

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
D'ORAN MOHAMED BOUDIAF



جامعة العلوم والتكنولوجيا بهران محمد
بوضيف

FACULTÉ DE GÉNIE ELECTRIQUE

كلية الهندسة الكهربائية

DÉPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

قسم الإلكترونيك

Cours

Electronique Fondamentale 1

2^{ème} année ELECTRONIQUE Licence

Cours préparé par :

Mme LEKHAL-MAZOUZ.N

Semestre : S3

UEF 2.1.2

Matière 1 : Electronique fondamentale 1 (VHS: 45h00, Cours : 1h30, TD : 1h30)

Objectif de l'enseignement :

Expliquer le calcul, l'analyse et l'interprétation des circuits électroniques. Connaître les propriétés, les modèles électriques et les caractéristiques des composants électroniques : diodes, transistors bipolaires et amplificateurs opérationnels.

Connaissances préalables recommandées

Notions de physique des matériaux et d'électricité fondamentale.

Contenu de la matière :

Chapitre 1 – Régime continu et Théorèmes fondamentaux : 3 semaines

Définitions (dipôle, branche, nœud, maille), générateurs de tension et de courant (idéal, réel), relations tension-courant (R, L, C), diviseur de tension, diviseur de courant.

Théorèmes fondamentaux : superposition, Thévenin, Norton, Millmann, Kennelly, Equivalence entre Thévenin et Norton, Théorème du transfert maximal de puissance.

Chapitre 2 - Quadripôles passifs : 3 semaines

Représentation d'un réseau passif par un quadripôle. Matrices d'un quadripôle, associations de quadripôles. Grandeurs caractérisant le comportement d'un quadripôle dans un montage (impédance d'entrée et de sortie, gain en tension et en courant), application à l'adaptation. Filtres passifs (passe-bas, passe-haut, ...), Diagramme de

Bode, Courbe de gain, Courbe de phase, Fréquence de coupure, Bande passante.

Chapitre 3 - Diodes : 3 semaines

3.1 Rappels élémentaires sur la physique des semi-conducteurs : Définition et structure atomique d'un semi-conducteur. Si cristallin, Si polycristallin, Notion de dopage, Semi-conducteurs N et P, Bandes d'énergie, Jonction PN, Barrière de potentiel.

3.2 Théorie de la diode : Constitution et fonctionnement d'une diode, polarisations directe et inverse, caractéristique courant-tension, régime statique et variable.

Résistance différentielle (ou dynamique), Schéma équivalent.

3.3 Les applications des diodes : Redressement simple et double alternance. Stabilisation de la tension par la diode Zener. Ecrêtage. Multiplicateur de tension. Autres types de diodes : Varicap, DEL, Photodiode.

Chapitre 4 - Transistors bipolaires : 3 semaines

4.1 Transistors bipolaires : Effet transistor, modes de fonctionnement (blocage, saturation, ...), réseau de caractéristiques statiques, polarisations, droite de charge, point de repos, ...

4.2 Etude des trois montages fondamentaux : EC, BC, CC, schéma équivalent, gain en tension, gain en décibels, bande passante, gain en courant, impédances d'entrée et de sortie,

...

4.3 Etude d'amplificateurs à plusieurs étages BF en régime statique et en régime dynamique, condensateurs de liaisons, condensateurs de découplage.

4.4 Autres utilisations du transistor : Montage Darlington, transistor en commutation, ...

Chapitre 5 - Les amplificateurs opérationnels : 3 semaines

Principe, Schéma équivalent, Ampli-op idéal, contre-réaction, caractéristiques de l'ampliop, Montages de base de l'amplificateur opérationnel : inverseur, non inverseur, sommateur, soustracteur, comparateur, suiveur, dérivateur, intégrateur, logarithmique, exponentiel, ...

Mode d'évaluation : Contrôle continu : 40 % ; Examen final : 60 %.

Références bibliographiques:

(Selon la disponibilité de la documentation au niveau de l'établissement, Sites internet...etc.)

1. A. Malvino, Principe d'Electronique, 6ème Edition Dunod, 2002.
2. T. Floyd, Electronique Composants et Systèmes d'Application, 5ème Edition, Dunod, 2000.
3. F. Milsant, Cours d'électronique (et problèmes), Tomes 1 à 5, Eyrolles.
4. M. Kaufman, Electronique : Les composants, Tome 1, McGraw-Hill, 1982.
5. P. Horowitz, Traité de l'électronique Analogique et Numérique, Tomes 1 et 2, Publitronic-Elektor, 1996.
6. M. Ouhruche, Circuits électriques, Presses internationale Polytechnique, 2009.
7. Neffati, Electricité générale, Dunod, 2004
8. D. Dixneuf, Principes des circuits électriques, Dunod, 2007
9. Y. Hamada, Circuits électroniques, OPU, 1993.
10. I. Jelinski, Toute l'Electronique en Exercices, Vuibert, 2000.

Chapitre 3 - Diodes

Chapitre 3 - Diodes

3.1 Rappels élémentaires sur la physique des semi-conducteurs

3.1.1 Définition et structure atomique d'un semi-conducteur.

3.1.2 Bandes d'énergie

3.1.3 Notion de dopage et Semi-conducteurs N et P

3.1.4 Jonction PN, et Barrière de potentiel

3.2 Théorie de la diode

3.2 .1 Constitution et fonctionnement d'une diode,

3.2 .2 polarisations directe et inverse,

3.2 .3 caractéristique courant-tension et le modèle d'une diode à jonction PN,

3.2 .4 Le point de fonctionnement et la droite de charge de la diode

3.2 .5 Résistance différentielle (ou dynamique), Schéma équivalent.

3.3 Les applications des diodes

3.3 .1 Redressement simple et double alternance.

3.3 .2 Stabilisation de la tension par la diode Zener.

3.3 .3 Ecrêtage.

3.3 .4 Multiplicateur de tension.

3.1 Rappels élémentaires sur la physique des semi-conducteurs

3.1.1 Définition et structure atomique d'un semi-conducteur

Orbites et Electrons de valence

Les électrons gravitent autour du noyau d'un atome à certaines distances de celui-ci. Les électrons près du noyau possèdent moins d'énergie que ceux situés sur des orbites plus éloignées. Il n'existe que des quantités d'énergie électronique discrètes.

A chaque éloignement du noyau correspond un certain niveau énergétique. Ce concept énergétique est illustré à la figure 3.1.

Les niveaux d'énergie augmentent à mesure que l'on s'éloigne du noyau de l'atome. La couche la plus éloignée est connue sous le nom de couche de valence et les électrons de cette couche sont appelés électrons de valence. Ces électrons contribuent aux réactions chimiques et aux liaisons à l'intérieur de la structure d'un matériau.

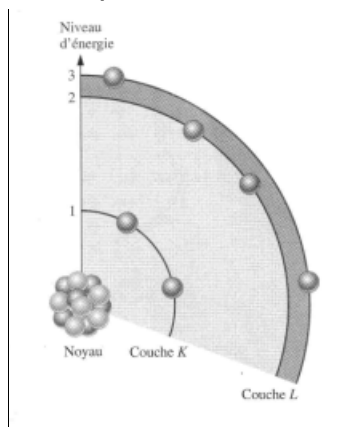


Figure 3.1 : Le niveau d'énergie augmente à mesure que l'on s'éloigne du noyau

3.1.2 Bandes d'énergie,

Lorsqu'un atome absorbe de l'énergie d'une source de chaleur ou de la lumière, les niveaux énergétiques des électrons sont augmentés. Lorsqu'un électron acquiert de l'énergie il se déplace vers une orbite plus éloignée du noyau.

Si un électron de valence reçoit une quantité suffisante d'énergie, il peut en fait s'échapper de la couche extérieure et de l'emprise de l'atome. Le départ d'un électron de valence laisse un atome avec un excédent de charge positive. L'électron qui s'est échappé est appelé électron libre ce que l'on désigne comme étant la bande de conduction.

En terme d'énergie, la différence entre la bande de valence et la bande de conduction est appelée un écart énergétique. Il s'agit en fait de la quantité d'énergie que doit avoir un électron pour sauter de la bande de valence vers la bande de conduction.

La figure 3.2 Montre les diagrammes d'énergie pour un isolant, un semi-conducteur et un conducteur.

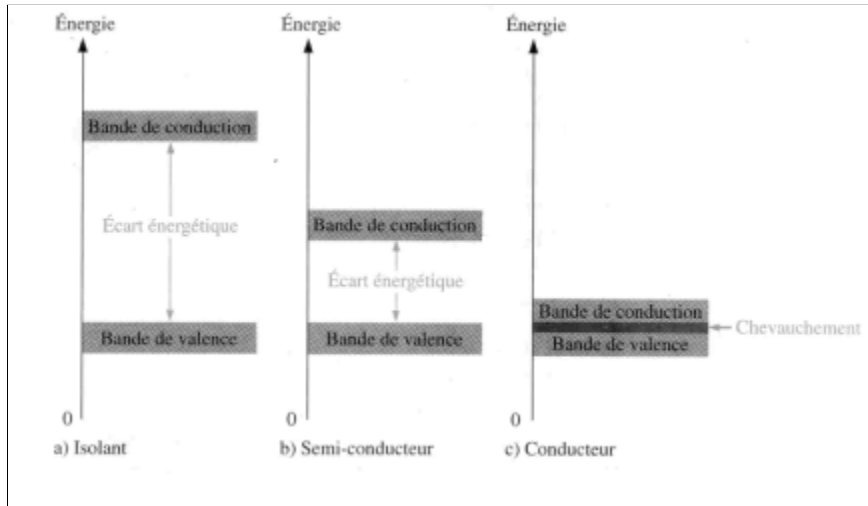


Figure 3.2 : Diagrammes énergétiques pour les trois types de matériaux.

Silicium et Germanium

La structure atomique du Silicium et Germanium sont illustrées à la figure 3.3. Les électrons de valence du Germanium se situent dans la quatrième couche tandis que ceux du Silicium sont dans la troisième couche, plus près du noyau. Cela signifie que les électrons de valences du Germanium (Ge) sont à des niveaux d'énergie supérieure que le Silicium (Si), ils demandent une plus petite quantité d'énergie additionnelle pour s'échapper de l'atome, cette propriété rend le Germanium plus instable à des températures élevées, c'est la raison pour laquelle le Si est le matériau Semi-conducteur (SC) le plus largement utilisé.

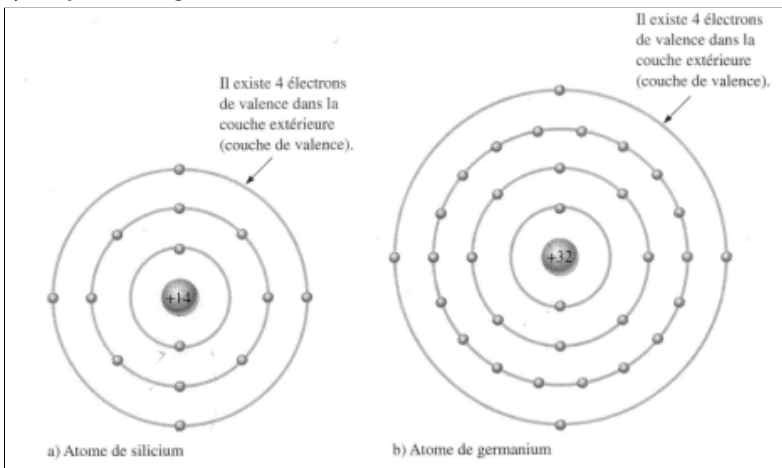


Figure 3.3 : Diagrammes des atomes de Silicium et Germanium

Liaison atomique

Lorsque certains atomes se combinent en molécules pour former un matériau solide, ils se disposent en un modèle fixe appelé Cristal. Les atomes de l'intérieur de la structure du cristal sont retenus ensemble par des liens covalents qui sont créés par l'interaction

des électrons de valence de chaque atome, un morceau solide de Si est un matériau cristallin.

La figure 3.4 montre comment chaque atome de Silicium se positionne avec quatre atomes adjacents pour former un cristal de Silicium. Les liaisons covalentes d'un cristal intrinsèque de Silicium sont illustrées à la figure 3.4. Un cristal intrinsèque ne possède aucune impureté.

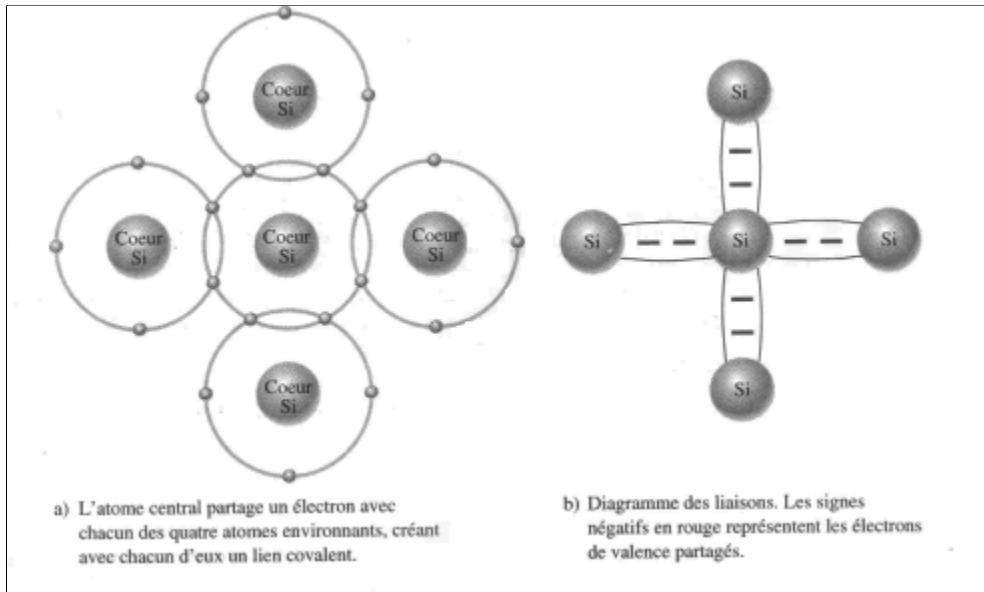


Figure 3.4 : les liens covalents forment la structure d'un cristal.

Conduction et semi-conducteur

Un cristal de Silicium tire de l'énergie de la chaleur (thermique) de l'air d'environnement. Quelques électrons de valence absorbent alors l'énergie suffisante pour traverser l'écart entre la bande de valence et la bande de conduction devenant ainsi des électrons libres. Lorsqu'un électron bondit vers la bande de conduction un espace vacant est laissé dans la bande de valence, il est nommé trou créant une paire électron-trou. La recombinaison se produit lorsqu'un électron de la bande de conduction perd de l'énergie et retombe dans un trou de la bande de valence.

Pour résumer, un morceau de Silicium intrinsèque à température ambiante possède, en tout temps, une quantité d'électrons (libres) dans la bande de conduction. Ils ne sont attachés à aucun atome et sont essentiellement entraînés de façon aléatoire à travers le matériau. Une même quantité de trous est également créée dans la bande de valence lorsque ces électrons bondissent vers la bande de conduction.

3.1.3 Notion de dopage et Semi-conducteurs de type N et de type P

Les Semi-conducteur intrinsèque ne conduisent pas très bien le courant du fait de leur nombre limité d'électrons libres dans la bande de conduction. Ainsi la conduction d'un SC est bien inférieure à celle d'un conducteur.

Dopage

L'addition d'impuretés dans le SC Intrinsèque (pur), ce procédé appelé dopage,

augmente le nombre de porteurs de courant (électrons et trous). Les deux catégories d'impuretés sont le type N et le type P.

Semi-conducteurs de type N

Pour augmenter le nombre d'électrons de la bande de conduction dans du Silicium intrinsèque, on ajoute des atomes d'impureté pentavalents. Ce sont des électrons avec cinq électrons de valence, tels l'arsenic (As), le phosphore (P), et l'antimoine (Sb).

Comme l'illustre la figure 3.5, chaque atome pentavalent forme des liens covalents avec quatre atomes adjacents de Silicium, laissant un électron en sus.

Le nombre d'électrons de conduction peut être contrôlé par le nombre d'atomes d'impuretés ajoutées au Si.

Porteurs majoritaires et minoritaires :

Les porteurs majoritaires dans un matériau de type N sont les électrons.

Les porteurs minoritaires dans un matériau de type N sont les trous.

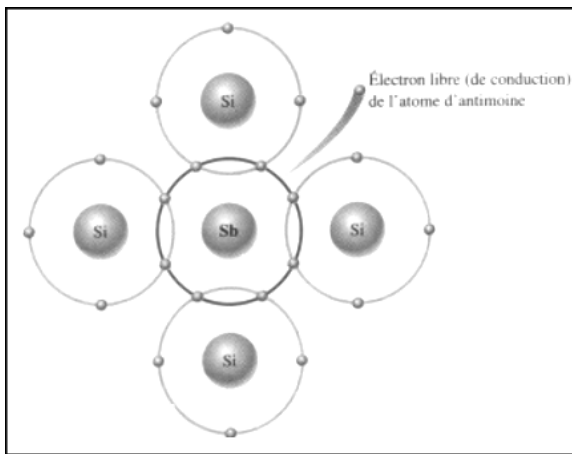


Figure 3.5 : Le Semi-conducteurs de type N

Semi-conducteurs de type P

Pour augmenter le nombre de trous de la bande de conduction dans du Silicium intrinsèque, on ajoute des atomes d'impureté trivalents. Ce sont des électrons avec trois électrons de valence, tels l'aluminium (Al), le bore (B), et le gallium (Ga).

Comme l'illustre la figure 3.6, chaque atome trivalent forme des liens covalents avec quatre atomes adjacents de Silicium. Ainsi, puisque quatre électrons sont requis, un trou est formé avec chaque atome trivalent.

Le nombre de trous peut être contrôlé par la quantité d'impuretés trivalentes ajoutées au Si.

Porteurs majoritaires et minoritaires :

Les porteurs majoritaires dans un matériau de type P sont les trous.

Les porteurs minoritaires dans un matériau de type P sont les électrons.

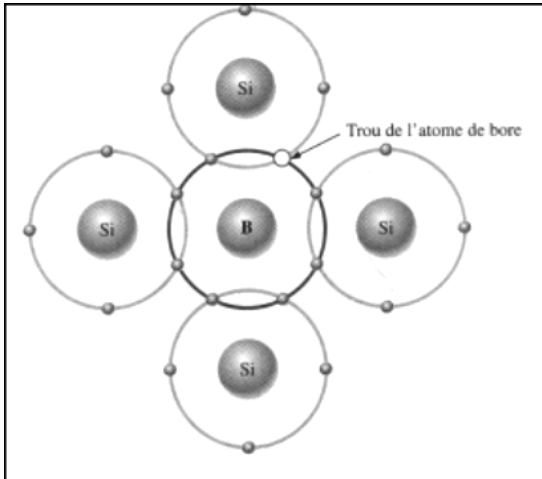


Figure 3.6 : Le Semi-conducteurs de type P

3.1.4 Jonction PN, et Barrière de potentiel

La Jonction PN

Si on prend un bloc de Si et on dope une moitié avec une impureté trivalente et l'autre moitié avec une impureté pentavalente, il se forme une frontière entre les portions résultantes de type P et de type N appelée jonction PN, c'est une caractéristique qui permet aux diodes, transistors et autres composants de fonctionner.

A l'instant où la jonction PN est formée, les électrons libres de la région N, à proximité de la jonction, commencent à se propager à travers la jonction vers la région P où ils se combinent avec les trous à proximité de la jonction, tel qu'illustré à la figure 3.7.a.

La région N perd des électrons libres à mesure qu'ils se diffusent à travers la jonction. Ceci engendre une couche de charges positives. A mesure que les électrons traversent la jonction, la région P perd des trous puisqu'ils se combinent aux électrons. Ceci crée une couche de charges négatives à proximité de la jonction. Ces deux couches forment la région d'appauvrissement, telle qu'illustrée la figure 3.7.b. un sommet est atteint lorsque la somme des charges négatives dans la région d'appauvrissement empêche tout autre électron de se diffuser vers la région P. à ce moment, la diffusion s'interrompt. En d'autres mots, la région d'appauvrissement agit comme une barrière s'opposant au passage des électrons à travers la jonction

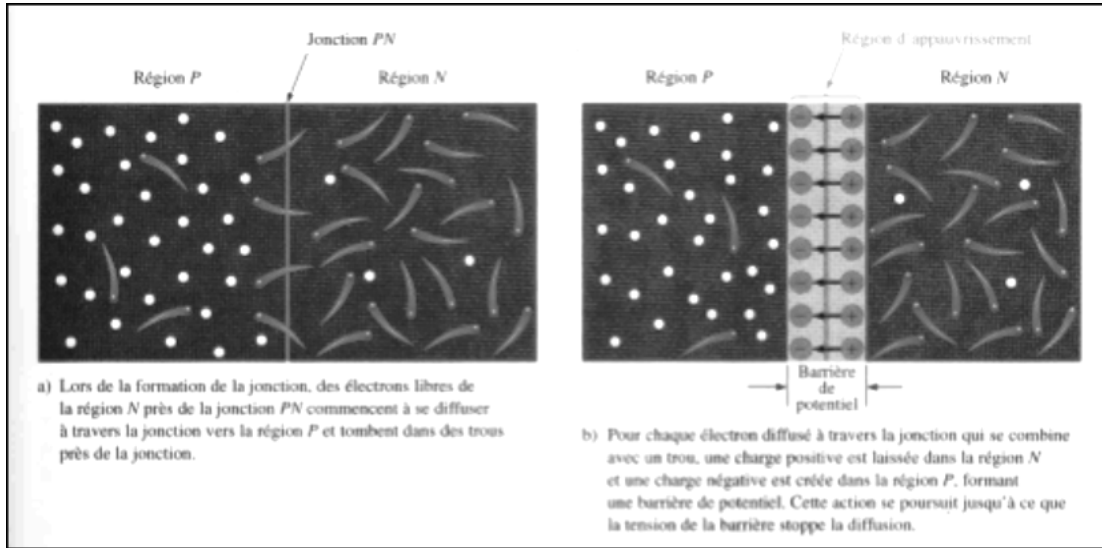


Figure 3.7 : Formation de la région d'appauvrissement

La différence du potentiel du champ électrique dans la région d'appauvrissement est la quantité d'énergie requise pour réussir à déplacer les électrons à travers le champ électrique. Cette différence de potentiel est appelée barrière de potentiel et est exprimé en volts.

La barrière de potentiel d'une jonction PN dépend de plusieurs paramètres, incluant le type de matériau SC, la quantité de dopage et la température. La barrière de potentiel typique est d'approximativement 0.7 V pour le Si et de 0.3 V pour le Ge.

Parce que l'attraction du noyau pour les électrons de valence dans l'atome trivalente est moindre que dans l'attraction pentavalente. Ainsi les électrons de valence trivalente sont situés sur une orbite légèrement supérieure donc un niveau énergétique supérieur. Un diagramme énergétique de la jonction PN, à l'instant de sa formation, est illustré à la figure 3.8

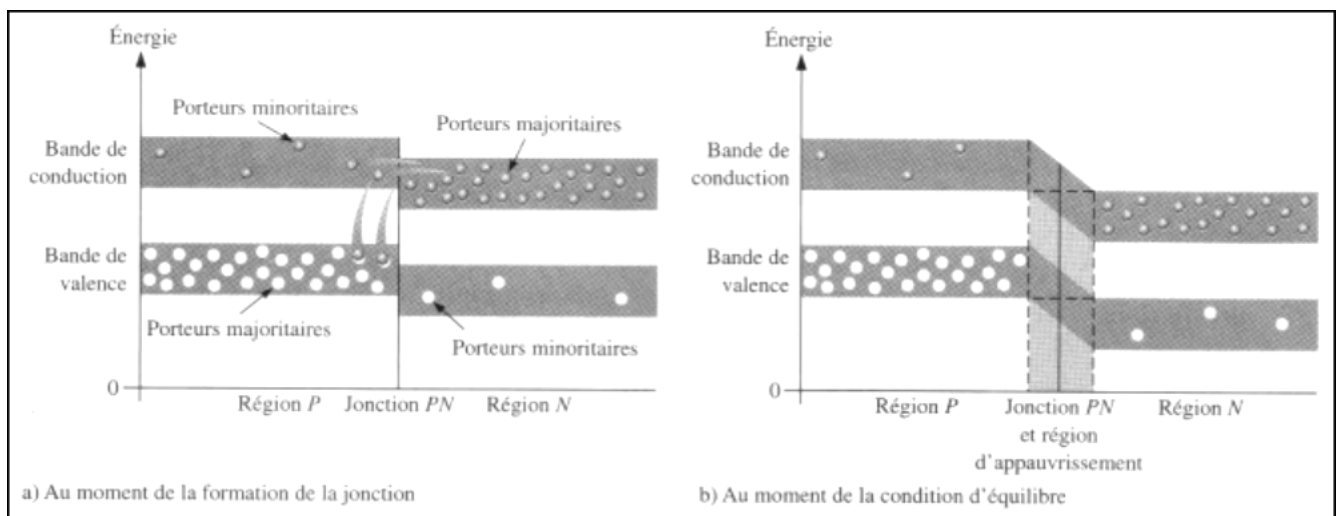


Figure 3.8 : Diagramme énergétique la Formation de la jonction PN et la région d'appauvrissement.

Polarisation de la jonction PN

Il y a aucun courant dans une jonction PN en condition d'équilibre. L'utilité principale de la jonction PN est sa capacité de permettre un courant de passer dans une seule direction et d'empêcher le courant dans l'autre direction, tel que déterminé par la polarisation. Il y a deux conditions de polarisation pratiques : polarisation directe et inverse. L'une ou l'autre de ces conditions est créée par l'application d'une tension externe de polarité et de grandeur appropriées.

Polarisation directe

Pour polariser une jonction PN, il suffit d'appliquer une tension CC externe à travers elle. La polarisation directe est la condition qui permet le courant à travers la jonction PN. La figure 3.9 illustre une source de tension CC, relié à une jonction PN par des matériaux conductifs.

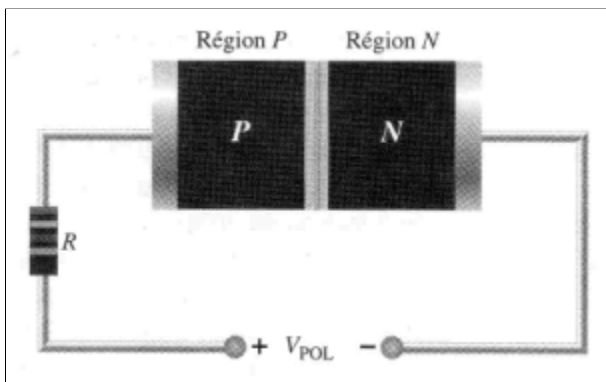


Figure 3.9 : Une jonction PN branchée en polarisation directe.

La résistance R limite le courant pour éviter d'endommager la structure de la jonction PN. Notez que la borne négative de la source est reliée à la région N de la jonction PN et que la borne positive de la source est reliée à la région P de la jonction PN, une deuxième condition nécessite que la tension de polarisation V_{POL} , soit plus grande que la barrière de potentiel.

Le pôle (-) de la pile pousse les électrons de la région N vers la jonction, Le pôle (+) de la pile pousse les trous de la région P vers la jonction, les charges semblables se repoussent (figure 3.10), lorsqu'elle vainc la barrière de potentiel, la source de tension externe fournit plus d'énergie au électrons de la région N pour pénétrer à la région d'appauvrissement et traverse la jonction où ils se combinent avec les trous de la région P, (d'autres viennent de la pile). Ainsi le courant de la région N est formé par le mouvement des électrons conductifs (porteurs majoritaires) vers la jonction.

Une fois les électrons de la région N sont dans la région P, ces électrons deviennent des électrons de valence, ils peuvent se déplacer de trou en trou vers le pôle positif de la pile. Le courant de la région P est donc formé par le mouvement des trous (porteurs majoritaires) vers la jonction.

Le mouvement de ces électrons est le même que celui des trous en direction inverse

Effet de la barrière de potentiel durant la polarisation directe

L'action de la barrière de potentiel est de s'opposer à la polarisation directe. Lorsqu'une

polarisation directe est appliquée, les électrons libres reçoivent suffisamment d'énergie de la source pour franchir la barrière de potentiel et « grimper » la colline énergétique afin de traverser la région d'appauvrissement. L'énergie requise par les électrons pour traverser la région d'appauvrissement est égale à l'énergie de la barrière de potentiel. Cette perte d'énergie crée une chute de tension aux bornes de la jonction PN égale à la barrière de potentiel (0.7 V pour le Si et 0.3 V pour le Ge).

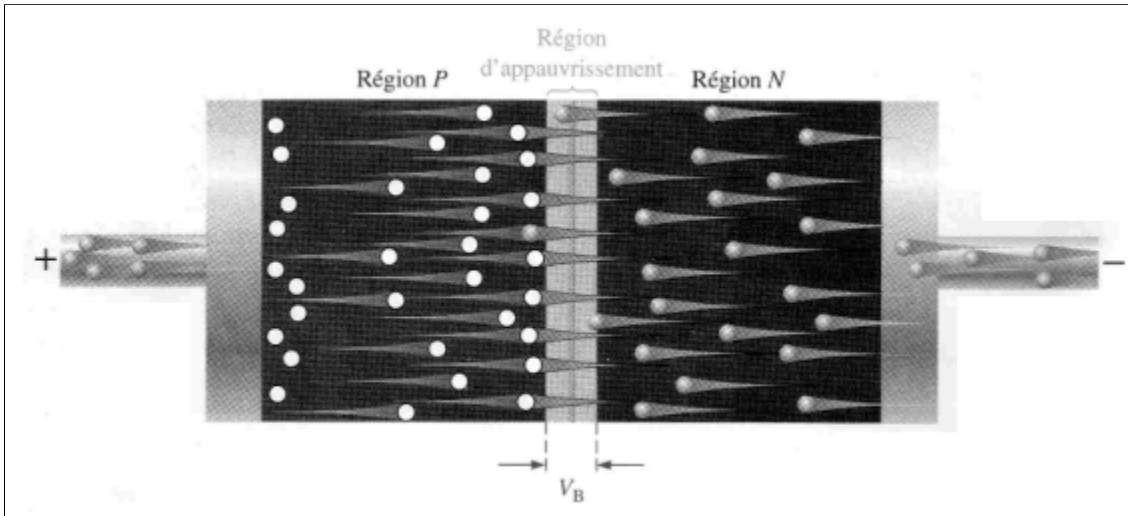


Figure 3.10 : Représentation d'une jonction PN en polarisation directe et effet de la barrière de potentiel.

Polarisation inverse

La polarisation inverse est la condition qui empêche le courant de traverser la jonction PN. La figure 3.11 illustre une source de tension CC branchée de manière à fournir une polarisation inverse. La borne négative de la pile est branchée à la région P de la jonction PN et que la borne positive de la source est reliée à la région N de la jonction PN.

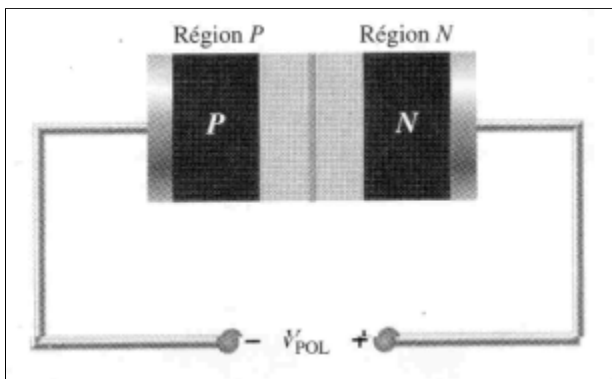


Figure 3.11 : Une jonction PN branchée en polarisation inverse.

La borne négative de la pile attire les trous de la région P loin de la jonction PN pendant que la borne positive de la pile attire les électrons de la région N loin de la jonction. A mesure les électrons et les trous s'éloignent de la jonction PN, la région d'appauvrissement s'élargit, d'autres ions positifs sont créés dans la région N et

d'autres ions négatifs sont créés dans la région P. le mouvement initial des porteurs majoritaires loin de la jonction est appelé courant transitoire (figure 3.12) et ne dure qu'un très court laps de temps lors de l'application de la polarisation inverse.

La région d'appauvrissement s'élargit jusqu'à ce que la tension région d'appauvrissement soit égale à la tension de la polarisation V_{POL} . A ce moment les électrons et les trous cessent de s'éloigner et le courant majoritaire cesse, il n'existe qu'un courant inverse infime, qui est habituellement négligeable.

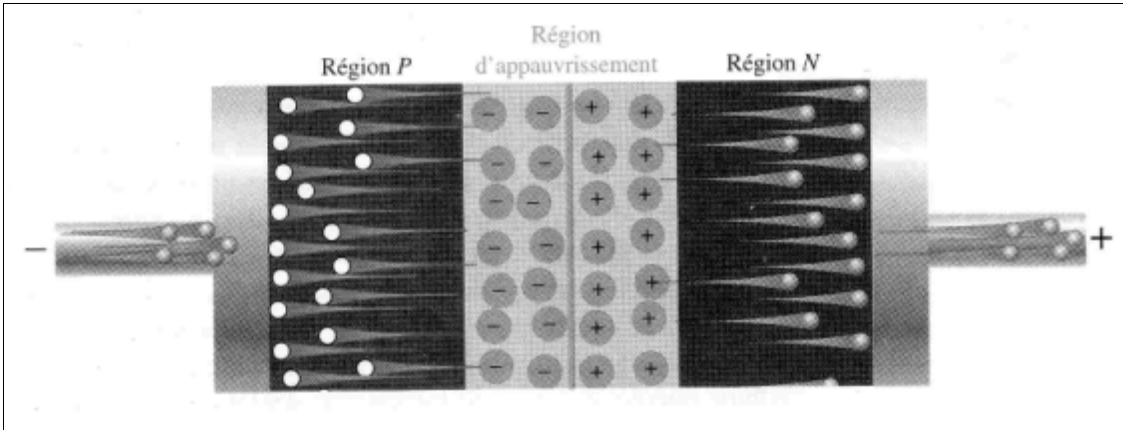


Figure 3.12 : illustration de la jonction PN durant la courte période transitoire en polarisation inverse.

3.2 Théorie de la diode

3.2.1 Constitution et fonctionnement d'une diode

La diode d'usage général, ou diode utilisée comme redresseur de courant, est un composant à jonction PN simple muni de contacts conducteurs et de connections à fils connectés sur chaque région (figure 3.13.a). Une des moitiés de la diode est un semi-conducteur de type N et l'autre moitié est un semi-conducteur de type P. le symbole schématique de la diode est illustrée à la figure 3.13.b. la région N est la cathode et la région P est l'anode.

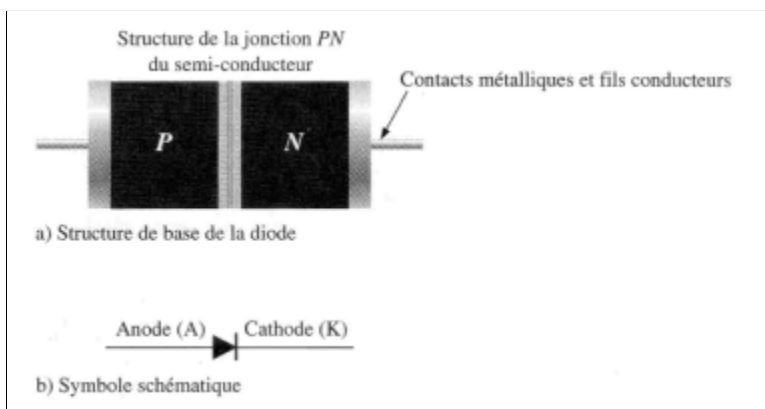


Figure 3.13 : Structure de base de la diode et son symbole schématique.

3.2.2 polarisations directe et inverse

La discussion précédente au sujet de la polarisation d'une jonction PN s'applique aussi

pour la diode puisque celle-ci est un composant à jonction PN.

Branchement de la polarisation directe

Lorsqu'une source de tension est connectée tel que démontré à la figure 3.14.a. La borne positive de la source est connectée à l'anode à travers une résistance de limite du courant. La borne négative de la source est connectée à la cathode. Le courant (I_{AV}) passe de la cathode vers l'anode.

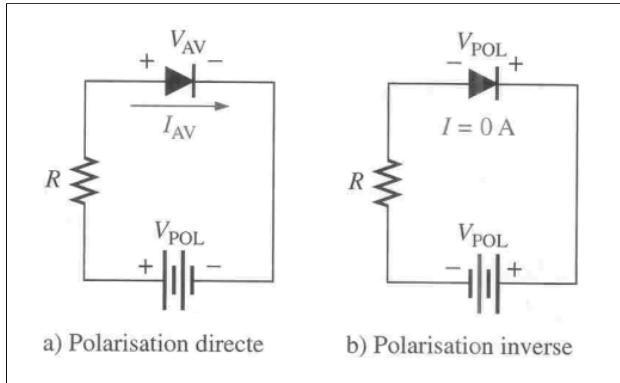


Figure 3.14 : Branchements de la diode pour la polarisation directe et la polarisation inverse.

Branchement de la polarisation inverse

Une diode est polarisée en inverse lorsqu'une source de tension est connectée tel que démontré à la figure 3.14.b. une résistance n'est pas nécessaire en polarisation inverse. Le courant est nul (en négligeant l'infime courant inverse). Notez que toute la tension de polarisation (V_{POL}) apparaît aux bornes de la diode.

3.2 .3 Caractéristique courant-tension et le modèle d'une diode à jonction PN

3.2.3.1 Caractéristique courant-tension (I-V)

- Caractéristique courant-tension en polarisation directe

Nous avons vu qu'un courant traverse une jonction PN de Si lorsqu'une tension de polarisation directe est appliquée à ses bornes. Ce courant s'appelle courant avant (I_{AV}). La résistance est utilisée pour limiter le courant avant afin de ne pas endommager la jonction PN par une dissipation thermique excessive.

Lorsque la jonction PN est à 0 V, il n'existe aucun courant avant, tel qu'illustré à la figure 3.15.a. A mesure que l'on augmente la tension de polarisation, le courant avant et la tension aux bornes de la jonction PN augmentent graduellement. Une portion de la tension de polarisation appliquée se retrouve aux bornes de la résistance de limitation. Lorsque la tension de la polarisation appliquée est augmentée et que la tension aux bornes de la jonction PN atteint environ 0.7 V, le courant avant commence à augmenter rapidement.

Si l'on continue à accentuer la tension de polarisation, le courant continue de croître très rapidement, tandis que la tension aux bornes de la jonction PN augmente très légèrement au-dessus de 0.7 V, cette faible augmentation est causée par la chute de tension aux bornes de la résistance dynamique du matériau semi-conducteur.

Comme nous pouvons le voir à la figure 3.15.a, le courant avant n'augmente que très peu tant que la tension aux bornes de la jonction n'atteint pas environ 0.7 V au genou de la courbe.

- Caractéristique courant-tension en polarisation inverse

Lorsqu'une tension de polarisation inverse est appliquée sur une jonction PN, il n'existe qu'un très faible courant inverse (I_{AR}).

Lorsque la tension sur la jonction PN est de 0 V, il n'y a aucun courant inverse. A mesure que la tension négative augmente, il n'existe qu'un très faible courant inverse tandis que la tension aux bornes de la jonction PN augmente (figure 3.15.b). Lorsque la tension est augmentée suffisamment et que la tension inverse aux bornes de la jonction PN (V_{AR}) atteint la valeur de claquage (V_{BR}), le courant inverse commence à augmenter rapidement.

Si l'on accroît encore la tension, le courant s'intensifie très rapidement tandis que la tension aux bornes de la jonction surpasse à peine V_{BR} . Le claquage n'est pas un mode opérationnel normal pour la grande majorité des composants à jonction PN.

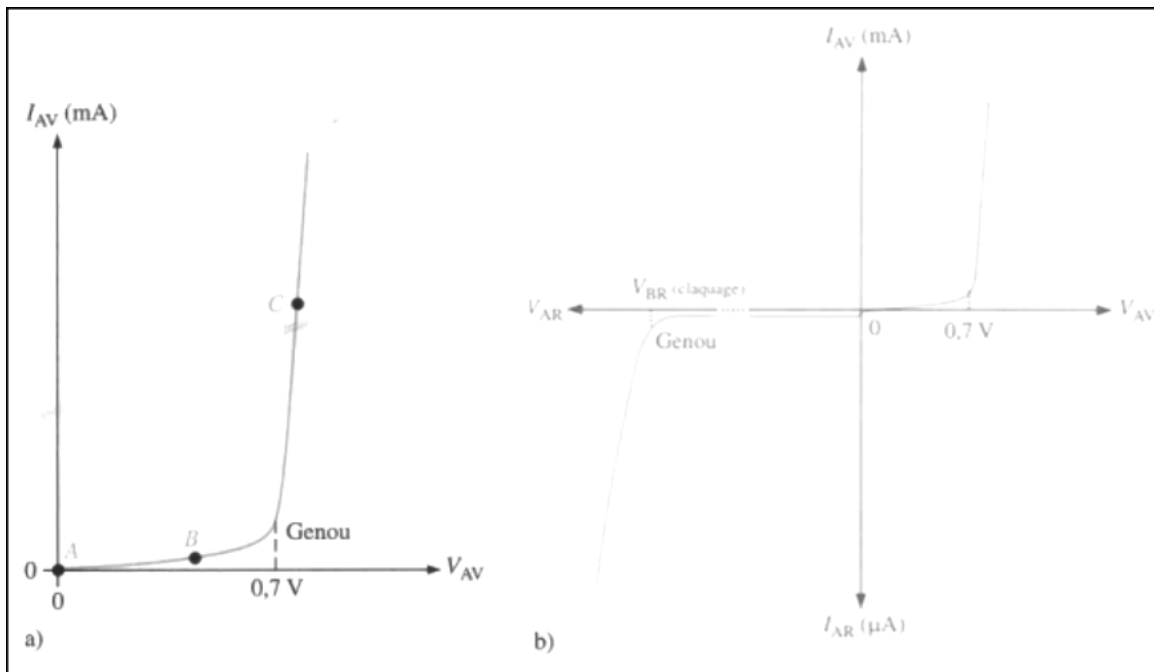


Figure 3.15 : Courbe caractéristique I-V complète d'une jonction PN.

3.2.3.2 Modèles d'une diode à jonction PN

Modèle idéal de la diode

Le modèle idéal de la diode est un simple interrupteur. Lorsque la diode est en polarisation directe, elle agit comme un interrupteur fermé (état de marche) (figure 1.16.a). Lorsque la diode est sous polarisation inverse, elle agit comme un interrupteur

ouvert (état d'arrêt), comme l'illustre la figure 1.16.b. la barrière de potentiel, la résistance interne avant et le courant inverse sont tous négligés.

A la figure 1.16.c, une courbe caractéristique de diode illustre graphiquement le fonctionnement du modèle de diode idéal.

Le courant avant est déterminé par la tension de polarisation et la résistance R_{LIMITE} .

$$I_{AV} = \frac{V_{POL}}{R_{LIMITE}} \quad (3.1)$$

Le courant inverse est nul.

$$I_{AR} = 0 \text{ A} \quad (3.2)$$

La tension inverse est égale à la tension de polarisation.

$$V_{AR} = V_{POL} \quad (3.3)$$

Le modèle idéal peut être utilisé lors de dépannages ou pour connaître le fonctionnement particulier d'un circuit sans être concerné par les valeurs des tensions ou des courants.

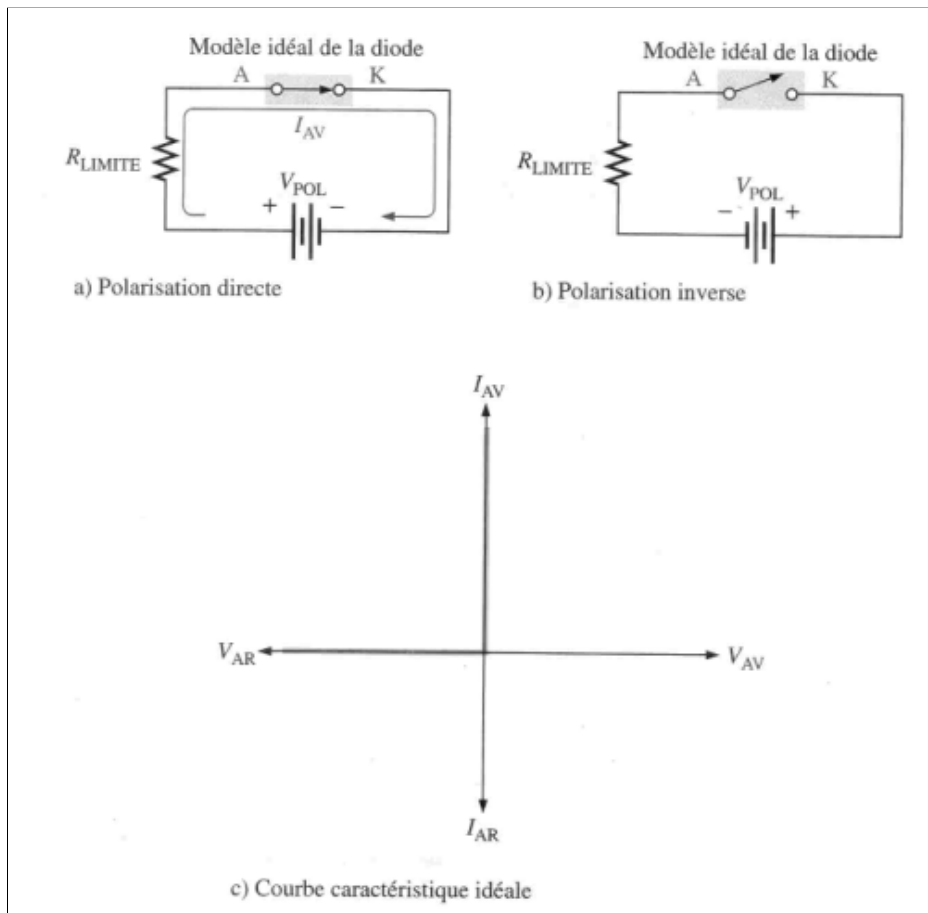


Figure 3.16 : Modèle idéal de la diode

Modèle pratique de la diode

Le modèle pratique celui que nous utiliserons le plus souvent dans ce manuel, est semblable au modèle idéal de la diode, mais tient compte de la barrière de potentiel. Lorsque la diode est en polarisation directe (figure 1.17.a), elle agit comme un interrupteur fermé en série avec une faible tension (de 0.7 V pour le silicium) égale à la barrière de potentiel. Lorsque la diode est sous polarisation inverse, elle agit comme un interrupteur ouvert (état d'arrêt), comme l'illustre la figure 1.17.b.

La courbe caractéristique pour le modèle pratique est illustrée à la figure 1.17.c.

$$V_{AV} = 0.7 \text{ V} \quad (\text{Silicium}) \quad (3.4)$$

$$V_{AV} = 0.3 \text{ V} \quad (\text{Germanium}) \quad (3.5)$$

Le courant avant est déterminé par la formule suivante :

$$I_{AV} = \frac{V_{POL} - V_{AV}}{R_{LIMITE}} \quad (3.6)$$

Le courant inverse est nul.

$$I_{AR} = 0 \text{ A} \quad (3.7)$$

$$V_{AR} = V_{POL} \quad (3.8)$$

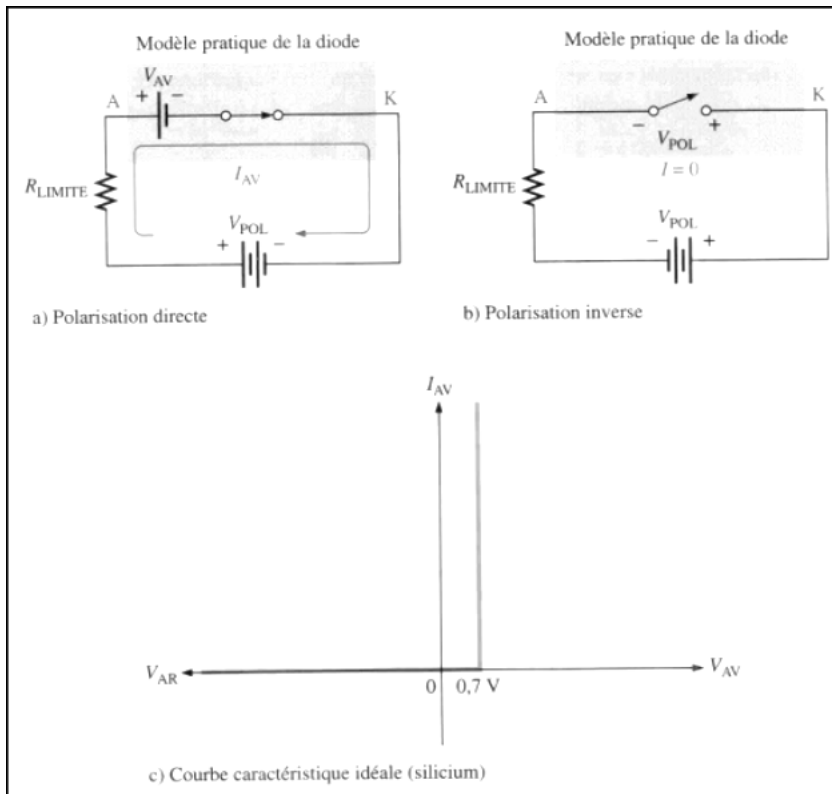


Figure 3.17 : Modèle pratique de la diode

Modèle complexe de la diode

Modèle complexe de la diode tient compte de la barrière de potentiel, de la faible résistance dynamique avant (r'_d) et de la forte résistance inverse (r'_{AR}). On tient compte de la résistance interne puisqu'elle fournit un chemin pour le courant inverse.

Lorsque la diode est en polarisation directe (figure 1.18.a), elle agit comme un interrupteur fermé en série avec la tension de la barrière de potentiel et la résistance dynamique avant (r'_d). Lorsque la diode est sous polarisation inverse, elle agit comme un interrupteur ouvert en parallèle avec la forte résistance inverse interne (r'_{AR}) (figure 1.18.b), la barrière de potentiel n'affecte pas la polarisation inverse ; nous ne la prenons pas donc en considération.

La courbe caractéristique pour le modèle complexe est illustrée à la figure 1.18.c. puisque ce modèle inclut les paramètres internes, on présume qu'une tension apparaît aux bornes de la diode en polarisation directe. Cette tension (V_{AV}) est constituée de la barrière de potentiel et de la chute de tension aux bornes de la résistance dynamique, comme illustre la portion de courbe à la droite du point d'origine. La courbe possède une pente puisque cette chute augmente en fonction du courant. Pour le modèle complexe de la diode au Silicium, les formules suivantes s'appliquent :

$$V_{AV} = 0.7 \text{ V} + I_{AV} r'_d \quad (3.9)$$

$$I_{AV} = \frac{V_{POL} - 0.7 \text{ V}}{R_{LIMITE} + r'_d} \quad (3.10)$$

Le courant inverse est pris en considération avec la résistance en parallèle, tel qu'indiqué par la portion de courbe à la gauche sur l'axe horizontal. La portion de courbe pour le claquage n'est pas incluse puisque le claquage n'est pas une condition d'opération normale pour la plupart des diodes.

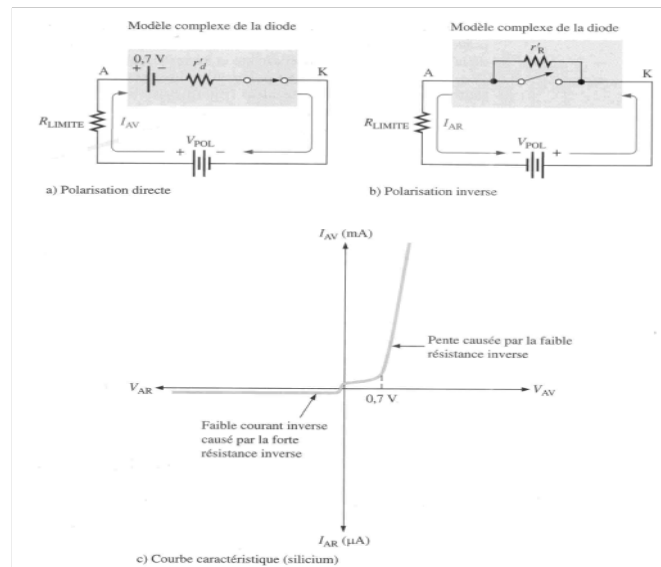


Figure 3.18 : Modèle complexe de la diode

3.2.4 Le point de fonctionnement et la droite de charge de la diode

De la figure 3.19, nous calculons le courant qui circule à travers la diode à jonction PN.

$$I_{AV} = \frac{V_{POL} - V_{AV}}{R} = \frac{E - V}{R} \quad (3.11)$$

Pour tracer la droite de charge, deux hypothèses :

- $I_{AV} = 0$ A alors $V_{AN} = V_{POL}$: c'est la tension de blocage de la diode
- $V_{AN} = 0$ V alors $I_{AV} = \frac{V_{POL}}{R}$: c'est le courant de saturation de la diode

Pour qu'une diode conduise, il faut que sa tension égale ou supérieure à la tension de seuil (la tension de la barrière de potentiel), on dit dans ce cas là que la diode travaille à son point de fonctionnement. Dans le cas contraire, nous dirons que la diode est bloquée.

Les coordonnées du point de fonctionnement (V_M , I_M) seront déterminées comme suit :

$$V_M = E - R \cdot I_M = V_d + r_d \cdot I_M \quad (3.12)$$

$$\text{Donc : } I_M = \frac{E - V_d}{R + r_d} \quad \text{et} \quad V_M = \frac{E \cdot r_d + V_d \cdot R}{R + r_d}$$

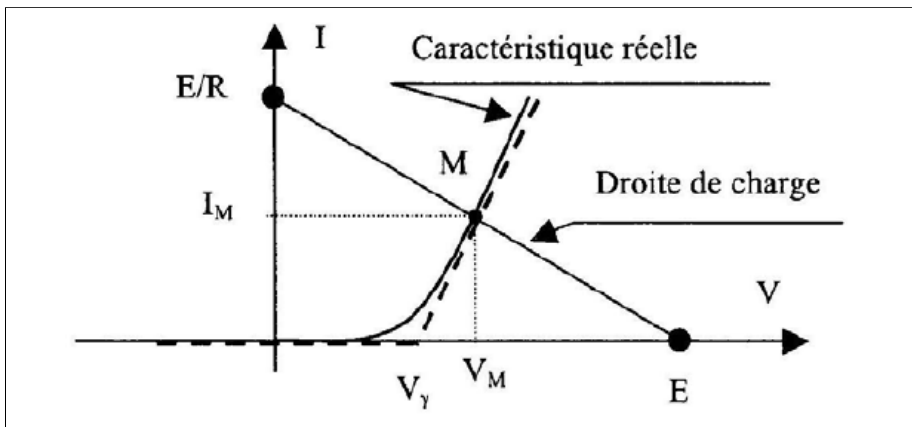


Figure 3.19 : point de fonctionnement et droite de charge d'une diode à jonction.

3.2.5 Résistance différentielle (ou dynamique), Schéma équivalent

Contrairement à une résistance linéaire, la résistance du matériau PN sous polarisation directe n'est pas constante tout au long de la courbe : elle varie au fil de la courbe I-V et on la qualifie de résistance dynamique r'_d ou c.a.

La résistance est plus élevée au-dessous du genou de la courbe puisque le courant augmente très peu pour une variation en tension donnée

$$r'_d = \frac{\Delta V_{AV}}{\Delta I_{AV}} \quad (3.13)$$

La résistance commence à diminuer dans la région de genou de la courbe et devient minimale au-dessus du genou où la variation en courant est élevée pour une variation en tension donnée. Cette caractéristique est illustrée à la figure 3.20.

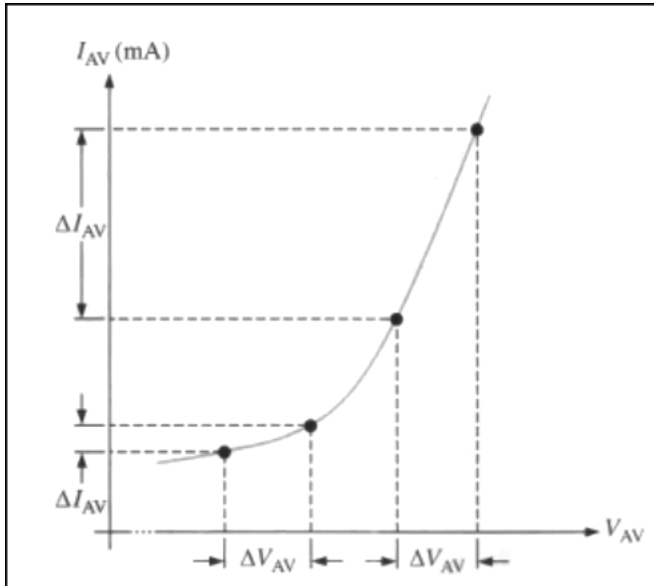


Figure 3.20 : La variation de la résistance dynamique.

3.3 Les applications des diodes

3.3.1 Redressement simple et double alternance

Les diodes sont aussi dans les circuits redresseurs qui convertissent le c.a en c.c. les redresseurs se retrouvent dans tous les blocs d'alimentation c.c. qui fonctionnent à partir d'une source c.a où elles constituent une partie essentielle de tous les systèmes électroniques, du plus simple au plus complexe. La figure 3.21 illustre un bloc d'une alimentation c.c. avec une charge.

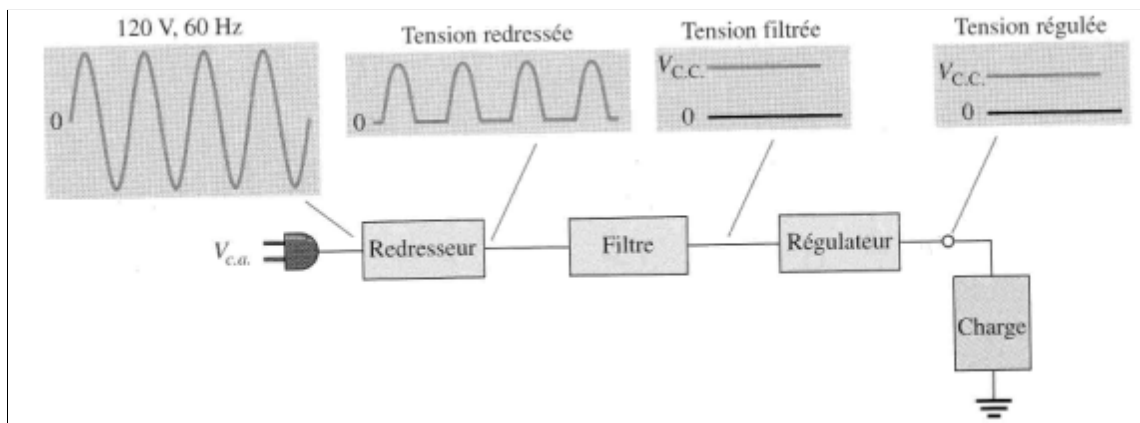


Figure 3.20 : Diagramme bloc d'une alimentation c.c. avec une charge.

3.3.1.1. Redressement simple alternance

La figure 3.21.a illustre le procédé appelé redressement simple alternance. Examinons ce qui survient durant un cycle de la tension d'entrée en utilisant le modèle de la diode idéal. Lorsque la tension sinusoïdale à l'entrée devient positive, la diode est en polarisation directe et conduit le courant vers la résistance de charge (figure 3.21.b). Le courant traverse la charge et produit une tension possédant la même forme que le demi-cycle positif de la tension d'entrée.

Lorsque la tension à l'entrée devient négative durant la seconde moitié de son cycle, la diode est en polarisation inverse. Il n'y a aucun courant et la tension aux bornes de la résistance est nulle (figure 3.21.c). Par conséquent, seuls les demi-cycles positifs de la tension c.a d'entrée apparaissent aux bornes de la charge. Puisque la polarité ne change pas à la sortie, nous obtenons une tension c.c. pulsative d'une fréquence de 60Hz (figure 3.21.d).

La valeur moyenne d'une tension de sortie d'un redresseur simple alternance est celle que vous mesurez avec un voltmètre en position c.c.

$$V_{\text{MOY}} = \frac{V_{\text{crête}}}{\pi} \quad (3.14)$$

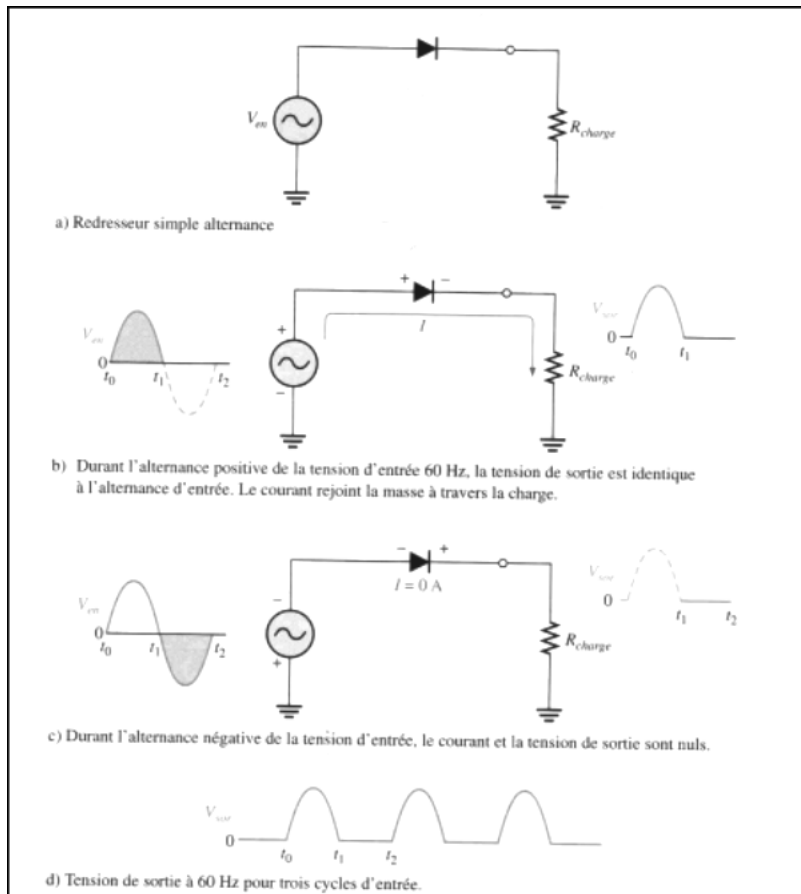


Figure 3.21 : Fonctionnement d'un redressement simple alternance.

Le facteur de forme :

$$F = \frac{I_{\text{eff}}}{I_{\text{MOY}}} \quad (3.15)$$

Lorsque $F=1$ c'est un redressement parfait

Le taux d'ondulation

$$\tau = \sqrt{F^2 - 1} \quad (3.16)$$

Le taux nous indique la qualité du redressement, un bon redressement signifie que taux est faible.

Effet de la barrière de potentiel de la diode sur V_{SOR} :

La tension à l'entrée doit franchir la barrière de potentiel avant que la diode ne puisse passer en polarisation directe (figure 3.22).

$$V_{\text{crête(SOR)}} = V_{\text{crête(en)}} - 0.7 \text{ V} \quad (3.17)$$

On néglige l'effet de la barrière de potentiel sauf dans le cas où la tension crête d'entrée est beaucoup plus élevée.

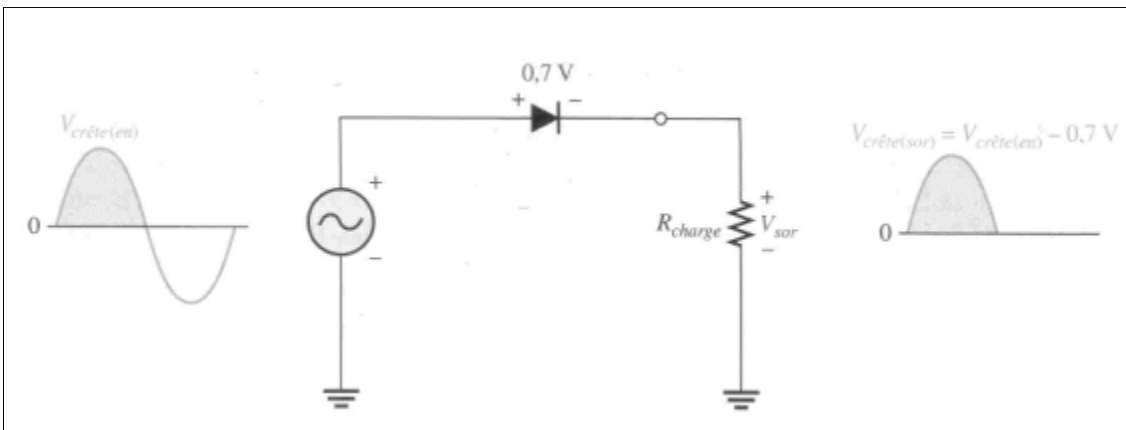


Figure 3.22 : Effet de la barrière de potentiel sur un redressement simple alternance.

3.3.1.2. Redressement double alternance

Le redresseur double alternance fournit un courant unidirectionnel à la charge pendant la durée complète du cycle d'entrée (360°) tandis que le redresseur simple alternance ne le permet que durant la moitié du cycle. (Figure 3.23).

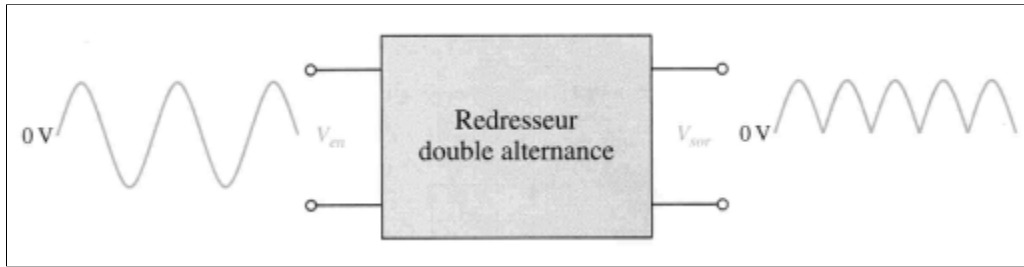


Figure 3.23 : redresseur double alternance.

Le nombre d'alternance positive que fournit le redresseur est le double de celui d'un redresseur simple alternance pour un même intervalle de temps. La valeur moyenne est donc :

$$V_{MOY} = \frac{2V_{crête}}{\pi} \quad (3.18)$$

a. Redressement double alternance à prise médiane

Ce type de redresseur utilise deux diodes branchées au secondaire d'un transformateur à prise médiane. Le signal d'entrée est couplé au secondaire à travers le transformateur. La moitié de la tension du secondaire apparaît entre la prise médiane et chaque coté du bobinage secondaire. Figure 3.24.

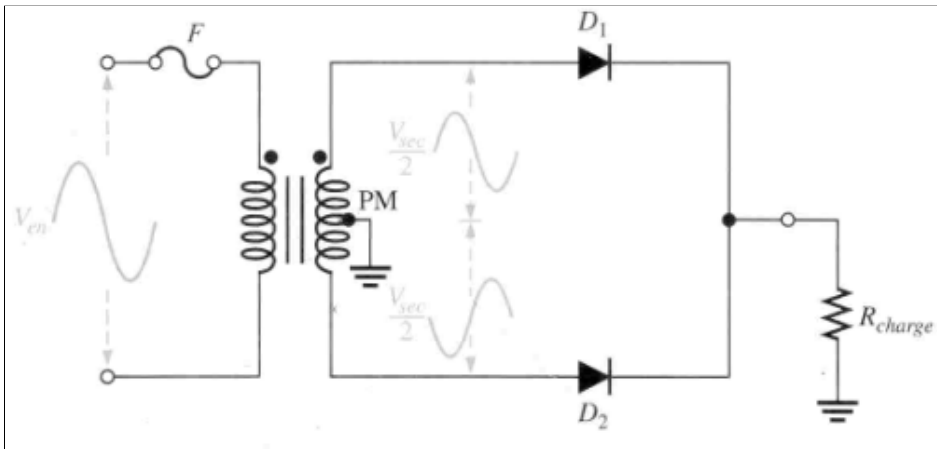


Figure 3.24 : redresseur double alternance à prise médiane.

Les polarités des tensions du secondaire pour un demi-cycle positif de la tension d'entrée sont illustrées à la figure 3.25.a. cette condition applique une polarisation directe sur la diode D_1 et une polarisation inverse sur la diode D_2 . Le courant s'achemine à travers la diode D_1 et la résistance de charge R_{charge} . Pour un demi-cycle négatif de la tension d'entrée, les polarités des tensions du secondaires sont elles qu'illustrées à la figure 3.25.b. cette polarisation applique une polarisation inverse sur D_1 et une polarisation directe sur D_2 . Le courant s'achemine à travers la diode D_2 et la résistance de charge R_{charge} . Puisque le courant traverse la charge dans la même direction durant les deux cycles d'entrées, la tension de sortie produite aux bornes de la charge est une

tension continue redressée double alternance.

Dans tous les cas, la tension de sortie d'un redresseur double alternance à prise médiane est toujours la moitié de la tension du secondaire, moins la perte par la diode, peu importe le rapport de transformation.

$$V_{\text{crête(SOR)}} = \frac{V_{\text{sec}}}{2} - 0.7 \text{ V} \quad (3.19)$$

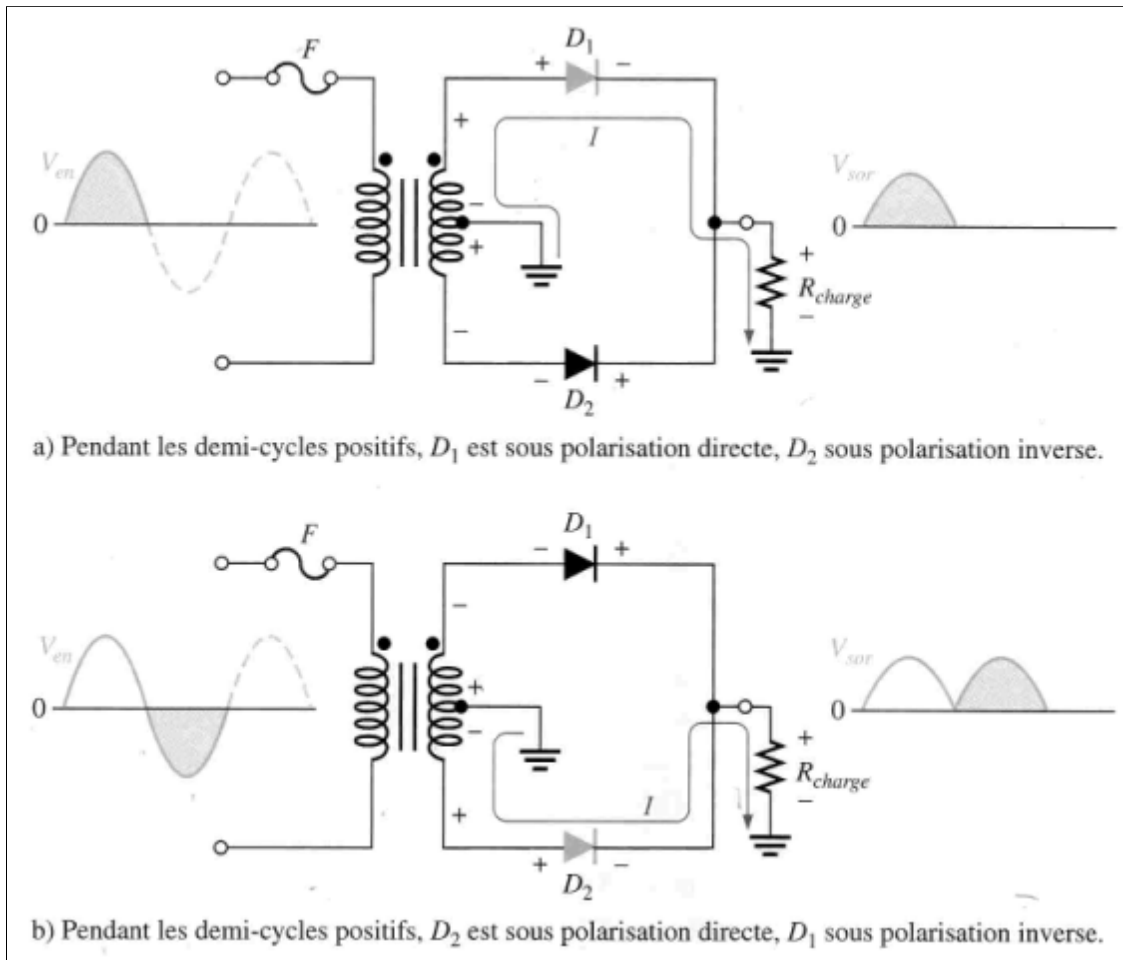


Figure 3.25 : Fonctionnement de base d'un redresseur double alternance à prise médiane.

b. Redressement double alternance en pont

Le redresseur double alternance en pont utilise quatre diodes, tel qu'illustré à la figure 3.26. Lorsque le cycle à l'entrée est positif comme à la partie (a), les diodes D_1 et D_2 sont sous polarisation directe et conduisent le courant dans la direction indiquée, une tension est développée au niveau de R_{charge} . Durant ce temps, les diodes D_3 et D_4 sont sous polarisation inverse.

Lorsque le cycle à l'entrée est négatif comme à la partie (b), les diodes D_3 et D_4 sont sous polarisation directe et conduisent le courant dans la direction indiquée, une tension est développée au niveau de R_{charge} . Durant ce temps, les diodes D_1 et D_2 sont sous

polarisation inverse.

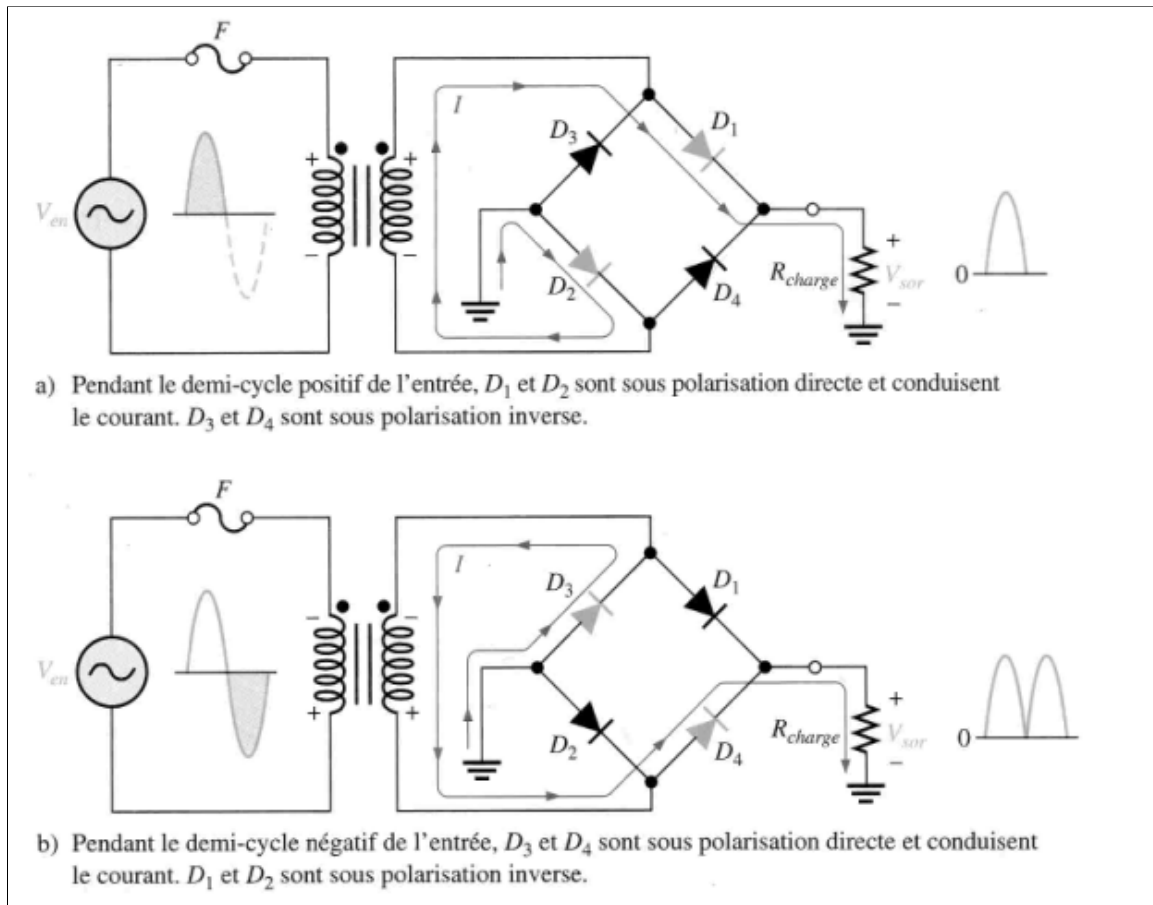


Figure 3.26 : Fonctionnement de base d'un redresseur double alternance en pont.

La tension de sortie d'un pont est (figure 3.27.a) :

$$V_{\text{crête(SOR)}} = V_{\text{crête(sec)}} \quad (3.20)$$

Comme on peut le constater à la figure 3.27.b, les deux diodes sont toujours en série avec la résistance de charge durant les deux demi-cycles positif et négatif. Si les deux chutes de tension aux bornes des diodes sont prises en ligne de compte, la tension de sortie sera :

$$V_{\text{crête(SOR)}} = V_{\text{crête(sec)}} - 1.4 \text{ V} \quad (3.21)$$

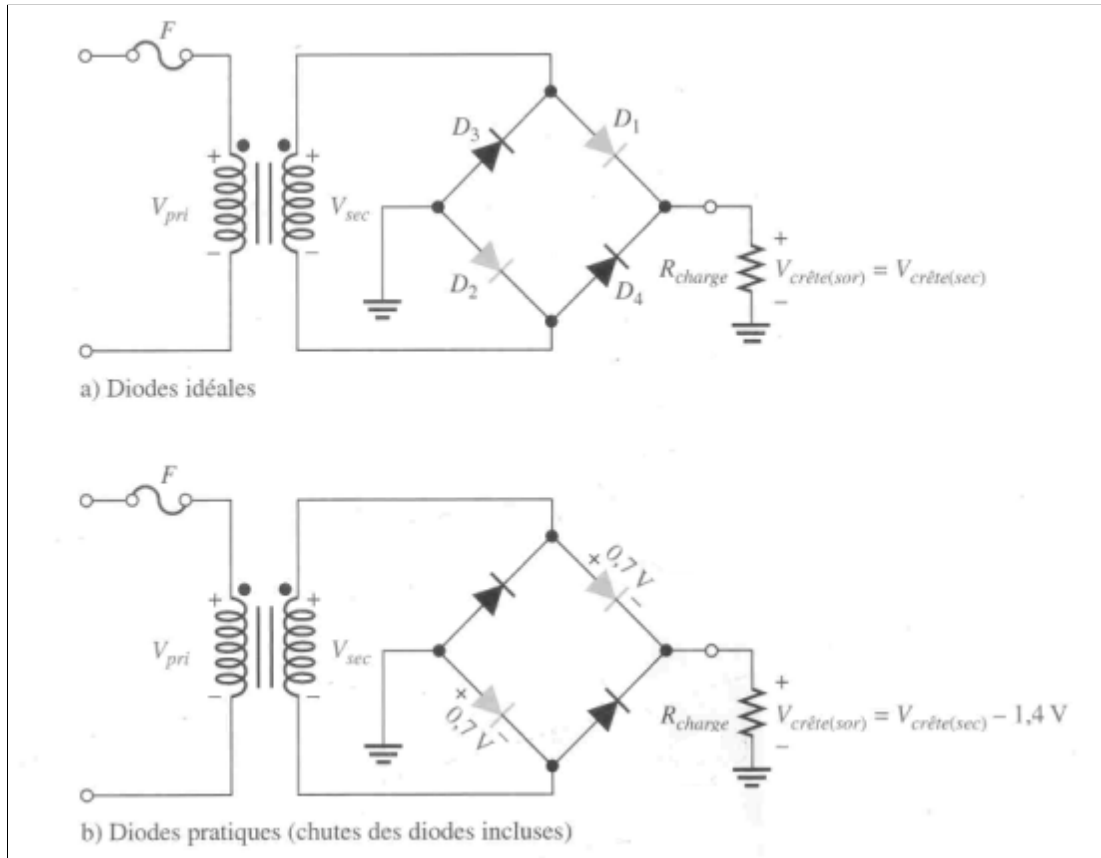


Figure 3.27 : Fonctionnement d'un redresseur double alternance en pont pendant le demi-cycle positif de la tension au secondaire.

Filtre à condensateur

Dans la plupart des blocs d'alimentation, la ligne électrique doit être convertie en une tension continue suffisamment constante. La sortie pulsative d'un redresseur doit être filtrée pour réduire les grandes variations de tension (figure 3.28).

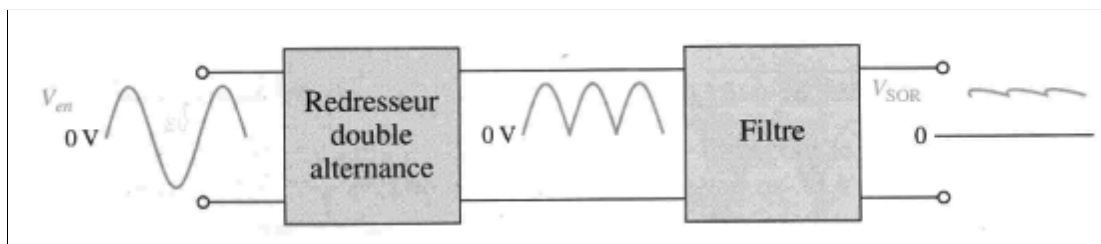


Figure 3.28 : Action d'un filtre de bloc d'alimentation.

La figure 3.29 représente un redresseur simple alternance avec filtre à condensateur. Durant le premier quart de cycle positif, la diode est sous polarisation directe et permet au condensateur de se charger, jusqu'à la valeur crête de l'entrée moins 0.7 V. après avoir atteint la crête, lorsque le signal d'entrée décroît, le condensateur retient sa charge et la diode devient sous polarisation inverse puisque la cathode est plus positive que

son anode. Durant le reste du cycle, le condensateur ne peut pas se décharger qu'à travers la résistance, à une vitesse déterminée par la constante de temps $\tau = R_{\text{charge}} \cdot C$. Plus la constante de temps sera élevée, moins le condensateur se déchargera.

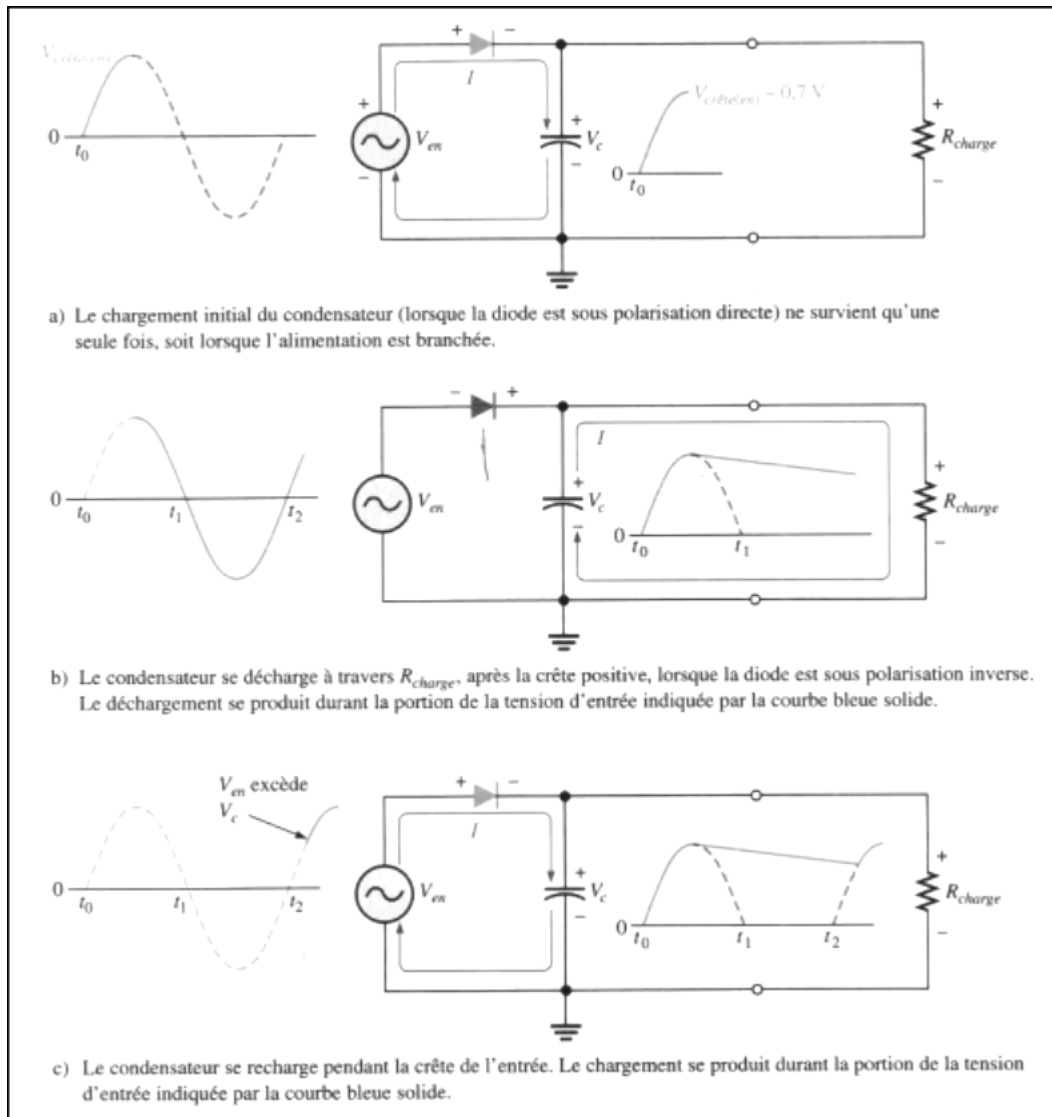


Figure 3.29 : Action d'un redresseur simple alternance muni d'un filtre à condensateur.

Coefficient d'ondulation (r) (pour ripple factor) est une induction de l'efficacité du filtre et est définie par :

$$r = \frac{V_{0(\text{crête-à crête})}}{V_{\text{MOY}}} - 0.7 \text{ V} \quad (3.22)$$

Où la tension $V_{0(\text{crête-à crête})}$ la valeur crête à crête de la tension d'ondulation, et V_{MOY} est la valeur moyenne de la tension de sortie du filtre (figure 3.30).

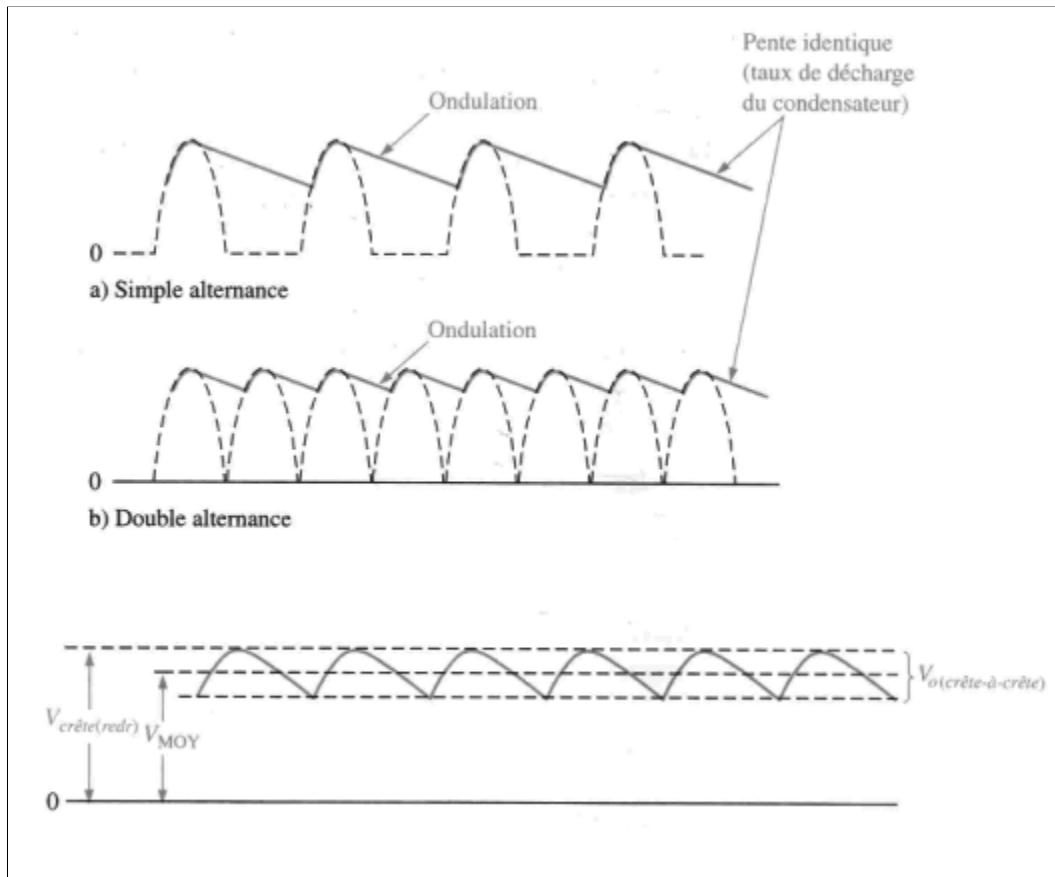


Figure 3.30 : les tensions d'ondulations des deux redresseurs simple et double alternance.

Pour le filtre double alternance, les approximations des deux tensions sont exprimées par les formules suivantes :

$$V_{o(\text{crête-à-crête})} \cong \left(\frac{1}{fR_{\text{charge}}C} \right) V_{\text{crête}(\text{redr})} \quad (3.23)$$

$$V_{\text{MOY}} \cong \left(1 - \frac{1}{2fR_{\text{charge}}C} \right) V_{\text{crête}(\text{redr})} \quad (3.24)$$

Où $V_{\text{crête}(\text{redr})}$ est la valeur crête de la tension redressée.

3.3 .2 Stabilisation de la tension par la diode Zener

La figure 3.31 illustre le symbole schématique de la diode Zener. La diode Zener est un composant à jonction PN au Silicium qui diffère d'une diode de redressement régulière puisqu'elle est conçue pour être opérée en polarisation inverse. La tension de claquage inverse de cette diode est ajustée en contrôlant soigneusement le niveau de dopage lors du procédé de fabrication.

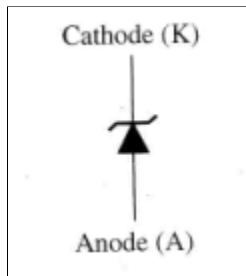


Figure 3.31 : symbole de la diode Zener

Nous avons vu la courbe caractéristique de la diode à jonction. Lorsqu'une diode atteint le claquage inverse, sa tension demeure presque constante bien que le courant puisse varier de façon drastique. A la figure 3.32, avec les régions d'opération normale des diodes de redressements et de la diode Zener en grisé. Si une polarisation directe est appliquée à une diode Zener, elle fonctionne comme une diode de redressement régulière.

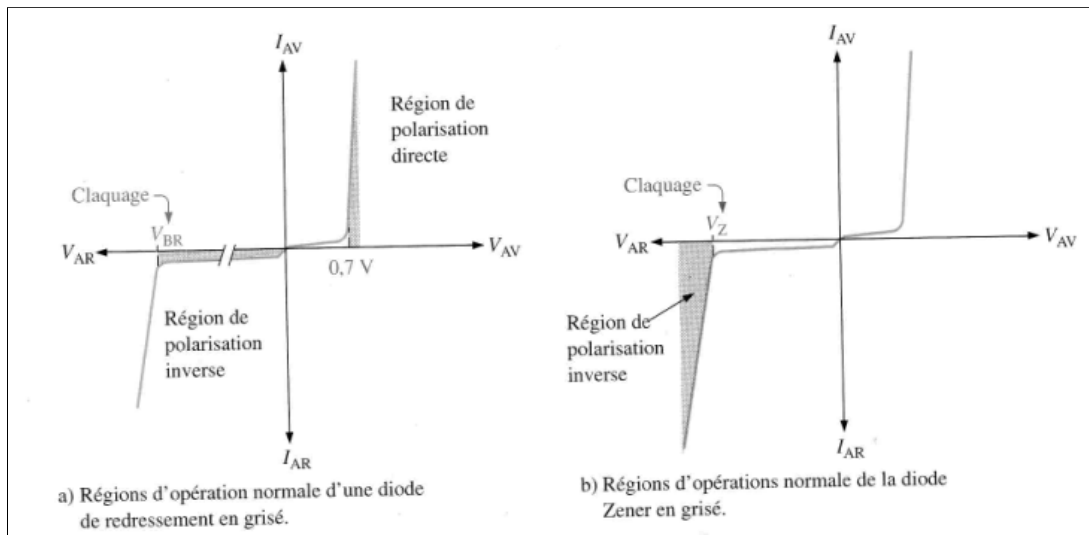


Figure 3.32 : caractéristique générale de la diode.

Les diodes Zener sont conçues pour fonctionner en claquage inverse. Les diodes Zener dont les tensions de claquage sont inférieures à environ 5 V fonctionnent d'une manière prédominante en claquage Zener (région d'appauvrissement très étroite). Celles dans les tensions de claquages sont supérieures à 5 V fonctionnent pour la plupart en claquage avalanche. Toutefois, elles sont toutes les deux disponibles sur le marché pour des tensions variant entre 1.8 V et 200 V avec une tolérance entre 1% et 20%.

Caractéristique de claquage

La figure 3.33 montre la portion inverse de la courbe caractéristique d'une diode Zener. Remarquez qu'à mesure que la tension inverse (V_{AR}) est augmentée, le courant inverse (I_{AR}) demeure infime jusqu'au genou de la courbe. Le courant inverse est également

appelé le courant Zener I_Z . À ce point l'effet de claquage commence : la résistance interne Zener (R_Z) aussi appelée Z_Z commence à diminuer à mesure que le courant Zener augmente rapidement. Au bas de ce genou, la tension de claquage Zener demeure essentiellement constante à mesure que le courant Zener augmente.

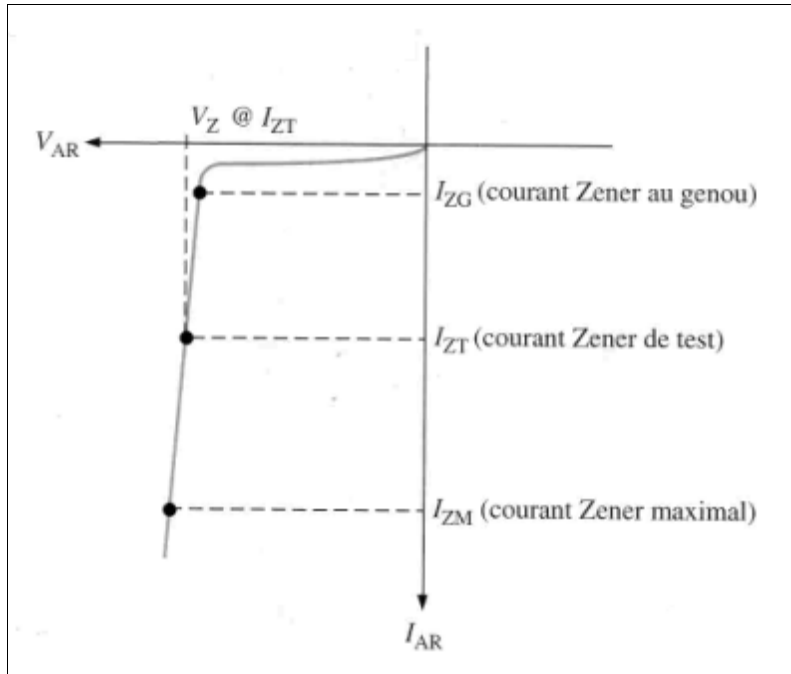


Figure 3.33 : caractéristique inverse de la diode Zener.

Régulation Zener

La caractéristique principale de la diode Zener est son habileté à garder une tension essentiellement constante à ses bornes. Une diode Zener opérant en claquage inverse agit comme un régulateur de tension parce qu'elle maintient une tension presque constante à ses bornes pour une échelle spécifique de valeurs en courant inverse.

Une valeur minimale de courant inverse I_{ZG} , doit être maintenue afin de garder la diode en claquage pour qu'elle effectue la régulation de tension. A la figure 3.33, la courbe illustre une diminution de tension de façon drastique lorsque le courant inverse est réduit au-dessous du genou de la courbe et que l'action de régulation est perdue. Il faut également s'assurer de ne pas dépasser la valeur maximale de courant I_{ZM} , pour ne pas endommager la diode.

Donc, la diode Zener pourra maintenir une tension à peu près constante à ces bornes pour les valeurs de courant inverse comprises entre I_{ZG} et I_{ZM} .

Circuit équivalent Zener

La figure 3.34.a illustre la modèle idéal d'une diode Zener en claquage inverse. La figure 3.34.b représente le modèle pratique où l'on y inclut l'impédance Zener.

$$Z_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z} \quad (3.25)$$

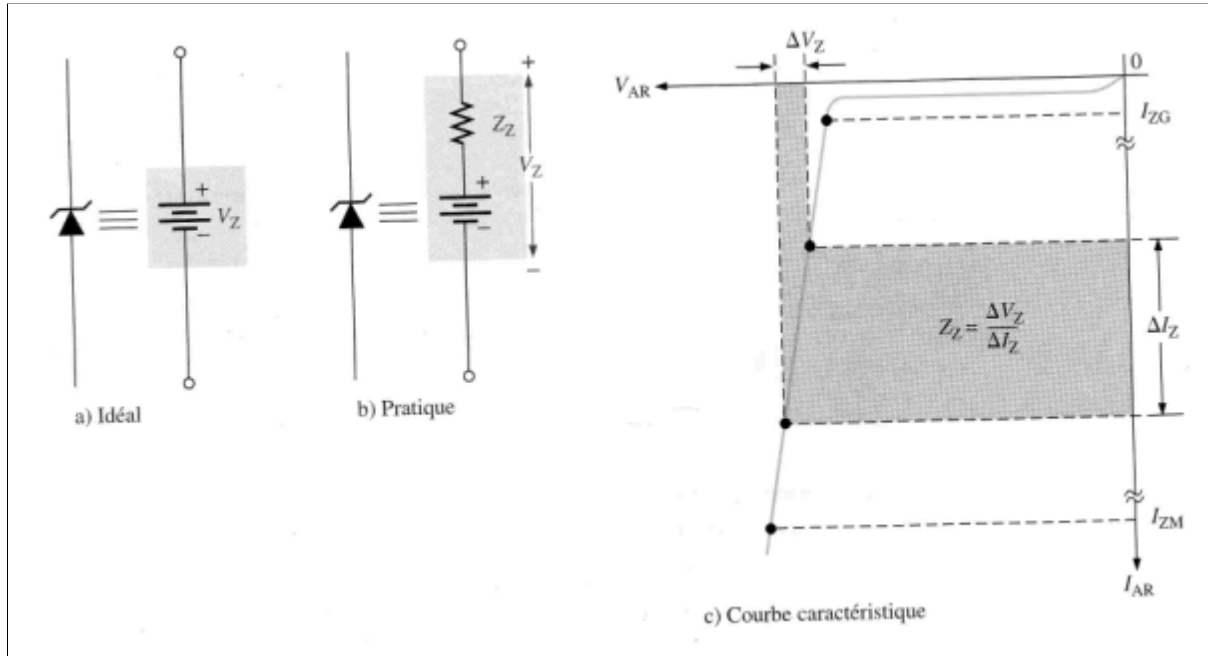


Figure 3.34 : Modèles de circuits équivalents à diode Zener et courbe caractéristique illustrant Z_Z .

Régulation diode Zener avec tension d'entrée variable

Les diodes Zener sont largement utilisées pour la régulation de tension, elle peut être utilisée pour la régulation d'une tension c.c. variable et maintenir cette dernière à un niveau constant. Ce procédé est appelé régulation de ligne ou d'entrée. Cependant lorsque V_{EN} varie, I_Z varie aussi proportionnellement. Ainsi les limites de la variation à l'entrée sont déterminées par les valeurs de courant minimale et maximale (I_{ZG} et I_{ZM}) avec lesquelles la diode peut fonctionner. La résistance R limite le courant.

Par exemple, supposons que la diode Zener 1N4740 de 10 V à la figure 3.35 peut maintenir la régulation pour une échelle de valeurs de courant Zener comprise entre $I_{ZG} = 0.25$ mA et $I_{ZM} = 100$ mA.

Pour le courant Zener minimal, la tension aux bornes de la résistance de 220Ω est :

$$I_{ZM} = \frac{P_{D(max)}}{V_Z} = \frac{1 \text{ W}}{10 \text{ V}} = 100 \text{ mA} \quad (3.26)$$

$$V_R = I_{ZG} R = (0.25 \text{ mA})(220 \Omega) = 55 \text{ mV} \quad (3.27)$$

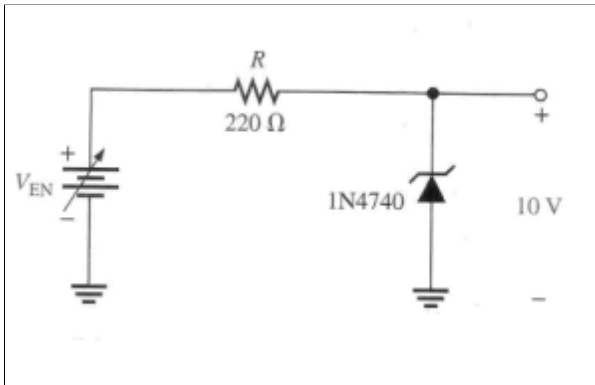


Figure 3.35 : Exemple de régulation Zener d'une tension d'entrée variable.

Régulation diode Zener avec charge variable

La figure 3.36 illustre un régulateur Zener avec une charge variable aux bornes de la sortie. La diode maintient une tension constante aux bornes de R_{charge} aussi longtemps que le courant Zener est supérieur à I_{ZG} et inférieur à I_{ZM} . Ce procédé est appelé régulation de charge.

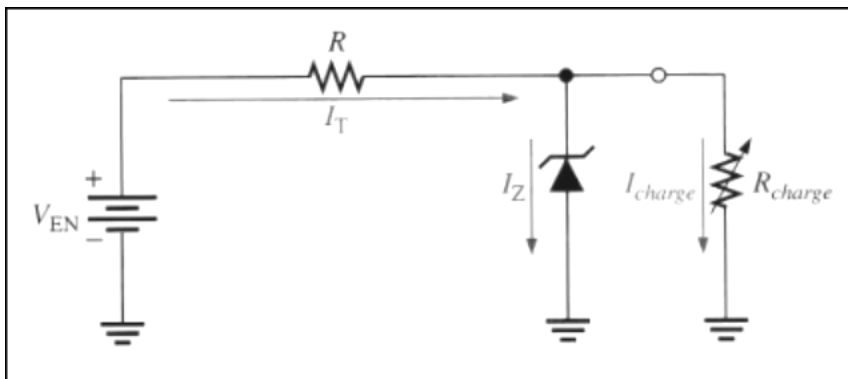


Figure 3.36 : Exemple de régulation Zener d'une charge variable.

$$I_{Z(max)} = I_T = \frac{V_{EN} - V_Z}{R} \quad (3.28)$$

$$I_{charge(max)} = I_T - I_{ZG} \quad (3.29)$$

$$R_{charge(min)} = \frac{V_Z}{I_{charge(max)}} \quad (3.30)$$

Limiteur Zener

Les diodes Zener peuvent être utilisées dans des applications c.a. pour limiter les ondulations de la tension à des niveaux désirés. La figure 3.37 illustre trois exemples d'utilisation de base de la diode Zener comme limiteur. La partie (a) illustre une diode

Zener utilisée pour limiter la crête positive d'un signal à une tension Zener choisie. Durant l'alternance négative, la diode Zener agit comme une diode en polarisation directe et limite la tension négative à -0.7 V . à la partie (b) la crête négative est limitée par l'action de la diode Zener et la tension positive est limitée à $+0.7\text{ V}$. à la partie (c), deux diodes Zener dos à dos limitent les deux crêtes à la tension Zener $\pm 0.7\text{ V}$. durant l'alternance négative D_2 fonctionne comme un limiteur et D_1 fonctionne comme une diode sous polarisation directe. Les rôles sont inversés durant l'alternance négative.

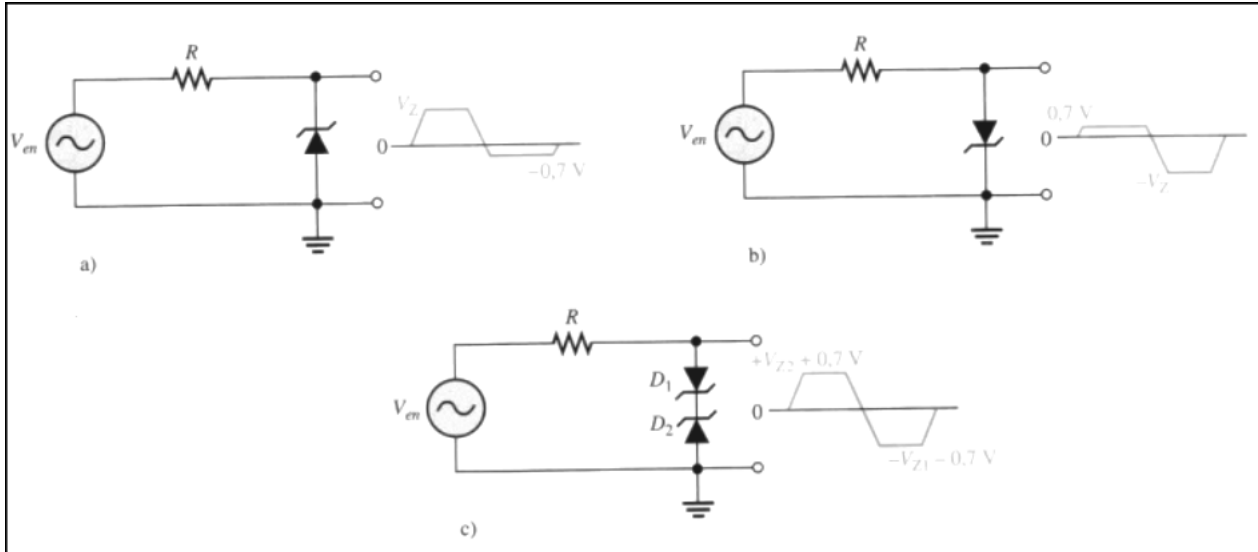


Figure 3.37 : Action de base de la diode Zener comme limiteur sur une tension d'entrée sinusoïdale.

3.3.3 Ecrêtage

La figure 3.38.a illustre un écrêteur aussi appelé limiteur qui écrête ou limite la portion positive du signal d'entrée. Comme le signal d'entrées devient positif, la diode est sous polarisation directe. Lorsque la tension d'entrée revient sous 0.7 V , la diode passe en polarisation inverse et apparait comme un circuit ouvert. La sortie devient alors identique à la tension d'entrée, mais d'une magnitude déterminée par le diviseur de tension formé par R_1 et la résistance de charge R_{charge} , comme suit :

$$V_{\text{SOR}} = \left(\frac{R_{\text{charge}}}{R_{\text{charge}} + R_1} \right) V_{\text{en}} \quad (3.31)$$

Si R_1 est faible comparativement à R_{charge} alors $V_{\text{SOR}} = V_{\text{en}}$

Pivotons la diode, comme à la figure 3.38.b. la partie négative du signal d'entrée est alors coupée. Lorsque la diode est sous polarisation directe, durant la partie négative du signal d'entrée, la tension au point A est maintenue à -0.7 V par la perte de la diode. Lorsque le signal d'entrée excède -0.7 V , la diode n'est plus en polarisation directe et une tension proportionnelle au signal d'entrée apparait à R_{charge} .

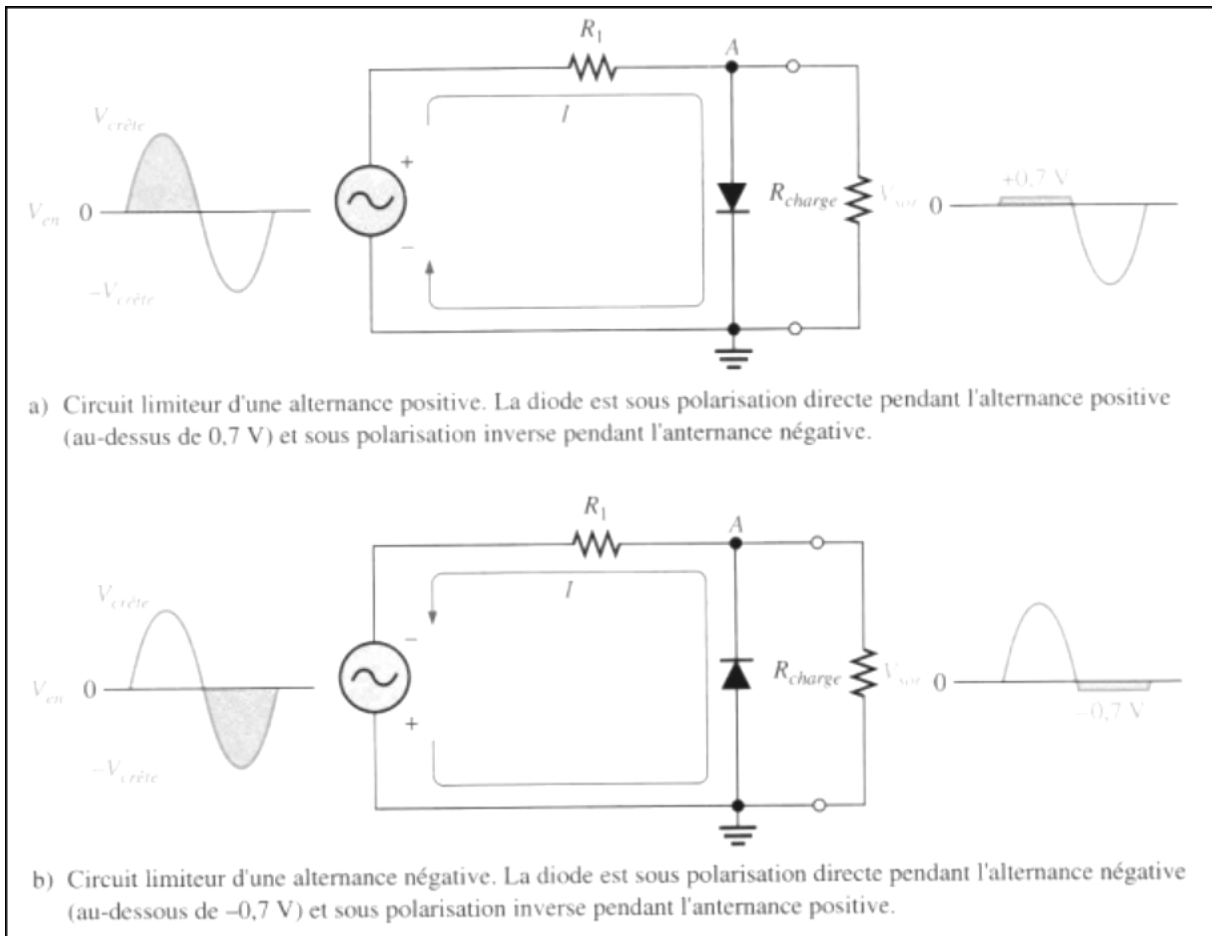


Figure 3.38 : Exemples de circuits limiteurs à diode.

Limiteurs polarisés

On peut ajuster le niveau auquel une tension c.a. sera limitée en ajoutant une tension de polarisation, V_{POL} , en série avec la diode, comme l'illustre la figure 3.39.

Si la tension de polarisation est augmentée ou diminuée, le niveau limiteur change également (figure 3.40).

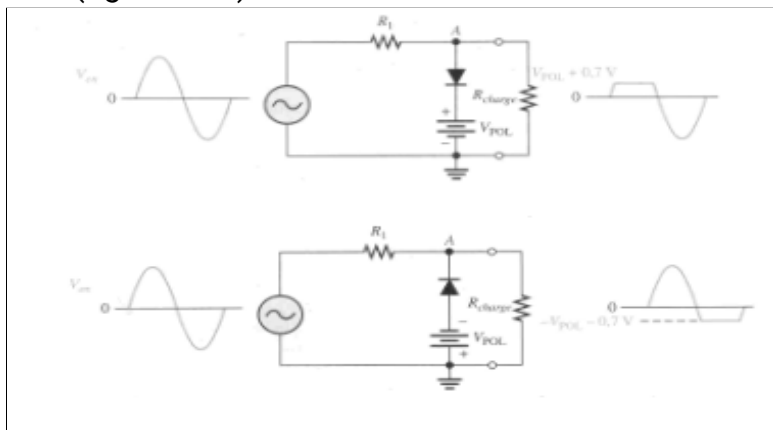


Figure 3.39 : Un circuit limiteur en polarisation positif et négatif.

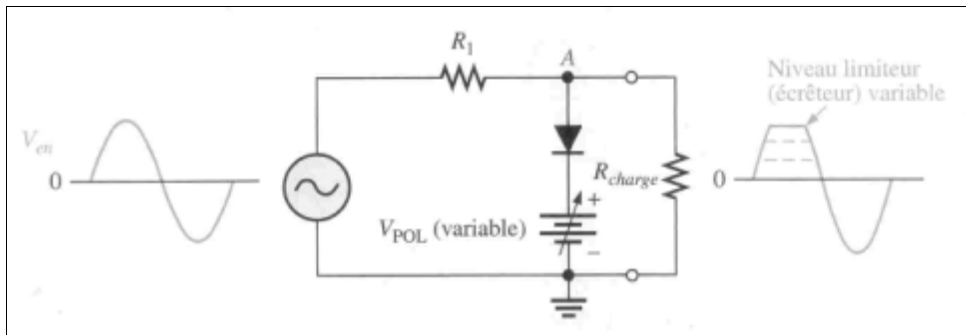


Figure 3.40 : Un limiteur positif a polarisation variable.

En pivotant la diode, le limiteur positif peut être modifié afin de limiter la tension de sortie à la portion du signal d'entrée se trouvent au-dessus de $V_{POL} - 0.7 \text{ V}$, telles qu'illustrées par les formes d'onde à la figure 3.41.a. De façon similaire, le limiteur négatif peut être modifié afin de limiter la tension de sortie à la portion du signal d'entrée se trouvent sous $-V_{BIAS} + 0.7 \text{ V}$. telles qu'illustrées par les formes d'onde à la figure 3.41.b.

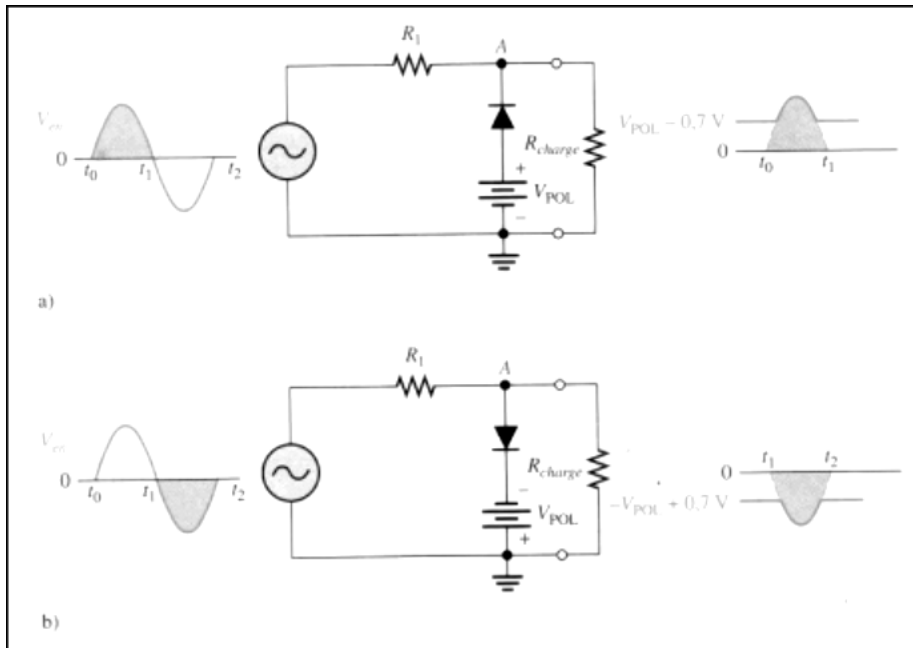


Figure 3.41 : Un limiteur a polarisation.

3.3 .4 Multiplicateur de tension

Les multiplicateurs de tension utilise la technique de fixation de niveau afin d'accroître les tensions crêtes redressées plutôt que d'augmenter la tension à l'entrée du transformateur. Les facteurs de multiplications de deux, trois ou quatre sont les plus communs, dans cette partie nous étudierons les doubleurs de tensions. Les multiplicateurs de tension sont utilisés dans les applications à haute tension et à faible courant comme les récepteurs de télévision.

Doubleurs de tension

Doubleur de tension simple alternance

Un Doubleur de tension simple alternance est illustré à la figure 3.42. Durant le demi-cycle positif de la tension au secondaire, la diode D_1 est sous polarisation directe et D_2 sous polarisation inverse. Le condensateur C_1 est chargé à la valeur crête de la tension du secondaire moins la perte par la diode. Durant le demi-cycle négatif, la diode D_2 est sous polarisation directe et D_1 sous polarisation inverse. Puisque C_1 ne peut pas se décharger, la valeur crête de la tension aux bornes de C_1 s'ajoute à la tension du secondaire afin de charger C_2 à environ $2V_{\text{crête}}$, la tension aux bornes de C_2 est :

$$V_{C_1} - V_{C_2} + V_{\text{crête}} = 0 \rightarrow V_{C_2} = V_{C_1} + V_{\text{crête}} \quad (3.32)$$

Si on néglige la chute de tension aux bornes de D_2 , $V_{C_1} = V_{\text{crête}}$. Par conséquent,

$$V_{C_2} = V_{\text{crête}} + V_{\text{crête}} = 2 V_{\text{crête}} \quad (3.33)$$

Sans résistance de charge, C_2 reste chargé à environ $2V_{\text{crête}}$. Si une résistance de charge est branchée à la sortie, C_2 se décharge lentement à travers elle pendant le prochain demi-cycle positif et est ensuite rechargé à la valeur de $2V_{\text{crête}}$ pendant le demi-cycle négatif suivant. La sortie résultante est une demi-onde de tension filtrée par condensateur. La tension inverse de crête de chaque diode est de $2V_{\text{crête}}$.

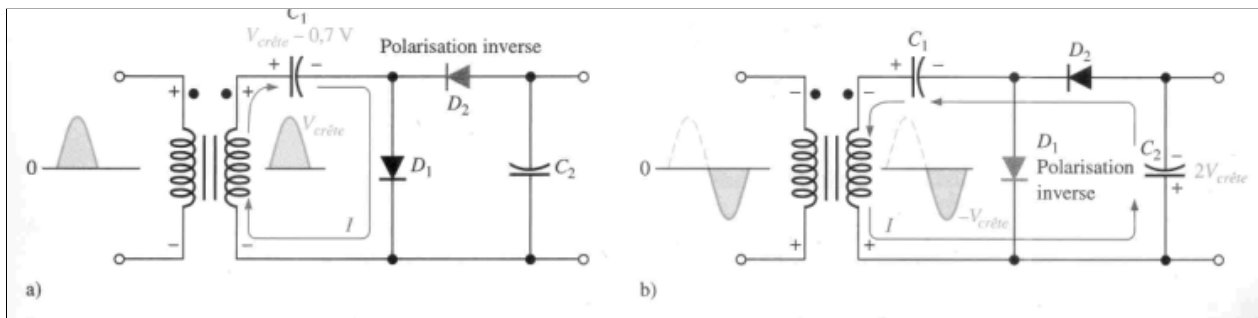


Figure 3.42 : Doubleur de tension simple alternance.

Doubleur de tension double alternance

Un doubleur pleine alternance est illustré à la figure 3.43. Lorsque la tension du secondaire est positive, D_1 est sous polarisation directe et C_1 se charge à environ $V_{\text{crête}}$ (figure 2.43.a). Durant le demi-cycle négatif, D_2 est sous polarisation directe et C_2 se charge à environ $V_{\text{crête}}$ comme à la partie (b). la tension de sortie, $2 V_{\text{crête}}$ est recueillie aux bornes des deux condensateurs en série.

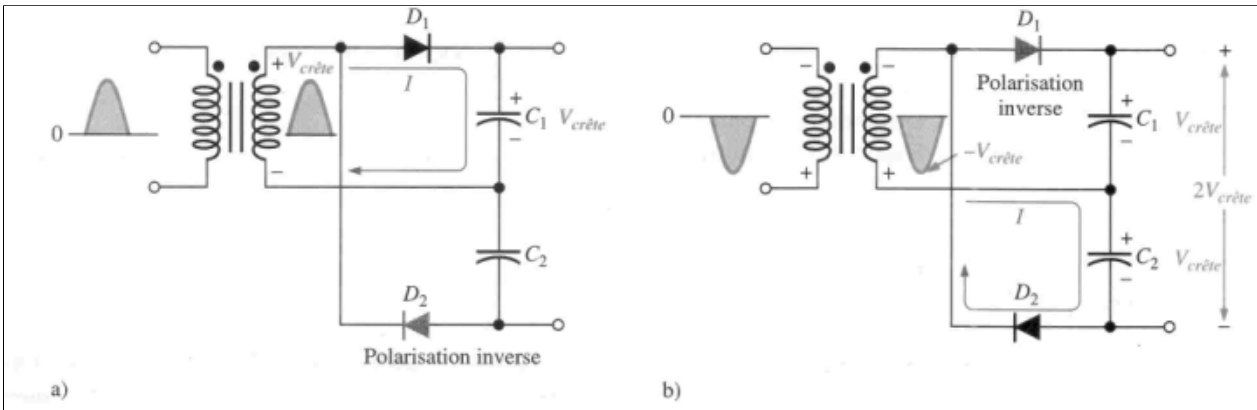


Figure 3.43 : Doubleur de tension double alternance.