

Electronique I

Cours 2

Physique des semiconducteurs

Preparation mentale

- **Sujet abstrait**
 - Retour a la chimie
 - Retour a la physique
- Analogies pas tout a fait vraies
- Le cours d'aujourd'hui devrait etre le plus abstrait de la session:
 - Faites un effort particulier pour comprendre

Preparation mentale

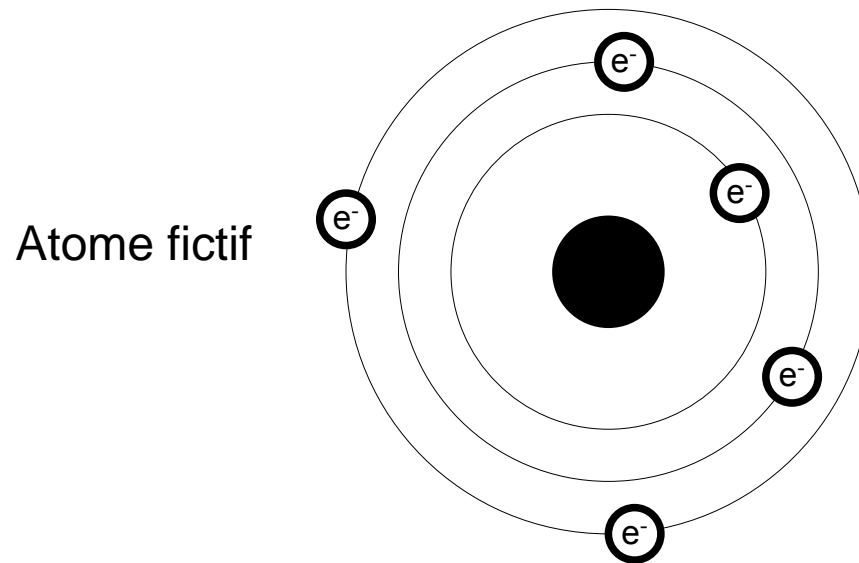
- But: Developper assez de connaissances pour comprendre les semiconducteurs
 - Semiconducteurs sont faits d'atomes
 - Atomes contiennent des electrons
 - Electrons servent a la conduction de courant
- Pour comprendre les semiconducteurs, il faut donc comprendre les electrons...

Semiconducteur ⇔ Atomes ⇔ Electrons

Retournons au modele d'atome de base...

Modele de Bohr

- Modele de Bohr:
 - Noyau positif au centre
 - Electrons qui orbitent autour
 - Comme un systeme solaire... (presque)

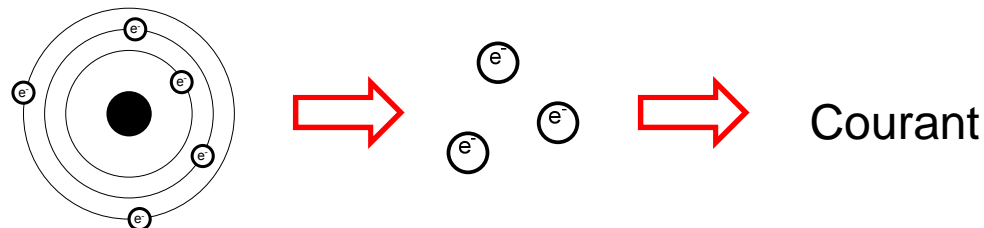


Modele de Bohr

- Le noyau est compose de protons et de neutrons
- Information :
 - Protons sont gros et sont des charges **positives**
 - Neutrons sont gros et n'ont pas de charges
 - Electrons sont petits et sont des charges **negatives**
- Donc:
 - On a des charges negatives qui “tournent” autour d'un noyau positif...

Modele de Bohr

- En electronique, on veut connaitre 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...



Modele de Bohr

- Les electrons sont “connectes” au noyau avec une certaine force
 - Charges positives et negatives s’attirent.
- Si on s’amusait a arracher des electrons, on se rendrait compte que:
 - Les electrons proches du noyau sont plus difficiles a arracher
 - Les electrons loins du noyau sont plus faciles a arracher

Quand un courant circule, c’est habituellement du aux electrons qui sont loins...

Modele de Bohr

- Peut-on etre plus specifique?
 - Combien d'energie faut-il pour arracher ces electrons?
 - Comment fait-on pour fournir cette energie?
 - Combien d'electrons vont partir?
 - Qu'est-ce que ca implique en termes de valeur du COURANT?
- Pour ca, il faut aller a la physique quantique (de base)

Ca va nous dire comment chaque electron se comporte

Nombres quantiques

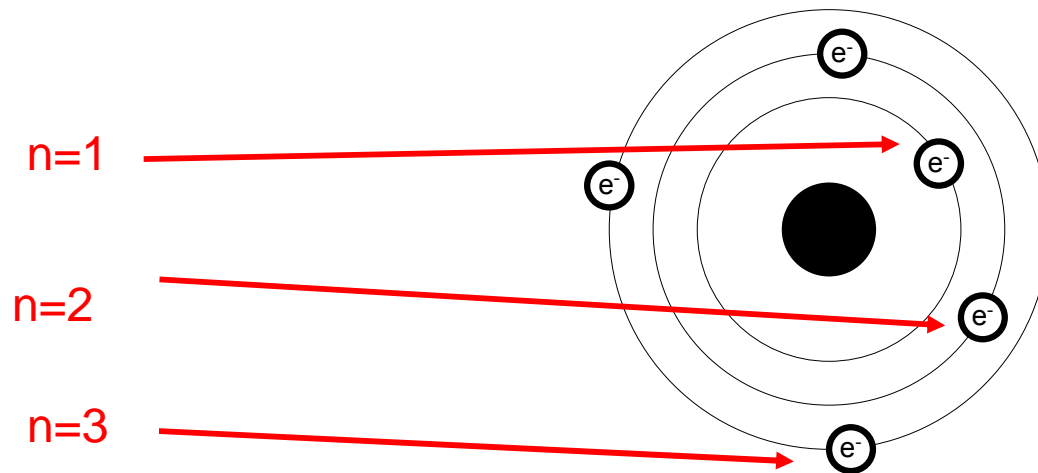
- Le courant est determine par le déplacement d'électrons
- Le comportement d'un electron depend de son *nombre quantique*
- Un *nombre quantique* est un chiffre qui identifie un electron dans un atome
 - C'est comme son nom
- Allons (re)voir les nombres quantiques

Nombres quantiques

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

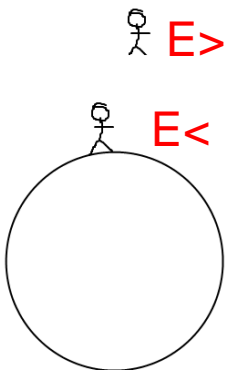
Nombres quantiques: n

- Dans le modele de Bohr, on parlait des electrons qui sont proches et loins
- On peut caracteriser la distance d'un electron 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 electrons:
 - Un electron proche du noyau a une faible energie
 - Un electron loin du noyau a une grande energie
- Analogie:
 - Un objet proche de la terre a une faible energie potentielle
 - Un objet loin de la terre a une grande energie potentielle



Les electrons a grande energie ont plus de facilite a conduire...

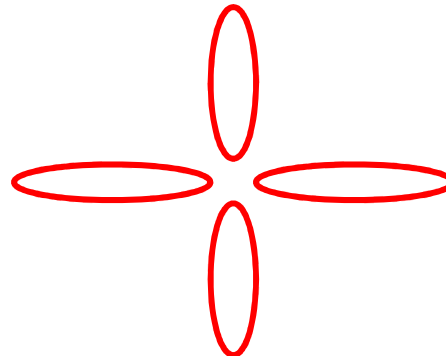
Nombres quantiques: /

- Dans le modele de Bohr, nos electrons ont des orbites spheriques
- Il existe d'autres formes d'orbite que la sphere. Par exemple:

- La forme a 2 lobes



- La forme a 4 lobes



Nombres quantiques : /

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

Le plus loin qu'on est, le plus de formes d'orbites differents 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 $n-1$:
 - Sphere ($l=0$)
 - Orbite avec 2 lobes ($l=1$)
 - Orbite avec 4 lobes ($l=2$)
 - Orbite avec 8 lobes ($l=3$)

Les orbites apparaissent dans cette ordre (vous comprendrez bientôt)

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...

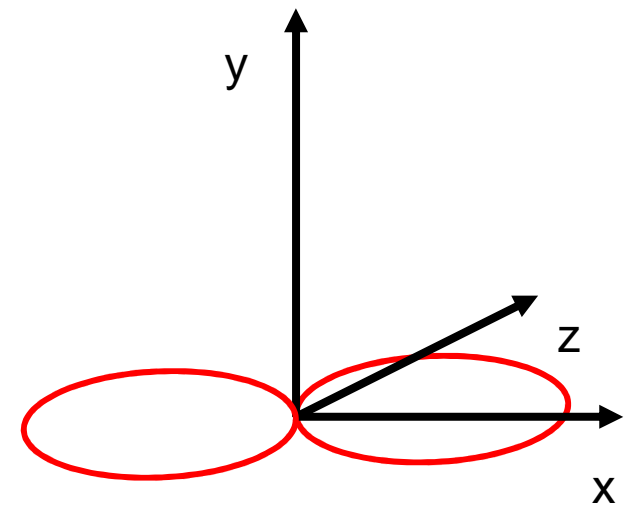
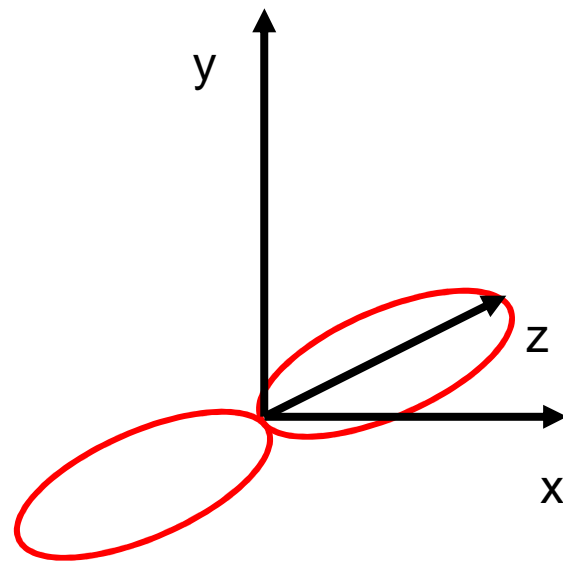
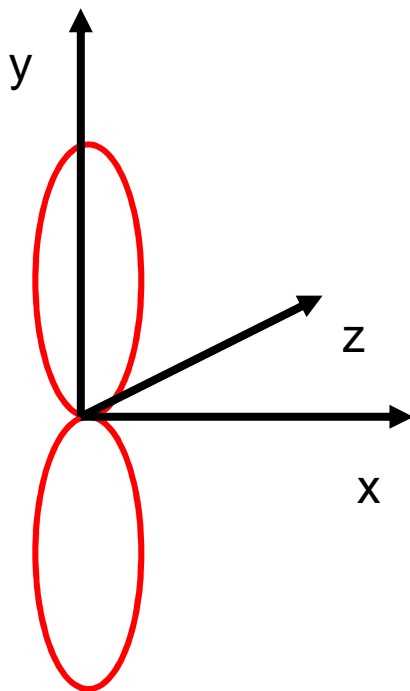
Nombres quantiques : m_l

- 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

- Considerons le cas ou $l=1$
- Il y a 3 facons d'orienter les orbites.
 - En general, il y a $(2 \cdot l) + 1$ facons de les orienter



Avec $l=1$

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

Nombres quantiques : m_l

- Avec $l=0$ (sphere), combien d'orientations differentes a-t-on?
 - L'equation $2*l+1$ nous donnerait 1.
 - C'est logique: On oriente une sphere comme on veut et ca ne change rien.
- Ex: Pour une orbitale a 4 lobes, combien y a-t-il d'orientations differentes?
 - 4 lobes veut dire $l=2$ et donc, on en aurait 5

Nombres quantiques : m_l

- “L’orientation” sera désormais nombre quantique magnetique
- On va lui assigner m_l (emm-el)
- Regle: m_l peut varier de $-l$ a $+l$
 - Ex: Pour $l=2$, on a 5 possibilites: -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 electrons 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 electron unique dans un atome
 - A chaque distance (n), il peut y avoir des types d'orbites differentes (l)
 - Chaque type (l) a des orientations differentes (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 $n=1$, $l=1$, $m_l=0$, $m_s=1/2$, ca ne peut parler que d'un seul electron

Ca nous mene au principe d'exclusion de Pauli

Principe d'exclusion de Pauli

- Le nom est compliqué mais le principe est simple:
 - 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
- Le principe ne dit que ça...
 - On peut maintenant connaître tous les électrons qui sont présents dans un atome donné...

Enumeration d'électrons

- Le comportement d'un atome depend, en partie, du comportement des electrons
 - Le comportement des electrons est determine par leurs nombres quantiques
 - Le tableau periodique donne le nombre d'electrons mais ne dit pas lesquels
 - Il faut savoir QUELS electrons sont presents
- Pour savoir quels electrons sont presents, on peut simplement les enumerer

Enumeration 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

Enumeration 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

Enumeration 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 electrons:
 - Enumerez les electrons qui sont presents.

Exemple (seul)

- On dessine un tableau et on remplit ca 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 electrons:

n	l	m_l	m_s
1	0	0	↑ ↓

On a enumere 2 electrons... 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 electrons:

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

On a enumere 10 electrons...
il en reste 1.

Exemple (seul)

- Pour le 3e niveau:
 - $n=3$: il y a 3 l
 - Cependant, il ne reste qu'un seul electron
 - 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

Energie \Rightarrow Arracher électrons \Rightarrow Courant

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

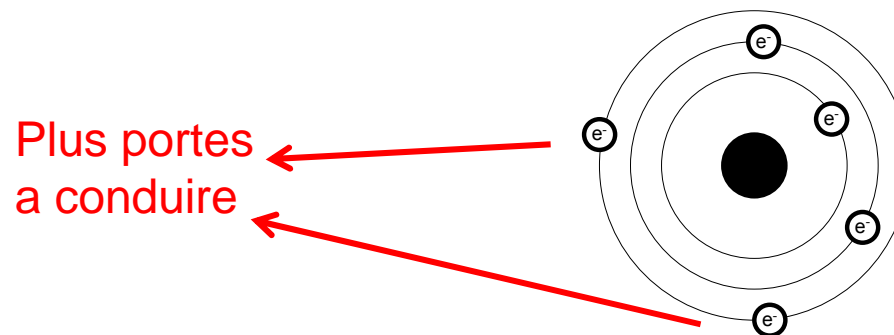
Bandes d'énergie

- 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 $l=0$ (sphère) sera différente de $l=1$ (2 lobes)

Des nombres quantiques différents impliquent des énergies différentes

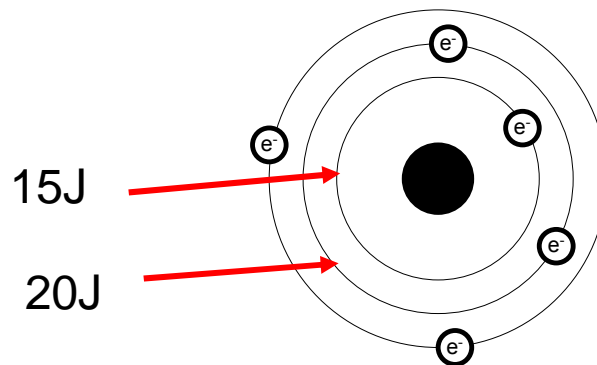
Bandes d'énergie

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



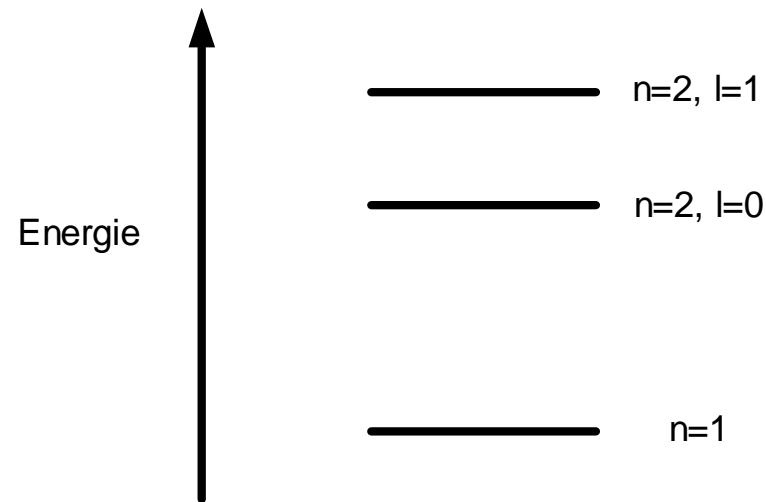
Note: 5J, c'est ENORME!

Bandes d'énergie

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

Bandes d'énergie

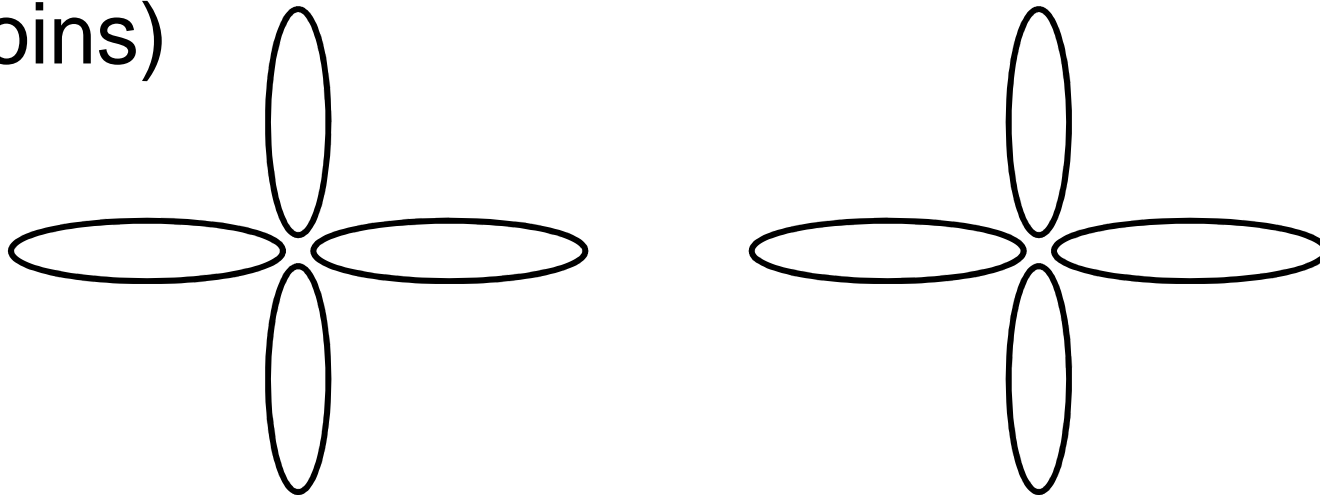
- Voici un diagramme typique d'énergie



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

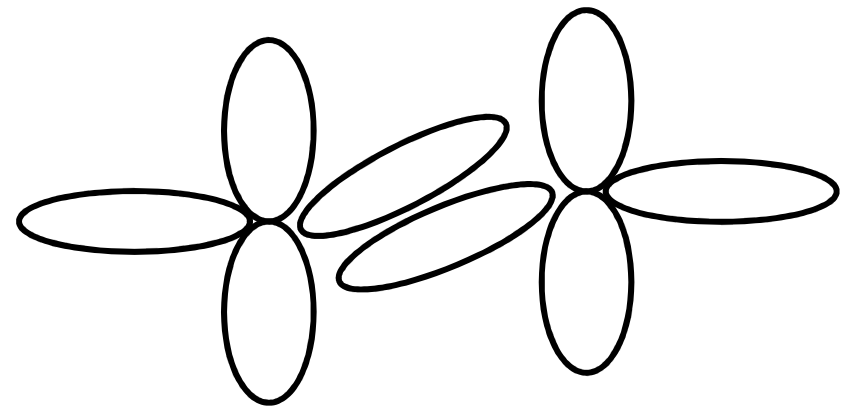
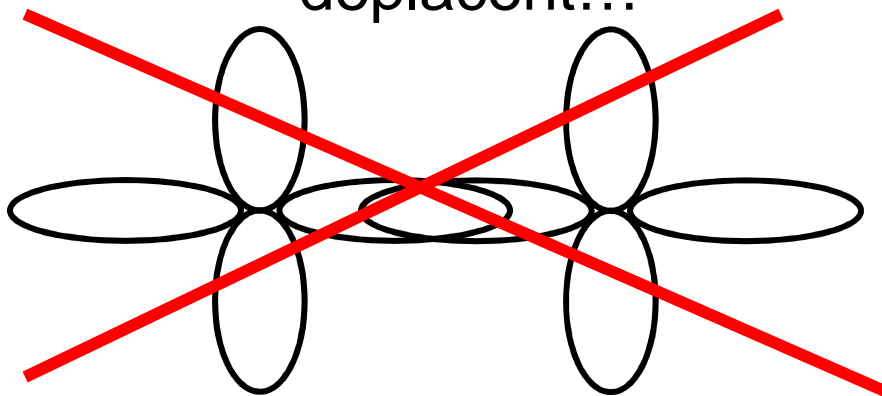
Bandes d'énergie

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



Bandes d'énergie

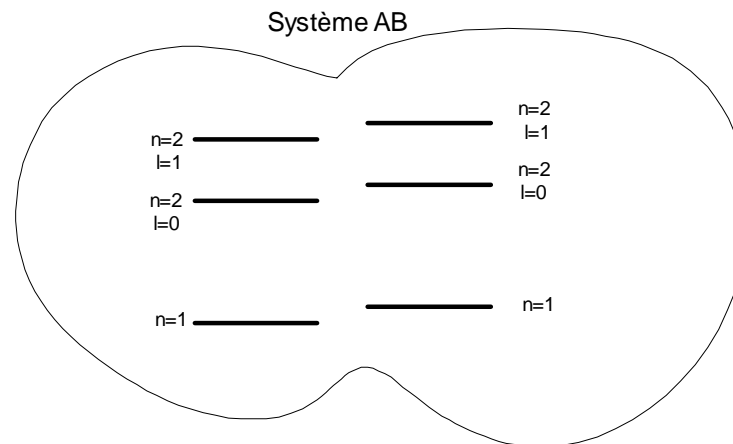
- Dans les solides, les atomes sont proches
 - S'ils sont trop proches, les électrons vont partager les mêmes orbitales
- Pauli n'est pas d'accord...
 - Il y a donc accommodation: les lobes se déplacent...



Revoyons ça avec les niveaux d'énergie...

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

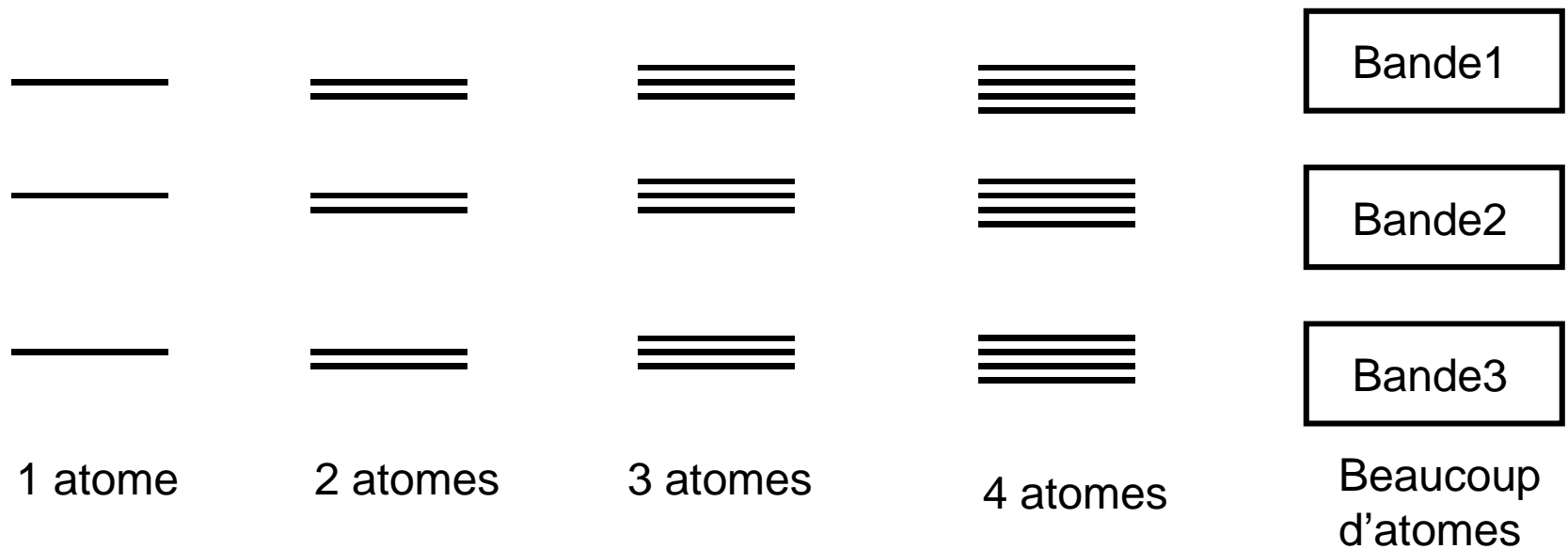
Bandes d'énergie

- 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 TRES colles

Essayons d'illustrer ca graphiquement

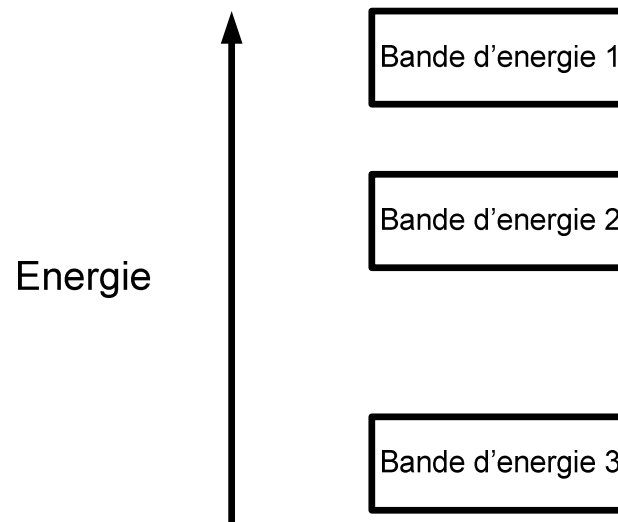
Bandes d'énergie

- En regroupant beaucoup d'atomes, on obtient beaucoup de niveaux d'énergie
- Quand ces niveaux et sont colles:
 - 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



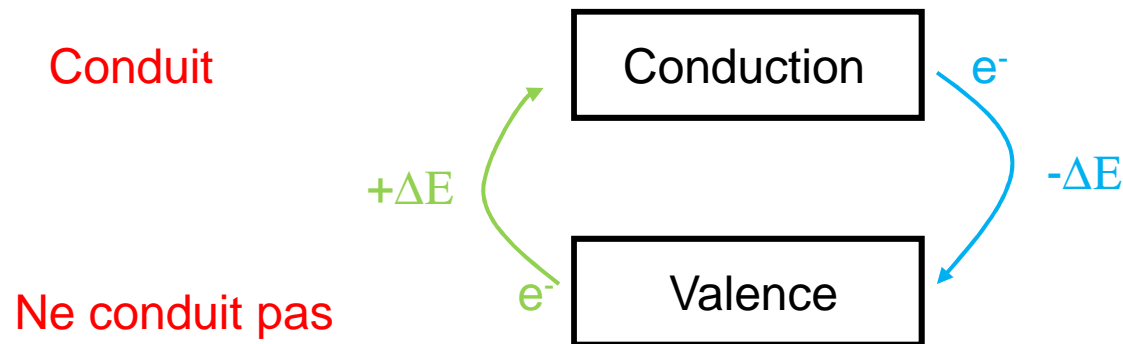
Bandes d'énergie

- 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



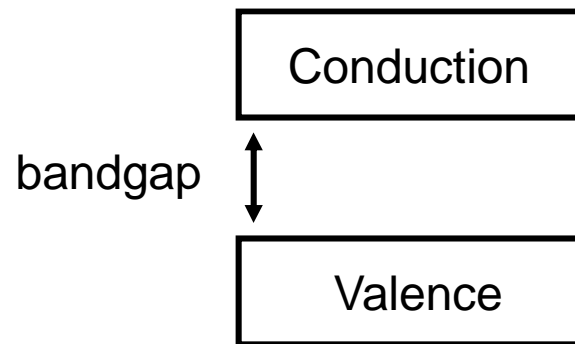
Bandes d'énergie

- 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



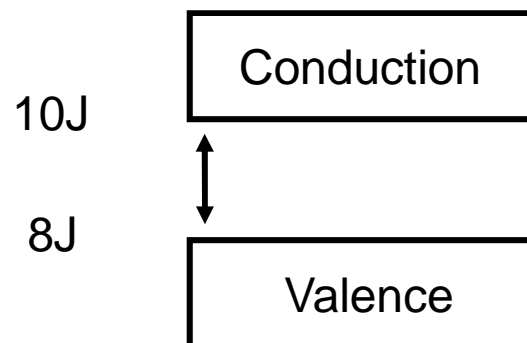
Bandes d'énergie

- Une des caractéristique importante, c'est la "distance" entre les 2 bandes
 - Terme anglais: bandgap
- Energie necessaire pour passer d'une bande a l'autre



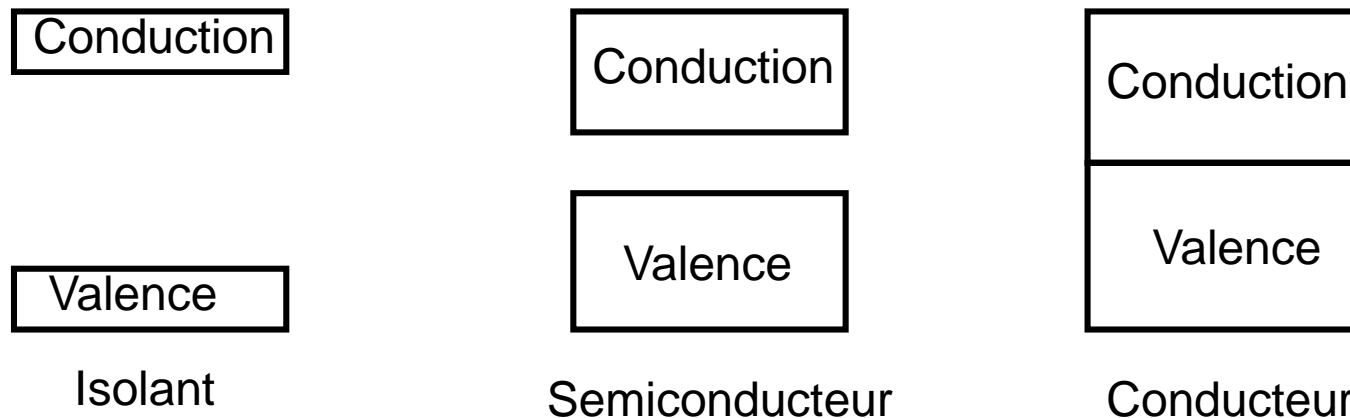
Bandes d'énergie

- Dans les bandes, les electrons peuvent avoir n'importe quelle energie
 - Conduction: plus que 10J
 - Valence: moins que 8J
- Aucun electron ne peut avoir d'energie dans la plage associee au bandgap
 - Aucun electron ne peut avoir entre 8 et 10J



Bandes d'énergie

- Différents matériaux ont différents bandgaps
- On classe par valeurs de bandgap:
 - Gros bandgap: isolant
 - Petit bandgap: conducteur
 - Moyen bandgap: semiconducteur



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, a la temperature de la piece, ne conduisent pas tres bien
 - La raison: pas assez d'electrons en conduction
- Il est possible d'ameliorer la conduction en "ajoutant des electrons"
- Comment? En dopant.

Definitions

- Doper: Injection d'atomes étrangers dans le matériau pour améliorer la conduction
- Intrinseque: pur
- Extrinseque: matériau qui a été dope
- Donc, le silicium pur s'appelle le silicium intrinseque
- Le silicium avec des atomes de Bore, par exemple, s'appelle le silicium extrinseque

Dopage

- Il y a 2 facons de doper le silicium:
 - En ajoutant des electrons
 - En ajoutant des places ou les electrons 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 Uun								

Legend:

- hydrogen
- alkali metals
- alkali earth metals
- transition metals
- poor metals
- nonmetals
- noble gases
- rare earth metals

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

Retour en arriere (Exemple)

- Avant d'expliquer les details, on va se rafraichir la memoire avec un exercice...
- Enumerez les electrons du silicium (14)

Retour en arriere (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 arriere

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

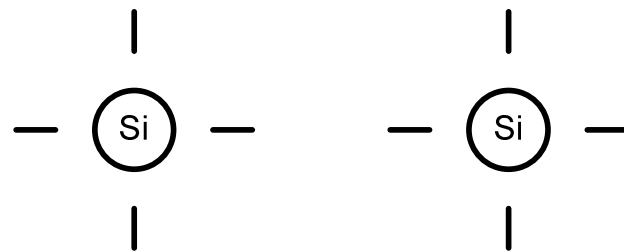
Retour en arriere

- Regle generale: les atomes veulent avoir une configuration de gaz noble
 - Ils veulent que toutes les lobes soient completes
 - Pour le silicium, on veut 8 electrons
- Certains elements forment des liens ioniques: ils volent les electrons
- Certains elements forment des liens de valence: ils se partagent les electrons

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

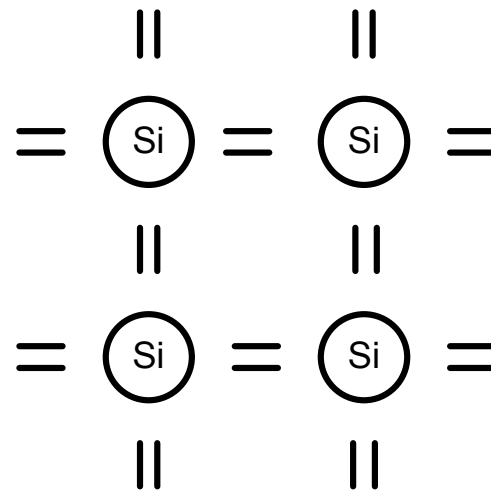
Modele simplifie

- Les atomes separes ressemblent a ca:



Les barres sont les
electrons de valence

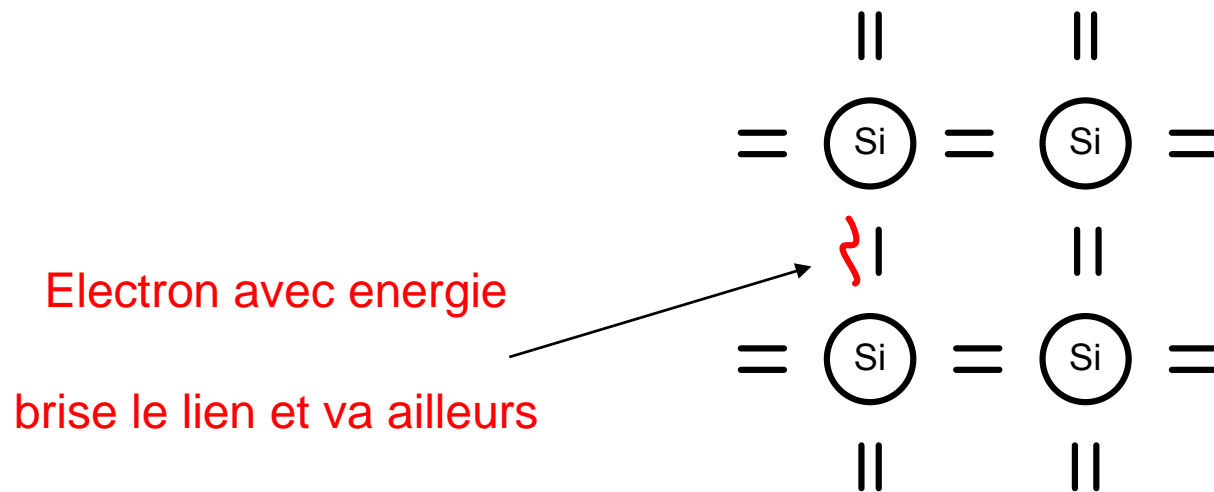
- Quand ils forment des liens, ca donne:



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

Modele simplifie

- Le silicium se retrouve avec 8 electrons sur la derniere orbite (lobe complet)
- La conduction est due a l'excitation des electrons (E_G ou plus)



Modele simplifie

- Quand on brise le lien, on laisse un “trou”
- Un “trou” est consideree comme une charge positive
 - En realite, c’est une ABSENCE d’electron la ou il devrait y en avoir un.
- Pour qu’il y ait conduction il faut:
 - Assez d’energie pour que le lien se brise (E_G)
 - Un trou qui peut accepter un electron

Dopage

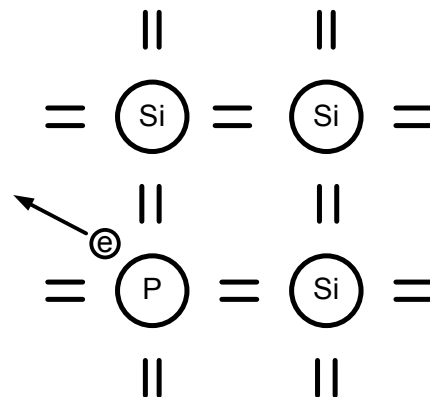
- Pour améliorer la conduction, on peut faire 2 choses:
 - Augmenter les électrons libres
 - Augmenter les trous disponibles
- Pour ces 2 options, on ajoute des “impuretés” au silicium
- Ce sont des molécules autres que le silicium (dopants)

Dopage: ajouter electron

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

Dopage : ajouter electron

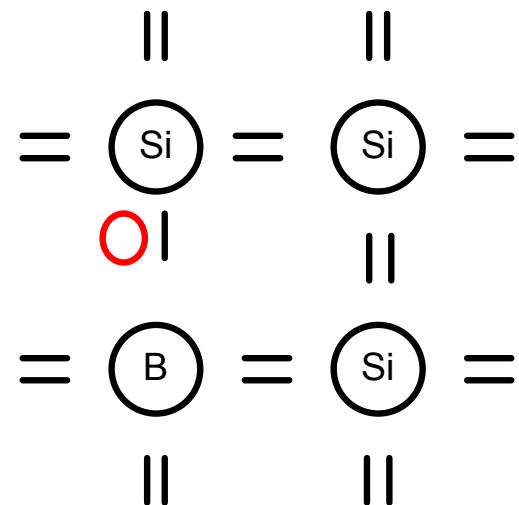
- Le Phosphore, par exemple, a 5 electrons de valence.
- Si on le connectait au Si, on aurait ceci:



- L'electron du P est "plus" libre de conduire

Dopage: ajouter trou

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



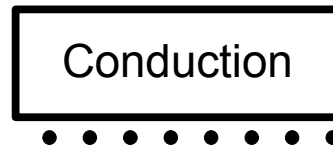
Les electrons ailleurs pourront venir se combiner au trou

Dopage

- Dopant de type N:
 - Avec le phosphore, on a un electron 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 electron 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 “dopes” 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:

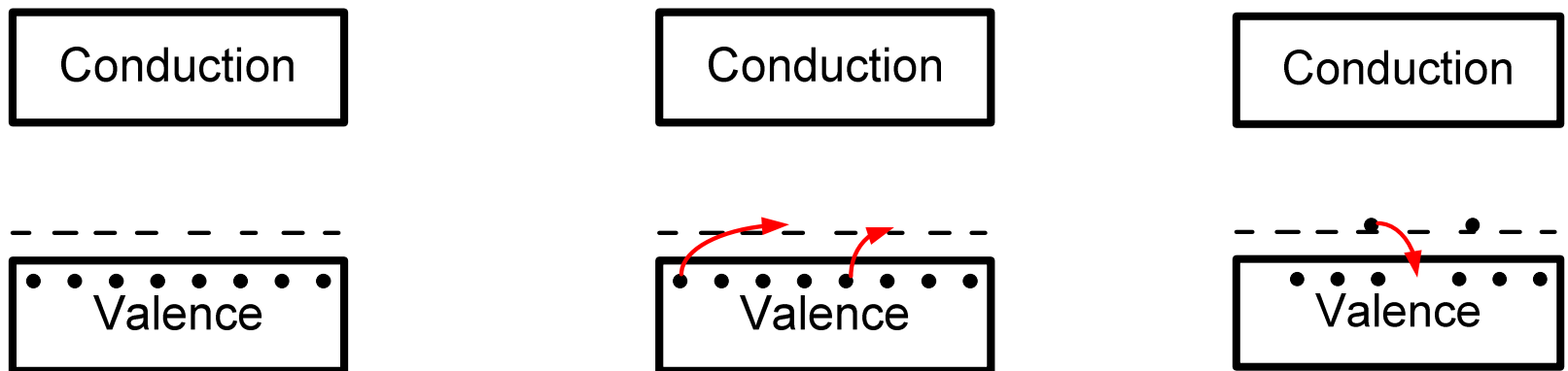
Conduction

Valence

- Les trous “dopes” 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 façons:
 - Dans la bande de conduction avec des électrons
 - Dans la bande de valence avec des trous
- C'est juste une façon de visualiser:
 - Les trous ne sont pas des particules: c'est une absence d'électrons.
 - En réalité, ce sont quand même les électrons qui circulent

Jonctions PN

- Silicium N et P (seul) :
 - Ca conduit plus ou moins bien
 - C'est comme des resistances (presque)
 - Pas tres interessant...
- Si on les combinait ensemble, qu'est-ce que ca donnerait?

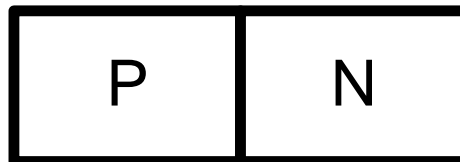


- Ca formerait une diode...

Les choses deviendraient plus interessantes...

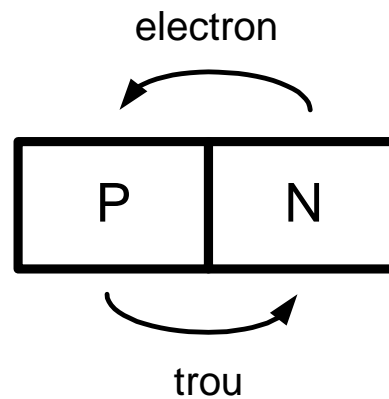
Jonctions PN

- Etape #1: Quand P et N viennent juste d'être "colles"
 - P grande concentration de trous
 - N grande concentration d'électrons
- Au temps 0s, la jonction ressemble a ca:



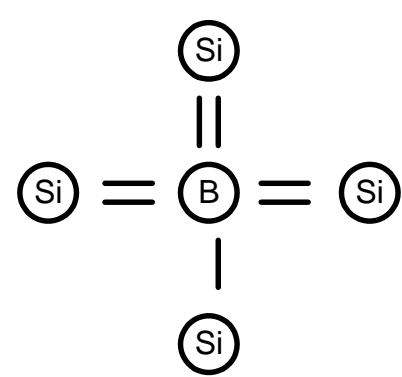
Diffusion

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

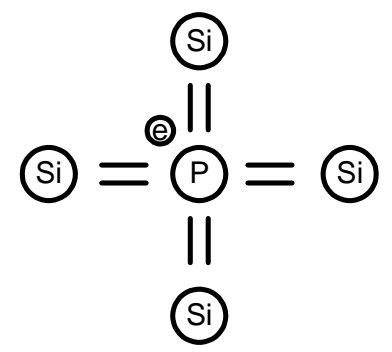
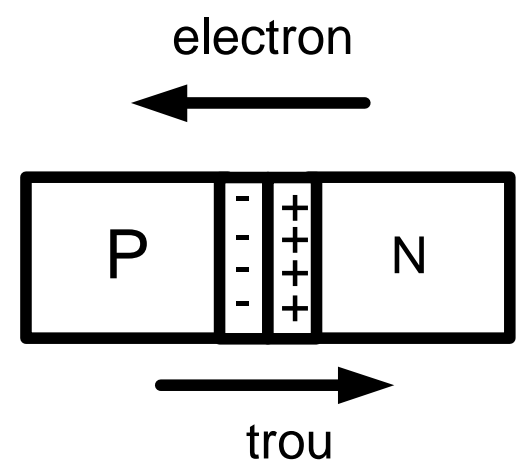


Diffusion

- Etape #3: Diffusion (etape intermediaire)
 - Quand electron part, il laisse un ion positif
 - Quand trou part, il laisse un ion negatif
 - Ions ne peuvent pas reagir parce qu'ils se partagent 8 electrons de valence



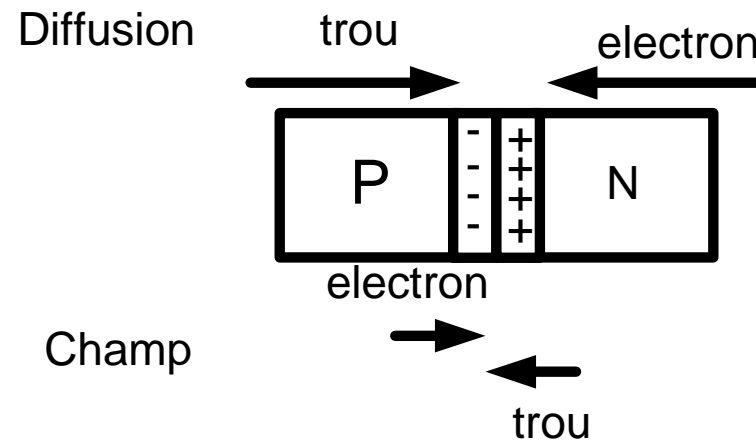
Type P
5 electrons
5 protons



Type N
15 electrons
15 protons

Diffusion

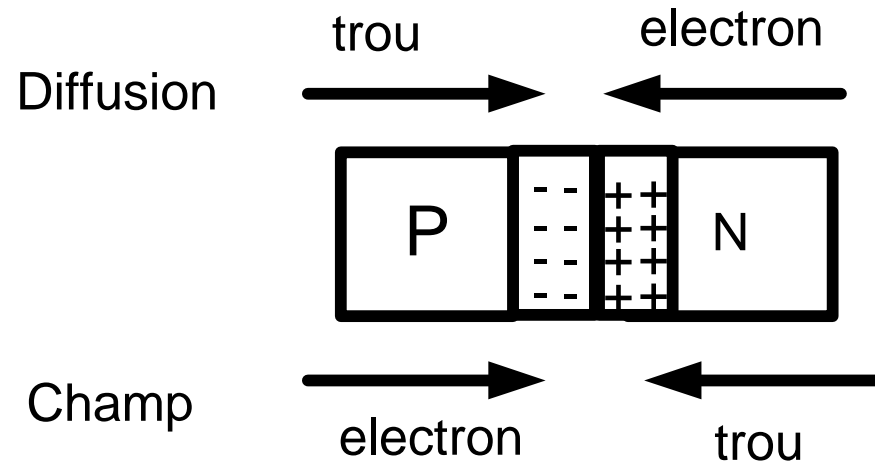
- Du a la difference de concentration, il y a encore diffusion
- Les ions forment un champ electrique
 - Champ s'oppose partiellement a la diffusion



Diffusion

- Etape #4: Equilibre

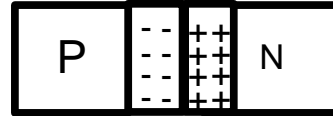
- La diffusion genere un courant I_1 (diffusion)
- La temperature genere des charges dans la region du centre et le champ genere un courant I_2 (drift)



Ca nous ramene au diagramme d'energie de la jonction PN

Voltage Charge Espace

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

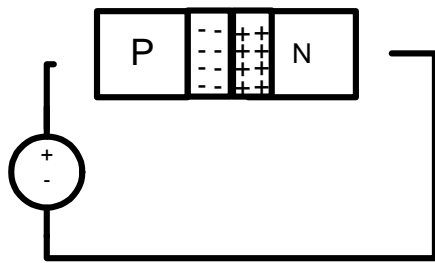


- V_b +

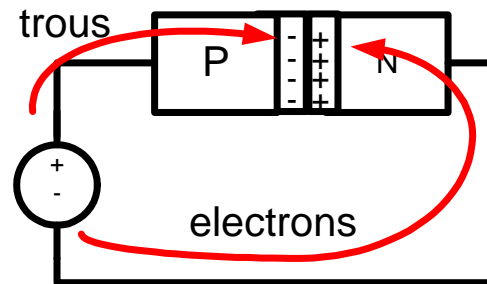
- Pour avoir un courant, je peux reduire V_b
 - Qu'est-ce que j'obtiendrais si je mettais une tension entre P et N?
 - Qu'arrive-t-il si j'appliquais V_b ?

Application d'une tension

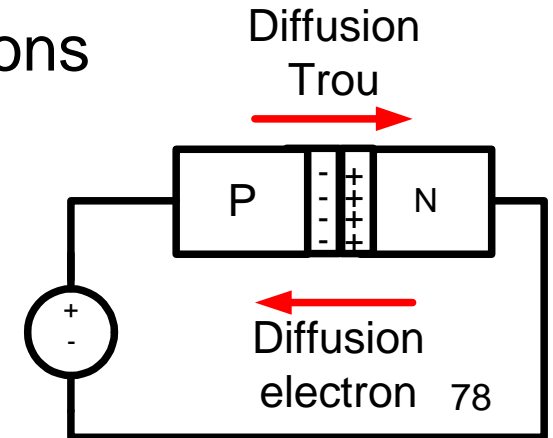
- Tension externe => réduit champ interne
 - Diffusion devient plus dominante
 - Ça donne un courant net de P vers N
- On peut voir ça en 3 étapes:
 - 1) Avant la connexion
 - 2) Avec connexion, tension V_b est réduite
 - 3) Diffusion des trous et des électrons



1



2



3

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...

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