

Électronique

Cours 2

Physique des semiconducteurs

Remarques

- Le sujet est abstrait...
 - Retour à la chimie
 - Retour à la physique
- Analogies pas tout à fait vraies
- Ce cours est le plus abstrait de la session:
 - Faites un effort particulier pour comprendre

Remarques

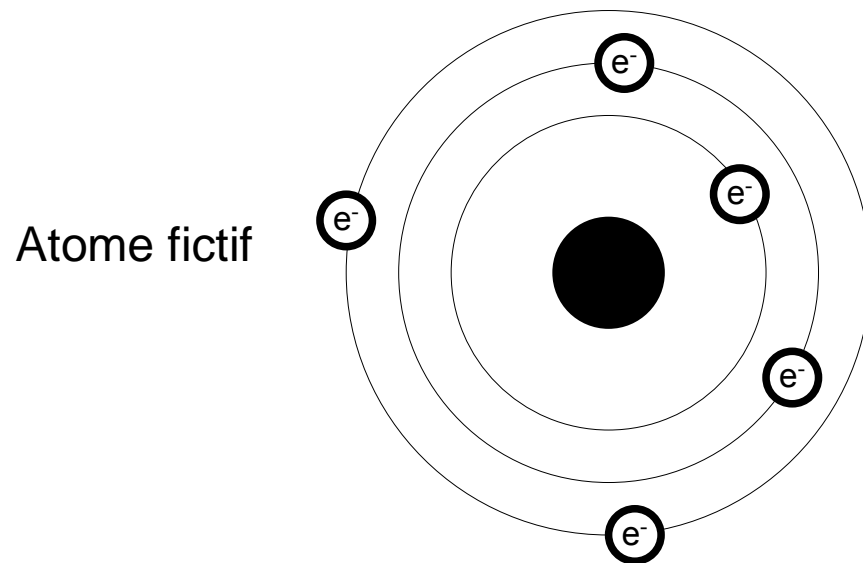
- Objectif: Développer un minimum de connaissances pour comprendre les semiconducteurs
 - Semiconducteurs sont faits d'atomes
 - Atomes contiennent des électrons
 - Électrons servent à la conduction de courant
- Pour comprendre les semiconducteurs, il faut donc comprendre les électrons...

Semiconducteur \Leftrightarrow Atomes \Leftrightarrow Électrons

Retournons au modèle d'atome de base...

Modèle de Bohr

- Modèle de Bohr:
 - Noyau positif au centre
 - Électrons qui orbitent autour

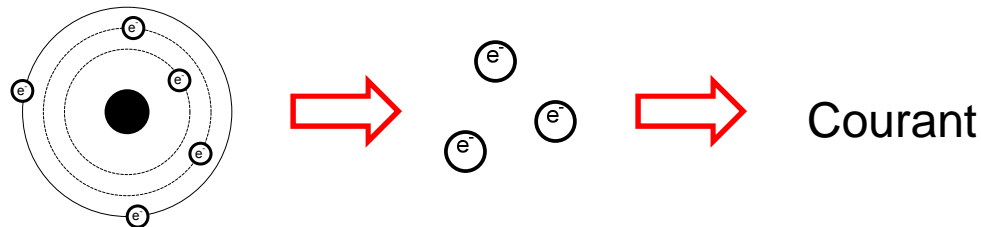


Modèle de Bohr

- Le noyau est composé de protons et de neutrons
- Information :
 - Protons sont gros et sont des charges **positives**
 - Neutrons sont gros et n'ont pas de charges
 - Électrons sont petits et sont des charges **négatives**
- Donc, des charges négatives “tournent” autour d'un noyau positif...

Modèle de Bohr

- En électronique, on veut connaître la tension et le courant
- Un courant est un déplacement d'électrons
- Comment fait-on pour déplacer les électrons dans un atome?
 - En "arrachant" les électrons et en les faisant circuler dans une direction donnée...



Modèle de Bohr

- Les électrons sont “connectés” au noyau avec une certaine force
 - Charges positives et négatives s’attirent.
- Si on arrachait les électrons, on se rendrait compte que:
 - Les électrons proches du noyau sont plus difficiles à arracher
 - Les électrons loins du noyau sont plus faciles à arracher

Combien d'électrons sont “loins”? Il faudrait être plus spécifique...

Nombres quantiques

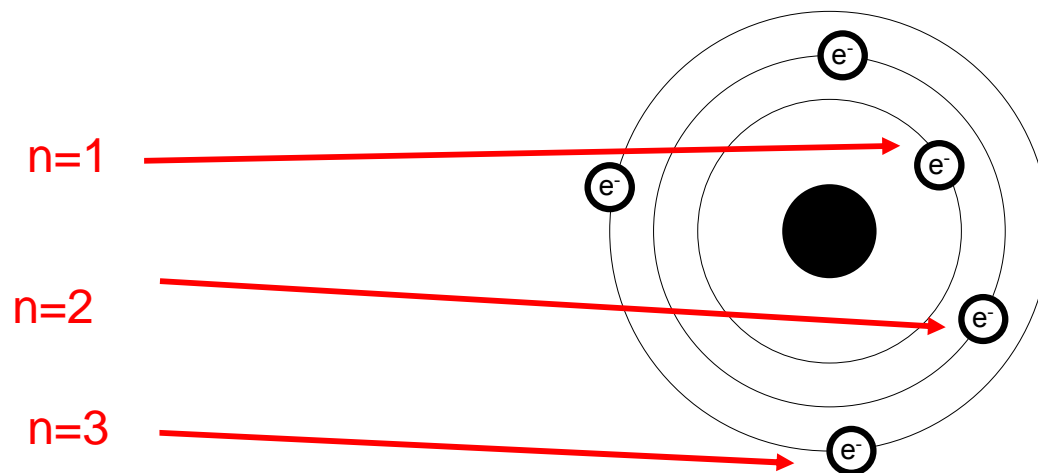
- Le courant est déterminé par le déplacement d'électrons
- Le comportement d'un électron dépend de son *nombre quantique*
- Un *nombre quantique* est un chiffre qui identifie un électron dans un atome
- Allons (re)voir les nombres quantiques

Nombres quantiques

- Il y a 4 nombres quantiques: n , l , m_l et m_s .
- La combinaison de ces 4 nombres sera suffisante pour identifier un électron
- Ces nombres quantiques décrivent caractéristiques “physiques” des électrons:
 - Ça va nous dire quels et combien d'électrons participeront à la conduction
 - Ça va aussi dire combien d'énergie il faut fournir pour générer un certain courant...

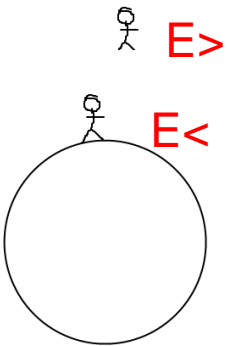
Nombres quantiques: n

- Dans le modèle de Bohr, on parlait des électrons qui sont proches et loins
- On peut caractériser la distance d'un électron par rapport au noyau avec n :
 - C'est le nombre quantique primaire



Nombres quantiques : n

- n peut avoir une valeur de 1, 2, ...
- n nous informe sur l'énergie de électrons:
 - Un électron proche du noyau a une faible énergie
 - Un électron loin du noyau a une grande énergie
- Analogie:
 - Un objet proche de la terre a une faible énergie potentielle
 - Un objet loin de la terre a une grande énergie potentielle



Les électrons avec une grande énergie ont plus de facilité à conduire...

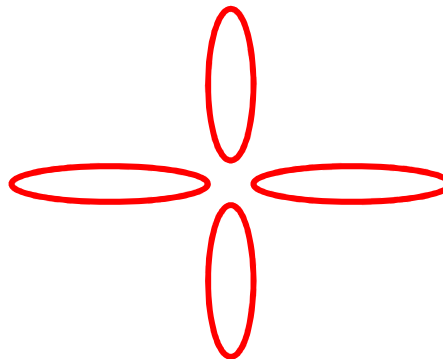
Nombres quantiques: /

- Dans le modèle de Bohr, nos électrons ont des orbites sphériques
- Il existe d'autres formes d'orbite que la sphère. Par exemple:

- La forme à 2 lobes



- La forme à 4 lobes



Nombres quantiques : /

- Règle: Le nombre de types d'orbitales est égal au nombre quantique primaire (n)
 - Quand $n=1$, il y a 1 sorte d'orbitales.
 - Quand $n=2$, il y a 2 sortes d'orbitales.
- Les sortes d'orbitales sont (entre autres):
 - Sphère
 - Orbite avec 2 lobes
 - Orbite avec 4 lobes
 - Orbite avec 8 lobes

Le plus loin qu'on est, le plus de formes d'orbitales différents on va avoir

Nombres quantiques : l

- On va utiliser la lettre l (el) pour parler de la forme de l'orbite
- l est un nombre quantique secondaire et peut aller de 0 a $n-1$:
 - Sphère ($l=0$)
 - Orbite avec 2 lobes ($l=1$)
 - Orbite avec 4 lobes ($l=2$)
 - Orbite avec 8 lobes ($l=3$)

Les orbites apparaissent dans cet ordre

Nombres quantiques : l

- Sur l'orbite 1, j'ai $n=1$:
 - Donc, j'ai 1 genre orbite
 - Et si j'ai 1 genre d'orbite ce sera une sphere ($l=0$)
- Sur l'orbite 2, j'ai $n=2$:
 - Donc, j'ai 2 genres orbites
 - Ce sera une sphere ($l=0$) et 2 lobes ($l=1$)
- Et ainsi de suite...

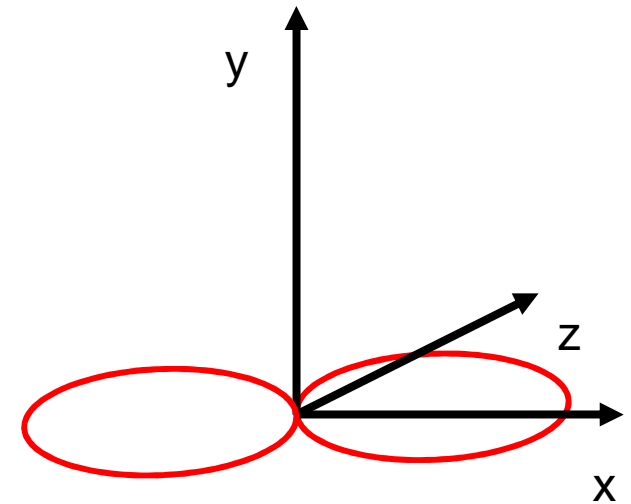
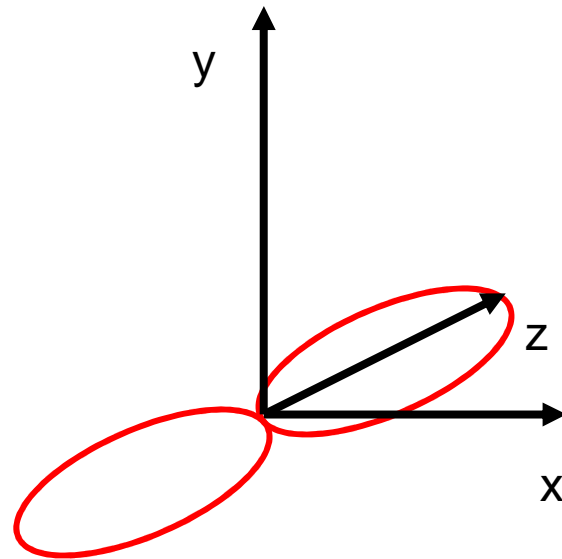
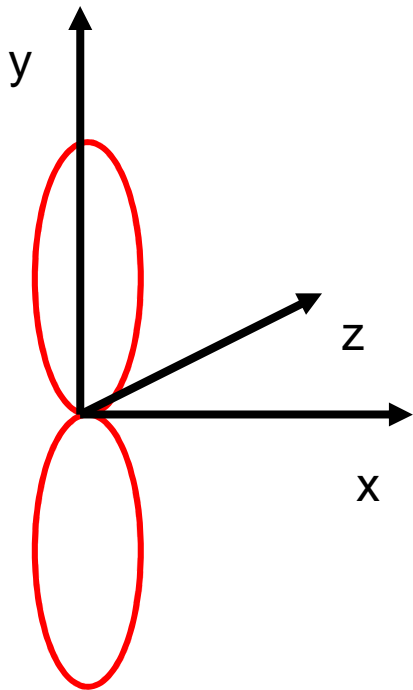
Nombres quantiques : m_l

- Donc, on est capable de distinguer les électrons différents avec:
 - Leurs orbites (n)
 - La forme de l'orbite (l)
- Est-ce qu'il manque quelque chose?
 - Il y a l'orientation de l'orbite: m_l
- Par exemple:
 - Si j'avais 2 lobes, est-ce que mes 2 lobes sont horizontales, verticales, diagonales, etc. ?

m_l va nous donner cette information

Nombres quantiques : m_l

- Considérons le cas où $l=1$
- Il y a 3 façons d'orienter les orbitales.
 - En general, il y a $(2 \cdot l) + 1$ façons de les orienter



Avec $l=1$

$$(2 \cdot 1) + 1 = 3$$

Nombres quantiques : m_l

- Avec $l=0$ (sphere), combien d'orientations différentes a-t-on?
 - L'équation $2l+1$ nous donnerait 1.
 - C'est logique: peu importe l'orientation de la sphère, il n'y a pas de différence.
- Ex: Pour une orbitale à 4 lobes, combien y a-t-il d'orientations différentes?
 - 4 lobes veut dire $l=2$ et donc, on en aurait 5

Nombres quantiques : m_l

- “L’orientation” sera désormais nombre quantique magnétique
- On va lui assigner m_l (emm-el)
- Règle: m_l peut varier de $-l$ a $+l$
 - Ex: Pour $l=2$, on a 5 possibilités: -2, -1, 0, 1 et 2

Nombres quantiques : m_s

- On peut caractériser les électrons avec:
 - Le nombre quantique primaire (distance)
 - Le nombre quantique secondaire (forme)
 - Le nombre quantique magnétique (orientation)
- Il reste une caractéristique: le “spin”
- Analogie: les planètes tournent autour du soleil et aussi sur elles-mêmes
 - Cette rotation sur elle-même serait le “spin”

Nombres quantiques : m_s

- Les électrons peuvent “tourner” soit d’un bord ou de l’autre:
 - Spin up (\uparrow) ou Spin down (\downarrow).
- Pour designer le spin, on utilise: m_s
- Les valeurs que peut prendre m_s seront:
 - $\frac{1}{2}$ pour spin up
 - $-\frac{1}{2}$ pour spin down

Et c’est fini...

Nombres quantiques

- Avec n , l , m_l et m_s , on peut identifier un électron unique dans un atome
 - À chaque distance (n), il peut y avoir des types d'orbitales différents (l)
 - Chaque type (l) a des orientations différentes (m_l)
 - Dans chaque orientation (m_l), il peut y avoir 2 types de spin (m_s): un spin up et un spin down.
- Ex: Quand on dit $n=1$, $l=1$, $m_l=0$, $m_s=1/2$, ça ne peut parler que d'un seul électron

Ça nous mène au principe d'exclusion de Pauli

Principe d'exclusion de Pauli

- Le principe est le suivant:
 - Dans une orbite donnée (avec n , l et m_l bien définis), il ne peut y avoir que 2 électrons ($\pm 1/2$)
 - Exemple: pour $n=2$, $l=1$ et $m_l=0$, il peut y avoir 2 électrons
- Ce principe se utilise plus tard pour le principe de bande d'énergie.

Énumération d'électrons

- Le comportement d'un atome dépend, en partie, du comportement de ses électrons
 - Le comportement des électrons est déterminé par leurs nombres quantiques
 - Le tableau périodique donne le nombre d'électrons mais ne dit pas lesquels
 - Il faut savoir QUELS électrons sont présents
- Pour savoir quels électrons sont présents, on peut simplement les énumérer

Énumération d'électrons

- Les électrons remplissent les “niveaux” en ordre
 - Ils remplissent les orbites proches et vont ensuite remplir les orbites loins: $n=1$, puis $n=2$, puis...
 - Pour chaque orbite, ils remplissent toutes les formes d'orbites avant de passer à l'autre orbite
 - Pour chaque forme d'orbites, ils remplissent toutes les orientations avant de passer à l'autre forme
 - Pour chaque forme d'orbites, ils ont spin up pour chaque orientation avant d'avoir spin down

Énumération d'électrons

- On peut procéder avec un tableau:
 - Pour chaque n , on voit quels l sont présents
 - Pour chaque l , on voit quels m_l sont présents
 - Pour chaque m_l on voit quels m_s sont présents

Exemple:

n	l	m_l	m_s
1	0	0	↑ ↓
2	0	0	↑ ↓
	1	-1	↑ ↓
		0	↑
		1	↑

Notez que les spin up remplissent les m_l avant les spin down

Énumération d'électrons

- Prenons le Bore (B), par exemple. Quels électrons sont présents?
- Dans ce cas, j'ai 5 électrons:
 - Sur $n=1$, j'ai $l=0$, $m_l=0$ et $m_s=(+/-) \frac{1}{2}$ (2 électrons)
 - Sur $n=2$, j'ai 2 types de l : $l=0$ et $l=1$
 - Sur $l=0$, $m_l=0$ et $m_s=(+/-) \frac{1}{2}$ (2 électrons)
 - Sur $l=1$, j'ai $m_l=-1$ et $m_s=+1/2$

n	l	m_l	m_s
1	0	0	↑ ↓
2	0	0	↑ ↓
	1	-1	↑

Exemple (seul)

- Pour le sodium (Na) qui a 11 électrons:
 - Énumérez les électrons qui sont présents.

Exemple (seul)

- On dessine un tableau et on le remplit niveau par niveau:
- Pour le premier niveau:
 - $n=1$: un seul l et un seul m_l
 - Pour chaque m_l , il y a 2 électrons:

n	l	m_l	m_s
1	0	0	↑ ↓

On a énuméré 2 électrons... il en reste 9.

Exemple (seul)

- Pour le 2e niveau:
 - $n=2$: il y a 2 l
 - Pour $l=0$, il n'y a qu'un m_l
 - Pour $l=1$, il y a 3 m_l
 - Chaque m_l a 2 électrons:

n	l	m_l	m_s
1	0	0	↑ ↓
2	0	0	↑ ↓
	1	-1	↑ ↓
		0	↑ ↓
		1	↑ ↓

On a énuméré 10 électrons...
il en reste 1.

Exemple (seul)

- Pour le 3e niveau:
 - $n=3$: il y a 3 l
 - Cependant, il ne reste qu'un seul électron
 - Il va remplir $l=0$, $m_l=0$ et spin up

n	l	m_l	m_s
1	0	0	↑ ↓
2	0	0	↑ ↓
	1	-1	↑ ↓
		0	↑ ↓
		1	↑ ↓
3	0	0	↑

Et c'est fini...

Bandes d'énergie

- On sait maintenant quels électrons sont présents dans un atome:
 - Comment est-ce que ça affecte le comportement?
- On aimerait explorer le phénomène de conduction:
 - Pour conduire, il faut un déplacement d'électrons
 - Pour ça, il faut arracher les électrons des atomes
 - Et pour ça, il faut fournir de l'énergie

Énergie \Rightarrow Arracher électrons \Rightarrow Courant

On va donc parler de l'énergie des électrons...

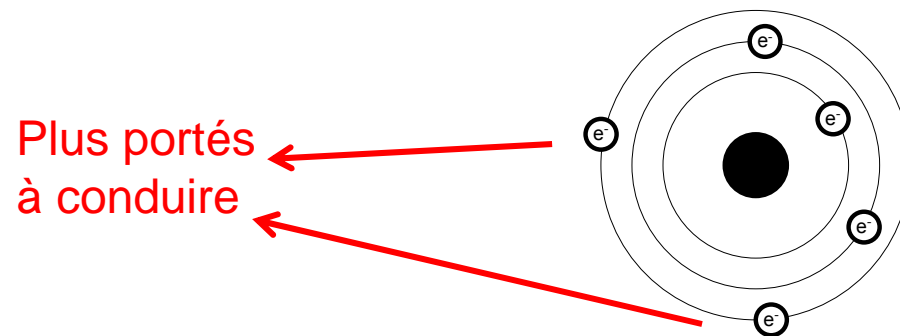
Bandes d'énergie

- On sait que l'énergie des électrons dépend de la distance du noyau (n):
 - Les électrons sur l'orbite 1 sont très attachés au noyau
 - En s'éloignant, les électrons sont moins attachés
- L'énergie est aussi affectée par la forme de l'orbite (l):
 - Ex: Énergie dans $l=0$ (sphere) sera différente de $l=1$ (2 lobes)

Des nombres quantiques différents impliquent des énergies différentes

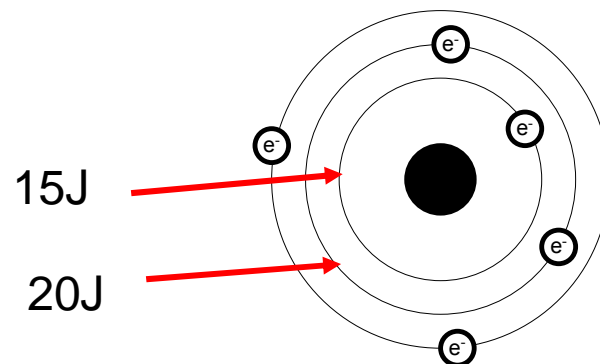
Bandes d'énergie

- Les électrons qui contribuent à la conduction sont dans l'orbite la plus loin
- Pour les "faire conduire" on leur fournit de l'énergie
- Quand les électrons sont assez éloignés, ils participent à la conduction



Bandes d'énergie

- Si on fournit de l'énergie aux électrons qui sont à l'intérieur, ils ne conduiront pas
 - Cependant, ils peuvent aller d'une orbite à l'autre
- Si on passe de l'orbite 1 à l'orbite 2, on a besoin de FOURNIR 5J:
 - Si plus que 5 J (ou égal), ça change de bande
 - Si moins que 5 J, ça ne bouge pas

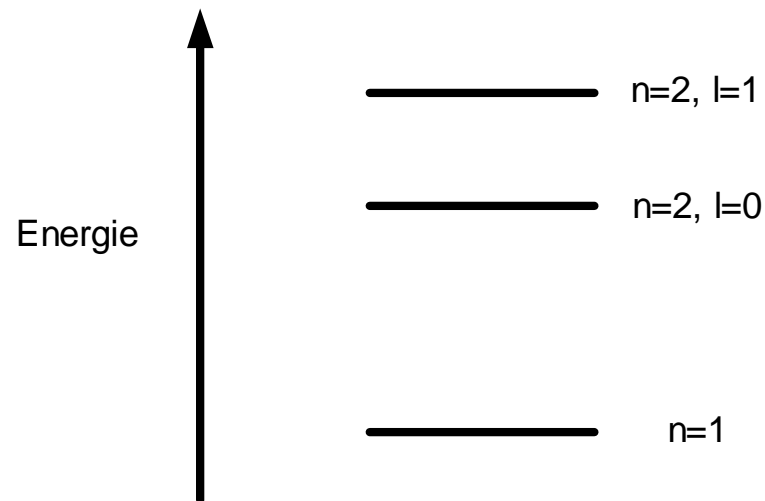


Bandes d'énergie

- Si on fournissait 1J, on n'aurait pas assez pour passer a l'autre orbite
 - On PERD cette energie et l'electron reste avec 15J
- Donc, l'électron peut avoir 15J OU 20J, mais RIEN ENTRE LES 2.
- Semble bizarre, mais c'est supporté par des expériences

Bandes d'énergie

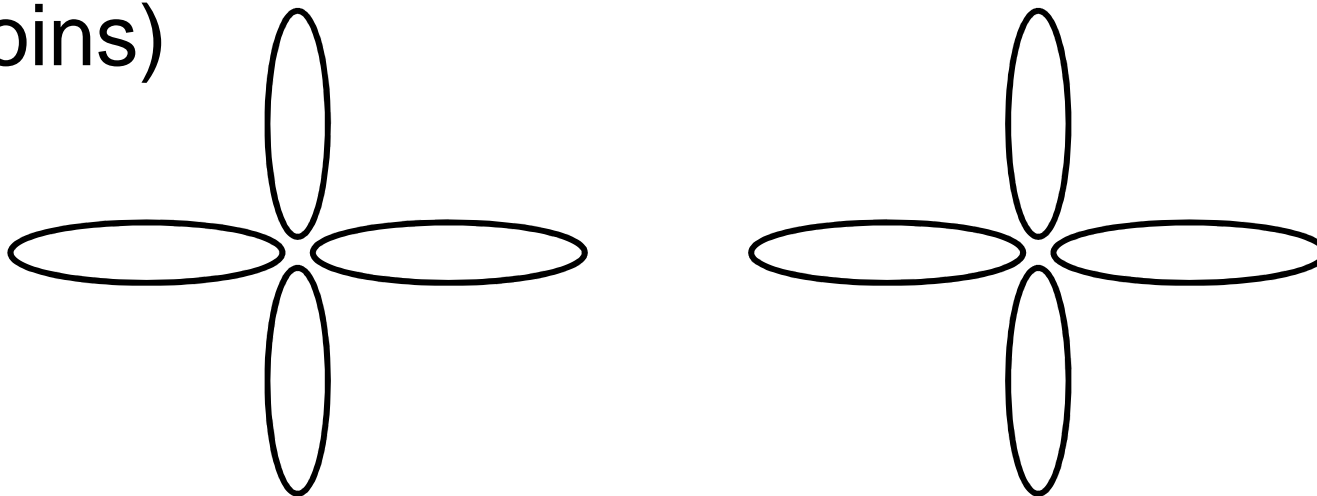
- Voici un diagramme typique d'énergie



- Différents distances (n) \rightarrow différentes énergies
- Différents formes (l) \rightarrow différentes énergies

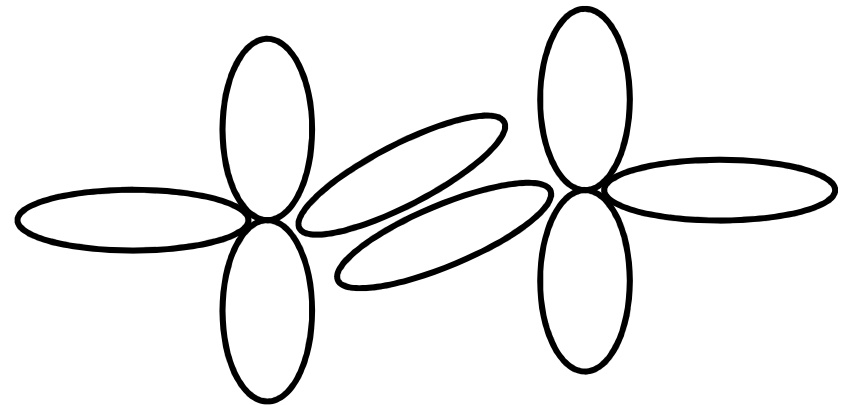
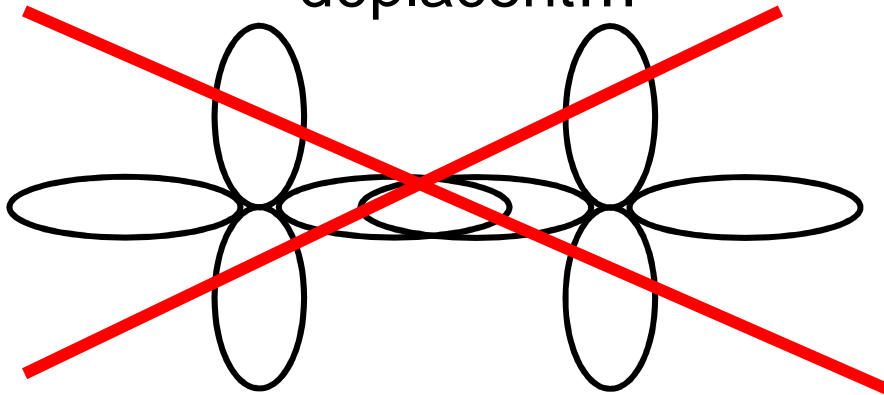
Bandes d'énergie

- Prenons 2 atomes identiques qui sont éloignés
- Ils ont des configurations identiques:
 - Les électrons ont tous les même énergies
- Situation typique dans les gas (atomes loins)



Bandes d'énergie

- Dans les solides, les atomes sont proches
 - S'ils sont trop proches, les électrons vont partager les mêmes orbitales
- Pauli n'est pas d'accord...
 - Il y a donc accommodation: les lobes se déplacent...



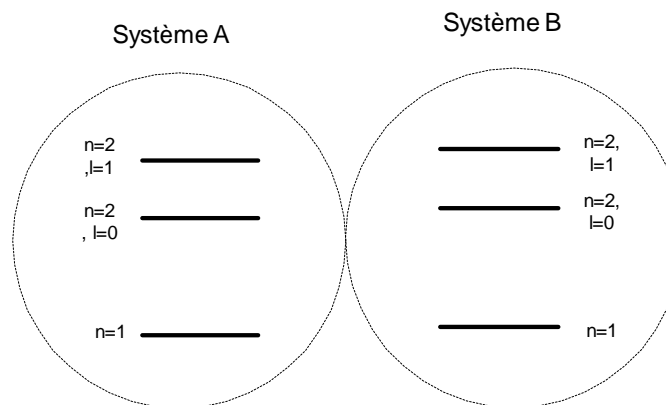
Revoyons ça avec les niveaux d'énergies...

Bandes d'énergie

- En se déplaçant, les énergies changent
 - Quand les atomes sont loins, on a ceci:

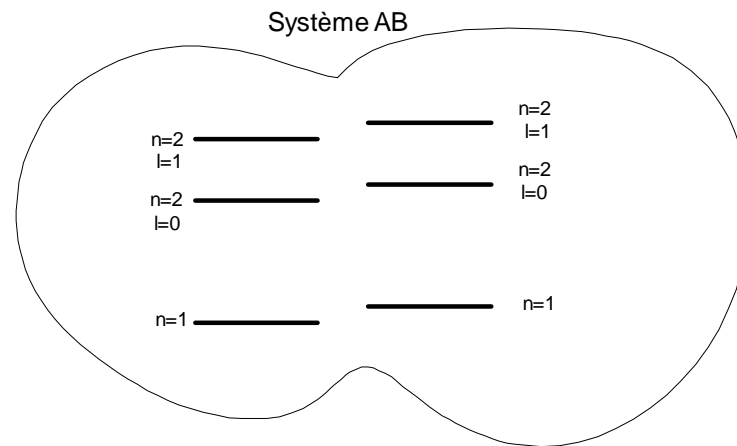


- En se rapprochant, c'est encore correct:



Bandes d'énergie

- En se rapprochant encore, les lobes se déplacent:



- Les niveaux d'énergies se déplacent parce que ça dépend de la forme
- On se retrouve avec 6 niveaux d'énergie

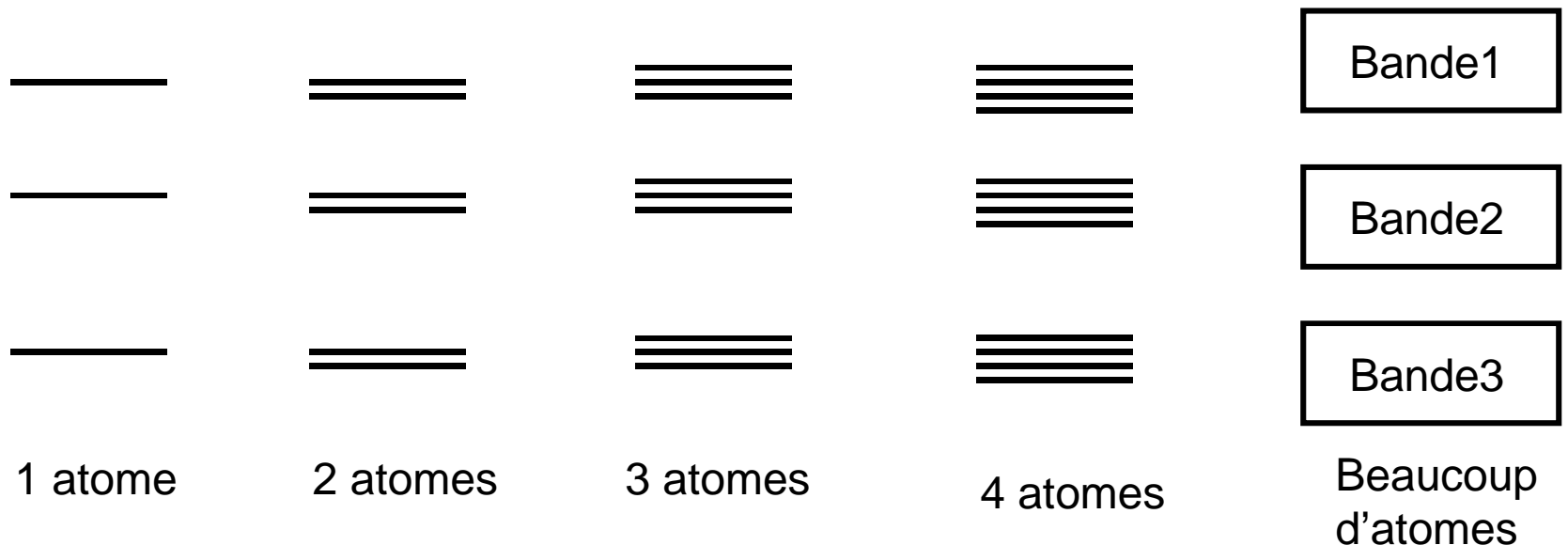
Bandes d'énergie

- Avec 2 atomes, on double le nombre de niveaux d'énergie
- Avec 3 atomes, on le triple
- Dans 1cm^3 de silicium, on a $\sim 5 \times 10^{22}$ atomes
 - Il y a donc BEAUCOUP de niveaux d'énergie qui sont très collés

Illustrons ça graphiquement

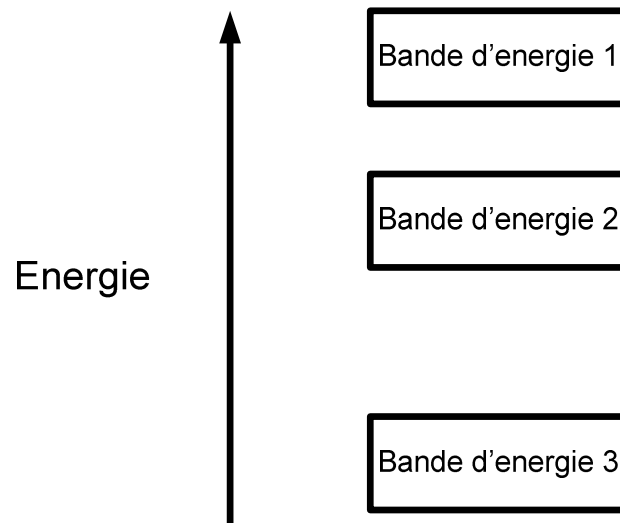
Bandes d'énergie

- En regroupant beaucoup d'atomes, on obtient beaucoup de niveaux d'énergies
- Quand ces niveaux proches et sont collés:
 - Bandes d'énergie (on considère que c'est continu)



Bandes d'énergie

- On s'intéresse aux 2 bandes d'énergie les plus loins (bande 1 et 2 dans notre cas)
- La raison: on s'intéresse à la conduction
 - Les électrons sur les autres bandes d'énergie sont "trop proches" du noyau pour conduire



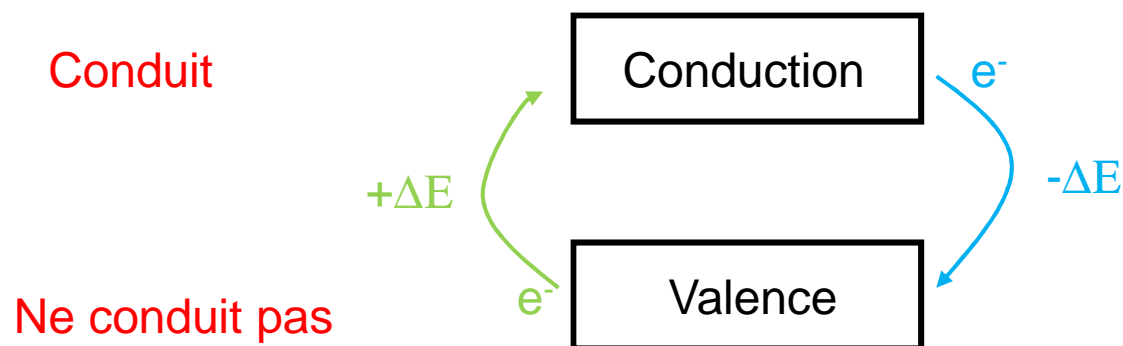
Bandes d'énergie

- Dans la bande 1, les électrons ont assez d'énergie pour se déplacer "librement"
- Dans la bande 2, les électrons n'ont pas encore assez d'énergie
- Donnons des noms aux bandes d'énergie:
 - Bande la plus loin (bande 1) : bande de conduction
 - Bande la 2e plus loin (bande 2) : bande de valence



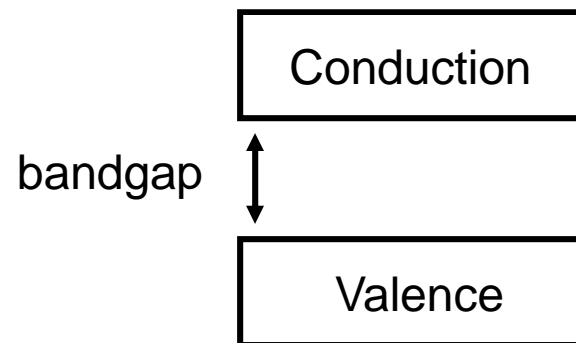
Bandes d'énergie

- Les électrons dans la bande de valence ne conduisent pas
- Les électrons dans la bande de conduction peuvent conduire
- Les électrons peuvent passer d'une bande à l'autre avec un échange d'énergie



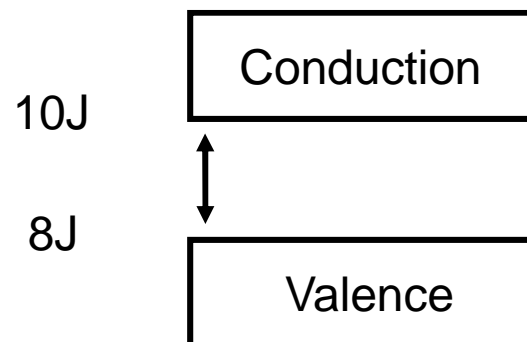
Bandes d'énergie

- Une des caractéristique importante, c'est la "distance" entre les 2 bandes
 - Terme anglais: bandgap
 - C'est une caractéristique propre à un matériau
- Énergie nécessaire pour passer d'une bande à l'autre



Bandes d'énergie

- Dans les bandes, les électrons peuvent avoir n'importe quelle énergie
 - Conduction: plus que 10J
 - Valence: moins que 8J
- Aucun électron ne peut avoir d'énergie dans la plage associée au bandgap
 - Aucun électron ne peut avoir entre 8 et 10J



Bandes d'énergie

- Différents matériaux ont différents bandgaps
- On les classifie par la valeur de bandgap:
 - Gros bandgap: isolant
 - Petit bandgap: conducteur
 - Moyen bandgap: semiconducteur

Conduction

Valence

Isolant

Conduction

Valence

Semiconducteur

Conduction

Valence

Conducteur

Bandes d'énergie

- Un isolant conduit mal:
 - On doit fournir beaucoup d'énergie pour avoir des électrons en conduction.
- Un conducteur conduit bien:
 - Les électrons sont déjà prêts à conduire avec peu ou pas d'énergie
- Un semiconducteur:
 - Entre les deux

Au fond, si on fournit assez d'énergie, n'importe quel matériau va conduire.

Dopage

- Plusieurs matériaux, à la température de la pièce, ne conduisent pas très bien
 - La raison: pas assez d'électrons en conduction
- Il est possible d'améliorer la conduction en "ajoutant des électrons"
- Comment? En dopant.

Définitions

- Doper: Injection d'atomes étrangers dans le matériau pour améliorer la conduction
- Intrinsèque: pur
- Extrinsèque: matériau qui a été dopé
- Donc, le silicium pur s'appelle le silicium intrinsèque
- Le silicium avec des atomes de bore, par exemple, s'appelle le silicium extrinsèque

Dopage

- Il y a 2 façons de doper le silicium:
 - En ajoutant des électrons
 - En ajoutant des places où les électrons peuvent aller

Periodic Table of the Elements

1 H																	2 He														
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne														
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar														
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr														
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe														
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn														
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Unq	105 Unp	106 Unh	107 Uns	108 Uno	109 Une	110 Unn																						
																		58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
																		90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Legend:

- hydrogen (black)
- alkali metals (yellow)
- alkali earth metals (red)
- transition metals (purple)
- poor metals (green)
- nonmetals (blue)
- noble gases (pink)
- rare earth metals (teal)

Retour en arrière (Exemple)

- Avant d'expliquer les détails, on va se rafraîchir la mémoire avec un exercice...
- Énumérez les électrons du silicium (14)

Retour en arrière (Exemple)

n	l	m_l	m_s
1	0	0	↑ ↓
2	0	0	↑ ↓
	1	-1	↑ ↓
		0	↑ ↓
		1	↑ ↓
3	0	0	↑ ↓
	1	-1	↑
		0	↑

Rappel: les spin ups remplissent les m_l avant les spin down

Retour en arrière

- Rappel: Les électrons les plus loins sont moins attirés par le noyau
 - La force d'attraction diminue avec la distance
 - Les autres électrons "bloquent" l'effet d'attraction
 - Ils sont les plus disposés à la conduction.
- Il y a 4 électrons au dernier niveau $n=3$
 - On dit alors qu'il y a 4 électrons de valence

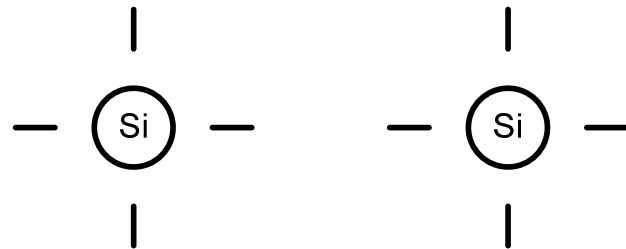
Retour en arrière

- Règle générale: les atomes veulent avoir une configuration de gaz noble
 - Ils veulent que toutes les lobes soient complétés
 - Pour le silicium, on veut 8 électrons
- Certains éléments forment des liens ioniques: ils volent les électrons
- Certains éléments forment des liens de valence: ils se partagent les électrons

Le silicium forme des liens de valence (partage d'électrons)

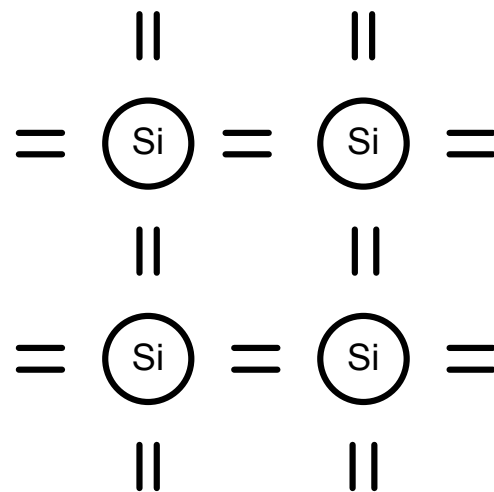
Modèle simplifié

- Les atomes séparés ressemblent à:



Les barres sont les électrons de valence

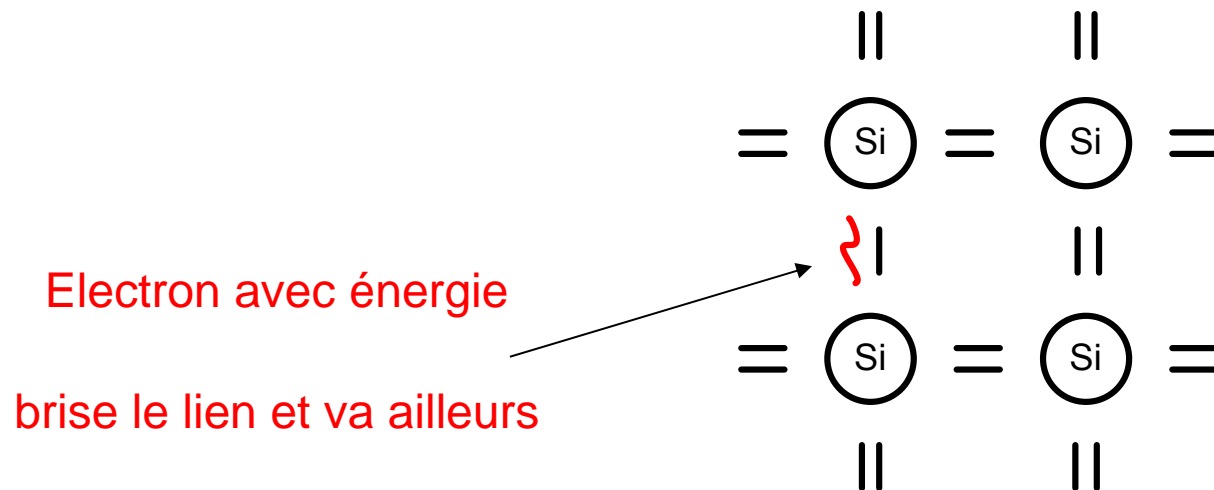
- Quand ils forment des liens, ça donne:



Ils se partagent les électrons et se retrouvent avec 8 électrons de valence

Modèle simplifié

- Le silicium se retrouve avec 8 électrons sur le dernier orbite (lobe complet)
- La conduction est due à l'excitation des électrons (E_G ou plus)



Modèle simplifié

- Quand on brise le lien, on laisse un “trou”
- Un “trou” est considéré comme une charge positive
 - En réalité, c’est une ABSENCE d’électron là où il devrait y en avoir un.
- Pour qu’il y ait conduction il faut:
 - Assez d’énergie pour que le lien se brise (E_G)
 - Un trou qui peut accepter un électron

Dopage

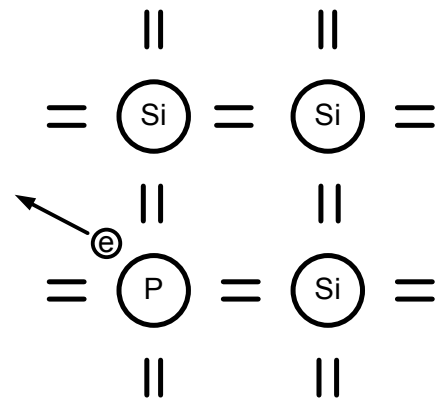
- Pour améliorer la conduction, on peut faire 2 choses:
 - Augmenter les électrons libres
 - Augmenter les trous disponibles
- Pour ces 2 options, on ajoute des “impuretés” au silicium
- Ce sont des molécules autres que le silicium (dopants)

Dopage: ajouter des électrons

- Comment ajouter des électrons et/ou des trous?
- On sait que Si a 4 électrons de valence
 - Il se connecte donc à 4 autres Si qui ont chacun 4 électrons de valence
- À la place d'avoir 4 électrons de valence, imaginez qu'on ait 5 électrons de valence
 - Le dernier électron ne serait connecté à rien
 - Il serait facile à arracher

Dopage: ajouter des électrons

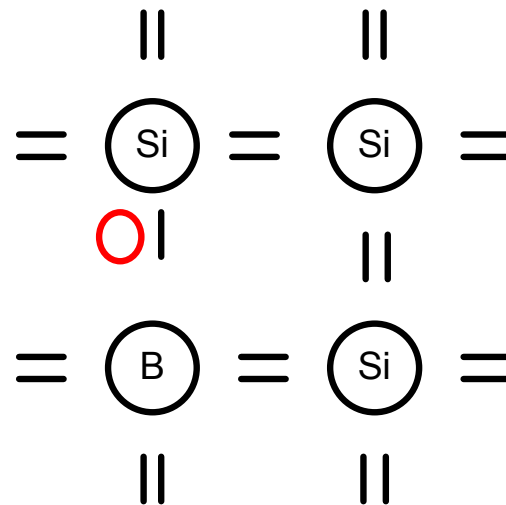
- Le Phosphore, par exemple, a 5 électrons de valence.
- Si on le connectait au Si, on aurait ceci:



- L'électron du P est “plus” libre de conduire

Dopage: ajouter des trous

- 2e option: ajouter des trous
- On peut doper avec un élément qui a 3 électrons de valence. Ex: le Bore (B)
 - On aurait une configuration comme ceci:



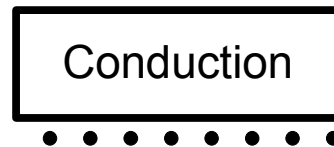
Les électrons ailleurs pourront venir se combiner au trou

Dopage

- Dopant de type N:
 - Avec le phosphore, on a un électron de plus.
 - Plus d'électrons implique plus négatif
 - On va appeler ça un dopant de type N
- Dopant de type P:
 - Avec le bore, on a un électron en moins
 - Moins d'électrons implique plus positif
 - On va appeler ça un dopant de type P

Bandes d'énergie avec dopant

- Le diagramme d'énergie d'un dopage N:



- Les électrons “dopés” se trouvent proche de la conduction:
 - Ils ont besoin de moins d'énergie pour conduire
 - Ils se trouvent dans la région “interdite”

Bandes d'énergie avec dopant

- Le diagramme d'énergie pour dopage P:

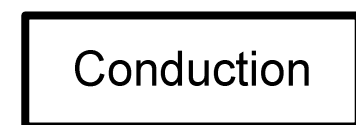
Conduction

Valence

- Les trous “dopés” se trouvent proche de la zone de valence
 - Les électrons de valence peuvent libérer des trous pour la conduction

Bandes d'énergie avec dopant

- Conduction par dopage d'électrons:
 - Facile à comprendre
- Explication de la conduction par dopage de trous:
 - Moins bien "organisé"... Déplacement "plus lent"



Bandes d'énergie avec dopant

- On peut dire que la conduction peut se faire de 2 facons:
 - Dans la bande de conduction avec des électrons
 - Dans la bande de valence avec des trous
- C'est une facon de visualiser:
 - Les trous ne sont pas des particules: c'est une absence d'électrons.
 - En réalite, ce sont quand même les électrons qui circulent

Jonctions PN

- Silicium N et P (seul) :
 - Ça conduit plus ou moins bien
 - C'est comme des résistances
 - Pas tres intéressant...
- Si on les combinait ensemble, qu'est-ce que ça donnerait?

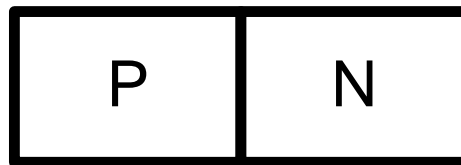


- Ça formerait une diode...

Les choses deviendraient plus intéressantes...

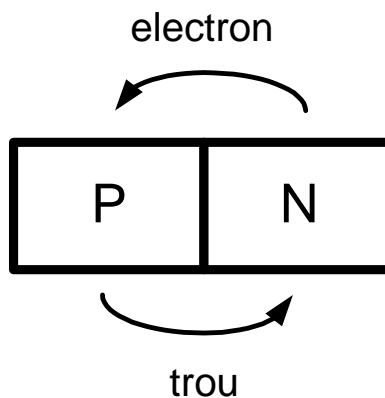
Jonctions PN

- Étape #1: Quand P et N viennent juste d'être "collés"
 - P grande concentration de trous
 - N grande concentration d'électrons
- Au temps 0s, la jonction ressemble à:



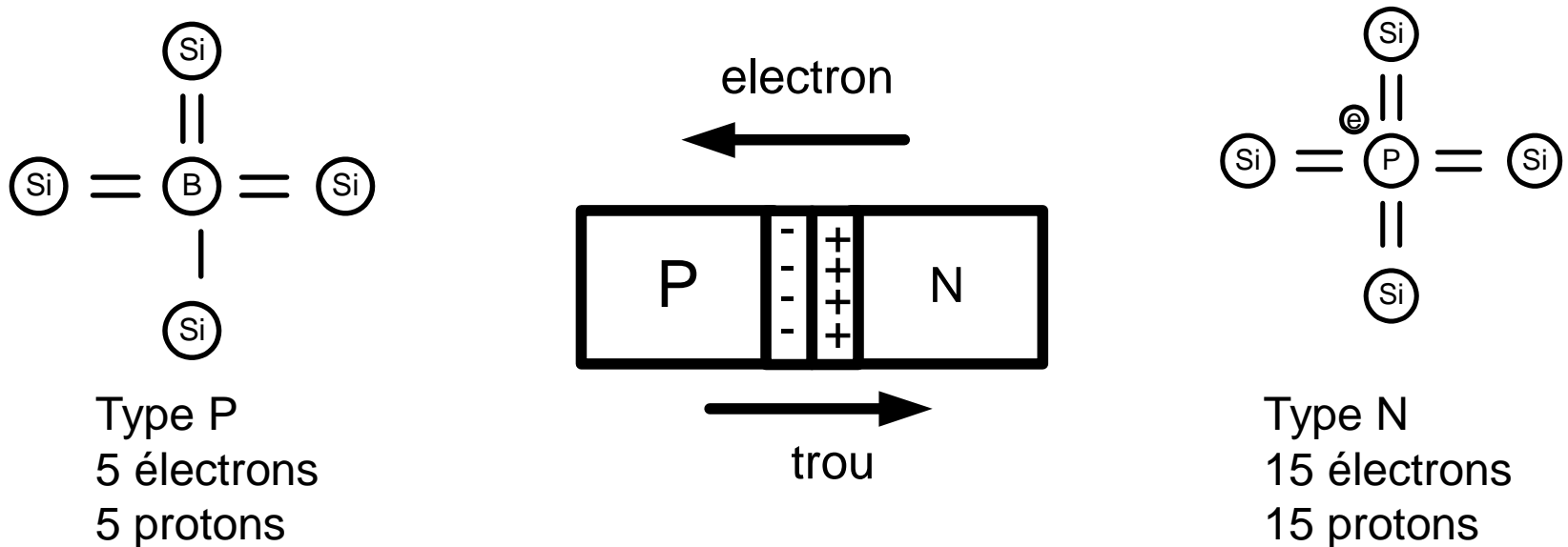
Diffusion

- Etape #2: Diffusion
- Grande concentration va vers faible concentration
 - Trou: P vers N
 - Électron: N vers P



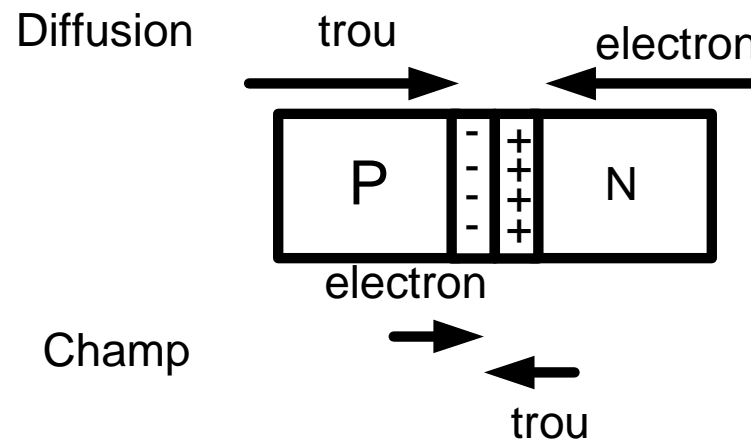
Diffusion

- Étape #3: Diffusion (étape intermédiaire)
 - Quand électron part, il laisse un ion positif
 - Quand trou part, il laisse un ion négatif
 - Ions ne peuvent pas réagir parce qu'ils se partagent 8 électrons de valence



Diffusion

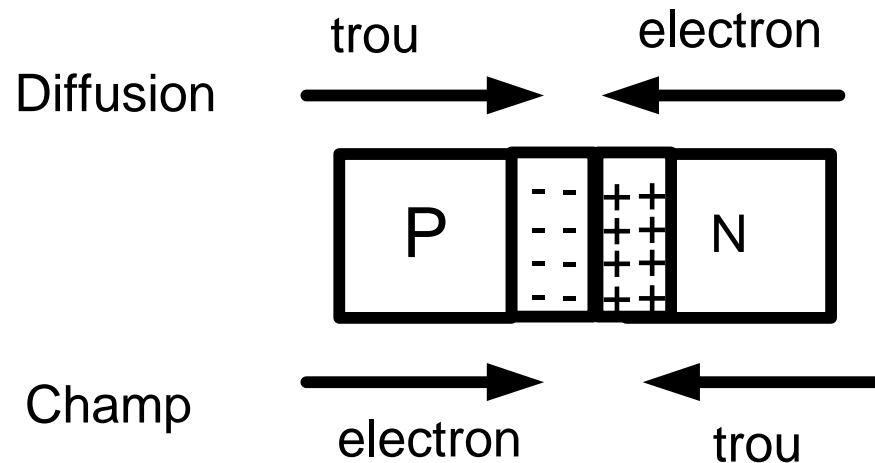
- Dû à la différence de concentration, il y a encore diffusion
- Les ions forment un champ électrique
 - Champ s'oppose partiellement à la diffusion



Diffusion

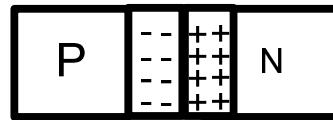
- Etape #4: Équilibre

- La diffusion génère un courant I_1 (diffusion)
- La température génère des charges dans la région du centre et le champ génère un courant I_2 (drift)



Voltage Charge Espace

- Au repos, il n'y a pas de courant NET:
 - La diffusion est compensée par le champ électrique

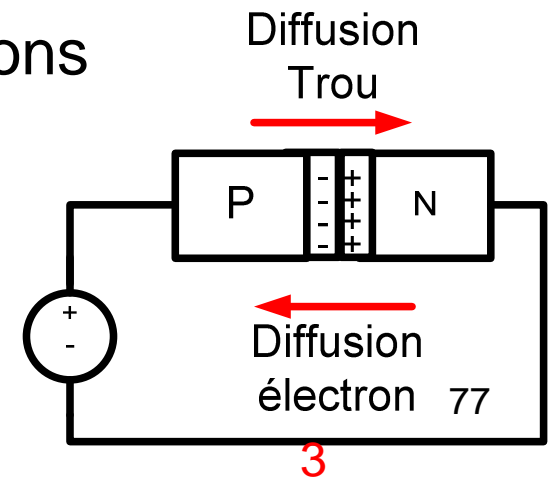
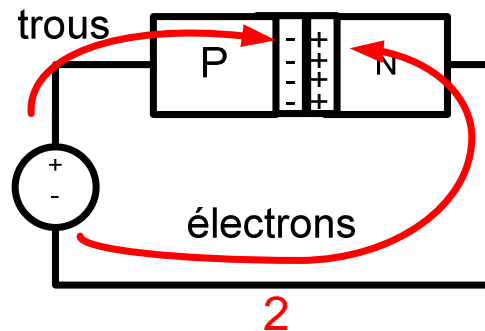
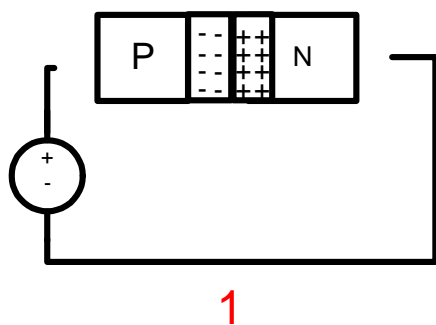


- V_b +

- Pour avoir un courant, je peux réduire V_b
 - Qu'est-ce que j'obtiendrais si je mettais une tension entre P et N?
 - Qu'arrive-t-il si j'appliquais V_b ?

Application d'une tension

- Tension externe => réduit champ interne
 - Diffusion devient plus dominante
 - Ça donne un courant net de P vers N
- On peut voir ça en 3 étapes:
 - 1) Avant la connexion
 - 2) Avec connexion, tension V_b est réduite
 - 3) Diffusion des trous et des électrons



Application d'une tension

- Quand on applique une tension, les charges qui conduisent augmentent
 - Ils augmentent de façon exponentielle par rapport à la tension appliquée
 - Le courant devrait donc aussi augmenter de façon exponentielle
- En faisant beaucoup de maths, on pourrait dériver l'équation d'une diode...

$$I = I_S \left(e^{\frac{V}{V_t}} - 1 \right)$$