

## **CHAPITRE 2 : LA JONCTION PN**

### **1. DEFINITION**

La jonction PN est une jonction métallurgique formée par la juxtaposition d'un semiconducteur (SC) dopé type P et d'un semiconducteur dopé type N, les deux proviennent du même semi-conducteur. Lorsque ces deux types de semi-conducteurs sont mis en contact, un régime électrique transitoire s'établit de part et d'autre de la jonction (les porteurs majoritaires de la région de forte concentration vont diffuser vers la région de faible concentration. Donc, les trous de la région P vont diffuser vers la région N en laissant derrière eux des charges négatives et les électrons de la région N vont diffuser vers la région P en laissant derrière eux des charges positives), suivi d'un régime permanent (la recombinaison des électrons avec les trous dans chaque région crée des ions fixes ionisés positivement ou négativement). A la fin du processus de diffusion-recombinaison des porteurs de charges, un équilibre permanent est établi et une zone pauvre en porteurs libres appelée la zone de charge d'espace (ZCE) va créer et il va apparaître une différence de potentiel appelée la tension de diffusion VD qui va provoquer l'apparition d'un champ électrique interne intense E qui va s'opposer le mouvement des porteurs majoritaires.

## 2. TYPES DE LA JONCTION

Il y a trois types de jonction

La jonction graduelle : dans ce type de jonction la densité de charge est une fonction dépendante de  $x$  autour de la région de contacte. C'est-à-dire  $\rho$  varie linéairement en fonction de  $x$  (voir Fig 16)

La jonction exponentielle (plus réel) : la densité de charge varie exponentiellement en fonction de  $x$

La jonction abrupte (le cas idéal) : dans ce type de jonction, le dopage est constant. C'est-à-dire, la densité de charge  $\rho$  passe d'une manière brutale à  $x = 0$  d'une valeur négative dans la région dopée type P à une valeur positive dans la région dopée type N.

Dans ce cours nous allons étudier la jonction PN abrupte qui consiste à la mise en contact de deux SC du silicium de type différent

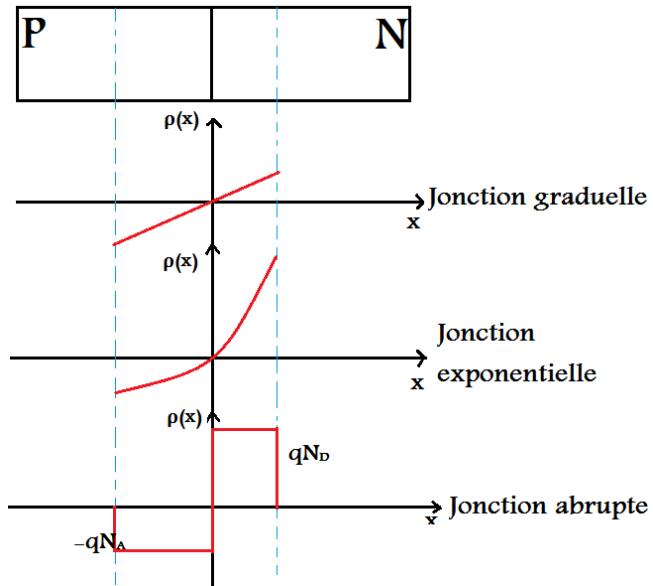


Fig 16 : Les types de jonction PN

### 3. ETUDE DE LA JONCTION PN

Lorsqu'on met en contact deux SC de dopage différent et en absence de polarisation extérieure, les porteurs majoritaires de la région de forte concentration vont diffuser vers la région de faible concentration. Donc, les trous majoritaires dans le côté P vont diffuser vers le côté N où leur concentration est faible en laissant derrière eux des charges négatives. De même pour les électrons majoritaires dans le côté N qui vont diffuser vers le côté P où leur concentration est faible en laissant derrière eux des charges positives. A la fin du processus de diffusion-recombinaison des porteurs de charges, un équilibre permanent est établi et une zone pauvre en porteurs libres appelée la zone de charge d'espace ZCE va créer et il va apparaître une différence de potentiel appelée la tension de diffusion  $V_D$  qui va provoquer l'apparition d'un champ électrique interne intense  $E$  qui va s'opposer le mouvement des porteurs majoritaires.

A l'équilibre thermodynamique le bilan des courants est nul donc le courant de diffusion des porteurs majoritaires  $I$  qui est équivalent à l'énergie suffisante pour sauter la hauteur de barrière = courant de diffusion des porteurs minoritaires  $i$  appelé aussi courant de saturation  $I_s$

Afin de décrire le comportement d'un SC, nous devons étudier la jonction PN à l'équilibre et hors équilibre thermodynamique

### 3.1. ETUDE D'UNE JONCTION ABRUPTE NON POLARISEE

#### A. Diagramme de bandes à l'équilibre

La figure suivante montre qu'à l'équilibre thermique dans un semi-conducteur non polarisé les niveaux de Fermi  $E_{Fp}$  et  $E_{Fn}$  associés aux côtés P et N respectivement restent alignés parce que le niveau de fermi reste constant dans toute la structure.

L'écart d'énergie  $\Delta E$  entre les bords de bandes est dû à la tension de diffusion  $V_D$

$$\Delta E = kT \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

On sait que la variation d'énergie potentielle  $\Delta E$  d'un électron soumis à une différence de potentiel  $\Delta V$  est telle que :  $\Delta E = -q\Delta V$

Donc, la différence de potentiel interne qui est correspond à la hauteur de barrière de

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

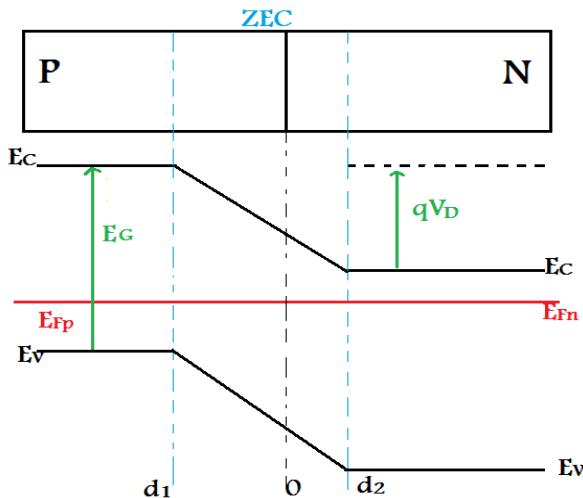


Fig 17 : Schéma de bandes de la jonction PN en court-circuit

#### B. Calcule de la charge d'espace $\rho(x)$ et la largeur de la ZCE

D'après l'équation de Poisson

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho(x)}{\epsilon} = \frac{q}{\epsilon} (p - n + N_D^+ - N_A^-)$$

Avec  $\rho$  la densité de charge.

$\epsilon$  la permittivité du semi-conducteur

Pour résoudre cette équation, nous supposons que la charge présente dans le semi-conducteur est seulement due à une distribution homogène d'impuretés. La concentration en porteurs de charges libres est donc négligeable devant ND et NA.

### **Hypothèse de Shockley**

La jonction PN est divisée en deux parties la partie côté P et la partie côté N

- **Côté P :** constitue deux régions

La région quasi neutre où  $x < -d_1$

La zone ZCE côté P où  $0 \leq x < -d_1$

- **Côté N :** constitue deux régions

La région quasi neutre où  $x > d_2$

La zone ZCE côté P où  $0 \leq x < d_2$

Schokley s'intéresse à la densité de charge  $\rho(x)$  tout au long de la jonction. Il suppose que la densité de charge est constante dans les deux régions de la zone de déplétion et égale à :

$$\rho(x) = \begin{cases} 0 & x \leq -d_1 \\ -qN_A & \text{Pour } -d_1 < x \leq 0 \\ qN_D & 0 \leq x < +d_2 \\ 0 & x \geq d_2 \end{cases}$$

A l'extérieur de la ZEC, chaque élément de volume est électriquement neutre. Dans la

ZCE, la charge côté N égale à la charge côté P  $N_A d_1 = N_D d_2 \Rightarrow d_1 = d_2 \frac{N_D}{N_A}$

$$\Rightarrow \begin{cases} d_1 = \frac{N_D}{N_A + N_D} d_T \\ d_2 = \frac{N_A}{N_A + N_D} d_T \end{cases} \text{ Avec la largeur de la ZCE } d_T = d_1 + d_2$$

Si  $N_D \gg N_A \Rightarrow d_2$  va être négligeable devant  $d_1$

### **C. Calcul du champ électrique E**

Pour déterminer le champ électrique créé dans chaque région il faut intégrer l'équation de Poisson  $\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho(x)}{\epsilon}$  et on aura :

$$E = \begin{cases} 0 & x \leq -d_1 \\ -\frac{qN_A}{\varepsilon}(x + d_1) & -d_1 < x \leq 0 \\ \frac{qN_D}{\varepsilon}(x - d_2) & 0 \leq x < +d_2 \\ 0 & x \geq d_2 \end{cases}$$

Au point  $x=0$ , la continuité du champ électrique impose que :  $\frac{qN_A}{\varepsilon}d_1 = \frac{qN_D}{\varepsilon}d_2$  donc

$$E = \frac{qN_A}{\varepsilon}d_1 = \frac{qN_A}{\varepsilon} \frac{N_D}{N_A + N_D} d_T \Rightarrow |E_m| = \frac{q}{\varepsilon} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} d_T$$

#### D. Le potentiel électrique

L'intégration de champ électrique  $E$  nous donne la formule du potentiel électrique créé dans la jonction, en tenant compte les conditions suivantes :

$V$  continu en  $x=0$   $V=V_s$

$$\left. \begin{array}{l} V(d_2) = V_n \\ V(-d_1) = V_p \end{array} \right\} V_n - V_p = V_D$$

➤ Si  $x \leq -d_1$ ,  $V = cte = V(-d_1)$

$$\text{➤ Si } -d_1 < x \leq 0, E(x) = -\frac{dV}{dx} \Rightarrow \int_{V_p}^{V(x)} dV = - \int_{-d_1}^x E(x) dx$$

$$V_p(x) = \frac{qN_A}{2\varepsilon}x^2 + \frac{qN_A}{\varepsilon}xd_1 + V_s$$

$$\text{D'où } V_s - V_p = \frac{1}{2}|E_m|d_1$$

➤ Si  $0 \leq x < d_2$ ,

$$V_n(x) = -\frac{qN_D}{2\varepsilon}x^2 + \frac{qN_D}{\varepsilon}xd_2 + V_s$$

$$\text{D'où } V_n - V_s = \frac{1}{2}|E_m|d_2$$

➤ Si  $x \geq d_2$ ,  $V = cte = V(d_2)$

➤ Au point  $x=0$ , la continuité du potentiel impose que

$$V_D = V_n - V_p = \frac{qN_A}{2\varepsilon}(d_1)^2 + \frac{qN_D}{2\varepsilon}(d_2)^2 = \frac{q}{\varepsilon}(N_A d_1^2 + N_D d_2^2)$$

$$V_D = \frac{q}{\varepsilon}(N_A d_1^2 + N_D d_2^2)$$

On peut écrire aussi  $V_D = V_n - V_p = \frac{1}{2} |E_m| (d_1 + d_2) = \frac{1}{2} |E_m| d_T$

$$\text{Donc } d_T = \frac{2}{|E|} V_D$$

### E. La tension de diffusion

Soient :

$n_n$  la densité des électrons dans la zone N

$p_n$  la densité des trous dans la zone N

$n_p$  la densité des électrons dans la zone P

$p_p$  la densité des trous dans la zone P

A l'équilibre, les densités de courants d'électrons et de trous sont nulles

$$\left. \begin{array}{l} J_n = qn\mu_n E + qD_n \vec{grad}n = 0 \\ J_p = qp\mu_p E + qD_p \vec{grad}p = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow E = -\frac{dV}{dx} = -\frac{D_n}{\mu_n} \frac{1}{n} \frac{dn}{dx} = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx}$$

$$\Rightarrow dV = \frac{D_n}{\mu_n} \frac{dn}{n}$$

$$\Rightarrow \frac{dn}{n} = \frac{dV}{V_t}$$

[D'après la relation d'Einstein  $\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} \Rightarrow D_n = V_t \mu_n$  (la tension=énergie/charge)]

En intégrant cette dernière relation dans la ZCE et on obtient

$$V_D = V_n - V_p = V_t \log \frac{n_n}{n_p} = V_t \log \frac{p_p}{p_n}$$

$$V_D = V_t \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

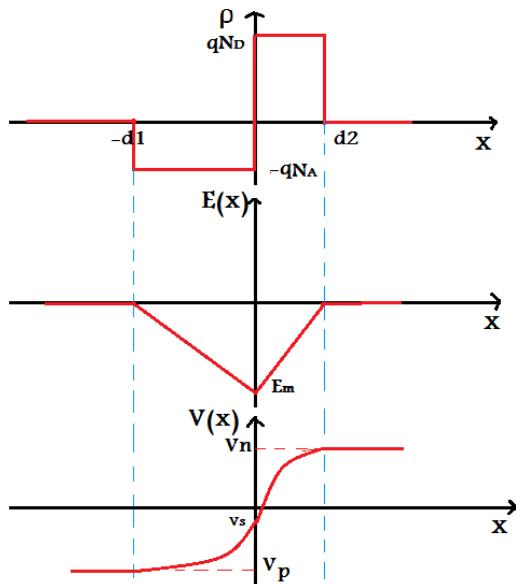


Fig 18 : Variation de densité de charge, champ électrique et le potentiel électrique le long de la ZCE

### 3.2. ETUDE D'UNE JONCTION POLARISEE EN DIRECT

A l'équilibre, le potentiel créé par la diffusion des porteurs de charges majoritaires va jouer le rôle d'une barrière qui va empêcher la circulation de courant

Pour assurer une bonne circulation de courant à travers la jonction PN, il faut fournir une énergie externe qui peut être électrique ou thermique pour vaincre cette barrière. Comme on travaille généralement à des températures ambiantes, on verra que l'énergie externe fournie est de type électrique.

L'application d'une polarisation extérieure est supposée comme si cette tension est appliquée uniquement aux bornes de la ZCE. Cette tension ne modifie pas la concentration des porteurs majoritaires dans les deux régions quasi neutre y compris les deux points  $-d_1$  et  $d_2$ .

Si on applique à la jonction une tension extérieure  $V_{ex}$  de telle manière à ce que la polarisation soit direct (lier P au pôle positif et N au pôle négatif), cette tension va s'opposer à  $V_D$  de façon à former une nouvelle barrière  $V_D - V_{ex}$  inférieure à la précédente  $V_D$ . La tension externe  $V_{ex}$  va créer un champ électrique externe  $E_{ex}$  dans le sens opposé du champ interne  $E$ . Dans ces conditions on peut envisager deux cas :

Si  $V_{ex} \prec V_D$  l'énergie résultante  $V_{seuil} = V_D - V_{ex}$  ne peut pas surmonter la barrière de potentiel et fournir le courant

Si  $V_{ex} > V_D$  L'alimentation externe permet de créer un champ électrique qui va compenser le champ électrique interne et au vu de son amplitude va permettre le renforcement de la diffusion des trous de la région P vers la région N et des électrons de la région N vers la région P Dans ce cas, on aura une véritable conduction et circulation du courant.

Le courant crée par les porteurs minoritaires (courant de saturation) s'écrit :  $I_s = I_0 e^{\frac{-qV_D}{kT}}$

Le courant crée par les porteurs majoritaires s'écrit :

$$I = I_0 e^{\frac{-q(V_D - V_{ex})}{kT}} = I_s e^{\frac{qV_{ex}}{kT}} \succcurlyeq I_s$$

Le courant direct est  $I_D = I - I_s = I_s (e^{\frac{qV_{ex}}{kT}} - 1) \approx I_s e^{\frac{qV_{ex}}{kT}}$

Alors, le courant  $I_D$  résulte du déplacement des porteurs majoritaires

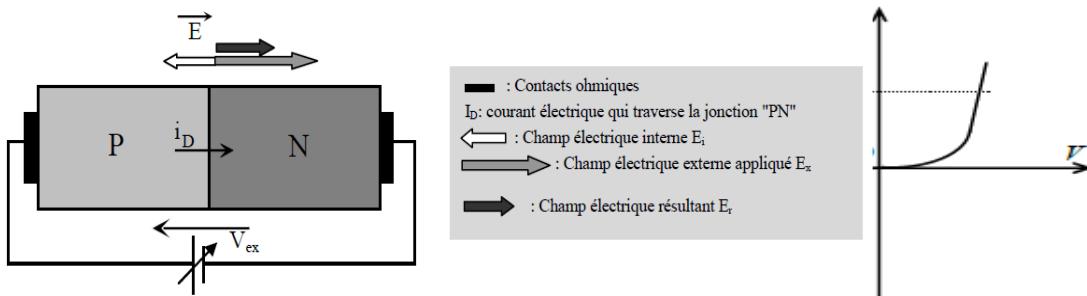


Fig 19 : Polarisation direct de la jonction PN et la courbe  $I(V)$

### 3.3. ETUDE D'UNE JONCTION POLARISEE EN INVERSE

Les polarités de l'alimentation dans la polarisation inverse sont inversées (le pôle positif est relié à la région N et le pôle négatif est relié à la région P). Le champ électrique externe renforce l'action du champ interne et la barrière augmente et devient  $V_D + V_{ex}$  et donc le passage des majoritaires va fortement réduire. De ce fait les électrons et les trous ne peuvent plus diffuser d'un côté à un autre et il n'y aura aucune circulation de courant.

Le courant crée par les porteurs minoritaires s'écrit :  $I_s = I_0 e^{\frac{-qV_D}{kT}}$

Le courant crée par les porteurs majoritaires s'écrit :

$$I = I_0 e^{\frac{-q(V_D + V_{ex})}{kT}} = I_s e^{\frac{-qV_{ex}}{kT}} \prec I_s$$

$$\text{Le courant direct est } I_{inv} = I - I_S = I_S \left(1 - e^{\frac{-qV_{ex}}{kT}}\right) \approx I_S$$

Alors, le courant  $I_{inv}$  résulte du déplacement des porteurs minoritaires. L'intensité de ce courant est très faible, il est de l'ordre de quelques pA à quelques nA.

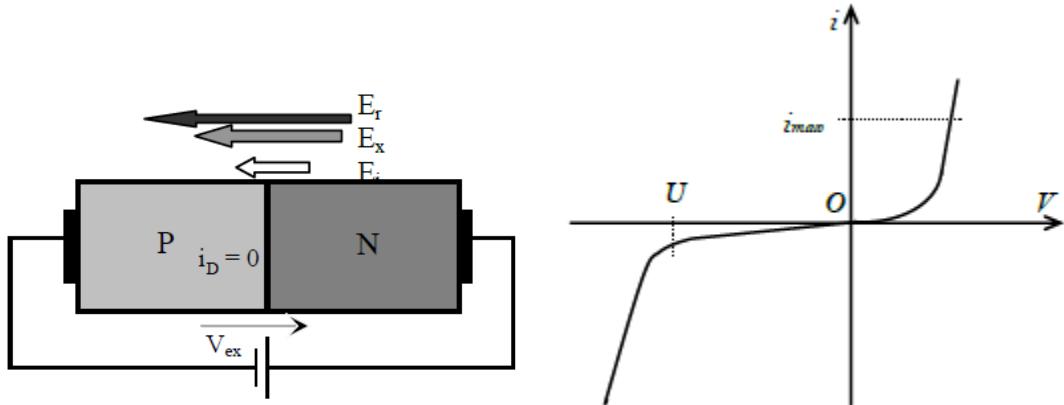


Fig 20 : Polarisation inverse de la jonction PN et la courbe  $I(V)$

N.B

1. En polarisation inverse, la jonction PN se comporte comme un condensateur dont la ZCE est le diélectrique et les régions N et P sont les électrodes. La capacité de la jonction s'écrit :  $C_D = \frac{\epsilon \cdot S}{W}$  avec S l'air de la jonction et W l'épaisseur de la ZCE qui dépend de la hauteur de la barrière.
2. La conduction est bloquée jusqu'à la tension de claquage (la tension d'avalanche) de la diode lors la polarisation négative. Dans cette zone la diode est détruite
3. La fonction diode a existé bien avant l'arrivée du silicium : on utilisait alors des diodes à vide dont le fonctionnement était basé sur l'effet thermoélectronique. Le silicium a apporté les avantages suivants : coût, fiabilité, encombrement, simplicité d'utilisation

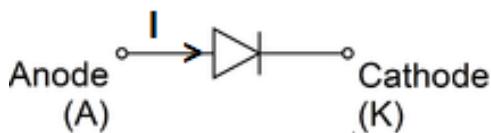
### 3.4. L'EFFET D'avalanche

La diode est un composant électronique qui ne laisse passer le courant que dans un sens (avec condition que la tension appliquée doit être supérieure ou égale à  $V_s$ ). Donc, le sens de branchement de ce composant dans un circuit électrique a une importance sur son fonctionnement (voir Fig 20)

Comme on a dit précédemment, lorsqu'une diode à jonction PN est polarisée en inverse, la zone ZCE devient plus large. Si on continue d'augmenter la tension polarisée en inverse aux bornes cette diode, la ZCE devient de plus en plus large. En même temps, il y aura un courant de saturation constant dû aux porteurs minoritaires. Après une certaine tension inverse  $V_A$ , les porteurs minoritaires reçoivent une énergie cinétique suffisante en raison du champ électrique puissant. Les électrons libres avec une énergie cinétique suffisante entrent en collision avec les ions stationnaires de la couche d'appauvrissement et créent davantage d'électrons libres. Ces électrons nouvellement créés obtiennent également une énergie cinétique suffisante en raison du même champ électrique et ils créent plus d'électrons libres par collision cumulativement.

Ce processus conduit à une augmentation considérable des porteurs minoritaires et provoque une augmentation brutale des électrons libres et des trous dans la région ZCE de la jonction, ce qui signifie qu'il n'y a plus de porteurs de charge d'appauvrissement à travers la jonction. En conséquence, un énorme courant inverse commence à circuler à travers la jonction. Ce phénomène est appelé L'EFFET D'avalanche. Si ce courant n'est pas limité par une résistance externe connectée au circuit de diode, la diode peut être définitivement détruite.

Le symbole de la diode est



### 4. APPLICATION DES DIODES

La diode a une grande variété d'applications dans les systèmes électroniques modernes. Divers circuits électroniques et électriques utilisent ce composant comme un dispositif essentiel pour produire le résultat requis. Dans ce qui suit, on va voir certaines des applications courantes des diodes

## A. LA DIODE CONVENTIONNELLE

### 1. LA DIODE FONCTIONNE COMME UN REDRESSEUR

C'est l'application la plus courante et la plus importante d'une diode est la conversion du courant alternatif en courant continu. En utilisant les diodes, nous pouvons construire différents types de circuits redresseurs. Les types de base de ces circuits redresseurs sont les redresseurs mono-alternance, double alternance, à pont de Graetz

#### Redressement mono alternance :

Ce type de redressement permet de supprimer l'alternance négative d'un signal en conservant l'alternance positive.

Le principe est simple, lorsque la tension à ses bornes est négative, la diode se bloque et elle supprime l'alternance négative du signal d'entrée. Pendant les alternances positives, elle se comporte comme un court-circuit et n'altère donc pas le signal d'entrée (faire attention à la chute de tension de la diode 0.7V)

La tension redressée est la moitié de la tension d'entrée mais les deux ont la même fréquence

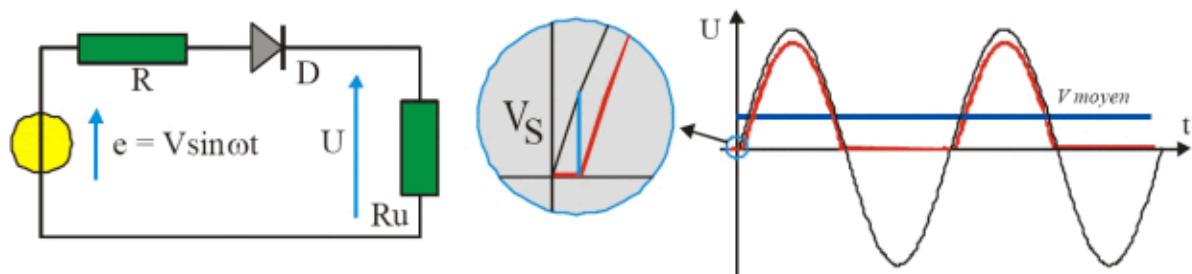


Fig 21 : Redresseur mono alternance

C'est le schéma le plus simple et le plus économique de fabrication, mais le plus coûteux du point de vue du rendement et de la difficulté de filtrage de la tension de sortie

Le redresseur à simple diode est un dispositif très fréquent mais il est davantage utilisé comme dispositif de variation de puissance que comme redresseur : pour les applications de chauffage, il permet, pour un coût très réduit, de diviser par deux la puissance consommée par la charge car pour une charge résistive, les valeurs efficaces de la tension et du courant sont divisées par  $\sqrt{2}$ . La quasi-totalité des sèche-cheveux possèdent deux puissances de chauffage. L'interrupteur qui commande le basculement est placé en parallèle d'une diode. Lorsqu'on veut obtenir une pleine puissance, l'interrupteur court-circuite la diode et la résistance est alimentée

directement par le secteur. Pour le fonctionnement à demi puissance, l'interrupteur est ouvert et la diode est en série avec la charge.

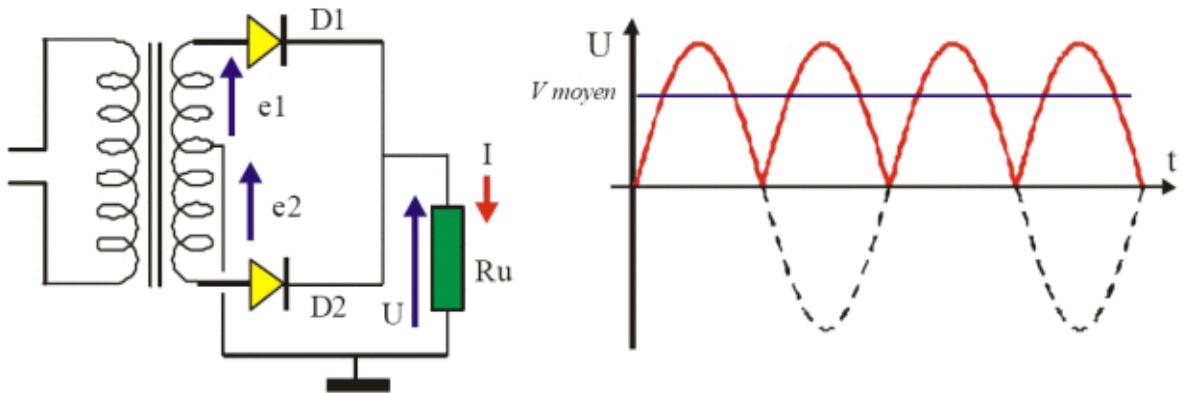


Fig 22 : Redresseur double alternance à deux diodes

Lors l'alternance positive du signal d'entrée D1 est passante et D2 est bloquée

Lors l'alternance négative du signal d'entrée D2 est passante et D1 est bloquée

### Redressement double alternance à Pont de Graetz

Ce type de redresseur est le montage le plus utilisé car la méthode précédente impose l'utilisation d'un transformateur spécial à point milieu. L'utilisation de 4 diodes permet l'emploi d'un transformateur conventionnel, augmente l'efficacité du redresseur par rapport à celui d'une simple alternance et Les diodes bloquées sont soumises à une tension inverse égale à  $V_{max}$ . Mais la chute de tension dans ce pont est égale à deux seuils de diode.

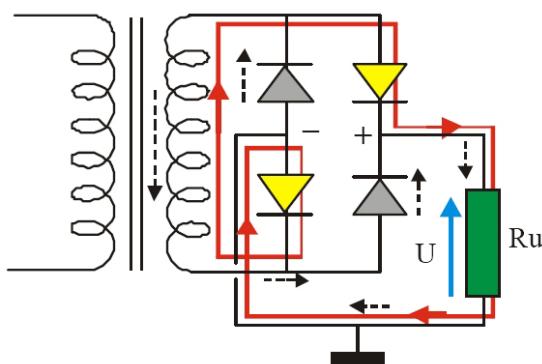
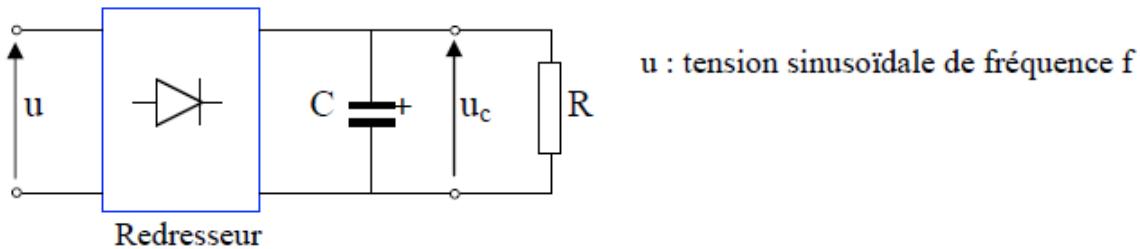


Fig 23 : Redresseur double alternance à Pont de Graetz

La tension redressée devrait devenir lisse (voir Fig 24)



*Fig 24 : Filtrage d'une tension redressée*

Le principe de fonctionnement est simple. Dès la première alternance, le condensateur C se charge puis, dès que la tension à ses bornes devient supérieure à la tension redressée, il se décharge à travers la résistance R.

**Le lissage** de tension par un **condensateur en parallèle avec la charge** est réservé aux courants faibles (typiquement inférieurs à 5A dans les adaptateurs secteurs et les alimentations). [Plus le condensateur est grand, meilleur est le lissage.]

Le lissage de courant par une **bobine en série avec la charge** est réservé aux courants forts (typiquement supérieurs à 5A dans les moteurs à courant continu par exemple). [Le lissage du courant par bobine est meilleur si l'inductance L de la bobine de lissage est grande].

Redresser le courant est très utile pour pouvoir faire fonctionner des appareils électriques fonctionnant en continu (MCC, lecteur MP3, téléphone portable, ordinateur portable, carte mère sur laquelle se trouve le microprocesseur des ordinateurs, moteurs des disques durs et des lecteurs CD et DVD des ordinateurs, etc.). Les téléphones portables par exemple sont vendus avec un adaptateur secteur pour pouvoir recharger la batterie. Cet adaptateur secteur contient : un transformateur pour passer l'alimentation du 220V alternatif 50Hz à une tension plus basse de 5V alternatif par exemple ; un dispositif redresseur à diodes permettant d'avoir un courant pulsé mais circulant toujours dans le même sens et enfin un dispositif de lissage qui permet d'avoir une tension ou un courant continu.

## 2. LA DIODE FONCTIONNE COMME UN MULTIPLICATEUR DE TENSION

Un multiplicateur de tension est un circuit électronique qui reçoit une tension alternative de valeur inférieure, la convertit en une tension continue et augmente son niveau de tension en utilisant les condensateurs et les diodes. **Donc il effectue à la fois le redressement et la multiplication de la tension.** Ici, l'opération de redressement est réalisée par des diodes et la montée en tension est réalisée par les condensateurs. Il existe deux schémas principaux :

Le doubleur de tension une alternance (Fig.25). Durant la première alternance négative de la tension d'entrée (D1 passante, D2 bloquée), le condensateur C1 se charge à la tension de crête Ue à travers le redresseur D1, donc la tension qui va apparaître au bornes C1 est  $U_{e \text{ crête}} - V_{SD1}$ . Durant l'alternance positive (D2 passante, D1 bloquée), la tension aux bornes C1 (C1 devient comme générateur de tension continue) se trouve en série avec la tension appliquée. Donc la tension au bornes D2 va être comme si la tension d'entrée a décalé vers le haut par une valeur  $U_{e \text{ crête}} - V_{SD1}$  (fig.). C2 se charge alors à la tension de crête  $2(U_{e \text{ crête}} - V_{SD})$  à travers le redresseur D2 et cette tension est la tension de sortie. Le condensateur C1 perd une partie de sa charge durant ce temps et se recharge à nouveau à la prochaine alternance négative et le condensateur C2 se décharge dans R1 (lorsque le redresseur D2 est bloqué).

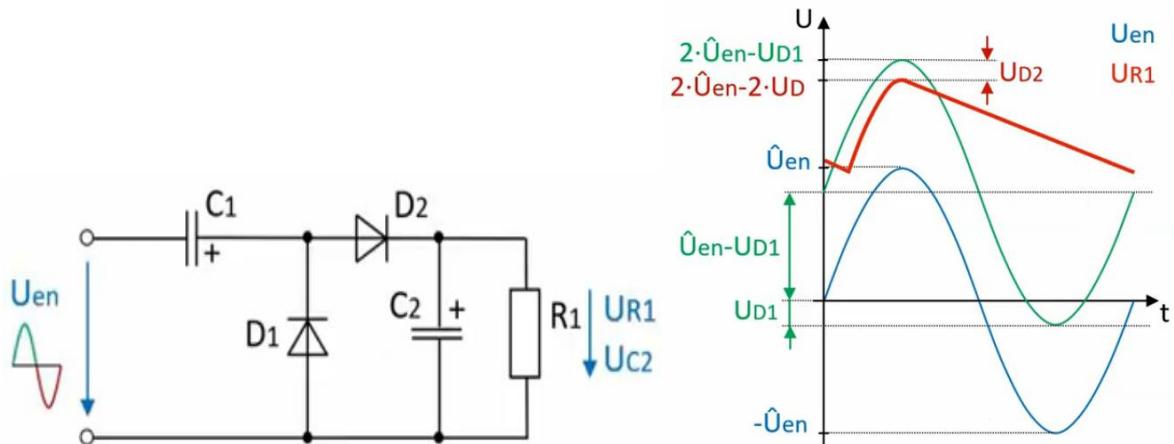
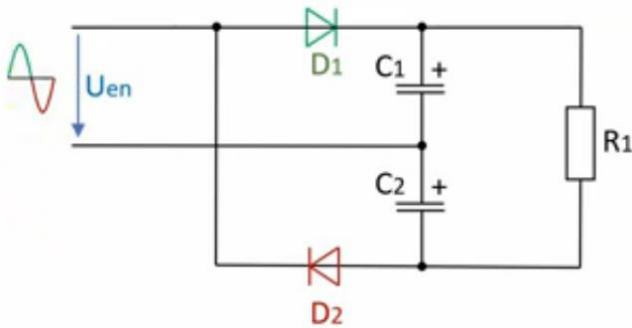


Fig 25: Doubleur d'une alternance (la tension aux bornes D2 lors l'alternance positive (en vert). En rouge c'est le signal de sortie)

#### Le doubleur de tension de deux alternances (Fig. 26)

Lorsque l'entrée est positive, le courant traverse la diode D1 et le condensateur C1 va se charger par  $U_{\text{crête}} - V_s$ . Lors l'alternance négative le courant va sortir et le condensateur C2 va se charger et il va arriver à l'entrée. La tension aux bornes R1 est la somme  $V_{C1} + V_{C2}$ . Les condensateurs C1 et C2 se chargent dans le même sens, les tensions aux bornes s'ajoutent. Ils se déchargent de manière continue dans la résistance d'utilisation R1. Ils agissent également comme élément de filtrage. La tension de sortie tend à atteindre 2  $U_{\text{crête}}$ , mais ne peut l'atteindre que si  $RC$  est infinie.



*Fig 26: Doubleur des deux alternances*

Il y a aussi les tripleurs de tension (utilise trois condensateurs et trois diodes, connectés pour produire une tension continue de sortie approximativement égale aux trois fois la valeur maximale de la tension alternative d'entrée) et les Quadripleurs de tension

Les multiplicateurs de tension sont utilisés dans plusieurs appareils électroniques pour générer un signal de tension de quelques volts à des millions de volts. Certaines applications courantes des multiplicateurs de tension sont les suivantes -

- Tubes à rayons cathodiques utilisés dans les récepteurs de télévision, les écrans d'ordinateur, les oscilloscopes, etc.
- Imprimantes laser, photocopieuses et les machines à rayons X
- Tubes à ondes progressives (utilisé en HF comme amplificateur de puissance)
- le générateur Cockcroft-Walton qui est utilisé pour alimenter des lasers, des émetteurs de rayons X, des pompes à ions, des systèmes électrostatiques, Elles servent aussi dans les ionisateurs d'air, dans le rétroéclairage des écrans LCD.
- Dans les industries de fabrication d'automobile, les multiplicateurs haute tension sont utilisés dans les machines de peinture par pulvérisation ...etc

### 3. DIODE FONCTIONNE COMME UN ECRETEUR

La plupart des circuits électroniques tels que les amplificateurs et les modulateurs ont une plage de tensions particulière à laquelle ils doivent accepter les signaux d'entrée. Tout signal ayant une amplitude supérieure à cette plage particulière peut provoquer des distorsions dans la sortie des circuits électroniques et peut même endommager les composants du circuit.

La plupart des appareils électroniques fonctionnent sur la plage positive du signal d'entrée. Mais il y a des signaux comme les signaux audio par exemple contiennent à la fois l'alternance positive et l'alternance négative avec une amplitude variable dans leur durée.

Ces signaux doivent être modifiés de manière à ce que l'alimentation des circuits électroniques peut fonctionner sur eux.

L'écrêtage d'une onde est la technique la plus courante qui s'applique aux signaux d'entrée pour les adapter afin qu'ils puissent se situer dans la plage de fonctionnement des circuits électroniques.

Un écrêteur est un circuit à base de diodes utilisé pour remodeler la forme d'onde d'un signal en écrétant ou en coupant un morceau de la partie positive, négative ou des deux parties du signal

L'écrêtage se fait pour remplir l'une des deux fonctions :

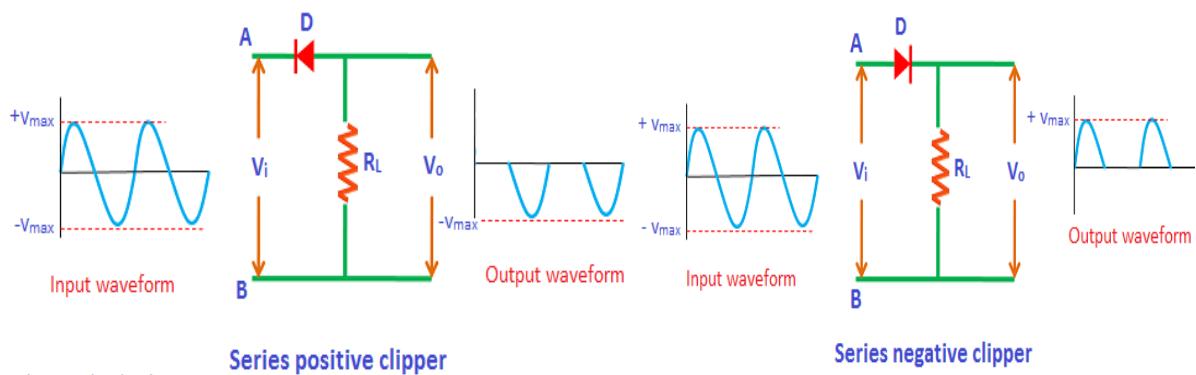
1. Modification de la forme des ondes

2. Protéger les circuits des effets transitoires : L'effet transitoire est défini comme un changement brusque de courant ou de tension d'une durée extrêmement courte. Les circuits d'écrêtage peuvent être utilisés pour protéger les circuits sensibles de ces effets.

On fait l'écrêtage des signaux FM dans les émetteurs pour limiter les pics de bruit à une quantité spécifique, supprimant les pics excessifs du signal. Même pour protéger les transistors des effets transitoires en connectant les diodes en parallèle avec la charge inductive ...etc

Le circuit écrêteur ne contient pas d'éléments de stockage d'énergie tels qu'un condensateur.

Il y a l'écrêteur en série et en parallèle



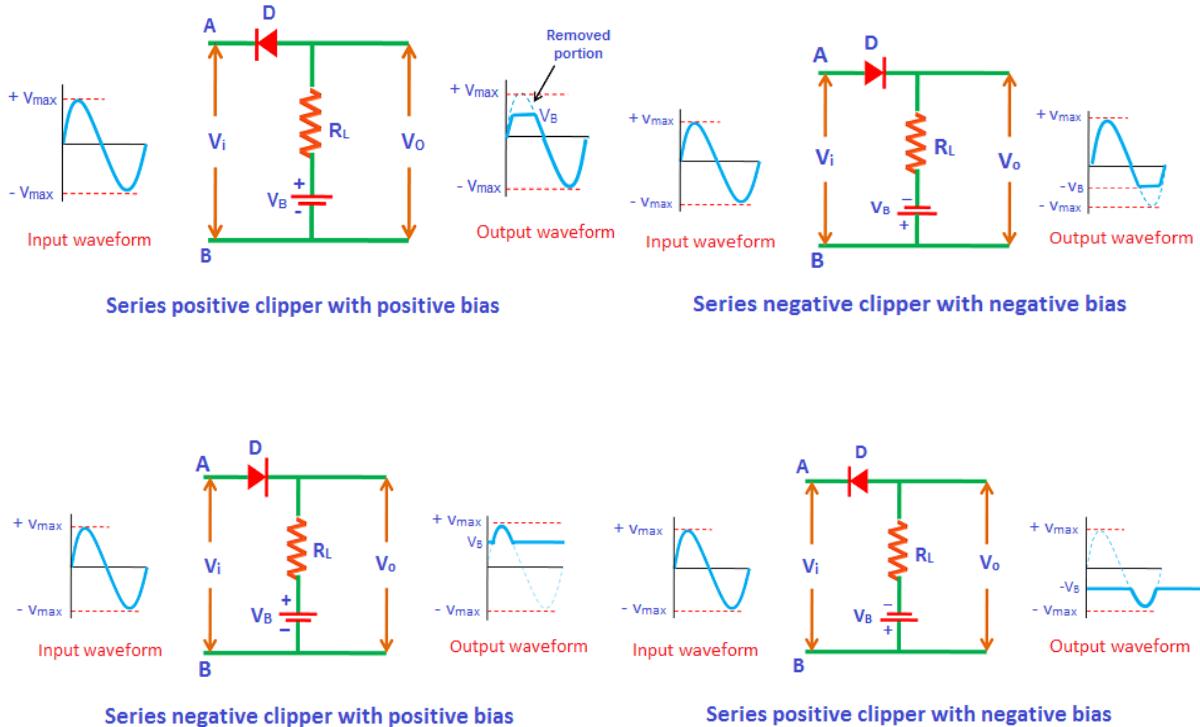


Fig 26:Differents types d'éréteurs

#### Explication du fonctionnement « series positive clipper with positives bias » :

Pendant l'alternance positif, la diode est polarisée en inverse. Il n'y aura donc pas de courant à la sortie par la tension d'alimentation d'entrée  $V_i$ . Cependant, nous fournissons la tension d'une autre source continue "la batterie", la borne positive de la batterie est connectée au côté P et la borne négative de la batterie est connectée au côté N de la diode. Par conséquent, la diode est passante car elle est polarisée en direct par la tension de la batterie  $V_B$  et c'est pourquoi nous avons dans l'alternance positive de la sortie le même signal d'entrée jusqu'à  $V=VB$ .

Pendant l'alternance négatif, la borne A est négative et la borne B est positive. Cela signifie que la diode D est polarisée en direct en raison de la tension d'alimentation d'entrée. De plus, la batterie est également connectée de telle manière que la borne positive est connectée au côté P et la borne négative est connectée au côté N. La diode est donc polarisée en direct par la tension de la batterie  $V_B$  et la tension d'alimentation d'entrée  $V_i$ .

Cela signifie que pendant l'alternance négative, ce n'est pas import qui est la tension la plus élevée  $V_i$  ou  $V_B$ , la diode reste toujours polarisée en direct. Ainsi, l'alternance négative complète apparaît à la sortie.

Les écrêteurs sont couramment utilisées dans les alimentations. Ils sont utilisé dans les émetteurs et récepteurs TV, les générations d'ondes. Les écrêteurs série sont utilisées comme des limiteurs de bruit dans les émetteurs FM

#### 4. DIODE FONCTIONNE COMME UN DECALEUR (clamper)

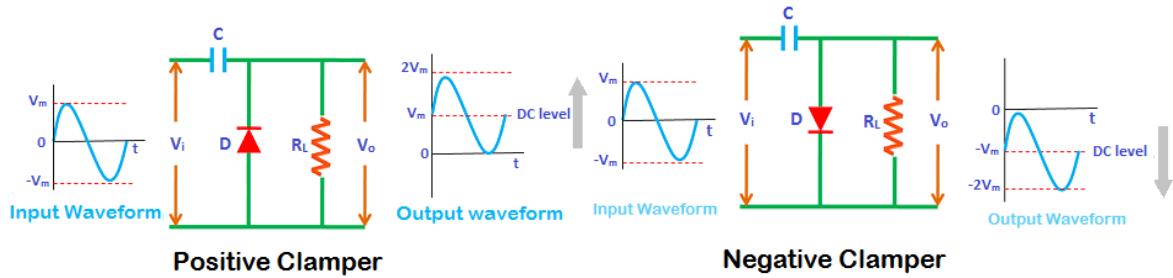
La crête positive ou négative d'un signal d'entrée est décalée ou modifiée à un niveau souhaité à l'aide d'un circuit décaleur. Ce circuit est également connu sous le nom « **Level Shifter** ».

La construction du circuit **clamper** est presque similaire à celle du circuit écrêteur. La seule différence est que le circuit **clamper** contient un condensateur qui est utilisé pour fournir un décalage DC (niveau DC) à partir de la charge stockée

Il existe 3 types d'application de circuits **clamping**

1. pour éliminer les distorsions et identifier la polarité des circuits.
2. Pour améliorer le temps de récupération inverse.
3. pour modéliser les formes d'onde existantes selon une forme et une plage requises.

Les décaleurs sont largement utilisées dans les équipements de test et d'autres systèmes sonar.



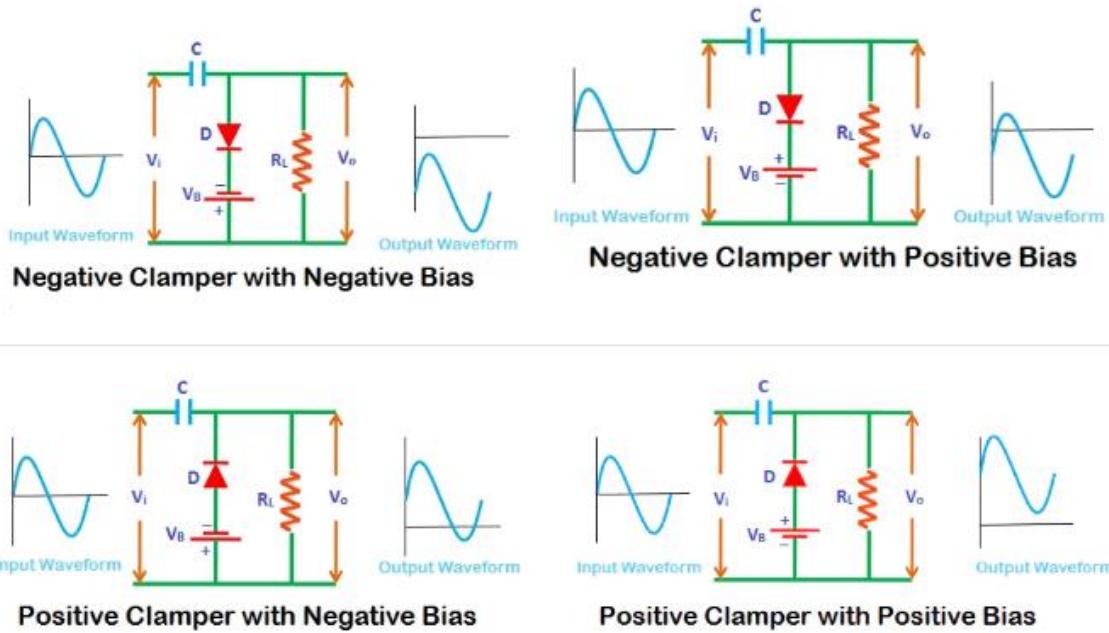


Fig 27:Differents types de circuit décaleur

### B. LA DIODE ZENER

Une diode Zener est formé par le contact de deux types de semi-conducteurs, l'un de type P et l'autre de type N. Ces deux SC sont fortement dopés

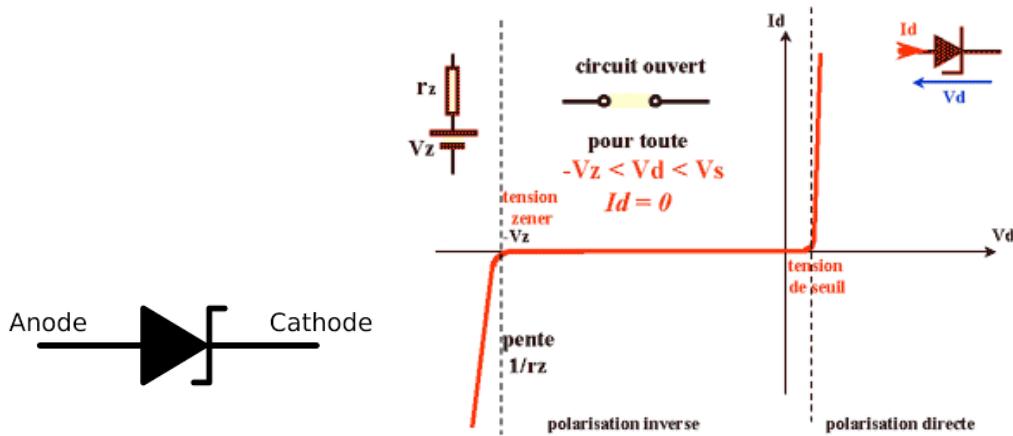


Fig 28:Symbole et caractéristique  $I(V)$  d'une Ziner

Le diagramme ci-dessus montre la caractéristique  $I(V)$  de la diode Zener qui travaille comme la diode conventionnelle lors de la polarisation directe. Mais lors la polarisation inverse les diodes Zener sont conçues de façon à laisser également passer le courant inverse à partir d'une certaine tension inverse sans destruction de la diode

La fonction principale d'une diode Zener est de maintenir une tension constante à ses bornes.

Lorsqu'une jonction PN est fortement dopée, la concentration d'atomes d'impuretés sera élevée dans le cristal. Cette concentration entraîne la concentration élevée d'ions dans la ZEC. Par conséquent, pour la même tension de polarisation inverse appliquée, la largeur de la ZEC devient plus fine que celle d'une diode normale (voir la formule du champ électrique  $E$  en fonction de  $dT$  la largeur de la ZEC).

Parce que la ZEC est plus fine, l'intensité du champ électrique à travers cette région est assez élevée. Si on continue à augmenter la tension inverse appliquée, après une certaine valeur, les électrons des liaisons covalentes dans la ZEC quittent ses orbites et deviennent des électrons libres. Le grand nombre de ces électrons libres rend la région ZEC conductrice (on n'arrive pas au niveau des collisions avec d'autres atomes afin de générer le grand nombre de porteurs libres car cette diode est déjà fortement dopée c.à.d le nombre de porteurs de charges et le champ interne  $E$  sont plus élevés que ceux de la diode conventionnelle). La tension à laquelle ce phénomène se produit est appelée tension Zener.

Si la tension inverse appliquée aux bornes de la diode est supérieure à la tension Zener, la diode fournit un chemin conducteur au courant qui la traverse, mais la tension aux bornes de la diode Zener reste fixe quelle que soit la tension de la source, bien qu'à cette condition, le courant traversant la diode puisse être de n'importe quelle valeur en fonction de la charge connectée avec une diode. Il n'y a donc aucun risque de claquage supplémentaire par avalanche. C'est pourquoi la diode Zener est principalement utilisée pour contrôler la tension dans les différents circuits. La tension Zener de la diode est ajustée lors de la fabrication à l'aide du dopage requis et approprié.

### **Domaine d'application**

Les diodes Zener sont conçues pour maintenir une tension fixe aux bornes de la diode lorsqu'elle présente une polarisation inverse. Cette capacité est utilisée pour fournir des tensions de référence dans les alimentations stabilisées par exemple. Elle permet également la protection en surtension, une opération importante dans les alimentations. Les diodes Zener sont également utilisées pour couper ou limiter les formes d'onde, les empêchant ainsi de dépasser les limites de tension.

Les diodes Zener sont fréquemment utilisées pour réguler la tension dans un circuit.

### a. REGULATEUR DE TENSION A BASE DIODE ZENER

Pour de nombreuses applications telle que les alimentations électriques, le chargement des batteries, l'électronique automobile, les appareils de communication, les équipements médicaux, les systèmes d'énergie renouvelable et les systèmes de contrôle industriel il est souhaitable qu'une alimentation CC soit stable et sans ondulation. Pour cela, on utilise les régulateurs de tension qui peuvent garantir que la sortie d'une alimentation à courant continu CC est stable et relativement indépendante de la charge.

La diode Zener est couramment utilisée comme un régulateur de tension pour maintenir une tension de sortie CC constante aux bornes d'une charge malgré la variation de la tension d'entrée ou la modification du courant de charge.

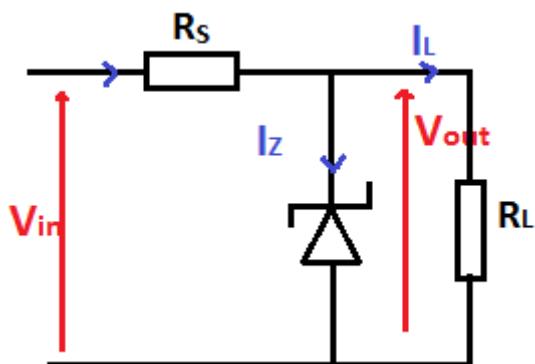


Fig 29 : Régulateur de tension à base diode zener

#### Régulation avec une tension d'entrée variable :

Elle est définie comme la variation de la tension régulée par rapport à la variation de la tension d'entrée.

Lorsqu'on augmente la tension d'entrée,  $I_s$  augmente et le courant Zener augmente. La tension supplémentaire est répartie aux bornes  $R_s$ . Quand  $I_z$  augmente,  $V_z$  reste toujours constante et égale à  $V_{out}$  et donc la tension de sortie restera constante

Lorsqu'on diminue la tension d'entrée  $V_{in}$ ,  $I_s$  diminue et comme le courant de charge  $I_L$  reste constant donc, la chute de tension aux bornes de  $R_s$  est réduite. Mais même si  $I_z$  peut changer,  $V_z$  reste constante et la tension de sortie reste constante

### Régulation avec charge variable :

Elle est définie comme le changement de tension de charge par rapport aux variations du courant de charge ( $V_{in}$  est constant et la tension de sortie varie en raison du changement de la valeur de la résistance de charge).

Si le courant de charge  $I_L$  augmente, la tension de sortie augmente et  $I_Z$  diminue ( $V_{in}$  est constant donc  $I_S$  est constant =  $I_Z + I_L$ ). À partir des caractéristiques de polarisation inverse, même  $I_Z$  change,  $V_z$  reste le même et la tension de sortie reste constante.

En effet, une partie du courant qui traverse la résistance est déviée dans la diode Zener, et le reste traverse la charge. Ainsi on contrôle la tension que voit la charge en faisant passer une partie du courant issu de la source dans la diode au lieu de la charge.

### b. PROTECTION CONTRE LES SURTENSIONS UTILISANT UNE DIODE ZENER

Si nous voulons protéger par exemple un microcontrôleur (qui fonctionne à  $V_m$ ) des surtensions à l'aide d'une diode Zener ( $V_z$  est légèrement plus grand que  $V_m$ ), on doit utiliser le circuit ci-dessous

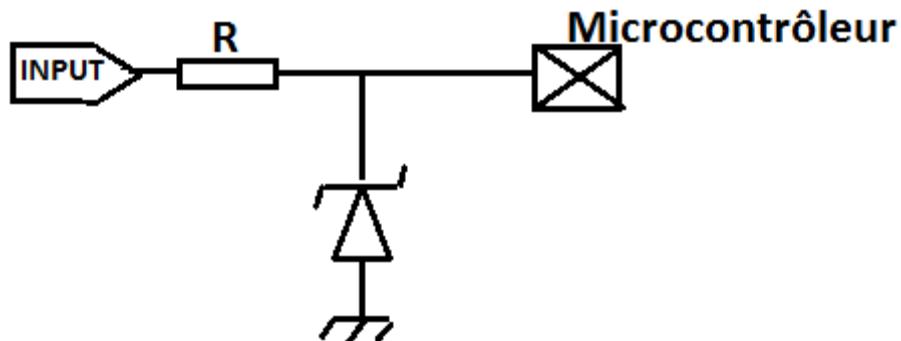


Fig 30 : Protecteur contre les surtensions à base diode zener

Lorsque  $V_{in} \leq V_m$ , la diode Zener sera bloquée et le courant circulera normalement. En cas de surtension, le circuit transférera le courant et régulera la tension de sortie jusqu'à  $V_z$ .

### c. DECALEUR DE TENSION

Lorsqu'on connecte une diode Zener en série avec une alimentation  $V_{in}$ , la diode Zener peut créer une tension de sortie plus faible, décalant ainsi le niveau de tension.

Si  $V_{in} < V_z$ , il n'y aura pas de courant à circuler donc  $V_{out}=0$

Si  $V_{in} = V_z$ , la diode Zener commencera à fonctionner et le courant circulera donc  $V_{out} = V_{in} - V_z$

Plus  $V_{in}$  augmente, plus  $V_{out}$  augmente comme le montre la figure ci-dessous.

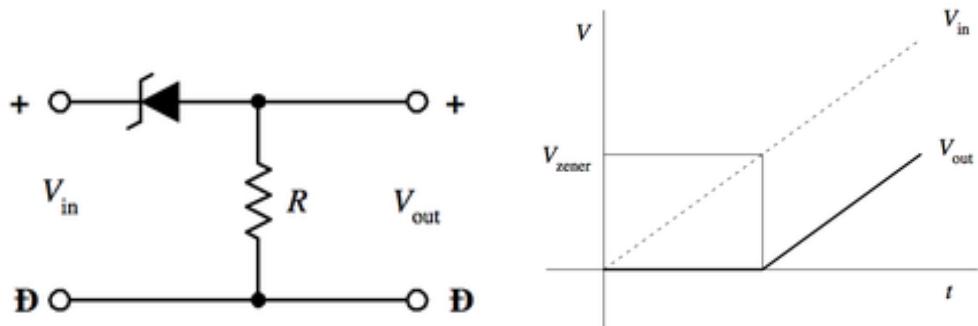
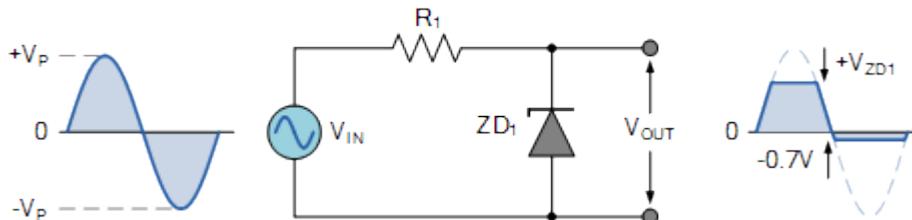


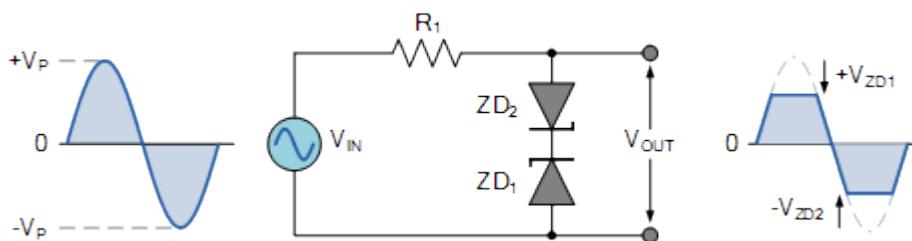
Fig 31 : Décaleur de tension à base diode zener

Donc, ce circuit abaisse la tension de sortie  $V_{out}$  d'une quantité égale à la tension de claquage de la diode Zener.

#### d. L'ECRETEUR DIODE ZENER



Dans ce circuit, pendant l'alternance positive, la diode Zener est polarisée en inverse et le signal d'entrée est écrêté à la tension Zener,  $V_{ZD1}$ . Pendant l'alternance négative, la diode Zener agit comme une diode normale avec sa tension de seuil égale à 0,7 V.



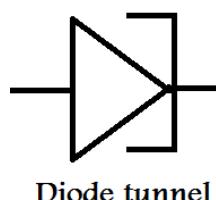
L'alternance positive est écrêtée à la somme de la tension Zener de la diode  $ZD_1$  plus le 0,7 V de la diode  $ZD_2$  et vice versa pour l'alternance négative.

Ce type de circuits est généralement utilisé dans les émetteurs TV et FM pour éliminer les interférences.

### C. DIODE TUNNEL

L'effet tunnel est un effet quantique, qui permet à une particule de franchir une barrière de potentiel de hauteur supérieure à son énergie.

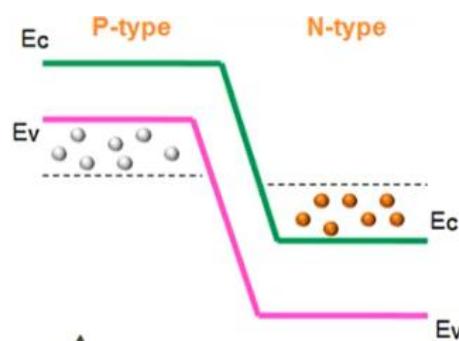
La diode tunnel est formée à partir d'une jonction p-n dont les zones p et n sont très fortement dopées, le matériau semi-conducteur est "dégénéré". Dans cette diode le courant électrique diminue lorsque la tension augmente et cela correspond à une résistance négative



*Fig 33 : Symbole d'une diode tunnel*

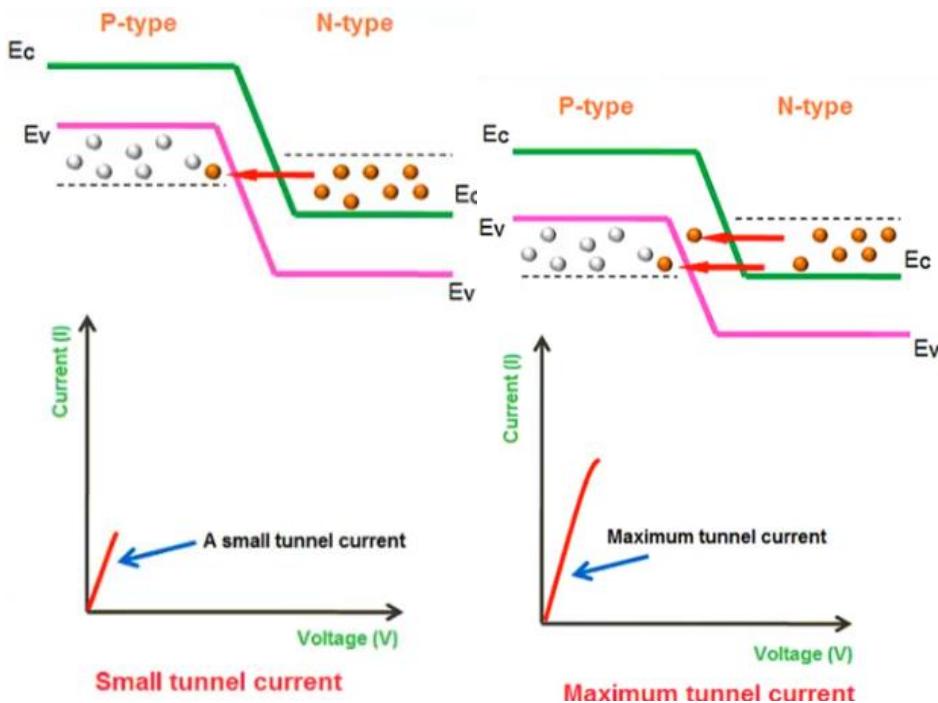
Dans la diode tunnel, la bande de conduction du matériau de type N chevauche avec la bande de valence du matériau de type P en raison du dopage important.

Dans la diode normale, l'EF existe dans le milieu de la BI dans les deux côtés. Par contre dans la diode tunnel, l'EF pénètre dans la BV côté type P et dans la BC côté type N. Alors, même à  $T = 0^\circ \text{ K}$ , les électrons existent dans la bande de conduction du matériau de type N, et les trous existent dans le matériau de type p. En raison de ce chevauchement, les électrons de la bande de conduction du côté N et les trous de la bande de valence du côté P sont presque au même niveau d'énergie.



A une température 0°K tous les niveaux en dessous du niveau de Fermi sont occupés et tous les niveaux au-dessus sont vides. Le courant qui traverse la barrière est nul car le nombre d'électrons qui vont de P vers N est le même que le nombre d'électrons qui vont de N vers P

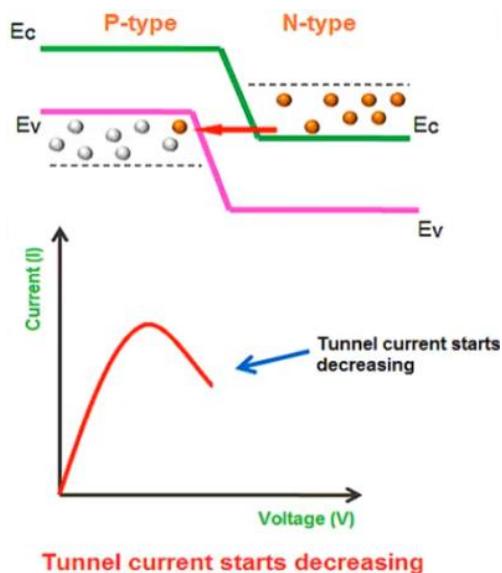
- ❖ Lorsqu'aucune tension n'est appliquée sur la diode tunnel et lorsque la température augmente, certains électrons passent de la bande de conduction de la région N à la bande de valence de la région P. De la même manière, les trous tunnel de la bande de valence de la région P à la bande de conduction de la région N
- ❖ Lorsqu'une petite tension est appliquée à la diode tunnel, qui est inférieure à la tension de seuil de la ZCE, aucun courant direct ne traverse la jonction. Cependant, un petit nombre d'électrons dans le BC de la région N va tunnel aux trous de la bande de valence dans la région P. Cela créera un petit courant tunnel de polarisation directe. Ainsi, le courant tunnel commence à circuler avec une petite application de tension.
- ❖ Si on augmente la tension appliquée, le nombre d'électrons libres du côté N et le nombre des trous du côté P également le chevauchement du BC et du BV augmentera. En conséquence, le maximum du courant tunnel circule



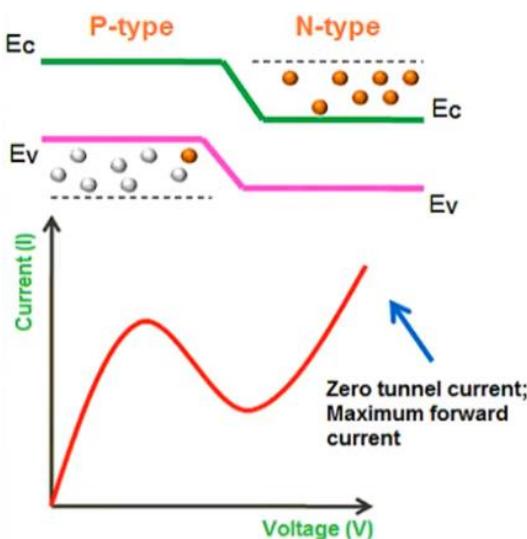
Lors de l'application d'une tension V, la largeur de la région ZCE diminuera car la barrière de potentiel diminuera jusqu'à  $q(V_d - V)$  ainsi la bande d'énergie du côté N augmentera et la bande d'énergie du côté P diminuera. Ainsi les niveaux d'énergie de Fermi vont se séparer et la

différence entre ces deux niveaux d'énergie est égale à  $qV$ . En général les électrons et les trous sont censés surmonter le potentiel barrière pour passer de l'autre côté. Mais parce que la largeur de la ZCE est très petite, au lieu de surmonter cette barrière les électrons vont directement de l'autre côté et c'est le phénomène tunnel

- ❖ Si la tension est encore augmentée, un léger désalignement de la BC et de la BV se produit. Depuis la BC du matériau de type N et la BV du matériau de type P se chevauchent. Les électrons tunnel de la région BC de N à la BV de la région P et provoquent un petit flux de courant. Ainsi, le courant tunnel commence à diminuer



- ❖ Si la tension appliquée est largement augmentée, le courant tunnel tombe à zéro. Dans ce cas, la BC et la BV ne se chevauchent plus et la diode tunnel fonctionne de la même manière qu'une diode à jonction PN normale



### **Domain d'application**

La résistance négative est la caractéristique la plus importante et la plus largement utilisée de la diode tunnel. Une diode tunnel fonctionnant dans cette région peut être utilisée comme amplificateur ou oscillateur en haute fréquence.

Cette diode peut être utilisée comme dispositif de stockage logique (mémoire) et elle est utilisée dans des circuits oscillateurs à relaxation. Elle est également utilisée comme commutateur à ultra haute vitesse dans les ordinateurs par exemple et elle est utilisée dans les récepteurs FM

#### a. OSCILLATEUR A RESISTANCE NEGATIVE UTILISANT UNE DIODE TUNNEL

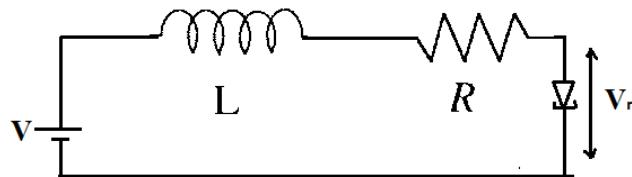


Fig 34 : Oscillateur a base d'une diode tunnel

La diode tunnel aide à générer un signal à très haute fréquence de près de 10 GHz. Un circuit à diode tunnel pratique peut être constitué d'un interrupteur S, d'une résistance R et d'une source d'alimentation V, connectés à un circuit réservoir via une diode tunnel D.

### **Principe de fonctionnement**

La valeur de la résistance sélectionnée doit être telle qu'elle polarise la diode tunnel au milieu de la région de résistance négative. La figure ci-dessous montre le circuit pratique d'oscillateur à diode tunnel.

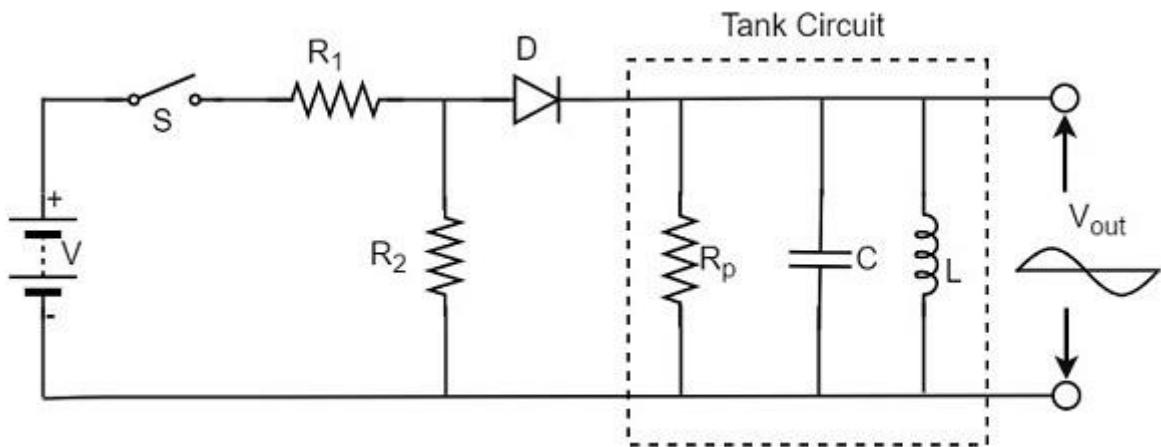
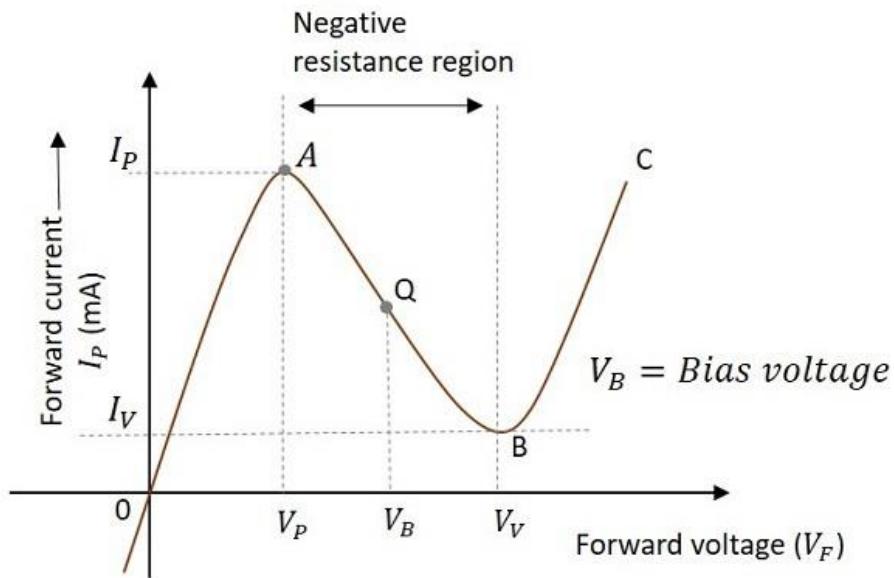


Fig 35 : Oscillateur à base d'une diode tunnel

Dans ce circuit, la résistance  $R_1$  définit la polarisation appropriée pour la diode et la résistance  $R_2$  définit le niveau de courant approprié pour le circuit du réservoir. La combinaison parallèle de la résistance  $R_p$ , de l'inductance  $L$  et du condensateur  $C$  forme un circuit réservoir qui résonne à la fréquence sélectionnée.

Lorsque l'interrupteur  $S$  est fermé, le courant du circuit monte immédiatement vers la valeur constante, dont la valeur est déterminée par la valeur de la résistance  $R$  et la résistance de la diode. Cependant, lorsque la chute de tension aux bornes de la diode tunnel  $V_D$  dépasse la tension de crête  $V_p$ , la diode tunnel est entraînée dans une région de résistance négative.

Dans cette région, le courant commence à diminuer, jusqu'à ce que la tension  $V_D$  devienne égale à la tension du point de vallée  $V_v$ . À ce stade, une nouvelle augmentation de la tension  $V_D$  entraîne la diode dans une région de résistance positive. De ce fait, le courant du circuit a tendance à augmenter. Cette augmentation du circuit augmentera la chute de tension aux bornes de la résistance  $R$ , ce qui réduira la tension  $V_D$ .



*Fig 36 : Région de la résistance négative dans la caractéristique  $I(V)$  d'une diode tunnel*

La courbe AB indique la région de résistance négative à mesure que la résistance diminue tandis que la tension augmente. Il est clair que le point Q est fixé au milieu de la courbe AB. Le point Q peut se déplacer entre les points A et B pendant le fonctionnement du circuit. Le point A est appelé point culminant et le point B est appelé point vallée.

Pendant le fonctionnement, après avoir atteint le point B, l'augmentation du courant du circuit augmentera la chute de tension aux bornes de la résistance R, ce qui réduira la tension VD. Cela ramène la diode dans la région de résistance négative.

La diminution de la tension VD est égale à la tension VP et ceci complète un cycle de fonctionnement. La poursuite de ces cycles produit des oscillations continues qui donnent une sortie sinusoïdale

Conclusion : Le comportement unique en matière de résistance négative des diodes tunnel est le facteur clé qui leur permet de servir d'amplificateurs et d'oscillateurs. En raison de sa plage de fonctionnement limitée, une conception et une polarisation minutieuses du circuit sont nécessaires pour obtenir des performances stables et fiables.

### b. AMPLIFICATEUR A BASE DIODE TUNNEL

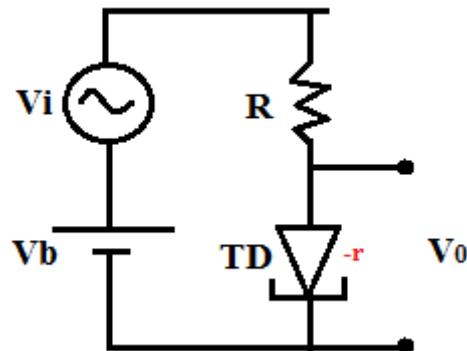


Fig 37 : Amplificateur a base diode tunnel

La tension continue  $V_b$  polarise la diode tunnel TD dans sa région de résistance négative et fournit également la puissance utilisée pour amplifier le signal. Pour plus de stabilité, la résistance  $R$  doit être inférieure à la résistance  $r$  des diodes. Par conséquent, la résistance totale des deux appareils en série,  $r - R$ , est une petite valeur négative. Par conséquent, une petite augmentation de la tension d'entrée  $V_i$  provoque une forte diminution du courant, provoquant une forte augmentation de la tension aux bornes de la diode.

Autres applications des diodes Tunnel

**Les diodes tunnel sont largement utilisées dans plusieurs domaines en raison de leur fonctionnement à grande vitesse et de leur capacité à fonctionner aux fréquences micro-ondes. Quelques applications clés incluent :**

- **Commutation et serrage à grande vitesse : les diodes tunnel ont la capacité de commuter en moins d'une nanoseconde, ce qui les rend idéales pour les systèmes informatiques à grande vitesse.**
- **Stockage de mémoire logique : les diodes tunnel peuvent également être utilisées dans les circuits de stockage de mémoire logique en raison de leur vitesse élevée et de leur temps de réponse rapide.**
- **Amplificateur micro-ondes : les diodes tunnel se trouvent dans diverses applications d'amplification micro-ondes. Les capacités haute fréquence les rendent adaptés aux circuits amplificateurs micro-ondes.**

- **Multiplicateurs de fréquence** : Ils sont utilisés dans les circuits multiplicateurs de fréquence. Le circuit fonctionne dans la région de résistance négative de la diode, fournissant une fréquence de sortie qui est un multiple de la fréquence d'entrée.

#### **D. DIODE SCHOTTKY**

La diode Schottky est un composant électronique semi-conducteur dont le principe de fonctionnement repose sur une jonction métal-semi-conducteur, contrairement aux diodes classiques qui utilisent une jonction PN (entre deux couches de semi-conducteurs dopées différemment). Le métal (l'aluminium ou le nickel) permet de réduire la barrière énergétique à travers laquelle les électrons doivent passer.



*Fig 38 : Symbole d'une diode Schottky*

On appelle NV (Niveau du Vide) l'énergie potentielle d'un électron dans le vide au voisinage des différents matériaux, NV est le même pour tous les matériaux et peut servir de référence

Pour chacun des matériaux, l'énergie potentielle d'un électron dans le vide au voisinage du matériau est située à  $e\phi$  (travail de sortie) au-dessus du niveau de Fermi.

Lorsqu'un métal et un semiconducteur sont au contact, il existe à l'interface une barrière de potentiel donnée par l'expression

$$E_b = e\phi_m - e\chi$$

où  $e\phi_m$  représente le travail de sortie du métal et  $e\chi$  est l'affinité électronique du semiconducteur.

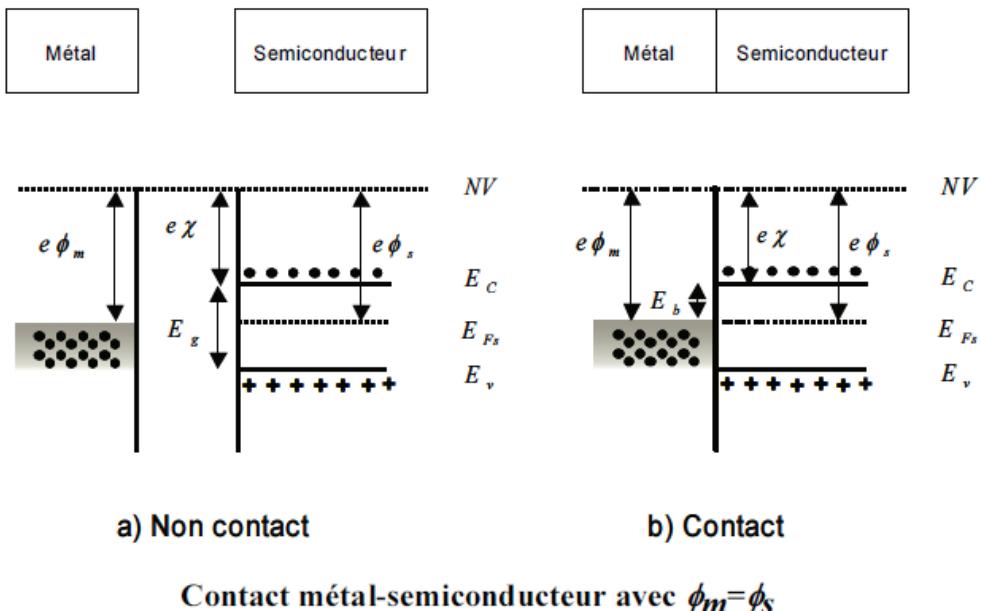
Rappelons que les électrons passent d'un matériau à un autre si le travail de sortie du premier est inférieur à celui du deuxième.

**Cas 1: Les travaux de sortie sont égaux**

Lorsque le métal et le semiconducteur sont mis au contact, ils peuvent échanger de l'énergie et constituent un seul système thermodynamique. La distribution statistique des électrons dans ce système est alors représentée par un niveau de Fermi unique, les niveaux EF<sub>m</sub> et EF<sub>s</sub> s'alignent. Les bandes sont horizontales, on dit que le système est en régime de bandes plates. La barrière de potentiel Eb s'établit au niveau de l'interface.

Si on applique une tension positive à cette jonction, les électrons circuleront de la BC du SC vers le métal. lorsqu'on applique une tension négative, les électrons vont essayer de passer du métal au BC du SC. et pour ce faire, ils doivent surmonter une barrière potentielle entre l'EF<sub>n</sub> et l'EC qui est égale à q\* Eb

Dans ce cas le diagramme énergétique est valable quel que soit le type (p ou n) du semiconducteur.



### Cas 2: le travail de sortie du métal est supérieur au travail de sortie de SC

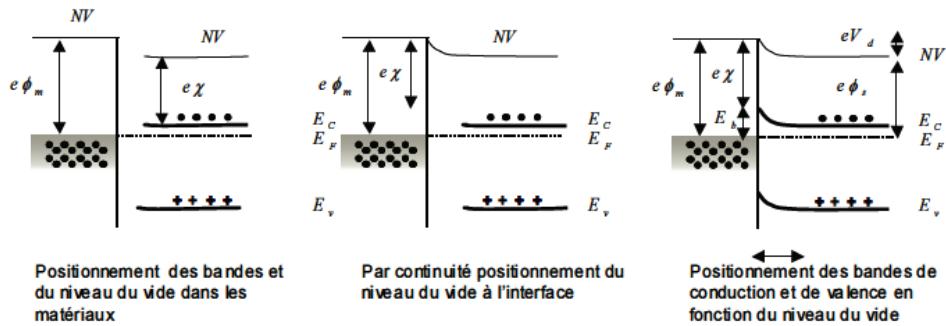
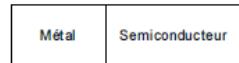
Lorsque les deux matériaux sont mis au contact et le travail de sortie du semiconducteur est inférieur à celui du métal, les électrons passent du semiconducteur dans le métal. Le système se stabilise à un régime d'équilibre défini par l'alignement des niveaux de Fermi.

Le diagramme énergétique résultant est différent suivant le type de semiconducteur.

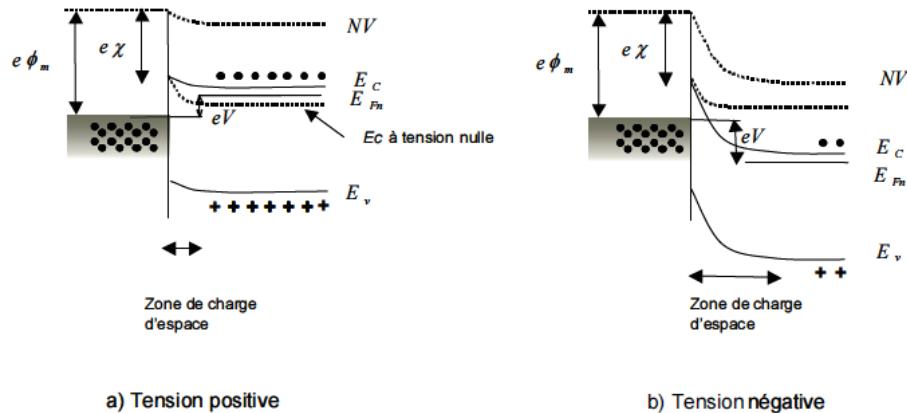
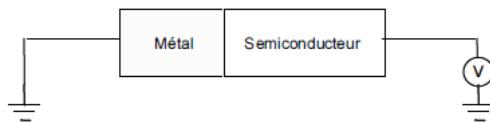
On prend le cas d'un SC type N: Les électrons qui passent du semiconducteur vers le métal, entraînent des modifications énergétiques dans chacun des matériaux. Dans le semiconducteur, une zone de déplétion se crée, les ions donneurs ionisés  $Nd^+$  ne sont plus compensés par les électrons, il apparaît une charge d'espace positive. D'autre part la distance bande de conduction-niveau de Fermi, qui traduit la population électronique, est plus grande au voisinage de l'interface que dans la région neutre du semiconducteur. Le niveau de Fermi étant horizontal, il en résulte une courbure des bandes vers le haut avec un montant égal à la distance entre les deux niveaux de Fermi. Le niveau de Fermi devient constant dans toute la structure et nous avons toujours la barrière  $q^*E_b$ . Mais, lorsqu'on essaye de faire passer les électrons du côté SC vers le côté métal, ils voient également une barrière = à la quantité de flexion de bande que nous avions. si on augmente la tension négative appliquée sur le SC, cette barrière réduira en hauteur, de sorte que les électrons auront un chemin de plus en plus facile à écouler vers le métal et c'est presque le même comportement qu'on a observé dans une diode à jonction PN (si on polarise la structure par une tension semiconducteur-métal négative, la BC du semiconducteur, la courbure diminue. Ainsi la barrière semiconducteur→métal diminue alors que la barrière métal→semiconducteur reste inchangée. L'équilibre est rompu, les électrons diffusent du semiconducteur vers le métal et créent un courant I du métal vers le semiconducteur. Si on augmente encore la tension de polarisation on atteint le régime de bandes plates lorsque  $V=V_d$ )

Si on polarise la structure par une tension SC-métal positive. La bande de BC est abaissée, ce qui augmente la hauteur de la barrière qui s'opposait à la diffusion des électrons. La structure est polarisée en inverse.

La structure métal-SC(n) avec  $\varphi_m > \varphi_s$  constitue donc un contact redresseur. C'est une diode Schottky. Notons que la différence des niveaux de Fermi est la différence de potentiel appliquée.)



Contact métal-semiconducteur(n) avec  $\phi_m > \phi_s$  à l'équilibre thermodynamique



Contact métal-semiconducteur(n) avec  $\phi_m > \phi_s$  sous polarisation.

a)  $V_{sc} - V_m < 0$ . b)  $V_{sc} - V_m > 0$

### Troisième cas : travail de sortie du métal inférieur, $\phi_m < \phi_s$

Lorsque les deux matériaux sont mis au contact et le travail de sortie du métal est inférieur à celui du semiconducteur, les électrons sortent du métal pour entrer dans le semiconducteur. Le système évolue jusqu'à alignement des niveaux de Fermi.

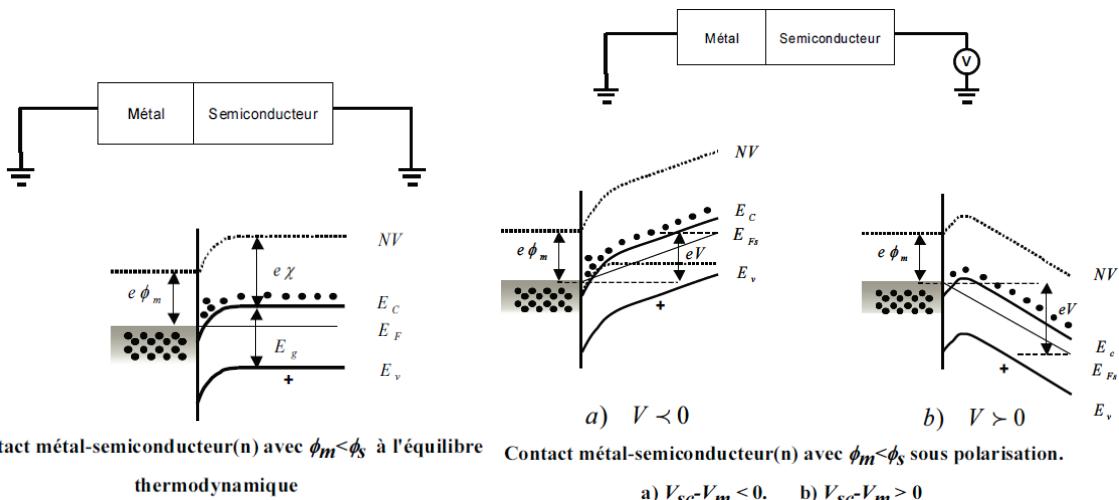
Le diagramme énergétique est différent suivant le type de semiconducteur.

#### Semiconducteur de type n

Les électrons qui passent du métal dans le semiconducteur font apparaître dans le métal un déficit d'électrons localisé à la surface, et dans le semiconducteur une zone d'accumulation très peu étalée. Il en résulte une courbure vers le bas des bandes de valence et de conduction

Si on polarise la structure, la tension de polarisation est distribuée dans tout le SC. Tout électron qui arrive à l'interface dans le semiconducteur passe librement dans le métal et vice versa. Le contact est ohmique.

La différence essentielle entre cette structure, et la structure précédente métal-SC(n), réside dans le fait que la charge d'espace dans le semiconducteur correspond à un régime d'accumulation et non de déplétion. Il en résulte qu'il n'existe pas de zone vide de porteurs, donc isolante, à l'interface. Ainsi lorsque l'on polarise cette structure (Fig. 4-6-a, b), la tension appliquée n'est plus localisée dans la zone de charge d'espace du semiconducteur, comme dans le cas précédent, mais distribuée dans tout le semiconducteur, plus résistif que le reste de la structure.



En résumé, le contact métal-semiconducteur est ohmique ou redresseur suivant la différence des travaux de sortie et le type du semiconducteur.

- Avec  $\phi_m > \phi_s$  : le contact métal-SC (n) est redresseur le contact métal-SC (p) est ohmique
- Avec  $\phi_m < \phi_s$  : le contact métal-SC (n) est ohmique le contact métal-SC (p) est redresseur.

## **E. DIODE VARACTOR**

Diode Varactor également connue sous le nom de diode à condensateur variable et diodes varicap: est une diode à jonction PN, sa capacité de jonction est relative à la tension inverse appliquée à travers elle.

Cette propriété des diodes varactor est utile dans plusieurs applications telles que les circuits d'accord des récepteurs radios, des téléviseurs ou encore des oscillateurs contrôlés par tension (VCO). Elles permettent de faire varier la capacité du circuit d'accord, et donc sa fréquence de résonance, en changeant la tension de commande appliquée sur la diode (qui provient d'un potentiomètre connecté en général entre le pôle positif et le pôle négatif de l'alimentation).

Les diodes varicap ont progressivement remplacé les condensateurs variables :

- Elles sont beaucoup plus petites,
- Elles sont moins coûteuses,
- Elles ne s'usent pas



Fig 43 : Symbole d'une diode Varicap

On a expliqué le fonctionnement de la diode conventionnelle.

Pour comprendre le principe de fonctionnement de cette diode, nous devons tout d'abord nous rappeler comment changer la capacité d'un condensateur à deux plaques parallèles dont sa capacité est  $C=\epsilon A/d$

Où A est l'aire des plaques

$\epsilon$  est la permittivité

D est la distance entre les deux plaques

Donc, pour  $\epsilon$  et A fixes, si nous modifions la distance entre les deux plaques, la capacité changera. Avec le même concept, la capacité d'une diode varicap varie lorsque les matériaux de type N et de type P agissent comme des plaques conductrices et la région d'appauvrissement (ZCE) agit comme le milieu diélectrique.

Dans la diode à jonction PN, les électrons sont majoritaires du côté N et les trous sont majoritaires du côté P de la diode. Lorsqu'on applique une tension inverse, les électrons libres de la région de type N s'éloignent de la jonction en raison de l'attraction d'un potentiel positif et les trous dans la région de type P s'éloignent de la jonction en raison de l'attraction du potentiel négatif. Cela rend la ZCE plus large avec l'augmentation de la tension inverse. Ainsi, la capacité va diminuer. La capacité est donc inversement proportionnelle à la tension inverse appliquée