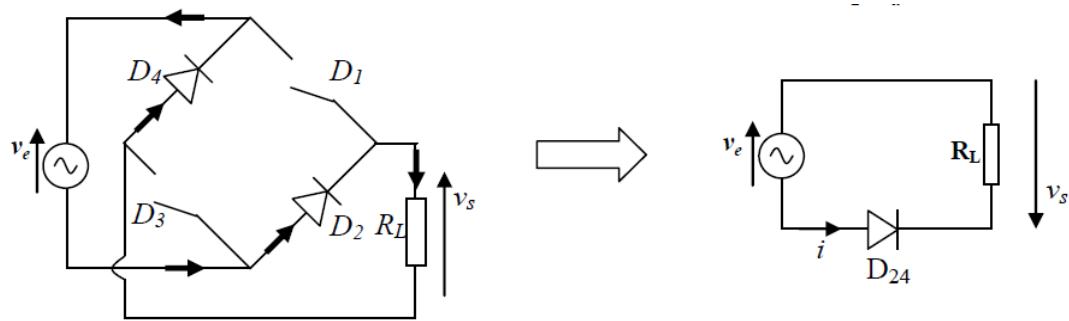


Figure II.24

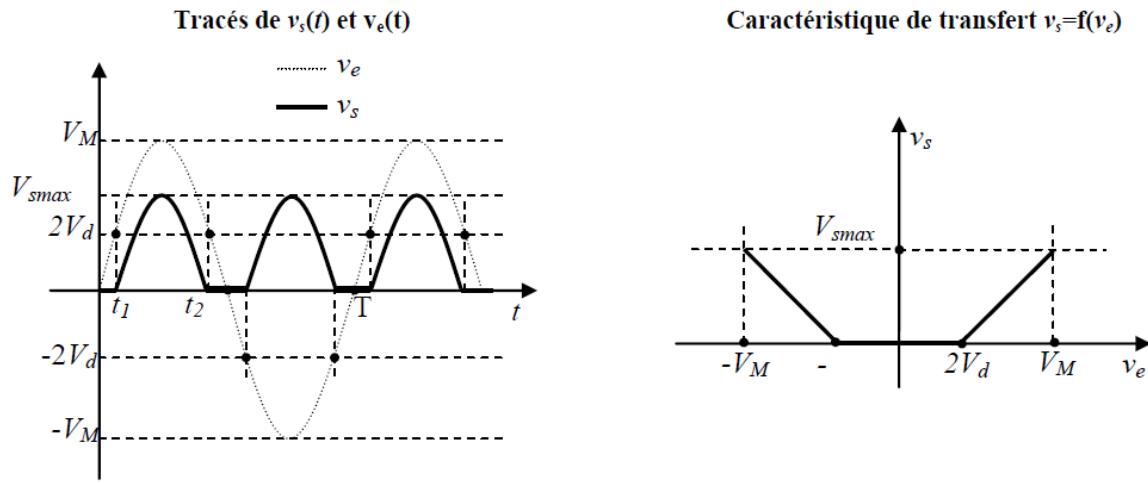


Figure II.25

c. Valeur moyenne et valeur efficace de la tension de sortie:

Valeur moyenne: La valeur moyenne d'une fonction périodique est donnée par :

$$\langle v_s \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v_s(t) dt$$

Valeur efficace: La valeur efficace d'une fonction périodique est donnée par :

$$v_{s(\text{efficace})} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_s(t)^2 dt}$$

- Redressement simple alternance:

$$\text{Si } r_d = 0 \text{ et } V_d = 0 \text{ alors : } \langle v_s \rangle = \frac{V_M}{\pi}$$

$$\text{Si } r_d = 0 \text{ et } V_d = 0 \text{ alors : } v_{s(\text{efficace})} = \frac{V_M}{2}$$

- Redressement double alternance:

$$\text{Si } r_d = 0 \text{ et } V_d = 0 \text{ alors : } \langle v_s \rangle = 2 \frac{V_M}{\pi}$$

$$\text{Si } r_d = 0 \text{ et } V_d = 0 \text{ alors : } v_{s(\text{efficace})} = \frac{V_M}{\sqrt{2}}$$