

# Résumé de cours M1 Microélectronique

## Module : Physique des composants semi-conducteurs 1

**Prof. Abdelhamid BENHAYA**

Directeur du Laboratoire d'Electronique Avancée  
Responsable Salle Blanche

Département d'Electronique  
Faculté de Technologie  
Université Batna 2

<https://youtu.be/7ojxc24eRuE>

Domaines d'intérêt:

Technologie des semi-conducteurs  
(Matériaux et dispositifs photovoltaïques)

e-mail: [a.benhaya@univ-batna2.dz](mailto:a.benhaya@univ-batna2.dz)  
[benhaya\\_abdelhamid@yahoo.fr](mailto:benhaya_abdelhamid@yahoo.fr)

Tel: +213 (0)7 73 87 37 84

# BIBLIOGRAPHIE

## Langue Anglaise

1. Marius Grundmann, The Physics of Semiconductors, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
2. S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, JOHN WILEY & SONS, 2007.
3. <http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/contents.htm>
4. [https://learnabout-electronics.org/fet\\_02.php](https://learnabout-electronics.org/fet_02.php)

## Langue Française

1. A. Vapaille et R. Castagné, Dispositifs et circuits semi-conducteurs, Physique et technologie, Dunod, 1987.
2. CHRISTIAN ET HELENE NGÖ, Introduction à la physique des semi-conducteurs, Dunod, 1998.
3. H. MATHIEU, physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Dunod, 2001.
4. <https://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/>
5. <http://koeniguer.perso.cegetel.net/ips/ips.html>

# Plan de l'exposé

## La jonction pn

- Définition;
- Paramètres de base d'une jonction pn;
- Composantes du courant en polarisation directe et inverse;
- Caractéristique  $I(V)$ ;
- Approximations en DC;
- Procédé technologique de réalisation de la jonction pn;
- Autres variantes de la jonction pn;
- Applications.

# Les composants discrets

## Jonction PN

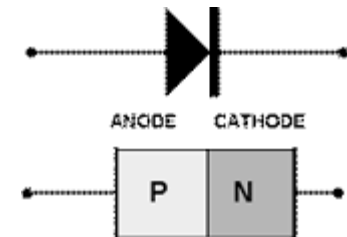
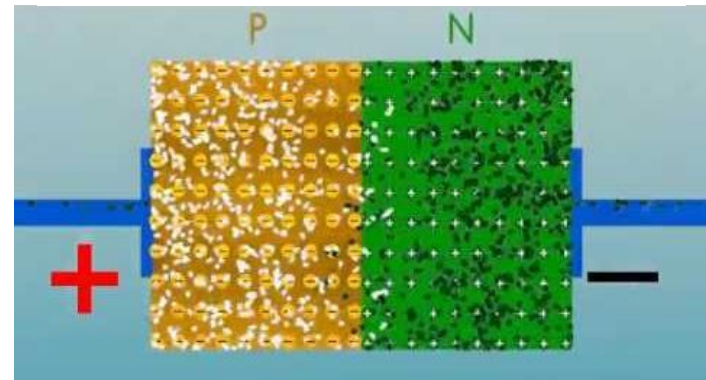
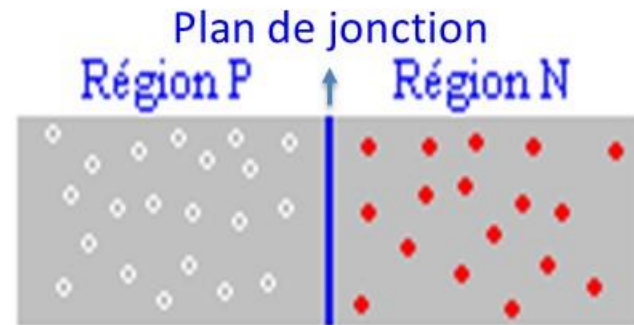
### Définition :

On dit **qu'il y a jonction** dans un cristal semi-conducteur lorsque ce cristal contient **un excès de donneurs d'un coté (région N)** et **un excès d'accepteurs de l'autre coté (région P)**.

On appelle **plan de jonction**, la frontière entre les deux régions.

### Remarque

La réalisation d'une jonction se fait **sur le même substrat semi-conducteur** et non pas **par la juxtaposition de deux cristaux** l'un de type N et l'autre de type P.



# Les composants discrets

## La jonction PN

### Zone de charge d'espace

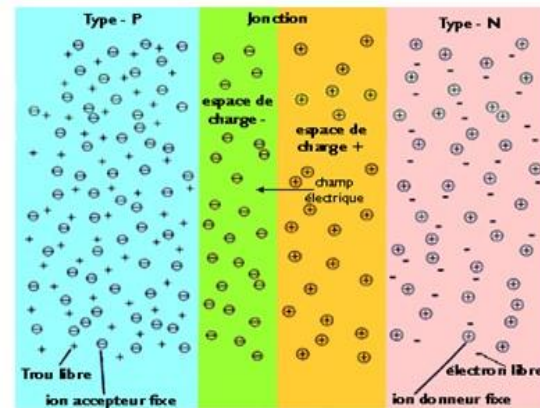
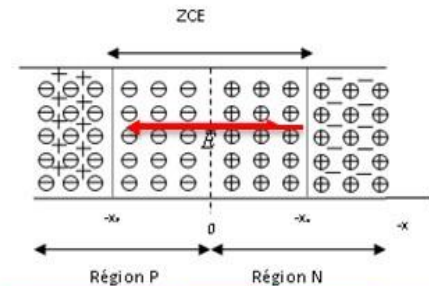
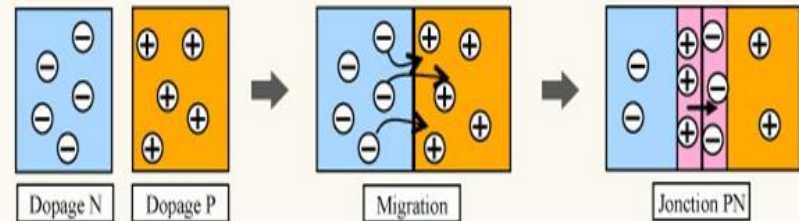
#### A cause de:

- la diffusion des trous de la région P vers la région N;
- la diffusion des électrons de la région N vers la région P.

il se crée au voisinage de l'interface une zone dépourvue de porteurs libres appelée zone de charge d'espace (ZCE).

#### Cette région est constituée des:

- Atomes donneurs fixes chargés positivement du côté N
- Atomes accepteurs fixes chargés négativement du côté P



# Les composants discrets

## La jonction PN

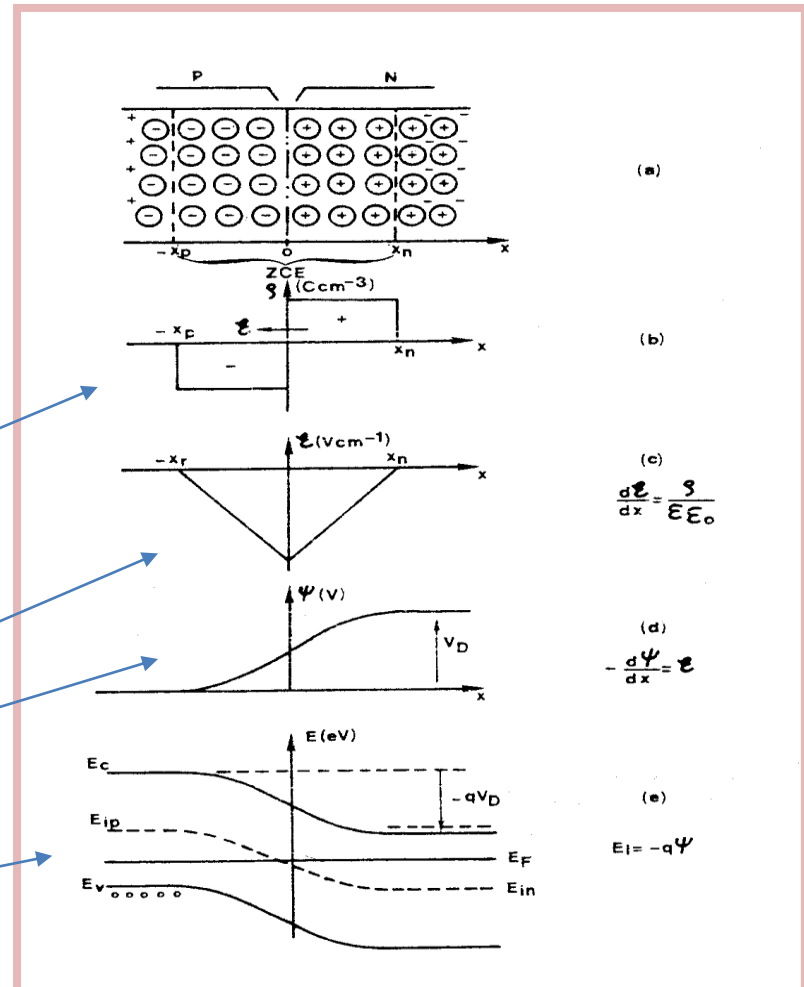
### Les différents profils à l'équilibre

- **La jonction PN à l'équilibre** : Une jonction à l'équilibre vérifie la double condition :

- Polarisation nulle ;
- Eclairement nul.

### Les profils qui s'établissent sont:

- Profil des charges;
- Profil du champ électrique;
- Profil du Potentiel;
- Diagramme des bandes.



# Les composants discrets

## La jonction PN

### Densités de porteurs libres dans chaque région

Les densités de porteurs libres dans chacune des régions sont alors données par:

$n_n = N_d$	$p_n = n_i^2 / N_d$	Région n
$n_p = n_i^2 / N_a$	$p_p = N_a$	Région p

En supposant tous les donneurs et accepteurs ionisés, la charge d'espace dans chacune des régions de la jonction s'écrit:

$$\rho(x) = e[N_d - N_a + p(x) - n(x)]$$

### N.B.:

En raison de la présence, dans la zone de charge d'espace, d'un champ électrique intense, la densité de porteurs libres dans cette région est négligeable.

# Les composants discrets

## La jonction PN

### Les paramètres de la jonctions à l'équilibre

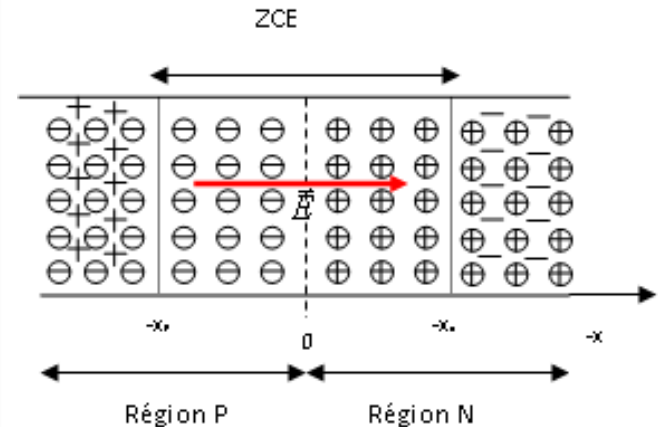
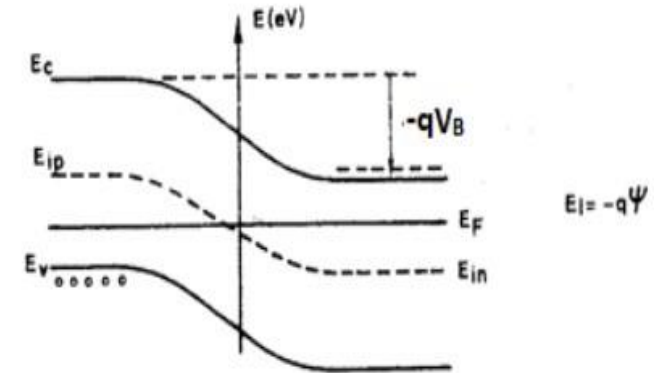
- Le potentiel de diffusion

$$V_B = V_T \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad V_T = kT/e$$

- La largeur de la zone de charge d'espace

$$x_n = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_s}{e N_D} \frac{N_A}{(N_D + N_A)} V_B} \quad x_p = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_s}{e N_A} \frac{N_D}{(N_D + N_A)} V_B}$$

$$W = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_s}{e} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) V_B}$$





# Les composants discrets

## La jonction PN

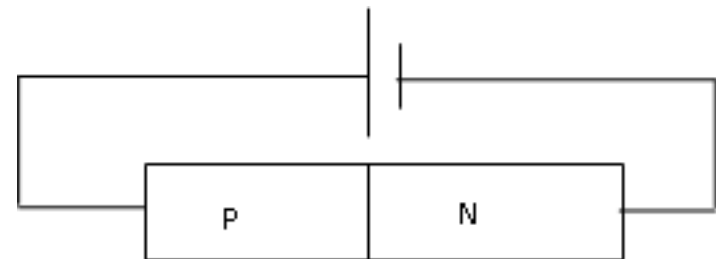
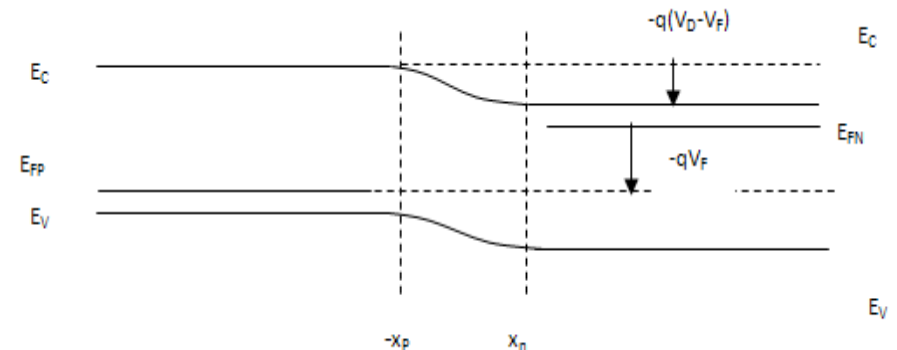
### La jonction PN polarisée en direct

$V_{\text{Appliquée}} = V_F$  (F=Forward)

$$x_n = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_0 \varepsilon_s}{e N_D} \frac{N_A}{(N_D + N_A)} (V_B - V_F)}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_0 \varepsilon_s}{e N_A} \frac{N_D}{(N_D + N_A)} (V_B - V_F)}$$

$$W = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_0 \varepsilon_s}{e} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) (V_B - V_F)}$$



# Les composants discrets

## La jonction PN

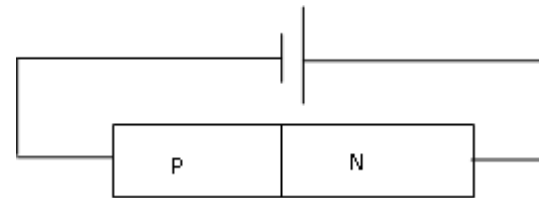
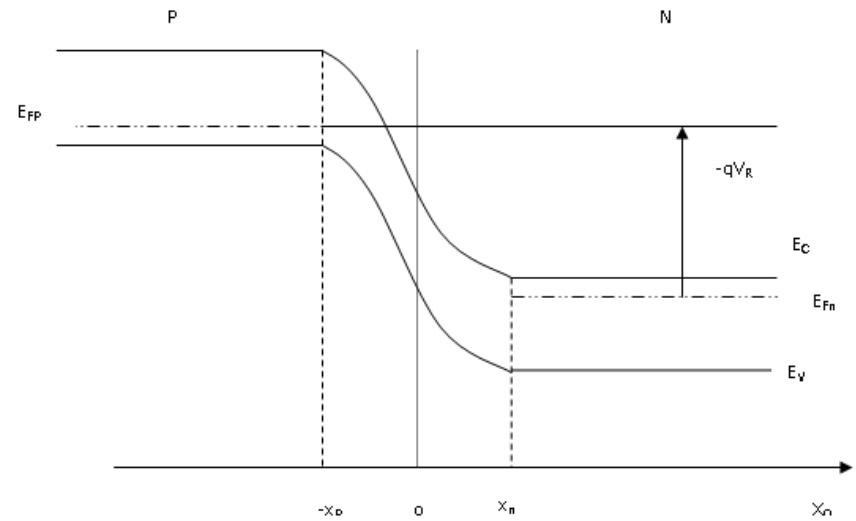
### La jonction PN polarisée en inverse

$V_{\text{appliquée}} = V_R$  (R=reverse)

$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_s}{eN_D} \frac{N_A}{(N_D + N_A)} (V_B + |V_R|)}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_s}{eN_A} \frac{N_D}{(N_D + N_A)} (V_B + |V_R|)}$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_s}{e} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) (V_B + |V_R|)}$$



# Les composants discrets

## La jonction PN

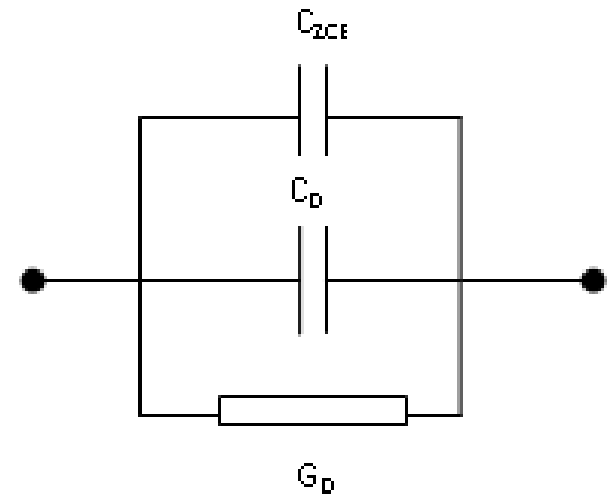
Le schéma équivalent en polarisation directe

Les capacités **de charge d'espace** et **de diffusion** ainsi que **la conductance** sont données par (capacité par unité de surface):

$$C_{ZCE} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s}{W} = \left[ \frac{e \varepsilon_0 \varepsilon_s N_A N_D}{2(N_A + N_D)} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sqrt{V_B - V_F}}$$

$$C_D = \frac{e}{k_B T} \left[ \frac{e L_{pn} P_{n0}}{2} \exp\left(\frac{e V_F}{k_B T}\right) \right]$$

$$G_D = \frac{e}{k_B T} \left[ \frac{e D_{pn} P_{n0}}{L_{pn}} \exp\left(\frac{e V_F}{k_B T}\right) \right]$$



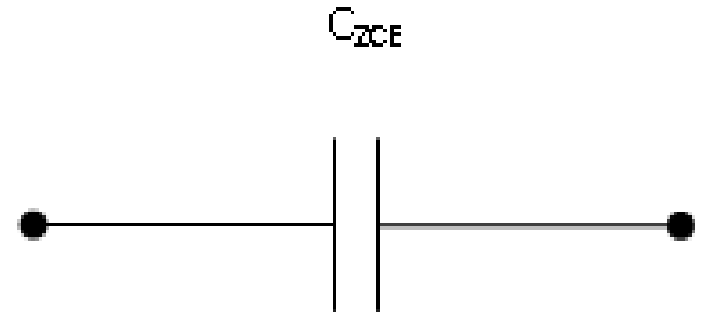
# Les composants discrets

## La jonction PN

Le schéma équivalent en polarisation inverse

La capacité est donnée par:

$$C_{ZCE} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s}{W} = \left[ \frac{e \varepsilon_0 \varepsilon_s N_A N_D}{2(N_A + N_D)} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sqrt{V_B + |V_R|}}$$



# Les composants discrets

## La jonction PN

### Les paramètres de la jonction polarisée en inverse

- Le champ maximal

$$E_{\max} = \left[ \frac{2eN_A N_D (V_B + V_R)}{\epsilon_0 \epsilon_s (N_A + N_D)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

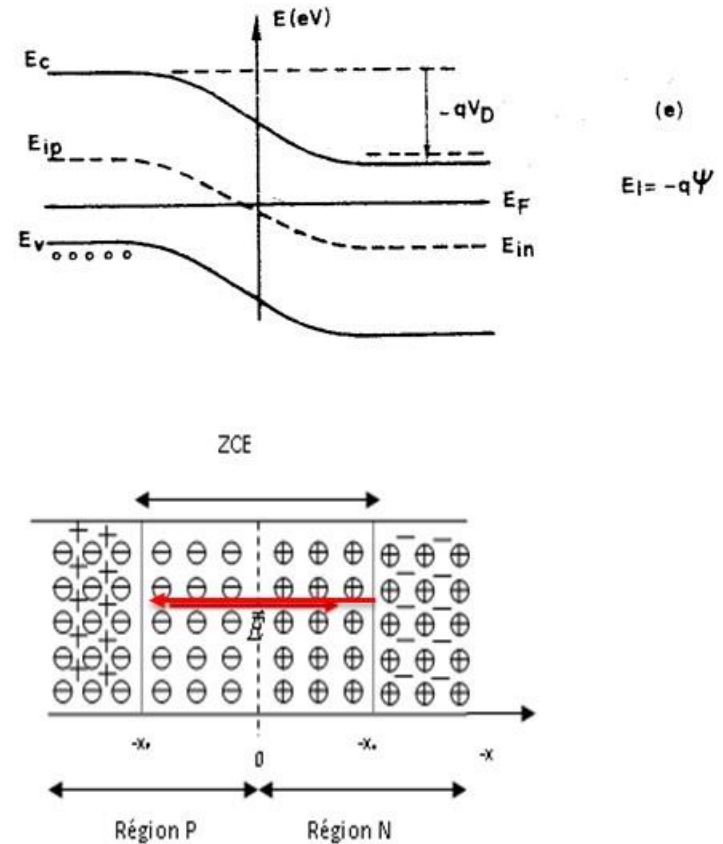
- La tension de claquage

$$BV = \frac{\xi_{crit} W}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s (N_A + N_D)}{2qN_A N_D} \xi_{crit}^2$$

- Le facteur multiplicatif

$$M = \frac{1}{1 - \left( \frac{V_R}{BV} \right)^n}$$

Avec  $n=3$  à  $6$

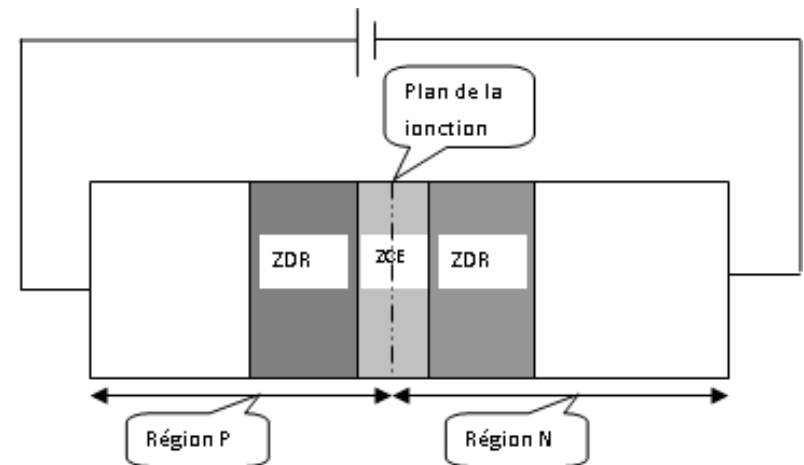


# Les composants discrets

## La jonction PN

Les différentes régions d'une jonction polarisée en direct

- Une zone de **charge d'espace (ZCE)** située au voisinage du plan de la jonction
- Deux zones de **diffusion recombinaison (ZDR)** situées des deux côtés de la ZCE.
  - La ZDR située dans la région P neutre correspond à la zone de diffusion recombinaison des électrons venant de la région N ;
  - La ZDR située dans la région N neutre correspond à la zone de diffusion recombinaison des trous venant de la région P.



# Les composants discrets

## La jonction PN

### Les composantes du courant en polarisation directe

- Une composante due aux recombinaisons dans la ZCE dite courant de recombinaison

$$J_R = \frac{en_i}{2\tau} W \left[ \exp\left(\frac{qV_F}{2k_B T}\right) - 1 \right]$$

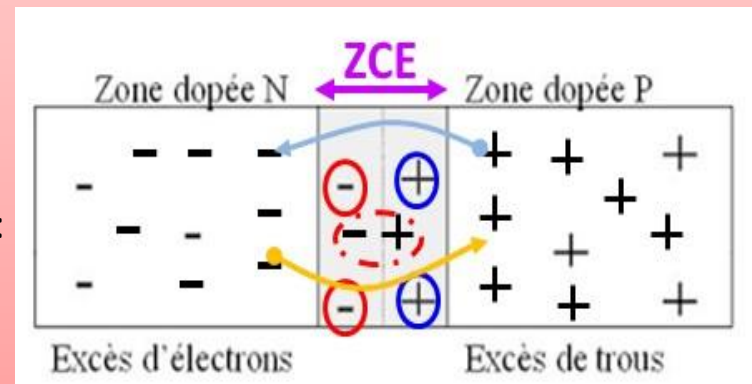
- Deux composantes dues aux recombinaisons dans les deux régions ZDR dites courants de diffusion des électrons et des trous et elles sont notées  $J_n$  et  $J_p$

$$J_n(-x_p) = \frac{e D_{nP}}{L_{nP}} \frac{n_i^2}{N_A} \left[ \exp\left(\frac{eV_F}{2k_B T}\right) - 1 \right]$$

$$J_p(x_n) = \frac{e D_{Pn}}{L_{Pn}} \frac{n_i^2}{N_D} \left[ \exp\left(\frac{eV_F}{2k_B T}\right) - 1 \right]$$

Donc, le courant de diffusion total est donné par :

$$J_D = e n_i^2 \left( \frac{D_{nP}}{L_{nP} N_A} + \frac{D_{Pn}}{L_{Pn} N_D} \right) \left[ \exp\left(\frac{eV_F}{2k_B T}\right) - 1 \right]$$



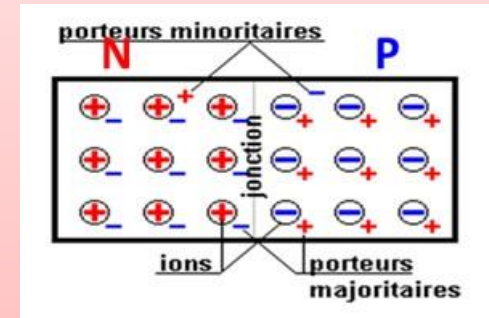
# Les composants discrets

## La jonction PN

### Les composantes du courant en polarisation inverse

- Courant de diffusion des porteurs minoritaires dû aux électrons de la région P et aux trous de la région N qui arrivent à atteindre la ZCE

$$J_{\text{dif. min.}} = -en_i^2 \left( \frac{D_{nP}}{L_{nP} N_A} + \frac{D_{Pn}}{L_{Pn} N_D} \right)$$



- Courant de génération thermique dû aux paires électrons trous générés thermiquement dans la ZCE .

$$J_{\text{Géné}} = -eW \frac{n_i}{2\tau}$$

- Courant de fuite superficielle dû aux impuretés et imperfections de la surface. L'expression de ce courant qui augmente quand la polarisation inverse augmente n'est pas connue.



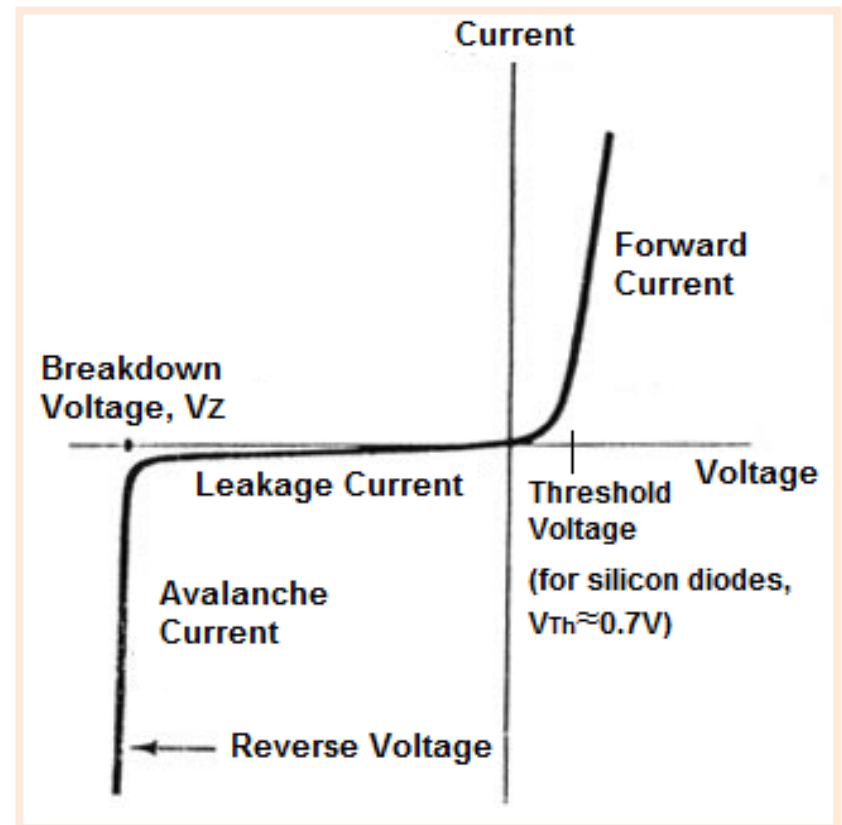
# Les composants discrets

## La jonction PN

### La caractéristique I(V)

#### Caractéristique I(V)

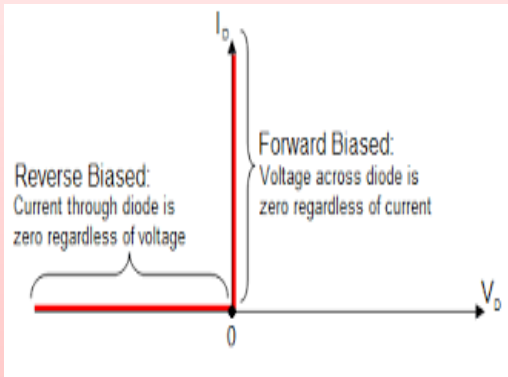
Le fait que la jonction soit *passante* (passage du courant) dans un sens et *non* dans l'autre fait de la jonction PN un *dispositif redresseur*. C'est cette propriété qui est à la base du fonctionnement de la diode à jonction.



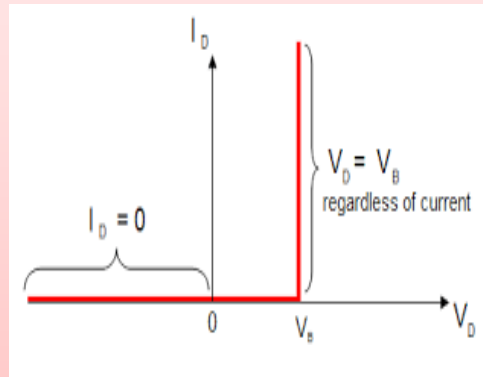
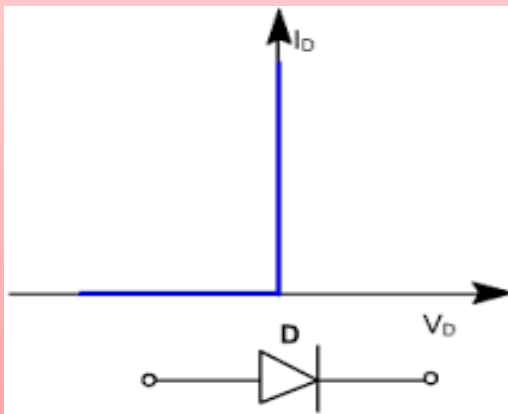
# Les composants discrets

## La jonction PN

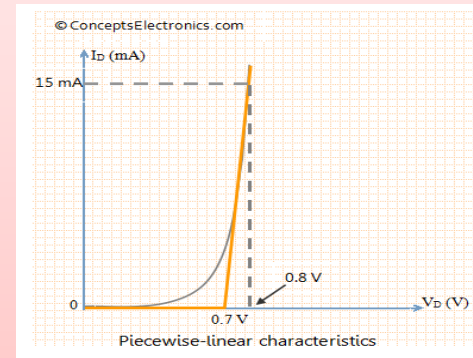
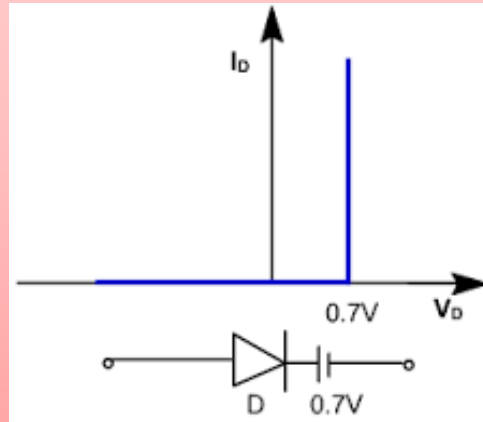
### Les différentes approximations en DC



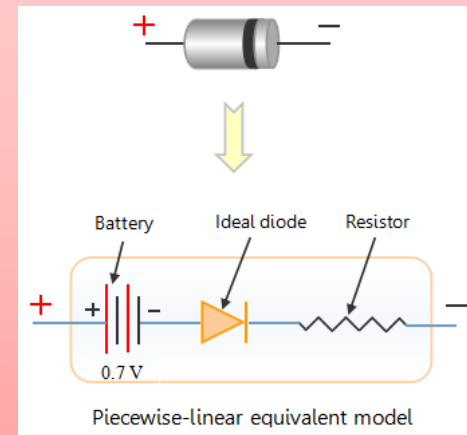
First approximation



Second approximation



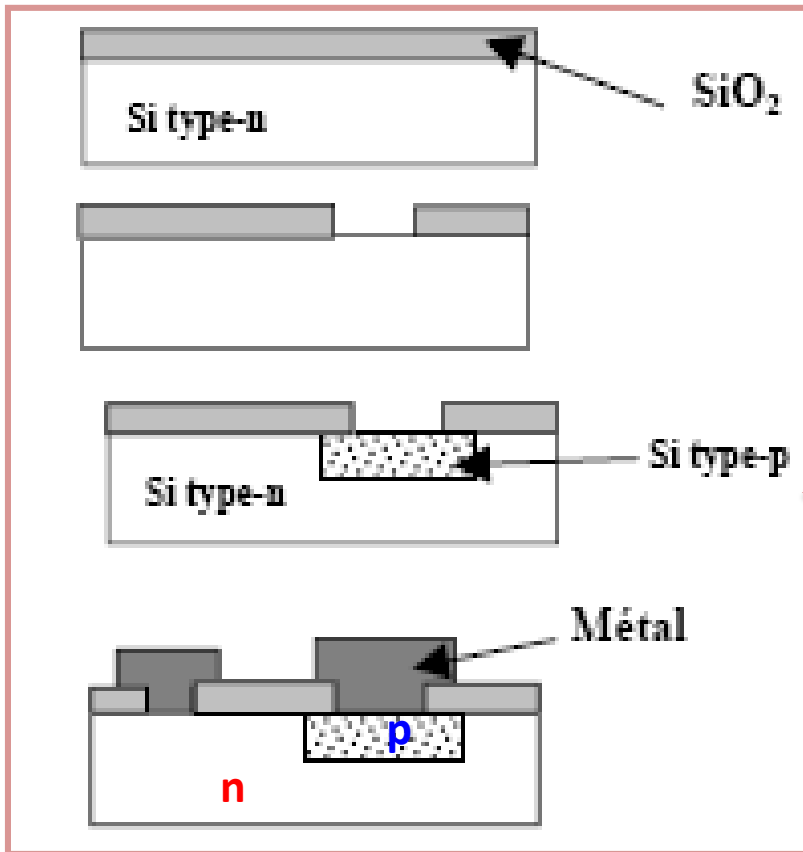
Third approximation



# Les composants discrets

## La jonction PN

### Réalisation



Il y a plusieurs techniques de préparation de la jonction PN à savoir :

Alliage ;

Diffusion thermique ;

Epitaxie ;

Implantation ionique.

# Les composants discrets

## La jonction PN

Autres variantes de diodes

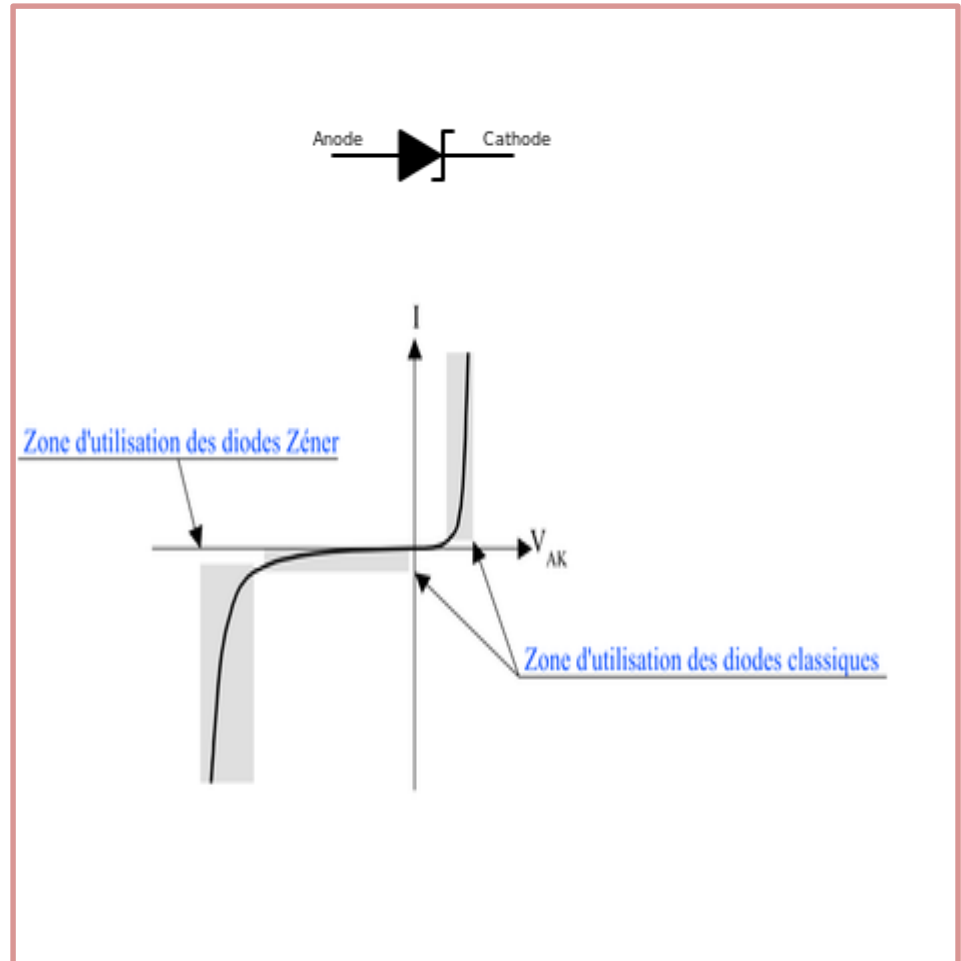
# Diode Zener

## Fonctionnement

Contrairement aux diodes conventionnelles, les **diodes Zener** sont **conçues** de façon à **laisser également passer le courant inverse**, mais ceci uniquement **si la tension à ses bornes est plus élevée que le seuil de l'effet d'avalanche**.

Ce seuil en tension inverse, appelé **tension Zener**, est de valeur déterminée pouvant aller de **1,2 V à plusieurs centaines de volts**.

Certaines **diodes Zener** comportent une **troisième broche** qui permet de **régler** cet effet d'avalanche.



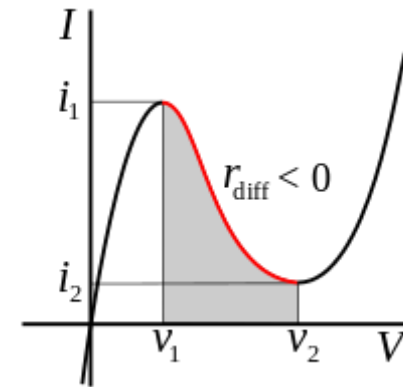
# Diode Tunnel

## Fonctionnement

Dans la diode tunnel, le dopage des couches P et N est si important que la tension de claquage est égale à zéro volt

Cette diode conduit donc en inverse, mais lors de son utilisation en direct, l'effet Tunnel se produit donnant à la caractéristique de cette diode une zone où l'augmentation de la tension aux bornes de la diode entraîne une diminution du courant la traversant.

Cela correspondant à une Résistance négative

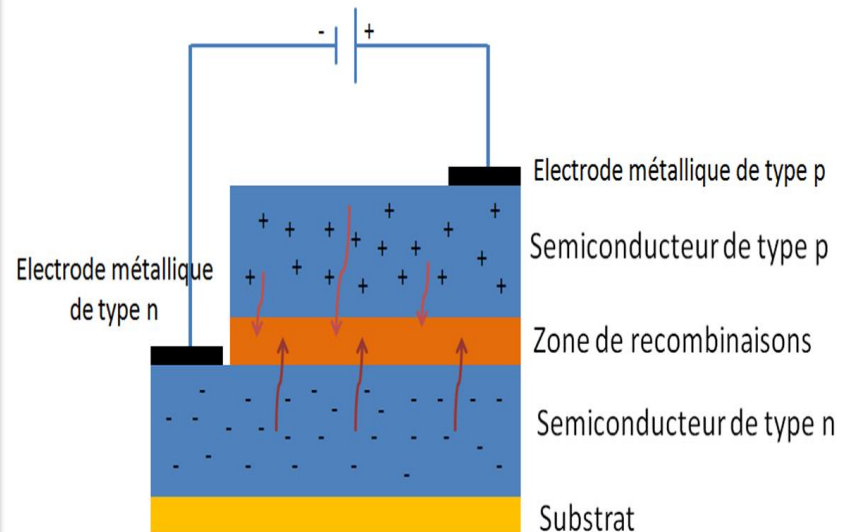


# Diode Electroluminescente (LED)

## Fonctionnement

Une **diode électroluminescente** est un dispositif optoélectronique **capable d'émettre de la lumière** lorsqu'il est **parcouru par un courant électrique**.

Une diode électroluminescente ne **laisse passer le courant électrique que dans un seul sens** (le sens passant, comme une diode classique, l'inverse étant le sens bloquant) et **produit un rayonnement monochromatique** ou **polychromatique non cohérent** à partir de la conversion d'énergie électrique lorsqu'un courant la traverse.



# Applications de la diode à jonction

**Les applications de la diode à jonction sont nombreuses:**

- Redressement et détection Signaux RF;
- Stabilisation de tension (diode Zener);
- Varactor (variation de C avec la tension);
- Oscillation à temps de transit (diode Impatt);
- Oscillateur Tunnel;
- Photodétecteurs et détecteurs nucléaires;
- Cellules solaires;
- Thermométrie.