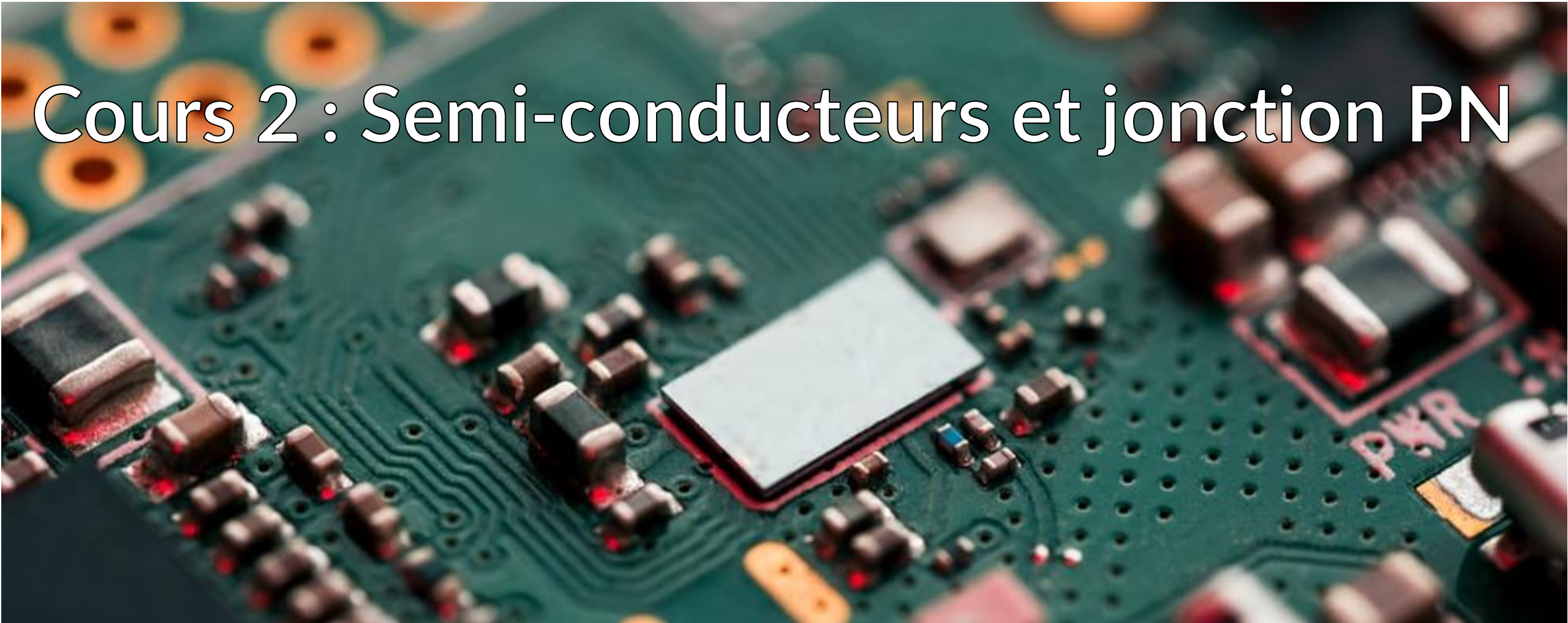


Cours 2 : Semi-conducteurs et jonction PN



Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Les semi-conducteurs

1. Les semi-
conducteurs (SC)

A. Structure de
l'atome

B. Energie thermique

C. Semi-conducteur

- SC purs
- SC dopés

D. Courant dans un SC

- Courant de conduction
- Courant de diffusion

2. La jonction PN

A. A l'équilibre

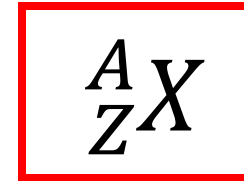
B. Polarisation directe

C. Polarisation inverse

Structure de l'atome

- Un atome est électriquement neutre. Il est composé d'un noyau positif comprenant des nucléons (protons positifs et neutrons neutres) et d'un nuage électronique.

Symbole du noyau :



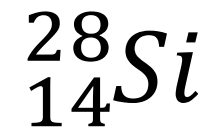
Z = numéro atomique = nombre de protons, de charge $+e$

A = nombre de masse = nombre de nucléons

= nombre de protons Z + nombre de neutrons N

- L'atome, électriquement neutre, possède donc autant d'électrons négatifs que de protons positifs. Le nuage électronique est donc composé de Z électrons.

Exemple avec l'atome de Silicium
particulièrement intéressant car on le
retrouve dans l'industrie du semi-conducteur.



Z = 14 protons

$N = A - Z = 14$ neutrons

14 protons donc 14 électrons

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

A. Structure de l'atome

B. Energie thermique

C. Semi-conducteur

- SC purs
- SC dopés

D. Courant dans un SC

- Courant de conduction
- Courant de diffusion

2. La jonction PN

A. A l'équilibre

B. Polarisation directe

C. Polarisation inverse

Le modèle de Bohr (simpliste et obsolète) décrit l'atome comme un modèle planétaire avec des électrons occupant des couches ayant des niveaux d'énergie définie.

- Les couches se nomment : K, L, M, N, etc ...
Chacune d'elles ne peut être occupée que par $2n^2$ électrons au maximum, n étant le numéro de la couche, ou encore nombre quantique principal.

$$n = 1, \text{ couche K : } 2 \times 1^2 = 2 \text{ électrons au maximum}$$

$$n = 2, \text{ couche L : } 2 \times 2^2 = 8 \text{ électrons au maximum}$$

$$n = 3, \text{ couche M : } 2 \times 3^2 = 18 \text{ électrons au maximum, etc. ...}$$

- La **structure électronique** d'un atome définit le remplissage des électrons dans les couches, sachant que ceux-ci se placent déjà dans la couche de plus basse énergie K, puis remplissent les couches de plus hautes énergies : L, M, N, etc. ...

Exemple : structure électronique de l'atome de Silicium :

14 électrons : soit 2 dans la couche K, puis 8 dans la couche L et enfin 4 dans la couche M, d'où la structure électronique : $(K)^2(L)^8(M)^4$

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

A. Structure de l'atome

B. Energie thermique

C. Semi-conducteur

- SC purs
- SC dopés

D. Courant dans un SC

- Courant de conduction
- Courant de diffusion

2. La jonction PN

A. A l'équilibre

B. Polarisation directe

C. Polarisation inverse

- La dernière couche remplie est appelée **couche de valence**. Les électrons de valence contribuent à la conduction électrique dans le métal.
- Les atomes sont rangés dans une **classification périodique** (de Mendeleïev) par numéros atomiques croissants. Mais la particularité de cette classification est que **les atomes d'une même colonne ont le même nombre d'électrons de valence**, formant ainsi une famille avec des propriétés chimiques et parfois physiques similaires.

Bore 5 B 10,8135	Carbone 6 C 12,0106	Azote 7 N 14,006855	Oxygène 8 O 15,99940
Aluminium 13 Al 26,9815385	Silicium 14 Si 28,085 (1)	Phosphore 15 P 30,97376200	Soufre 16 S 32,0675

La structure électronique du Silicium est $(K)^2(L)^8(M)^4$, sa couche de valence est donc la couche M, donc l'atome de Silicium a 4 électrons de valence, comme le carbone.

- Le Bore et le Phosphore vont aussi jouer un rôle important dans l'industrie des semi-conducteurs :
 - Le **bore**, est dans la colonne avant celle du Silicium, et a donc que 3 électrons de valence. Il intervient dans le **dopage de type P**.
 - Le **Phosphore**, est dans la colonne après celle du Silicium, et a donc 5 électrons de valence. Il intervient dans le **dopage de type N**.

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

A. Structure de l'atome

B. Energie thermique

C. Semi-conducteur

- SC purs
- SC dopés

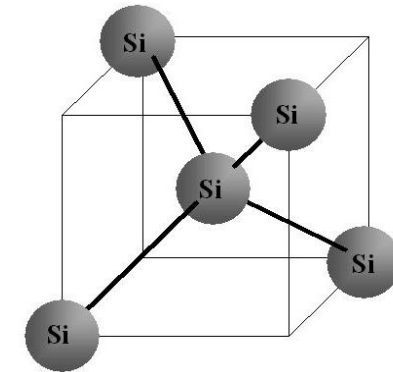
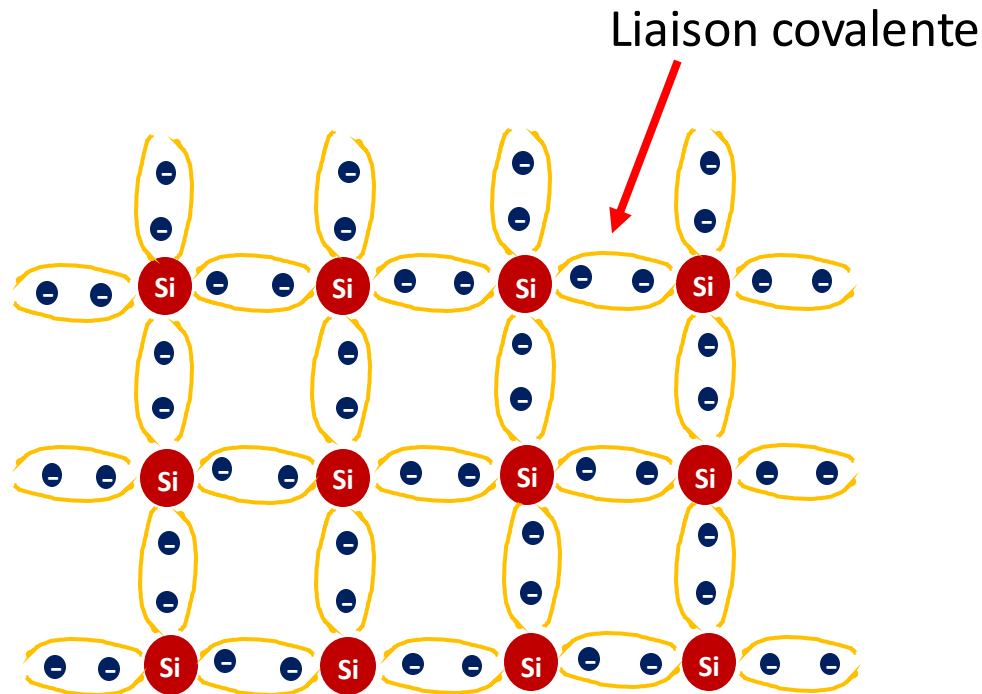
D. Courant dans un SC

- Courant de conduction
- Courant de diffusion

2. La jonction PN

- ### A. A l'équilibre
- ### B. Polarisation directe
- ### C. Polarisation inverse

- Les liaisons entre les atomes de silicium respectent généralement la règle de l'octet : Le silicium comme le carbone tend à former **des liaisons covalentes** pour compléter sa couche de valence avec huit électrons ce qui lui confère une stabilité maximale.
- On parle de liaisons covalentes car la différence d'électronégativité est nulle sachant que les deux atomes formant la liaison Si-Si sont identiques. (A l'inverse, la liaison Na-Cl est ionique car les atomes de sodium et de Chlore ont chacun une électronégativité très différente)



Les atomes de silicium, comme ceux du carbone, sont inscrits dans une structure tétraédrique

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. **Energie thermique**
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Énergie thermique

- On peut, pour simplifier, considérer que les atomes de Silicium sont reliés entre eux par des ressorts, et que l'ensemble forme une matrice d'atomes.

Si on plonge cette matrice dans un bain thermique, les ressorts se mettent à vibrer, selon différents degrés de liberté, comme la translation, la rotation, ou la vibration.

La matrice d'atomes acquiert alors de l'énergie thermique liés à ces vibrations, l'énergie thermique E_{Th} étant l'énergie cinétique moyenne $\langle E_C \rangle$ de vibration des atomes.

- **Théorème d'équipartition :**

Le théorème d'équipartition de l'énergie est fondamental en physique. Il stipule que, à l'équilibre thermique, l'énergie est répartie également entre tous les degrés de liberté d'un système. En d'autres termes, chaque degré de liberté d'une particule dans un système à une température donnée possède une énergie cinétique moyenne de :

$$E_{Th} = \langle E_C \rangle = \frac{1}{2} k_B T$$

T = température (en Kelvin)

k_B = constante de Boltzmann

$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. **Energie thermique**
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Dans le cas **des atomes dans un semi-conducteur**, on considère principalement les degrés de liberté de translation. les degrés de liberté de translation sont les trois axes : (Ox), (Oy), et (Oz). Cela signifie que les atomes vibrent dans ces trois directions.

Un axe correspond à une énergie cinétique moyenne de $E_{Th} = \langle E_C \rangle = \frac{1}{2} k_B T$, pour 3 axes, il faut multiplier par 3 !

$$E_{Th} = \langle E_C \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

⇒ La température est donc, à un facteur près, l'énergie cinétique moyenne d'agitation des particules (ici les atomes).

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. **Energie thermique**
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Lien avec l'électronique :

$$E_{Th} = \langle E_C \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

Cas du conducteur :

D'après la relation, si la température T du métal augmente, l'énergie cinétique $\langle E_C \rangle$ moyenne de vibration des atomes augmente. Cela crée plus de collisions avec les atomes du réseau ce qui diminue la mobilité μ des électrons, et par conséquent une augmentation de la résistivité ρ et donc une diminution de la conductivité γ (car $\gamma = 1/\rho$).

Conclusion :

si $T \nearrow$ alors $\gamma \searrow$, (donc $R \nearrow$)

Cas du semi-conducteur :

Dans un semi-conducteur, il y a deux types de porteurs de charge : les électrons et les trous (dont on parlera un peu plus loin). La mobilité, comme précédemment, des électrons et des trous diminue si la température augmente.

MAIS, le nombre de porteurs de charges, (les électrons et les trous), augmente bien plus si T augmente (on parlera un peu plus loin), ce qui compense la diminution de leur mobilité, entraînant même une augmentation de la conductivité.

Conclusion :

si $T \nearrow$ alors $\gamma \nearrow$, (donc $R \searrow$)

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. **Semi-conducteur**
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

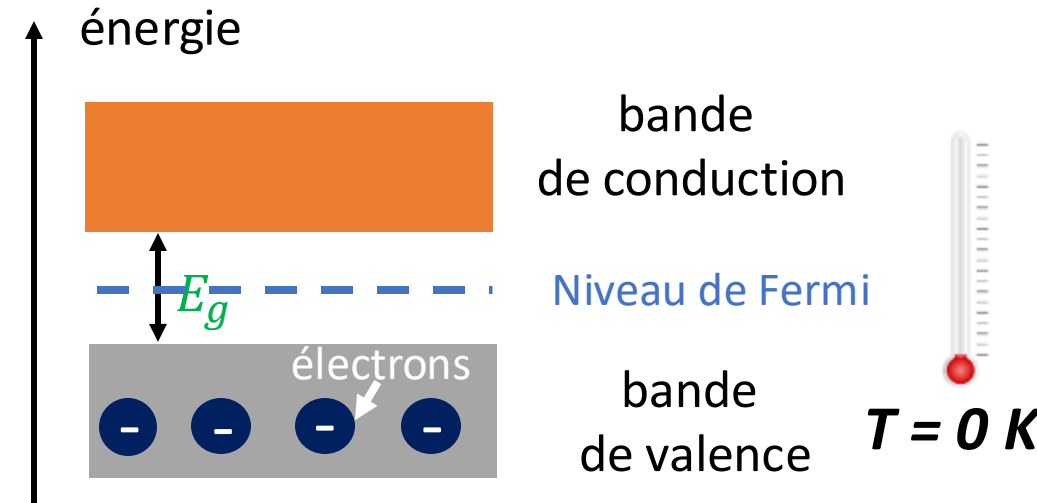
Différence entre un conducteur et un semi-conducteur

La différence principale entre un conducteur et un semi-conducteur réside dans leur capacité à conduire l'électricité.

Vocabulaire préliminaire :

Au zéro absolu (0 K) :

- **La bande de valence** d'un semi-conducteur est la dernière bande d'énergie TOTALEMENT occupée par les électrons.
- **La bande de conduction** est celle haut dessus de la bande de valence et elle est TOTALEMENT vide.
- **Le niveau de Fermi** est le niveau d'énergie le plus élevé occupable par les électrons au zéro absolu. (Analogie entre le niveau de fermi et le flotteur sur l'eau, le flotteur étant au niveau maximum où peut se trouver l'eau.)



L'énergie E_g qui sépare la bande de valence de la bande de conduction est appelée le « **gap** » (fossé, bande interdite).

Le SC se comporte comme un isolant, car pas d' e^- dans la bande de conduction.

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

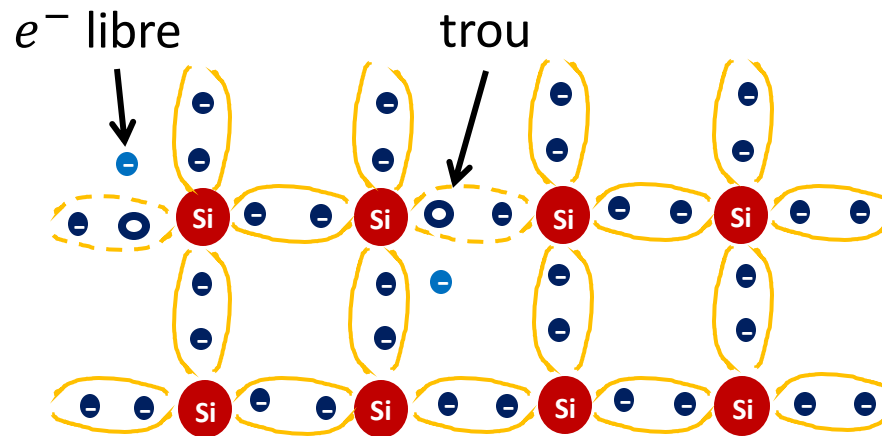
- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

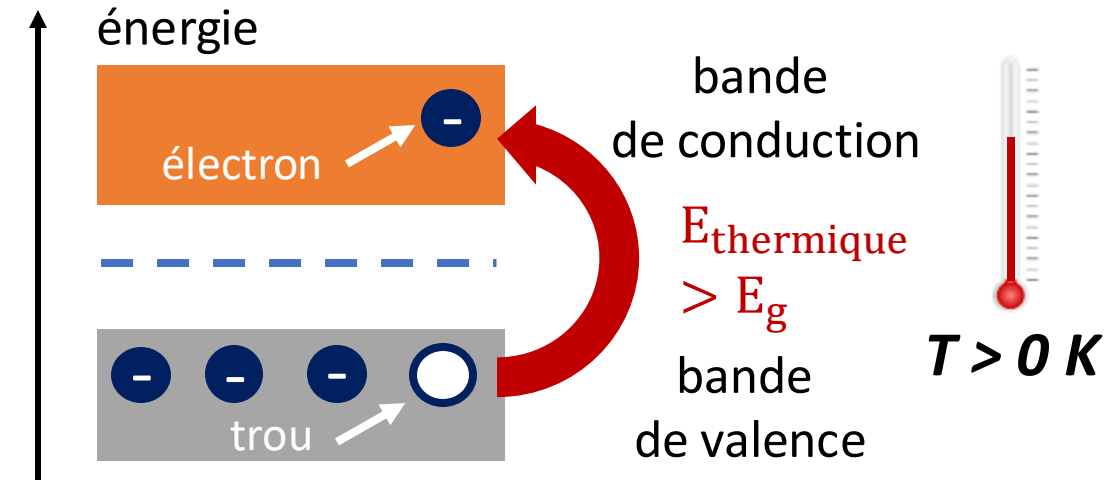
- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

En augmentant la température ($T > 0K$) :

- les e^- acquièrent de l'énergie et certains d'entre eux passent dans la bande de conduction : ils deviennent des e^- libres.
- Les e^- libres laissent derrière eux des espaces vacants dans la bande de valence du cristal : des **trous** (particules fictives encore appelées quasi-particules auxquelles on associe une charge opposée à celle de l'électron : $q = +e$).
- On parle de **recombinaison de paire électron-trou** lorsqu'un e^- de la bande de conduction perd de l'énergie et retombe dans un trou de la bande de valence.



Remarque importante :
La notion de trou est bien plus complexe, mais le modèle d'un trou qui se déplace dans le sens opposé des électrons marche bien.
(comme le modèle de Drude!)



Le SC se comporte comme un conducteur grâce à la présence d' e^- dans la bande de conduction et de trous dans la bande de valence.

⇒ La conductivité $\gamma \nearrow$ si $T \nearrow$

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Conducteurs : (exemple : cuivre, aluminium)

- **Conductivité élevée** : Les conducteurs, comme les métaux (cuivre, aluminium), ont une conductivité électrique très élevée. Cela signifie que les électrons peuvent se déplacer librement à travers le matériau, permettant un flux de courant électrique sans grande résistance.
- **Bande de conduction** : Dans un conducteur, la bande de conduction est partiellement remplie, **le niveau de Fermi est dans la bande de conduction ce qui permet aux électrons de se déplacer facilement. La distinction entre les bandes de valence et de conduction n'a pas de sens dans les métaux**, car la conduction se produit dans la bande de conduction partiellement remplie. (Rq : une bande totalement vide ou totalement remplie ne conduit pas)

Semi-conducteurs : (exemple : silicium, germanium)

- **Conductivité intermédiaire** : **Les semi-conducteurs ont une conductivité électrique qui se situe entre celle des conducteurs et celle des isolants.** Leur capacité à conduire l'électricité peut être modifiée par des facteurs externes comme la température ou le dopage (ajout d'impuretés).
- **Bande interdite** : **Les semi-conducteurs possèdent une petite bande interdite (gap) entre la bande de valence et la bande de conduction. Le niveau de Fermi est dans la bande interdite.** À température ambiante, certains électrons peuvent acquérir suffisamment d'énergie pour franchir cette bande interdite et contribuer à la conduction électrique.

Semi-conducteurs et jonction PN

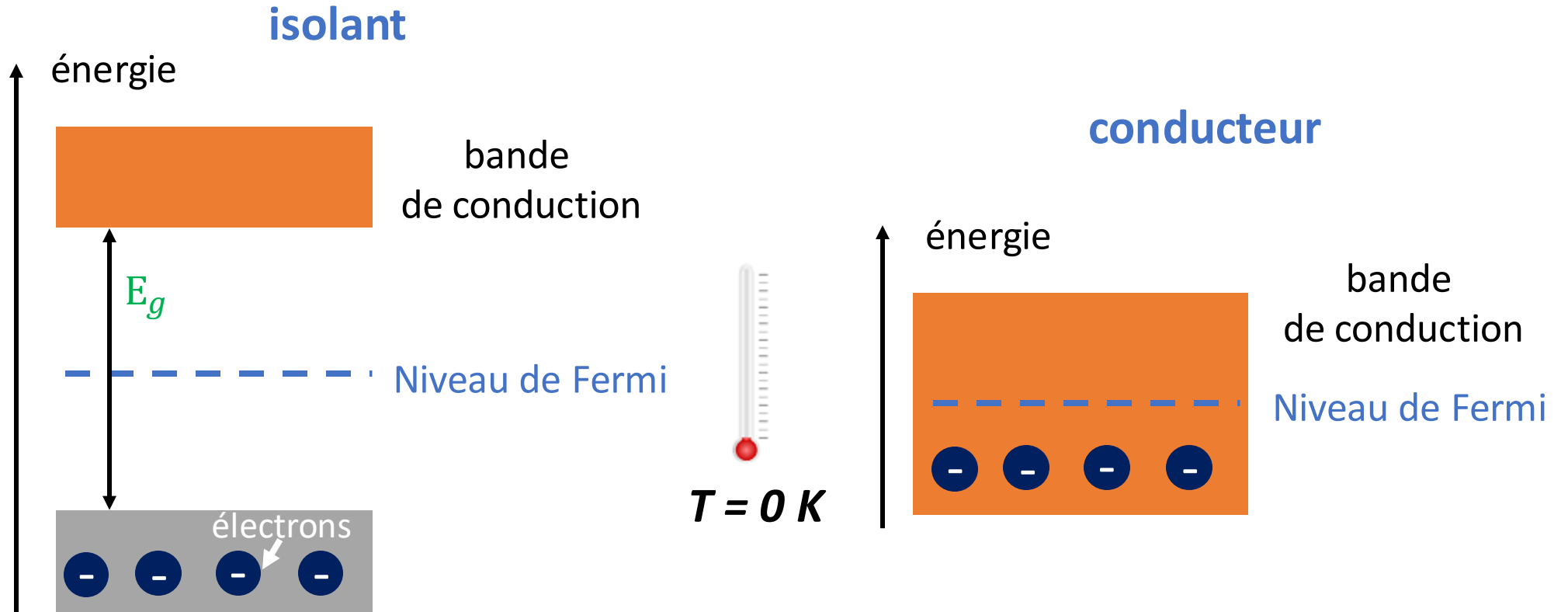
1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Différence fondamentale entre isolant et conducteur :



L'énergie E_g du gap est très grande empêchant les électrons de passer de la bande de valence à la bande de conduction. Si $T \nearrow$, quelques électrons passent dans la bande de conduction.

Le niveau de Fermi est dans la bande de conduction. Pas de bande de valence.

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Semi-conducteur pur : (ou encore intrinsèque)

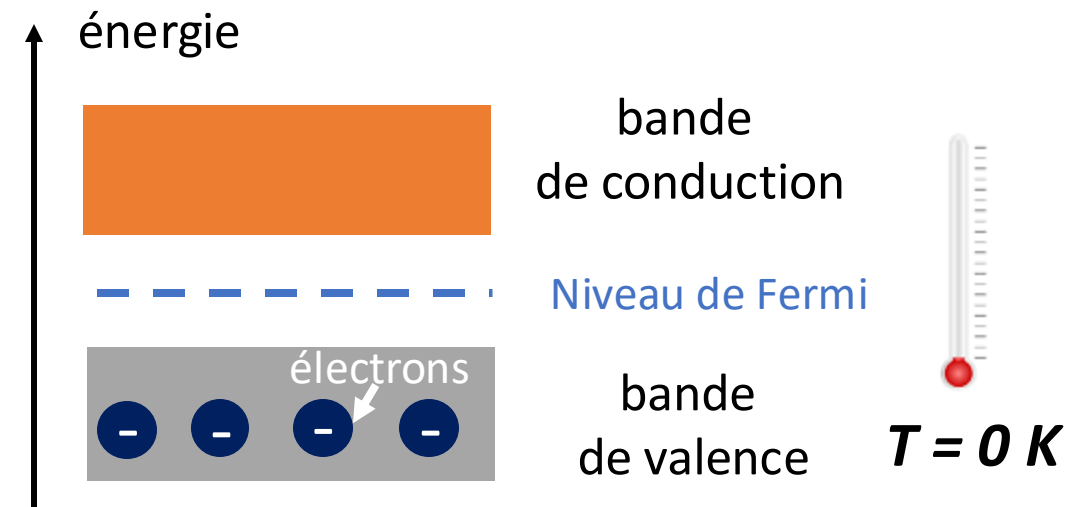
Dans un semi-conducteur **pur** (non dopé) (exemple Silicium pur) , la conductivité est limitée car il n'y a pas de porteurs de charge supplémentaires introduits par le dopage.

À température ambiante, seuls quelques électrons sont excités thermiquement de la bande de valence à la bande de conduction, créant ainsi des trous dans la bande de valence.

Dans un semi-conducteur **intrinsèque**, **le niveau de Fermi est exactement au milieu de la bande interdite**. La concentration d'électrons de conduction est égale à celle des trous.

On a alors : $n = p$

Remarque : le SC pur n'existe pas technologiquement parlant car il y a toujours des impuretés (= dopage P à $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, ce qui est considéré comme faible).



Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - **SC dopés**
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Semi-conducteur dopé (ou encore extrinsèque)

Dans un semi-conducteur **dopé** (par ajout d'impuretés), la conductivité est augmentée de manière significative, car le dopage introduit des porteurs de charge supplémentaires :

- **Dans le dopage de type N**, on introduit des **atomes donneurs d'électrons** (éléments du **groupe V** de la table périodique (comme le **phosphore**, l'**arsenic** ou l'**antimoine**) dans un matériau semi-conducteur comme le silicium, qui est un élément du **groupe IV**.)
- Ces atomes de type donneur ont **5 électrons de valence**, contre 4 pour le silicium. Lorsqu'un atome de phosphore (par exemple) remplace un atome de silicium dans le réseau cristallin, il se lie à ses voisins silicium avec 4 de ses électrons de valence, comme le ferait un atome de silicium. Cependant, le **5^e électron** est en excès.

Où va ce 5^e électron ?

- Cet électron excédentaire a beaucoup d'énergie par rapport aux électrons qui se trouvent dans la bande de valence du semi-conducteur. Il est donc **facilement libéré** par l'énergie thermique pour passer dans la **bande de conduction**, où il devient un **porteur de charge libre**, prêt à participer à la conduction électrique.
- Ainsi, le dopage de type N **augmente la concentration d'électrons** dans la bande de conduction. Ces électrons supplémentaires dans la bande de conduction améliorent évidemment la conductivité γ_{sc} du matériau semi-conducteur.

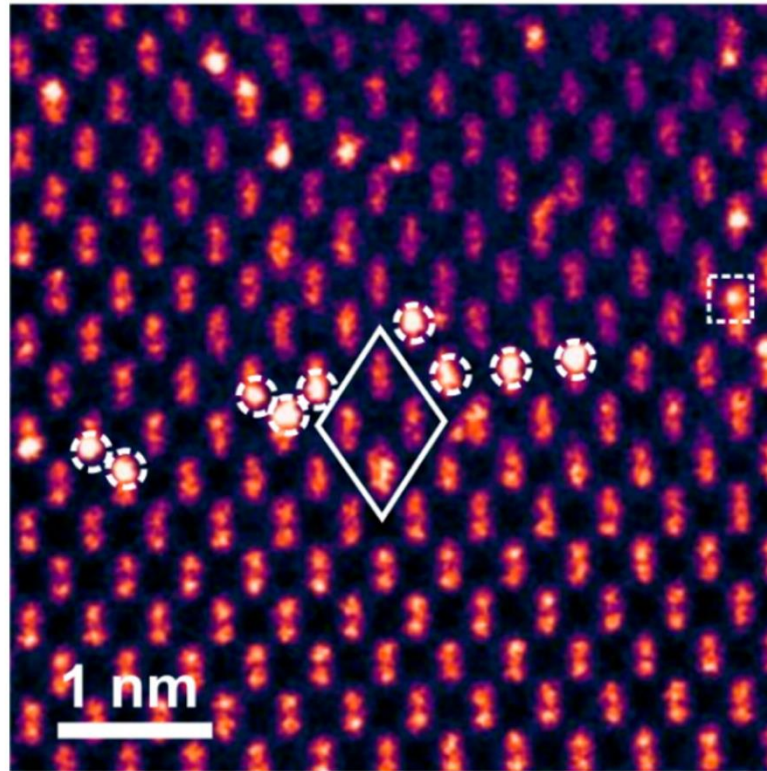
Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - **SC dopés**
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

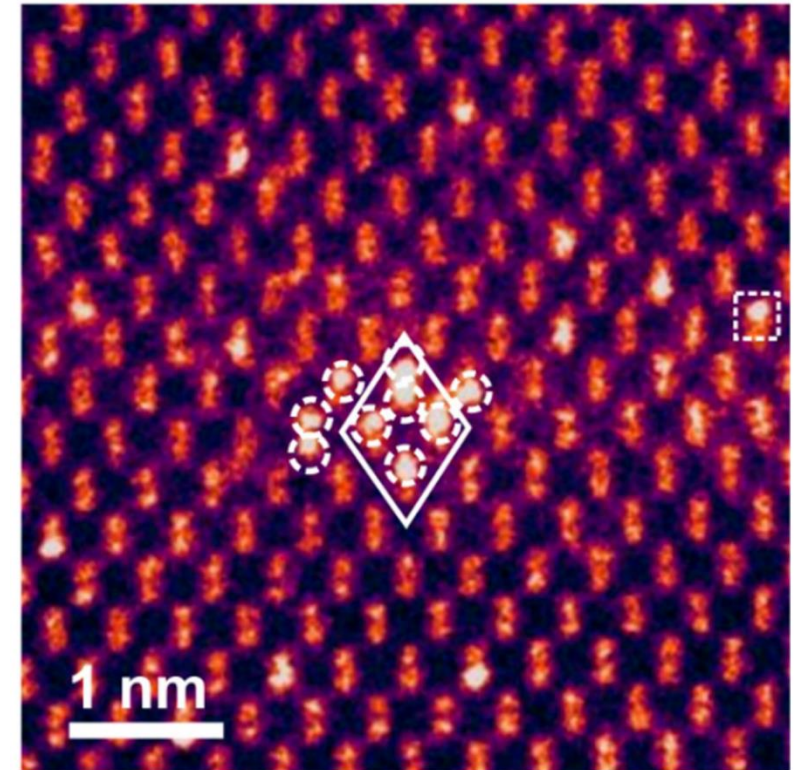
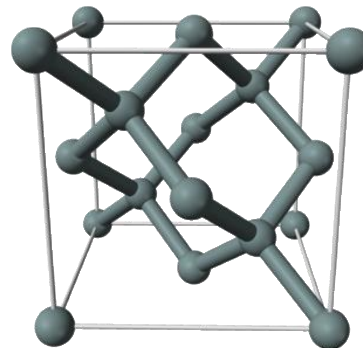
2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse



■ Silicium pur observé au METB

- Les atomes adoptant une structure cristalline de type diamant



■ même échantillon après **dopage de type N** (Bismuth)

- 1 atome de Bismuth est positionné dans le losange, changeant ainsi la structure locale

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Dopage de type P

- Dans le cas d'un semi-conducteur dopé de type p, on introduit des éléments du **groupe III** de la table périodique, comme le **bore**, dans un matériau semi-conducteur comme le silicium, qui est du **groupe IV**.
- Les atomes de bore (par exemple) ont seulement **3 électrons de valence**, alors que le silicium en a 4. Lorsqu'un atome de bore remplace un atome de silicium dans le réseau cristallin, il manque un électron pour compléter la liaison avec ses 4 voisins silicium.

Création d'un trou :

- Le réseau donne un électron au bore (qui est un électron de valence) ce qui crée un trou dans la bande de valence. Ce trou se comporte comme une charge positive.
- Ces trous peuvent se déplacer dans le matériau dans le sens identique à celui d'une particule positive.

Quelle est la conséquence de la création des trous ?

- En introduisant des atomes accepteurs comme le bore, on augmente donc la concentration des trous dans la bande de valence, ce qui augmente la conductivité γ_{sc} du matériau semi-conducteur.

Semi-conducteurs et jonction PN

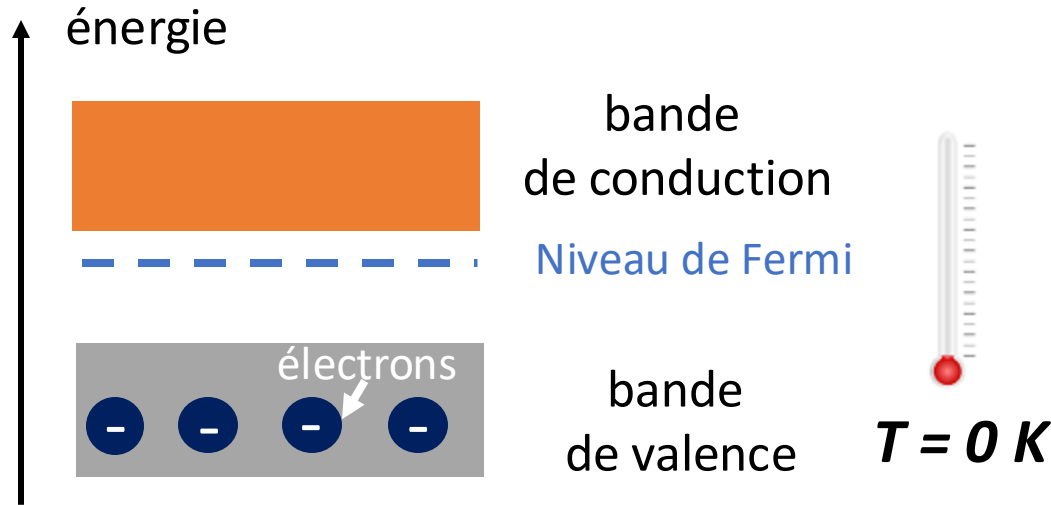
1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - **SC dopés**
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

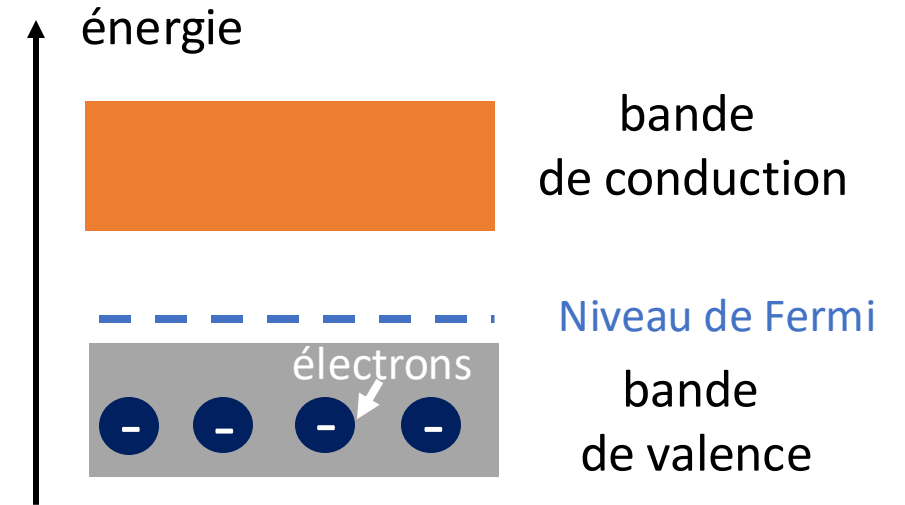
- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Dopage N



Le niveau de Fermi est plus proche de la bande de conduction, cela signifie qu'il y a plus d'électrons libres dans la bande de conduction qu'il n'y a de trous dans la bande de valence.

Dopage P



Le niveau de Fermi est plus proche de la bande de valence, ce qui signifie qu'il y a plus de trous dans la bande de valence que d'électrons libres dans la bande de conduction.

Semi-conducteurs et jonction PN

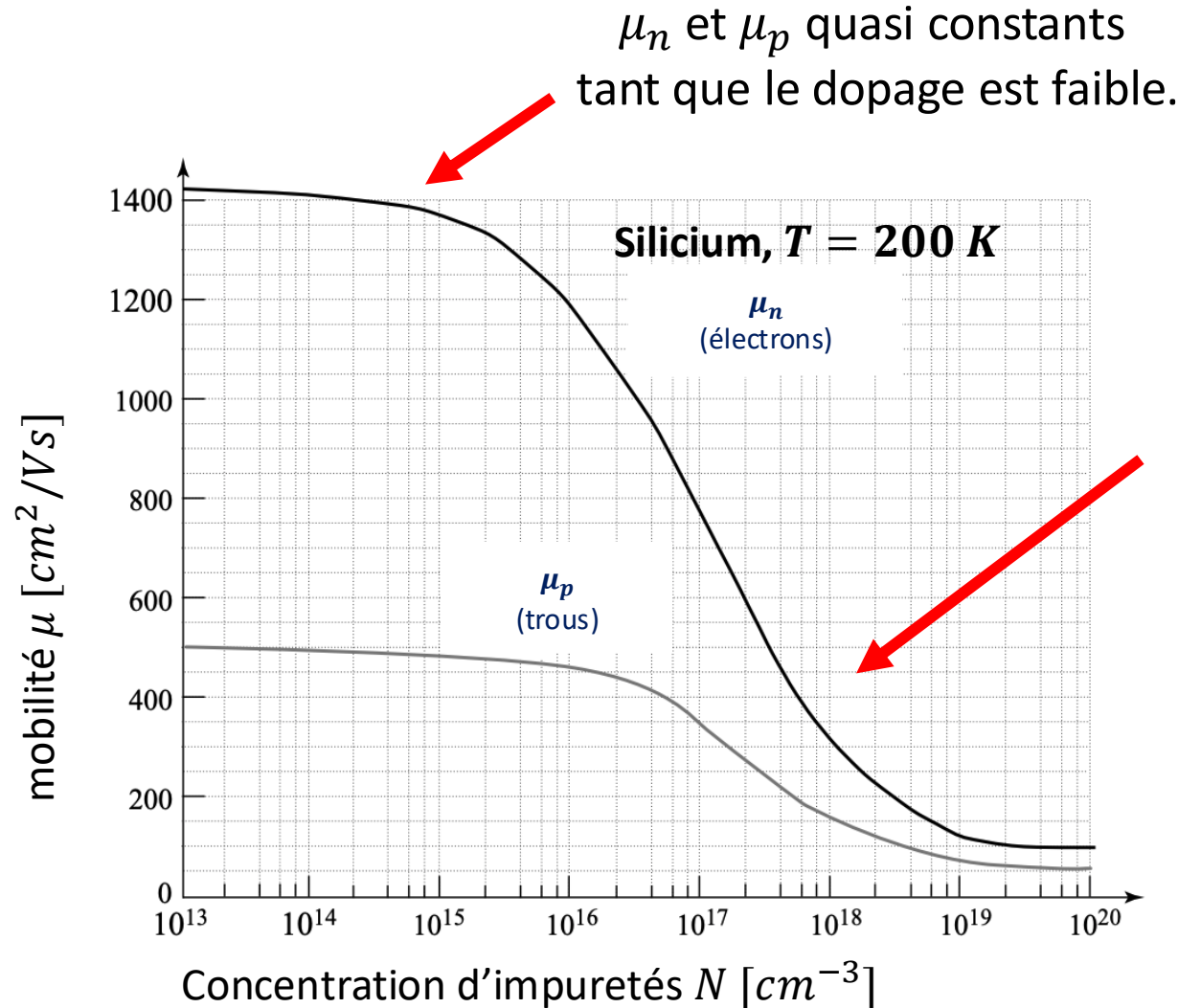
1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Evolution de la mobilité des électrons et des trous en fonction de la concentration des impuretés.



1. Les semi-
conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Nombre d'électrons et de trous

La loi d'action de masse décrit la concentration des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau semi-conducteur, à l'équilibre thermodynamique.

Remarque : on parle d'équilibre thermodynamique lorsqu'il y a :

- équilibre thermique : la température est constante et la même en tout point de l'espace
- équilibre mécanique : la pression est constante et uniforme
- équilibre chimique : pas de transfert de particules, en d'autres termes : pas de courant

$$np = n_i^2$$

- n = densité volumique des électrons (<0) dans la bande de conduction (en cm^{-3})
- p = densité volumique des trous (>0) dans la bande de valence (en cm^{-3})
- n_i = densité volumique intrinsèque des porteurs de charge, c.a.d. la concentration des électrons (ou des trous) dans un SC pur, sans impureté.

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Loi d'action de masse :

$$np = n_i^2$$

Influence du dopage sur n et p :

- Dans un semi-conducteur **de type N**, la concentration des électrons de conduction est très supérieure à celle des trous ($n \gg p$), mais leur produit n_i^2 reste constant.
- Inversement, dans un semi-conducteur **de type P**, la concentration des trous est très supérieure à celle des électrons ($p \gg n$) mais la relation $np = n_i^2$ reste valable.

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - **SC dopés**
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

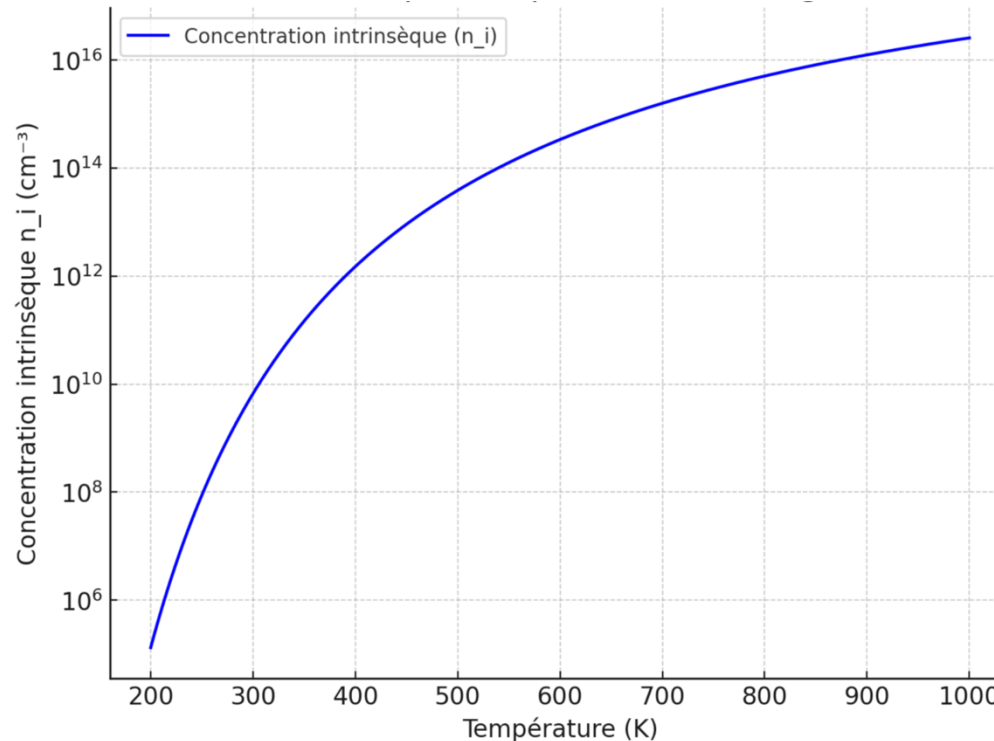
2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

n_i est déterminé par deux paramètres : température et énergie du gap (la bande interdite)

$$n_i = A T^{3/2} e^{-\frac{1}{2} \frac{E_g}{k_B T}}$$

- A : constante dépendant du matériau
- $T(K) = \theta(^{\circ}C) + 273,15$
- E_g = énergie du gap
- k_B : constante de Boltzmann



L'allure de la courbe montre que si $T \nearrow$, alors $n_i \nearrow$.

Semi-conducteurs et jonction PN

Application numérique :

Dopage N

Soit N_D la concentration en atomes donneur d'électrons (en cm^{-3})

- Si $N_D \ll n(\text{avant dopage})$ alors le dopage a peu d'effets
- Si $N_D \gg n(\text{avant dopage})$ alors le dopage influe significativement sur la densité n et p des porteurs de charge dans le semi-conducteur.

La densité des électrons de la bande de conduction est donc voisine de celle des atomes dopants donneur d'électrons, soit $n = N_D$

La loi d'action de masse donne la concentration en trous : $p = \frac{n_i^2}{N_D}$

EXEMPLE : Silicium ($n_i = 1,5 \cdot 10^{10}$)
dopé N à raison de $N_D = 10^{17} cm^{-3}$
Calculer n et p .

$$n = N_D = 10^{17} cm^{-3}$$

$$p = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(1,5 \cdot 10^{10})^2}{10^{17}} = 10^3 cm^{-3}$$

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Semi-conducteurs et jonction PN

Application numérique :

Dopage P

Soit N_A la concentration en atomes accepteur d'électrons (en cm^{-3})

- Si $N_A \ll p(\text{avant dopage})$ alors le dopage a peu d'effets
- Si $N_A \gg p(\text{avant dopage})$ alors le dopage influe significativement sur la densité n et p des porteurs de charge dans le semi-conducteur.

La densité des trous de la bande de valence est donc voisine de celle des atomes dopants accepteurs d'électrons, soit $p = N_A$

La loi d'action de masse donne la concentration en électrons : $n = \frac{n_i^2}{N_A}$

EXEMPLE : Silicium ($n_i = 1,5 \cdot 10^{10}$)
dopé P à raison de $N_A = 10^{16} cm^{-3}$
Calculer n et p .

$$n = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(1,5 \cdot 10^{10})^2}{10^{16}} = 10^4 cm^{-3}$$

$$p = N_A = 10^{16} cm^{-3}$$

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Origine du déplacement des porteurs de charges

Le transport des porteurs de charges (électrons et trous) est dû à deux phénomènes : une dérive et une diffusion.

Un exemple très simple pour illustrer ce transport est celui d'une goutte de colorant déposé à la surface d'une rivière.

- La goutte se déplace avec le courant, c'est **le phénomène de dérive** qui a pour origine une diminution de l'énergie potentielle.
- de plus, elle s'élargit progressivement au cours du temps : c'est **le phénomène de diffusion** qui résulte du fait que la concentration du colorant n'est pas la même en tout point de la rivière.

Les molécules de colorant diffusent des zones de fortes concentrations vers les zones de faibles concentrations. En d'autres termes, les molécules de colorant vont là où il y a le moins de colorant.

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - **Courant de conduction**
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Courant de conduction

Le courant de dérive est présent si il y a un champ électrique \vec{E} . Ce courant s'appelle le courant de conduction comme on l'a vu au chapitre 1. Sauf que dans le cas du Silicium, matériaux semi-conducteurs, **le courant de conduction provient des électrons ET DES TROUS**, contrairement au cuivre (par exemple) où le courant de dérive ne provient QUE des électrons.

Reprenons les résultats du chapitre précédent :

- Densité volumique de charges des e^- : $\rho_{m,n} = -en$
 - Vecteur densité de courant : $\vec{j}_n = \rho_m \vec{v}_n$
- n : nombre d'électrons par unité de volume
 - \vec{v}_n : vitesse des électrons

Porteur de charges = électrons

- La densité volumique de charges est négative : $\rho_{m,n} = -en$
- Le vecteur densité de courant est opposé à \vec{v}_n : $\vec{j}_n = -en \vec{v}_n$

n pour « négatif »

Porteur de charges = trous

- La densité volumique de charges est positive : $\rho_{m,p} = ep$ p = nombre de trous par unité de volume
- Le vecteur densité de courant est dans le même sens que \vec{v}_p : $\vec{j}_p = ep \vec{v}_p$

p pour « positif »

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - **Courant de conduction**
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

$$\vec{j}_n = -en \vec{v}_n$$

$$\vec{j}_p = ep \vec{v}_p$$

Le courant de conduction total est la somme du courant de conduction des électrons et du courant de conduction des trous.

$$\vec{j}_{total} = \vec{j}_n + \vec{j}_p$$

$$\vec{j}_{total} = -en \vec{v}_n + ep \vec{v}_p$$

Reprenons les résultats du chapitre précédent :

- Mobilité des électrons (grandeur scalaire, donc positive) :
- Vitesse des électrons :

$$\mu_n = \frac{e\tau}{m}$$

$$\vec{v}_n = -\mu_n \vec{E}$$

Rq : Les électrons sont plus mobiles que les trous.

La vitesse des trous est $\vec{v}_p = \mu_p \vec{E}$ (car $q = +e$ dans le chapitre 1), les trous se déplacent dans le même sens que le champ électrique.

$$\Rightarrow \vec{j}_{total} = (-en) \times (-\mu_n \vec{E}) + ep \times \mu_p \vec{E}$$

$$\vec{j}_{total} = (en\mu_n + ep\mu_p) \vec{E}$$

$$\vec{j}_{total} = \gamma_{semi-conducteur} \vec{E}$$

Conclusion : la conductivité du semi-conducteur est :

$$\gamma_{sc} = en\mu_n + ep\mu_p$$

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - **Courant de conduction**
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Résumé du courant de conduction dans un semi-conducteur (SC):

- D'une façon générale, quelle que soit la particule (électron ou trou), la vitesse de dérive (ou encore vitesse de déplacement de la particule) est : $\vec{v} = \frac{q\tau}{m} \vec{E}$
Pour un électron : $q = -e \Rightarrow$ leur vitesse est opposée à celle de \vec{E}
Pour un trou : $q = +e \Rightarrow$ leur vitesse est dans le même sens que de \vec{E} .
- μ_n et μ_p sont respectivement les mobilités des électrons et des trous, avec une mobilité supérieure pour celle des électrons qui bougent facilement dans la bande de conduction. μ_n et μ_p sont des scalaires donc positifs.
- $\rho_{m,n} = -en < 0$ et $\rho_{m,p} = ep > 0$ sont respectivement les densités volumiques de charges des électrons et des trous. n et p sont des densités volumiques de particules (> 0)
- $\vec{j}_n = -en \vec{v}_n \Rightarrow$ Le vecteur densité de courant des électrons est opposé à la vitesse de déplacement des électrons.
 $\vec{j}_p = ep \vec{v}_p \Rightarrow$ Le vecteur densité de courant des trous est dans le même sens que la vitesse de déplacement des trous.
- $\vec{j}_{total} = \gamma_{sc} \vec{E} \Rightarrow$ le vecteur densité totale de courant est dans le même sens que le champ électrique, avec $\gamma_{sc} = en\mu_n + ep\mu_p$ et la résistivité $\rho_{sc} = 1/\gamma_{sc}$

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Courant de diffusion

En l'absence de champ électrique, on peut toujours observer un phénomène de diffusion qui peut être décrit par **la loi de Fick** :

Les particules (électrons et trous) se déplacent des zones les plus concentrées vers les zones les moins concentrées. (exemple de la tâche de colorant dans un verre rempli d'eau calme). Le vecteur gradient, qui décrit une variation d'une grandeur dans l'espace, est adapté pour décrire ce mouvement, sauf que le gradient pointe dans le sens où la concentration augmente le plus rapidement. Il faut donc rajouter le signe « — » pour justifier un déplacement des particules dans le sens de la diminution de la concentration.

D'où l'expression mathématique de la loi de Fick :

le **vecteur densité de particules** s'écrit :

$$\overrightarrow{j_{particule}} = -D_{particule} \overrightarrow{grad}(n)$$

- n = densité volumique des particules
ou encore concentration des particules
- $D_{particule}$ = coefficient de diffusion de la particule

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

vecteur densité de particules : $\overrightarrow{j_{particule}} = -D_{particule} \overrightarrow{grad}(n)$

Le **vecteur densité de courant** est lié aux particules chargées. Il faut donc multiplier le vecteur densité de particules par la charge de la particule.

- Pour les électrons : $\overrightarrow{j_n} = (-e) \times (-D_n \overrightarrow{grad}(n))$ $n = \text{densité volumique des électrons}$
 $\overrightarrow{j_n} = e D_n \overrightarrow{grad}(n)$
- Pour les trous : $\overrightarrow{j_p} = e \times (-D_p \overrightarrow{grad}(p))$ $p = \text{densité volumique des trous}$
 $\overrightarrow{j_p} = -e D_p \overrightarrow{grad}(p)$

Les relations permettent de conclure que le courant de diffusion des électrons circule dans le sens inverse du courant de diffusion des trous.

- D'où le courant total $\overrightarrow{j_d}$ de diffusion dans un semi-conducteur :

$$\overrightarrow{j_d} = e D_n \overrightarrow{grad}(n) - e D_p \overrightarrow{grad}(p)$$

1. Les semi-
conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Courant total

La densité de courant totale est la somme des densités de courant de conduction et de diffusion :

$$\vec{J} = \vec{J}_c + \vec{J}_d$$

- **Remarque 1** : Pour un conducteur de même surface, le courant i est proportionnel à la densité de courant car $i = \iint \vec{J} \cdot d\vec{S}$
- **Remarque 2** : Pour de petits champs électriques, les effets de la mobilité μ et de la diffusion D sont directement liés à la température par la **relation d'Einstein** :

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_B T}{q}$$

- $K_B = 1,38 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ et $q = e = 1,6 \times 10^{-19} C$
- D_n et D_p = coef de diffusion des électrons et des trous
- μ_n et μ_p = mobilité des électrons et des trous

Application
numérique :

pour du Silicium subissant un dopage de type N, $D = \frac{k_B T}{q} \mu$

$$N_n = 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ à } 20^\circ\text{C}, \frac{k_B T}{q} = 25 \text{ mV}$$
$$\mu_n = 1\,000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \Rightarrow D_n = 25 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$
$$\mu_p = 400 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \Rightarrow D_p = 10 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

La jonction PN

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

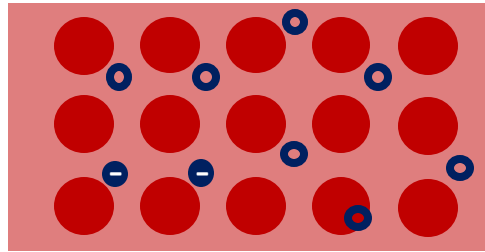
- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Complément sur le dopage P et N

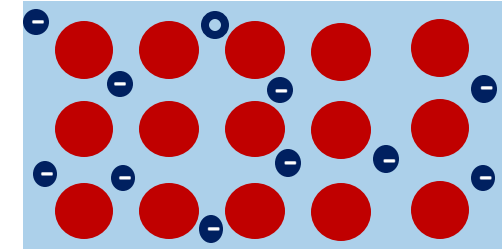
Semi-conducteur dopé P



Trous majoritaires

- Milieu neutre car pour chaque atome, le nombre de protons compense celui des électrons.
- De base, l'atome de bore perd son trou si la température est suffisante, donc le phosphore devient ionisé (**anion**), mais localement **la densité de charge reste nulle car le trou libre reste assez proche de l'atome de bore. Ce trou ne bouge pas tant que la jonction PN n'est pas réalisée.**

Semi-conducteur dopé N



électrons majoritaires

- Milieu neutre car pour chaque atome, le nombre de protons compense celui des électrons.
- De base, l'atome de phosphore perd son 5^{ème} électron si la température est suffisante, donc le phosphore devient ionisé (**cation**), mais localement **la densité de charge reste nulle car l'électron libre reste assez proche de l'atome de phosphore. Cet électron libre ne bouge pas tant que la jonction PN n'est pas réalisée.**

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

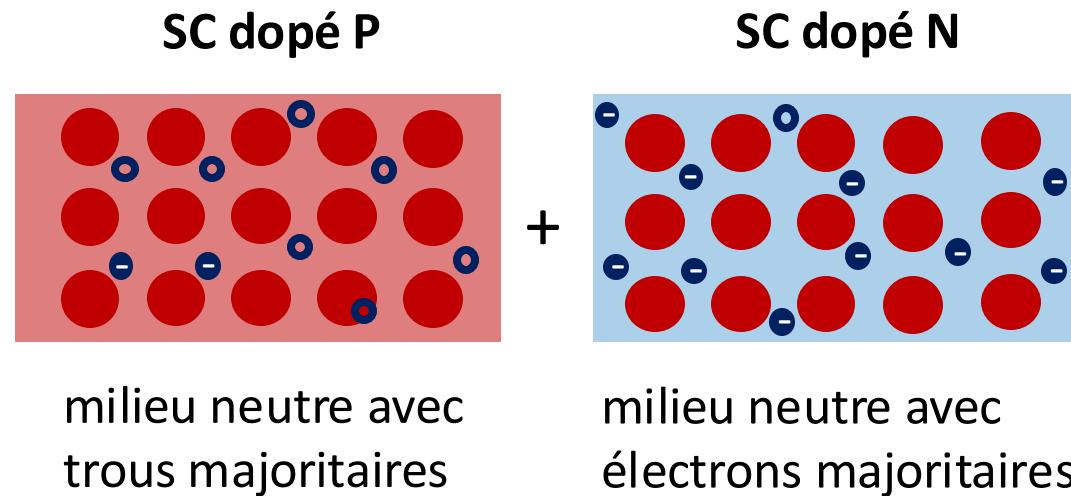
2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Jonction PN à l'équilibre

« fictive » car dans les faits, la jonction PN se fait sur le même substrat et non 2 la juxtaposition physique de 2 SC de type P et N.

La jonction PN à l'équilibre (ou encore non polarisée) désigne une jonction « fictive » formée entre un semi-conducteur de type P (riche en trous de charge positive) et un semi-conducteur de type N (riche en électrons de charge négative) sans l'application d'une tension externe.



Lors du contact des deux régions :

- Au voisinage de l'interface, les électrons libres de la zone N vont diffuser dans la zone P qui est pauvre en électrons. Ils se recombinent aux trous présents dans la zone. De même les trous de la zone P vont diffuser vers la zone N qui est pauvre en trous. Ils se recombinent aux électrons de cette zone. Ce processus résulte du fait que les énergies de Fermi des deux zones ne sont pas égales.

Semi-conducteurs et jonction PN

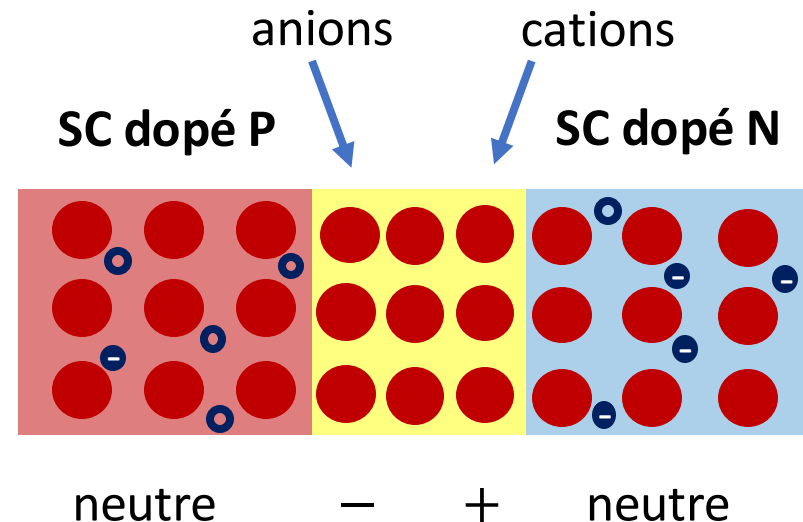
1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

- Les électrons et les trous sont des porteurs de charge **mobiles**. Mais il ne faut pas oublier qu'il y a aussi des ions (anions et cations) aux nœuds du réseau cristallin. Ceux-ci ne peuvent migrer et **restent en place** lorsqu'un électron ou un trou diffuse dans l'autre zone.
- Par conséquent, lors de la diffusion des électrons et des trous, il va y avoir un excédent de charges positives (= **cations** des impuretés donneurs d'électrons) **près de l'interface N** et un excédent de charge négative (= **anions** des impuretés accepteur d'électrons) **près de l'interface P**.
- Au total, ce processus de diffusion crée dans la zone P, près de l'interface, une charge négative et dans la zone N, près de l'interface, une charge positive.



- Conclusion : **dans la zone proche de l'interface, il n'y a plus du tout de charges mobiles (électrons et trous).** De ce fait, on appelle cette zone (jaune sur le schéma) la **zone de charges désertée, notée ZDC**.

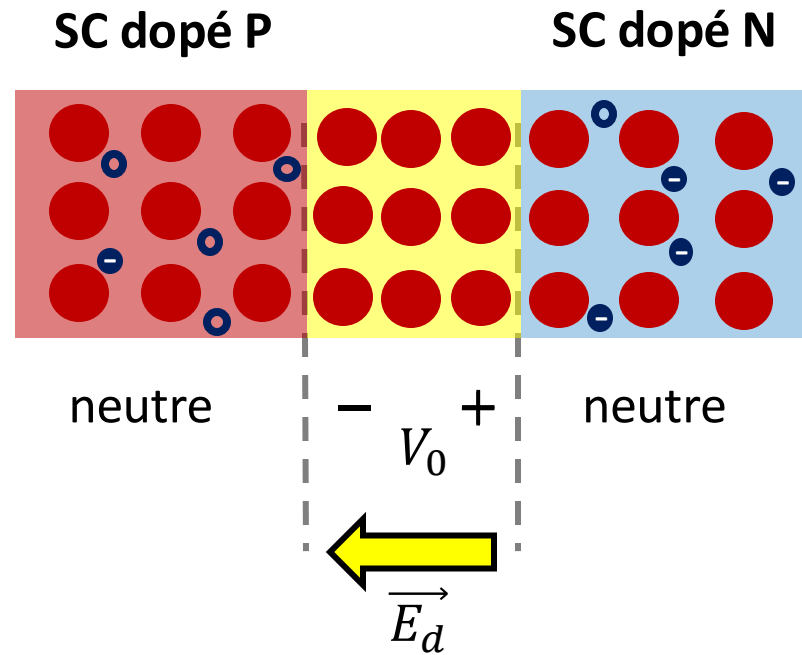
Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse



- Lorsque la jonction PN est à l'équilibre, il existe à l'interface des semi-conducteurs P et N une zone désertée et une **barrière de potentielle de hauteur V_0** qui s'oppose à la diffusion additionnelle des électrons de la zone N vers la zone P.

$$V_0 = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

- Un **champ électrique noté $\overrightarrow{E_d}$** (« d » pour diffusion) se construit progressivement. La diffusion d'électrons et de trous se poursuit jusqu'à ce que ce champ électrique devenu important arrête le processus de diffusion. Dans ce cas, on a atteint l'équilibre et les énergies de Fermi sont égales.

Rappel :

- N_A la concentration en atomes accepteur d'électrons (en cm^{-3}) – exemple Dopage N au phosphore.
- N_D la concentration en atomes donneur d'électrons (en cm^{-3}) – exemple Dopage P au bore.

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

EXEMPLE : Jonction PN de Silicium à température ambiante, $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Calculer la barrière de potentiel.

$$V_0 = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = 0,026 \ln \left(\frac{10^{16} \cdot 10^{17}}{(1,5 \cdot 10^{10})^2} \right) \\ = \mathbf{0,76 \text{ V}}$$

- Par conséquent, il y a plusieurs moyens d'augmenter la barrière de potentiel :
 - ▶ à E_g fixé, plus le produit $N_A N_D \nearrow$ et plus $V_0 \nearrow$
 - ▶ plus $T \nearrow$ et plus $V_0 \searrow$ ($n_i = A T^{3/2} e^{-\frac{1}{2} \frac{E_g}{k_B T}}$ donc la température augmente le nb de porteurs de charge)

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

■ Champ électrostatique

- ▶ il varie en fonction de x
- ▶ Maxwell-Gauss : $\text{div}(\vec{E}) = \frac{\rho}{\epsilon}$
 $\rightarrow \text{En 1D} : \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\rho}{\epsilon} \Rightarrow \mathbf{E(x)} = \frac{\rho}{\epsilon} x + \text{cte}$

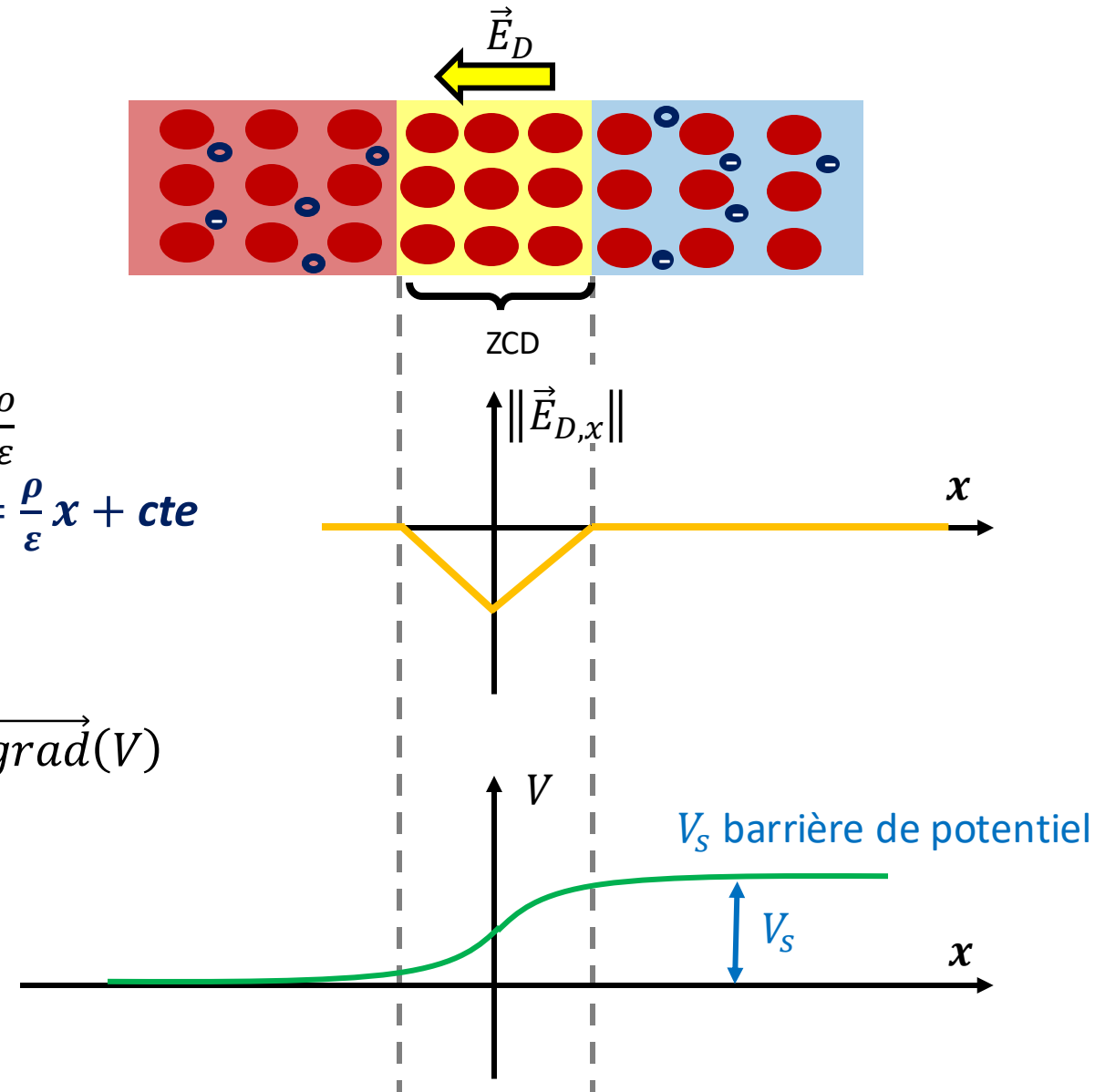
■ Potentiel électrique

- ▶ il varie en fonction de x
- ▶ Maxwell-Faraday : $\vec{E_D} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V)$
 $\rightarrow E_{D,x} = -\frac{\partial V}{\partial x}$

$$\Rightarrow dV = -E_{D,x} dx$$

$$\Rightarrow V(x) - V(x_0) = -\int_{x_0}^x E_{D,x}(x) dx$$

$$\Rightarrow \mathbf{V(x)} = -\int_{x_0}^x \mathbf{E_{D,x}(x)} dx$$



Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

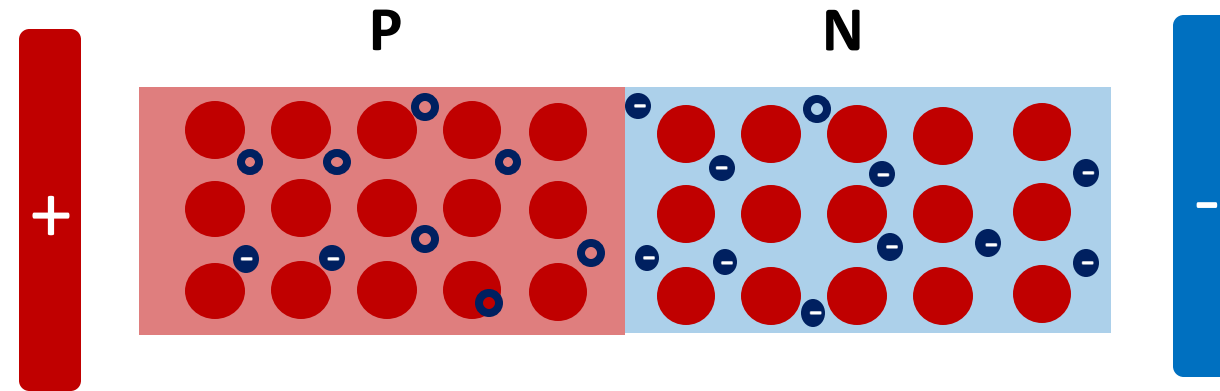
- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Polarisation directe

- région P reliée à un potentiel supérieur à celui de la région N



- On applique une tension notée V_p (« p » pour polarisation) orientée du potentiel négatif vers le potentiel positif) qui fait diminuer V_s (orienté de P vers N dans la ZDC) au point de l'annuler. Dans ce cas la barrière de potentiel a disparu (c'est pourquoi V_s et V_a n'apparaissent pas sur le schéma car ils se compensent et leur somme est nulle).
- Par conséquent le champ électrique de polarisation qui empêchait les porteurs majoritaires de charge (les électrons libres côté N et les trous côté P) de diffuser a lui aussi disparu. **La diffusion est donc de nouveau rétablie et abondante. Le courant circule. La jonction est passante.**

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

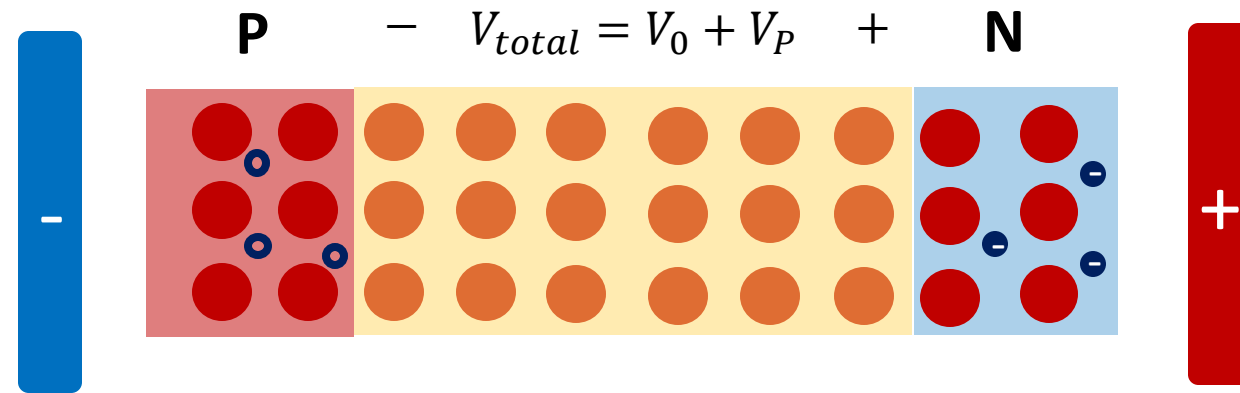
- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Polarisation inverse

- région P reliée à un potentiel supérieur à celui de la région N



- On applique une tension notée V_p dans le sens du potentiel négatif vers le potentiel positif qui fait s'ajouter à la tension V_0 . Dans ce cas la barrière de potentiel est alors augmentée ce empêche la diffusion des porteurs de charge majoritaires.
- On dit que **la jonction est bloquante**, à la fois pour les électrons et pour les trous.

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

- **A température nulle**, il y a toujours des porteurs de charges (électrons et trous) qui franchissent cette barrière et leur flux conduit à un courant appelé « courant inverse ». Les porteurs de charges qui contribuent au courant inverses sont minoritaires. L'intensité de ce courant croit fortement avec la température. Par exemple pour le silicium il double tous les 11°C.
- Si on mesure ce courant en fonction de la température et qu'on l'extrapole au zéro absolu, on obtient une valeur une valeur notée I_S appelé **courant inverse de saturation** qui dépend de la tension de polarisation (en sens inverse).
- Au-delà d'une certaine tension appelé tension de rupture on a en général destruction du composant.

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

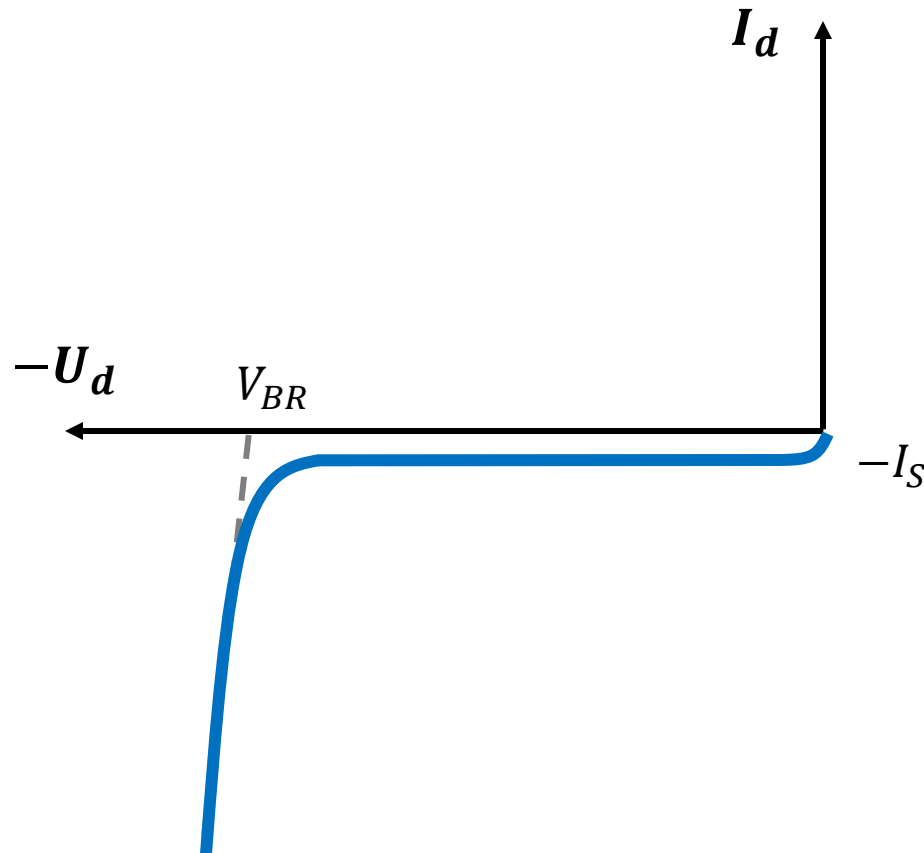
- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

Courant de polarisation inverse :

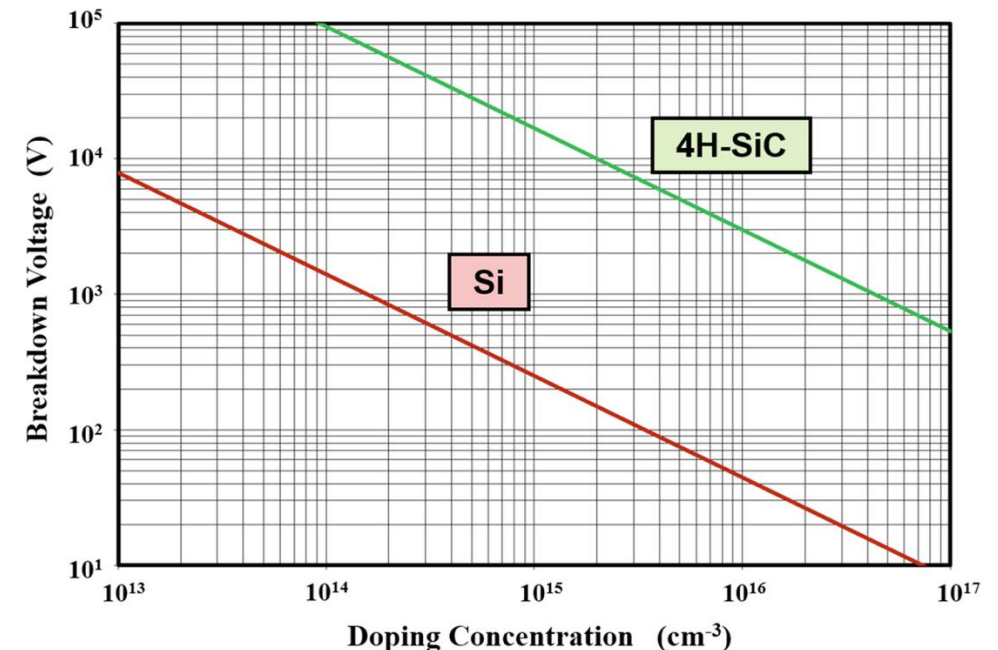
$$I_D = -I_S$$



Pour information :

Tension de Breakdown à partir de laquelle le composant est détruit :

$$V_{BR} \approx 60 \left(\frac{E_g}{1,1} \right)^{3/2} \left(\frac{N_D}{10^{16}} \right)^{-3/4}$$



→ On peut augmenter la tension de breakdown en dopant davantage la zone N.

Semi-conducteurs et jonction PN

1. Les semi-conducteurs (SC)

- A. Structure de l'atome
- B. Energie thermique
- C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
- D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion

2. La jonction PN

- A. A l'équilibre
- B. Polarisation directe
- C. Polarisation inverse

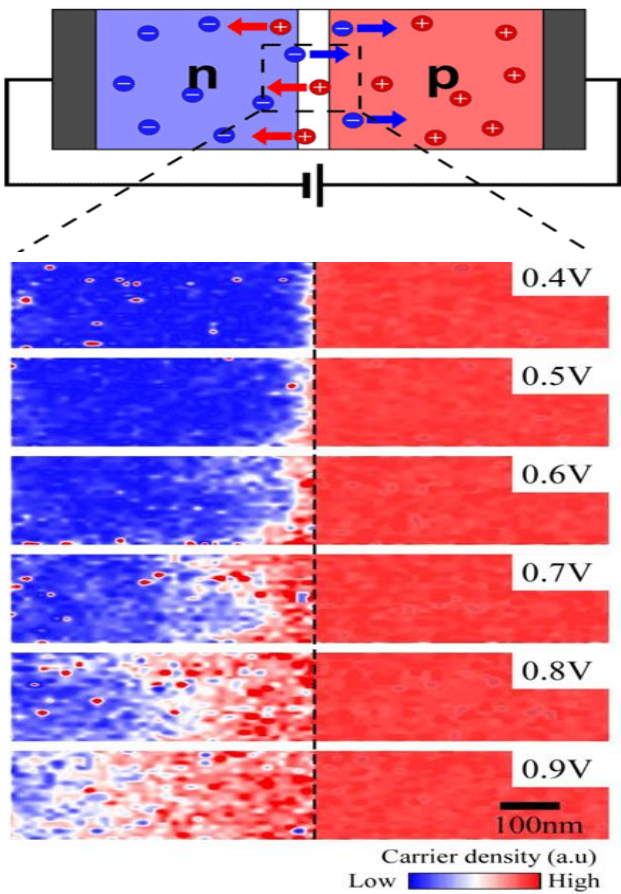
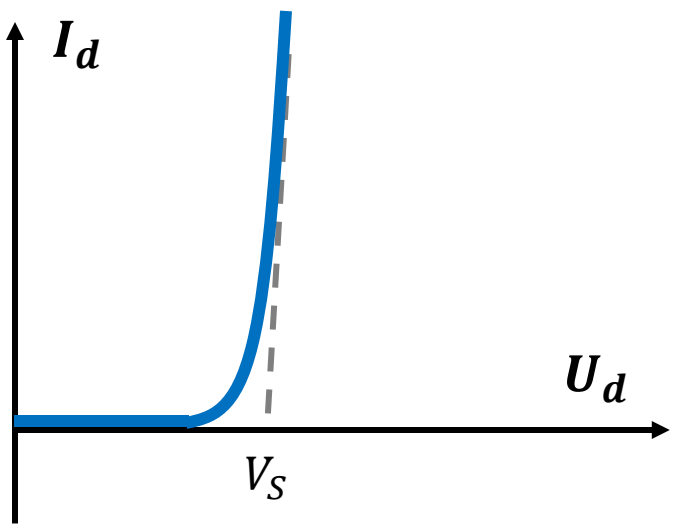
Expression du courant qui circule dans la diode :

Lorsque la diode est passante, les porteurs majoritaires peuvent circuler, un courant I_D (« D » pour diode) circule de la zone P vers la zone N. Son expression ci-dessous reste valable lorsque la diode est polarisée en inverse la tension V_D étant alors négative.

Relation de Shockley

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{eU_D}{\eta k_B T}} - 1 \right)$$

η entre 1 et 2 selon le matériau



Imagerie des porteurs de charge positifs (trous) en fonction de la tension de polarisation V_D . Les porteurs diffusent d'autant plus que V_D est important, augmentant ainsi I_S .

Semi- conducteurs et jonction PN

- 1. Les semi-
conducteurs (SC)**
 - A. Structure de l'atome
 - B. Energie thermique
 - C. Semi-conducteur
 - SC purs
 - SC dopés
 - D. Courant dans un SC
 - Courant de conduction
 - Courant de diffusion
- 2. La jonction PN**
 - A. A l'équilibre
 - B. Polarisation directe
 - C. Polarisation inverse

Fin du cours