

Les semi-conducteurs

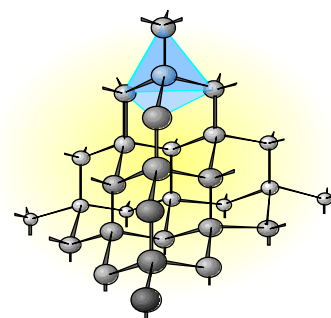
1) Préliminaires

Du point de vue de leur conductivité électrique, les corps se subdivisent essentiellement en 3 groupes :

- a) **les isolants** : ne conduisent pas le courant électrique
- b) **les conducteurs métalliques** : conduisent bien le courant électrique, d'autant mieux que la température est plus basse
- c) **les semi-conducteurs** : conduisent le courant nettement moins bien que les métaux, mais d'autant mieux que la température est plus élevée (exemples types : le silicium Si, le germanium Ge)

La bonne conductivité électrique des métaux est due à la présence des électrons libres du gaz électronique qui parcourent tout le réseau métallique.

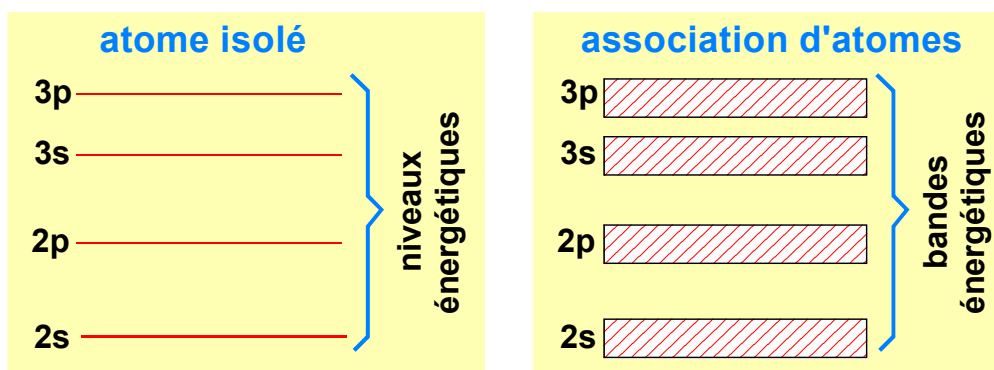
Les semi-conducteurs (exemple : le silicium Si) forment des réseaux atomiques (du type diamant) où les atomes sont reliés par covalence. Il n'existe pas d'électrons libres comme dans les métaux. La migration des électrons ne peut se faire que par « petits pas », les électrons sautant d'un atome à l'autre.



2) Modèle : la théorie des bandes énergétiques

En étudiant le modèle quantique, nous avons vu que pour les atomes isolés (état gazeux) les électrons présentent des niveaux énergétiques rigoureusement déterminés, associés aux différents nuages électroniques atomiques. L'espace compris entre 2 niveaux est interdit à l'électron.

A l'état condensé (liquide ou solide), les niveaux énergétiques de chaque atome sont influencés par ceux de tous les voisins, ce qui entraîne que ces niveaux énergétiques s'élargissent en bandes énergétiques ; l'espace entre 2 bandes reste interdit aux électrons.



(Cet élargissement en bandes est d'ailleurs confirmé par l'étude spectrale : en option sciences de 2^e, on vous a montré que l'état condensé (liquides et solides) présente des spectres d'absorption à bandes.)

Pour l'étude des semi-conducteurs basés sur le silicium Si, il importe de distinguer 2 bandes :

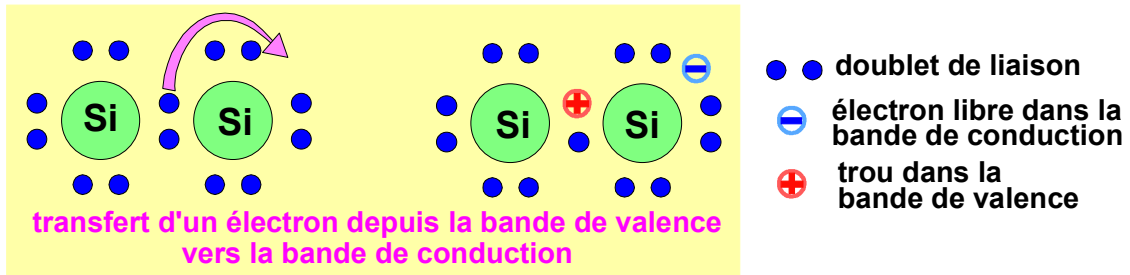
- * **la bande de valence** : c'est la bande énergétique des électrons qui assurent les liaisons covalentes (réalisées par les électrons de valence) entre les atomes du réseau. Pour le silicium p.ex., c'est la bande 3p.
- * **la bande de conduction** : c'est la bande d'énergie immédiatement supérieure à la bande de valence. Pour le silicium p.ex., c'est la bande 4s.

Comme les électrons recherchent toujours l'état de la plus basse énergie, au zéro absolu :

- la bande de valence du silicium, d'énergie inférieure à celle de la bande de conduction, est complètement remplie ; tous les électrons de la dernière couche des atomes forment 4 liaisons covalentes avec leurs voisins.
- la bande de conduction de Si est vide, le matériel se comporte en isolant parfait.

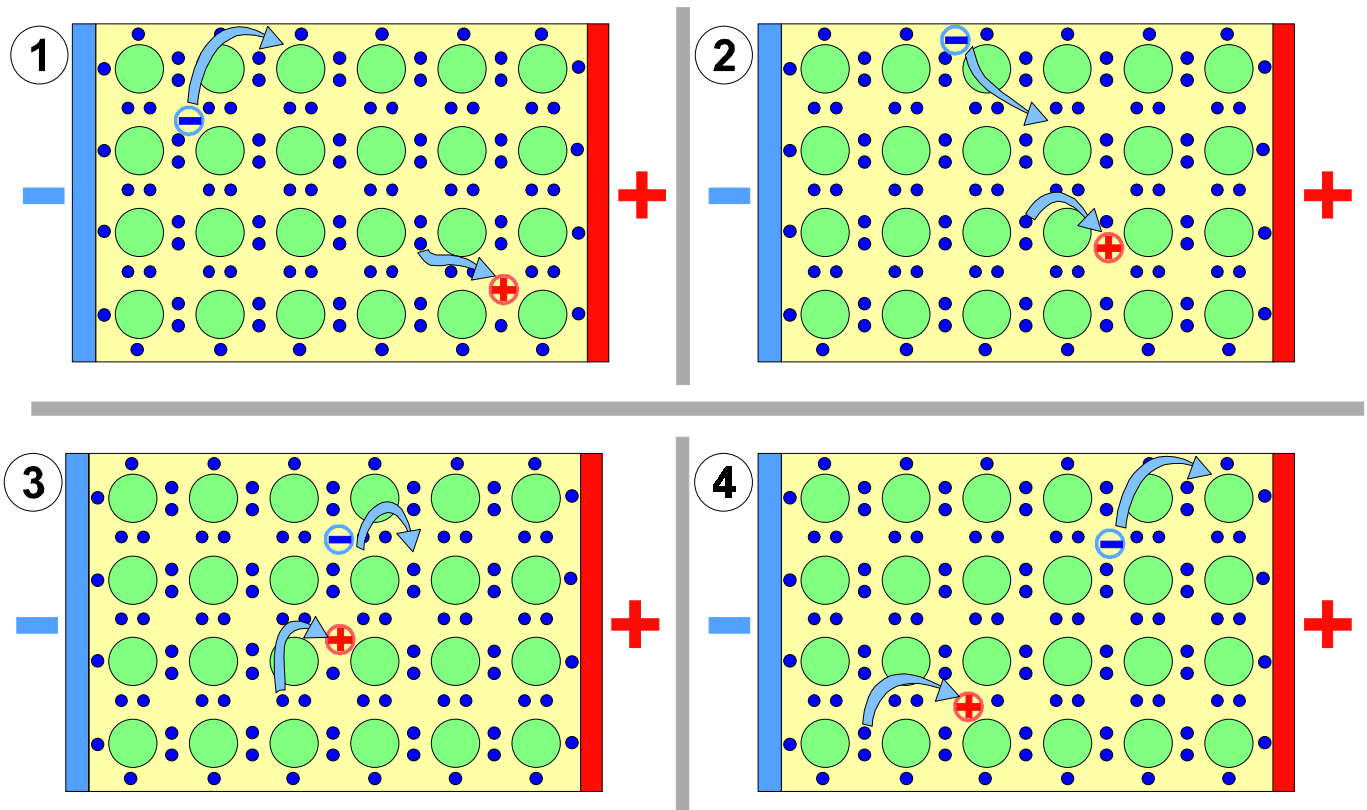
Des électrons ayant acquis un excès d'énergie par agitation thermique ou par impact d'un photon peuvent passer de la bande de valence à la bande de conduction et se déplacer à travers le réseau par sauts successifs d'un atome à l'autre. La conductivité électrique augmente avec le nombre des électrons dans la bande de conduction.

Remarquons que le transfert d'électrons depuis la bande de valence vers la bande de conduction laisse évidemment des places vides dans la bande de valence . Ces trous correspondent en fait à des charges positives portées par les atomes déficitaires en électrons.

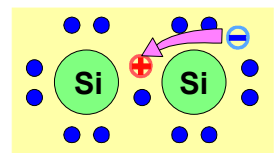


Un trou peut être occupé par l'électron d'un atome voisin, ce qui entraîne en définitif la migration du trou d'un atome à l'autre. Ainsi une bande de valence partiellement dépeuplée devient conductrice par « sauts de trous ».

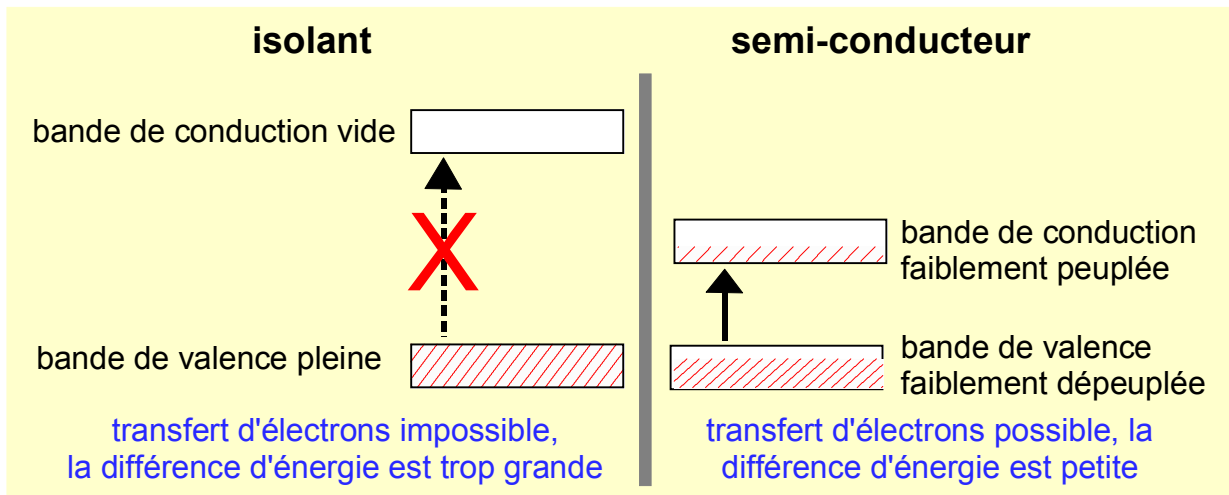
Représentation schématique du déplacement des électrons libres ⊖ et des trous ⊕ dans le silicium soumis à une différence de potentiel électrique :



Lorsqu'un électron libre de la bande de conduction et un trou de la bande de valence se rencontrent sur le même atome, l'électron passe dans le trou et les 2 porteurs de charges disparaissent simultanément.



3) Différence entre isolants et semi-conducteurs



La différence entre les isolants et les semi-conducteurs est donc purement quantitative. Dans la 2^e période du tableau périodique, l'écart énergétique important entre la bande de valence 2p et la bande de conduction 3s fait du diamant un isolant. A partir de la 3^e période, l'écart bien plus faible permet au silicium (3^e période) et au germanium (4^e période) de se comporter en semi-conducteurs.

Comme l'agitation thermique provoque le transfert d'électrons depuis la bande de valence à la bande de conduction, on comprend pourquoi les semi-conducteurs conduisent le courant électrique mieux à chaud.

4) Semi-conducteurs intrinsèques et semi-conducteurs dopés

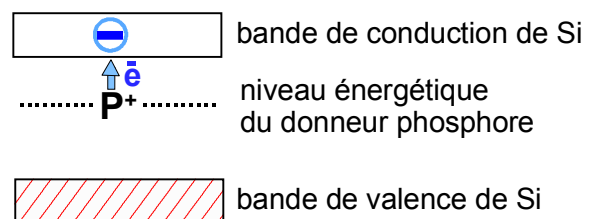
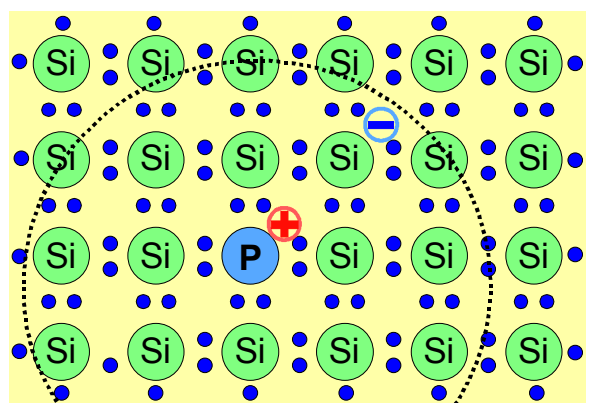
Les semi-conducteurs constitués des éléments silicium Si ou germanium Ge à l'état pur sont appelés semi-conducteurs intrinsèques. Surtout à froid, leur conductivité électrique est faible.

Afin d'augmenter la conductivité électrique des semi-conducteurs, on ajoute par traces (environ 1 atome sur 1 million) des atomes d'un autre élément (le dopant) judicieusement choisi de manière à ce que ses atomes présentent par rapport à l'élément qui constitue le réseau (Si ou Ge) soit un électron en excès, soit un électron en défaut.

a) semi-conducteurs dopés du type n

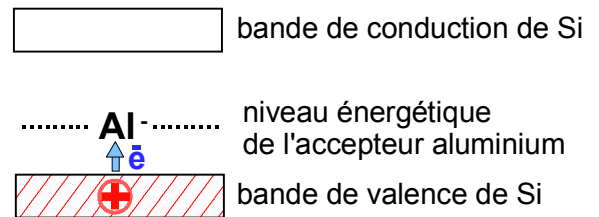
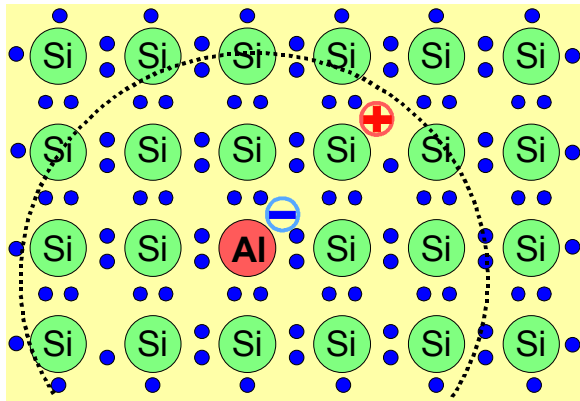
Soit le silicium dopé au phosphore. Par rapport au silicium, le phosphore présente 1 électron de valence excédentaire. Un atome P remplace par endroits un atome Si dans le réseau. Comme l'atome de phosphore ne peut former que 4 liaisons covalentes avec les 4 atomes voisins silicium, il abandonne l'électron excédentaire au réseau. L'atome de phosphore prend une charge positive (perte d'un électron) qui reste évidemment sur place (elle est due à l'excès d'un proton dans le noyau de P).

Mais l'électron abandonné représente une charge négative mobile, car il doit passer dans la bande de conduction du silicium, la bande de valence étant pleine. Le silicium ainsi dopé devient durablement conducteur par « sauts d'électrons » : c'est un semi-conducteur du type n (« négatif »).



b) semi-conducteurs dopés du type p

Soit le silicium dopé à l'aluminium. Par rapport au silicium, l'atome d'aluminium présente un électron de valence en défaut. Afin que Al puisse s'intégrer dans le réseau et former 4 liaisons covalentes avec ses 4 atomes voisins Si, le réseau lui cède l'électron déficitaire à partir de la bande de valence de Si qui acquiert ainsi un trou. La charge négative que prend l'atome Al n'est pas mobile, car Al a besoin de cet électron supplémentaire pour assurer ses 4 liaisons. Mais la bande de valence du silicium se dépeuple durablement et devient conductrice par « sauts de trous ». La migration de trous étant assimilable à une migration de charges positives, nous obtenons un semi-conducteur du type p (« positif »).

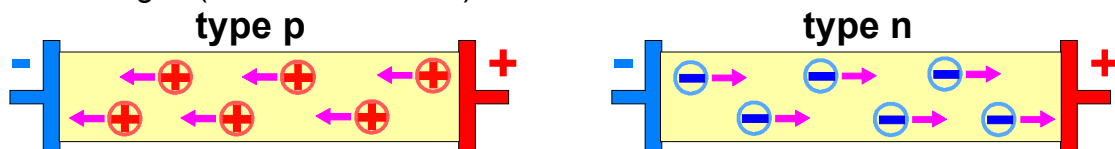


5) Avantage des semi-conducteurs dopés

Comme les niveaux énergétiques des éléments dopants se situent entre les bandes de valence et de conduction du silicium, le nombre des transitions d'électrons est bien plus important que dans les semi-conducteurs intrinsèques. Partant, la conductivité électrique des semi-conducteurs est supérieure à celle des semi-conducteurs intrinsèques.

Mais l'énorme avantage du dopage consiste en ce que l'on dispose maintenant de 2 types de conducteurs différents, l'un conduisant le courant électrique par « sauts d'électrons » (charges négatives), l'autre par « sauts de trous » (assimilables à des charges positives).

Lorsque nous appliquons une source électrique aux 2 types de conducteurs, la migration des porteurs de charges (électrons ou trous) se fait en sens inverse :



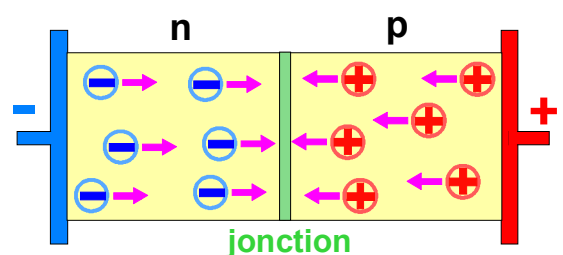
C'est en effet l'association des 2 types de semi-conducteurs qui permet la réalisation des 2 applications qui sont à la base de l'électronique moderne : la diode et le transistor !

6) La diode

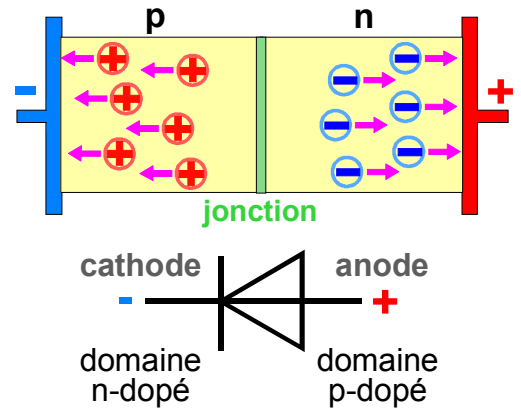
La diode est un dispositif qui laisse passer le courant électrique dans un sens, mais bloque le courant dans l'autre sens.

La diode est formée par l'union de 2 semi-conducteurs l'un dopé de type p et l'autre dopé de type n. La zone de contact entre les 2 types de semi-conducteurs dopés s'appelle jonction.

Lorsque le pôle positif d'une source de courant est relié au semi-conducteur p et le pôle négatif de la source est relié au semi-conducteur n, les porteurs de charges (électrons et trous) migrent dans les 2 types de semi-conducteurs vers la jonction. Au niveau de la jonction, les électrons se combinent aux trous : le courant électrique passe.



Lorsque la source de courant est reliée à la diode en sens inverse, les porteurs de charges s'éloignent des 2 côtés de la jonction qui, alors dépeuplée de charges, devient non-conductrice : le passage du courant est bloqué.



Dans les circuits électroniques, la diode est schématisé par le symbole ci-contre. La flèche traduit le sens du passage du sens conventionnel (de + vers -) du courant électrique.

Dans les diodes lumineuses (light emitting diodes LED, Leuchtdioden), l'énergie libérée lors de l'union des électrons et des trous est rayonnée sous forme de photons de lumière dont la couleur dépend du dopage. Le spectre émis est évidemment un spectre de bandes.

7) Le transistor (anglais : *trans*formation *resistor*, c'est-à-dire résistance adaptable, contrôlable)

Le transistor est un dispositif qui permet de contrôler un courant d'intensité plus forte à l'aide d'un courant d'intensité plus faible. Il peut servir de commutateur ou d'amplificateur.

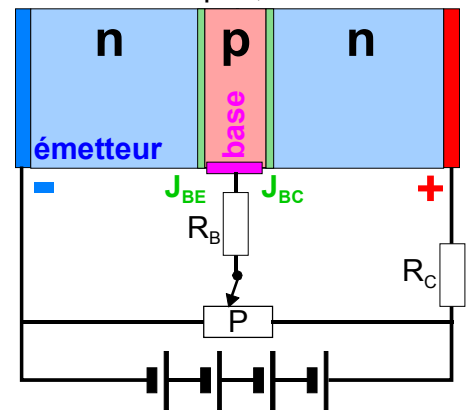
Nous expliquons le fonctionnement sur l'exemple du transistor bipolaire dit « npn ».

Il est constitué d'une association de trois couches de semi-conducteurs dopés, à savoir :

- une couche du type n appelée « émetteur (E) »
- une couche du type p appelée « base (B) »
- une couche du type n appelée « collecteur (C) »

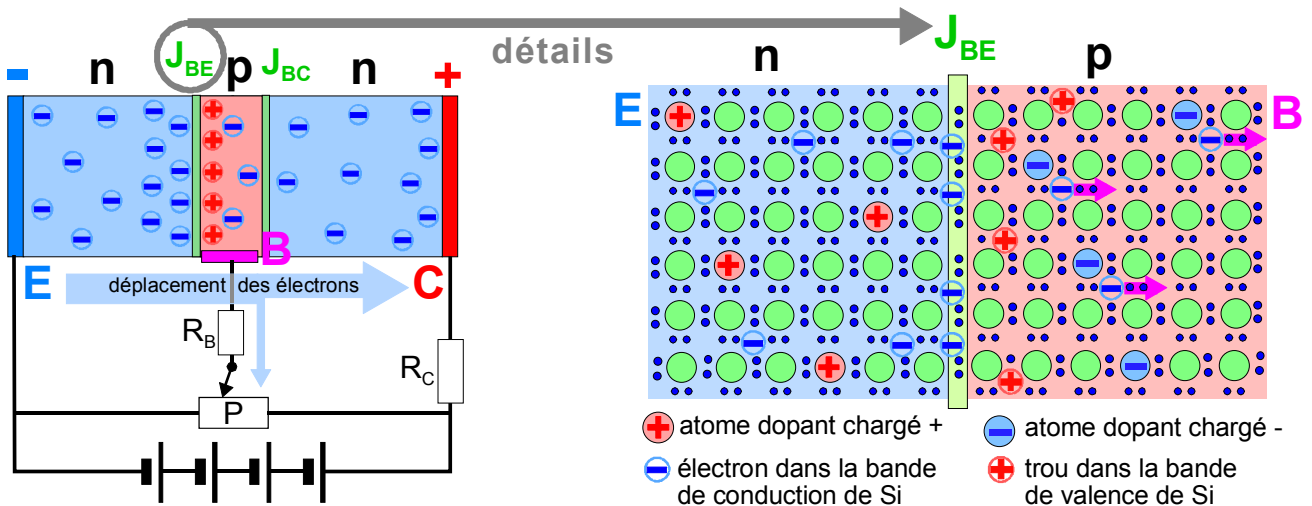
La couche p de la base est très mince par rapport à celles de l'émetteur et du collecteur. Elle forme avec les couches n de part et d'autre les 2 jonctions J_{BE} et J_{BC} .

L'émetteur est relié au pôle négatif d'une source électrique, le collecteur au pôle positif. La base est portée à un potentiel positif par rapport à l'émetteur et négatif par rapport au collecteur.



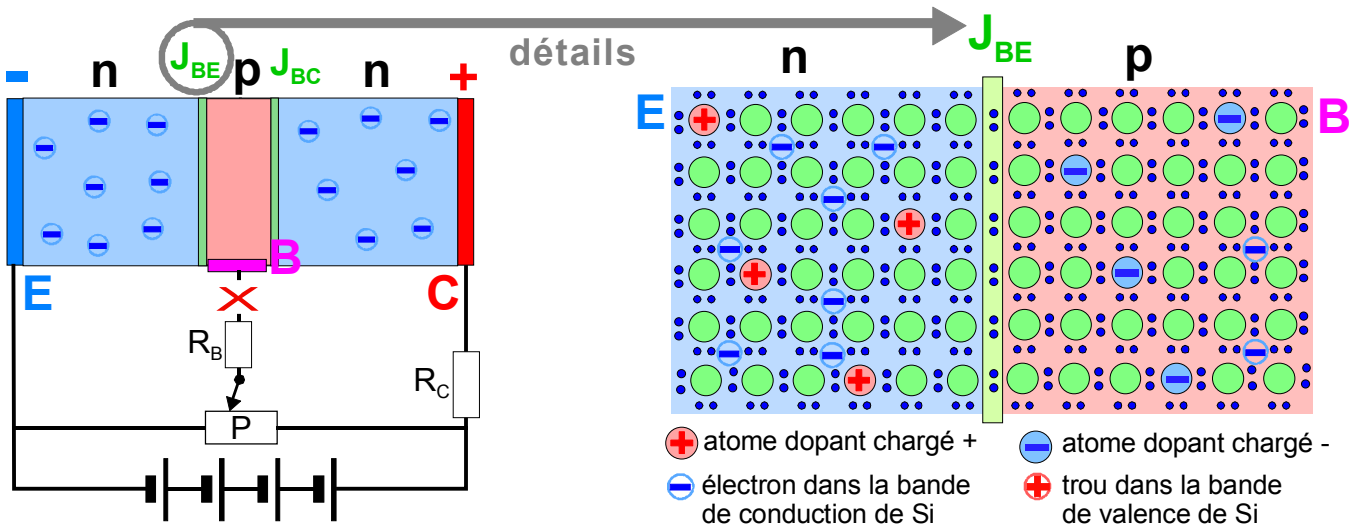
Les deux résistances R_B et R_C , avec $R_B \gg R_C$, servent à limiter les courants électriques.

Dans la zone de contact, les électrons de la bande de conduction de l'émetteur et les trous de la bande de valence de la base migrent vers la jonction J_{BE} . Si les tranches « n » et « p » étaient d'une épaisseur comparable, les électrons de « n » se combineraient aux trous de « p » et tout le courant passerait par la connexion de la base. Mais comme la tranche « p » est extrêmement mince, la grande majorité des électrons de « n » traversent la base ; attirés par l'important potentiel de la jonction J_{BC} , ils passent vers le collecteur (→).



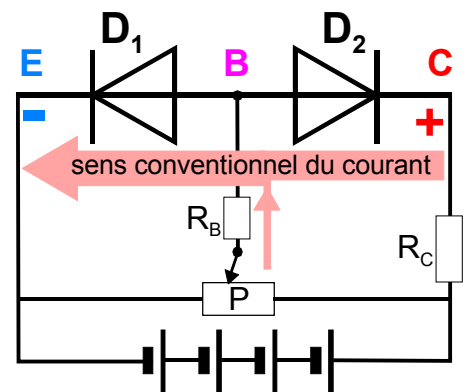
Seulement un nombre très restreint d'électrons en provenance de l'émetteur se combinent aux trous de la base. Pour régénérer les trous neutralisés par cette recombinaison, il faut qu'un faible courant (enlevant de électrons à la tranche « p ») circule par le circuit de connexion de la base.

Mais si la base cesse d'être chargée positivement par rapport à l'émetteur (connexion interrompue sur la figure ci-dessous), les trous de « p » disparaissent progressivement par recombinaison avec les électrons injectés par l'émetteur. Les charges fixes négatives associées aux atomes dopants de la base repoussent les électrons en provenance de « n ». On assiste ainsi à une déplétion en charges mobiles de la jonction J_{BE} : le courant émetteur-collecteur devient quasi nul.



Remarquons que le transistor npn est souvent assimilé à une association de deux diodes selon le schéma ci-contre : les diodes D_1 et D_2 sont les équivalents des 2 jonctions J_{BE} et J_{BC} .

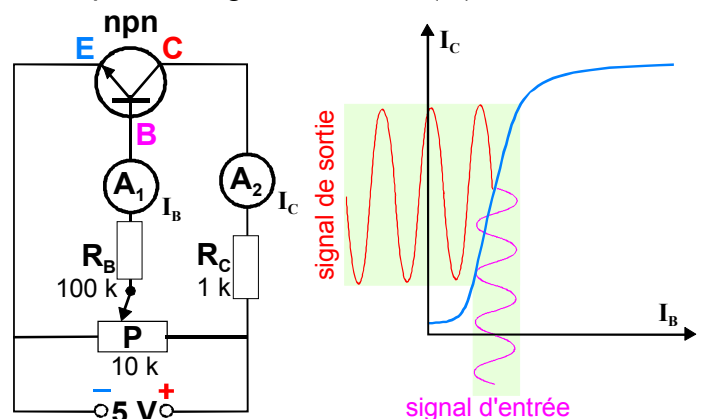
Puisque le potentiel de B est supérieur à celui de E, la diode D_1 est polarisée de façon à ce que le courant passe (polarisation en mode direct). La diode D_2 par contre devrait bloquer le passage du courant (polarisation en sens inverse du passage du courant). Le courant passe seulement parce que l'épaisseur de la base est très faible.



Conclusion : le transistor permet de moduler un courant collecteur-émetteur assez intense à l'aide d'un courant base-émetteur beaucoup plus faible.

L'amplification réalisée par le transistor est illustré par le diagramme $I_C = f(I_B)$ dressé avec le circuit représenté ci-contre. Les 2 ampèremètres A_1 et A_2 permettent de mesurer les intensités du courant électrique passant par la base (I_B) et par le collecteur (I_C).

Dans le domaine A-B de la courbe, le courant I_C est proportionnel au courant I_B , ce qui signifie que l'amplification est linéaire. Pour l'amplification d'un signal analogique (p.ex. musique), il importe de restreindre l'amplification à la partie linéaire de la courbe caractéristique du circuit, faute de quoi l'amplification s'accompagne de distorsions.

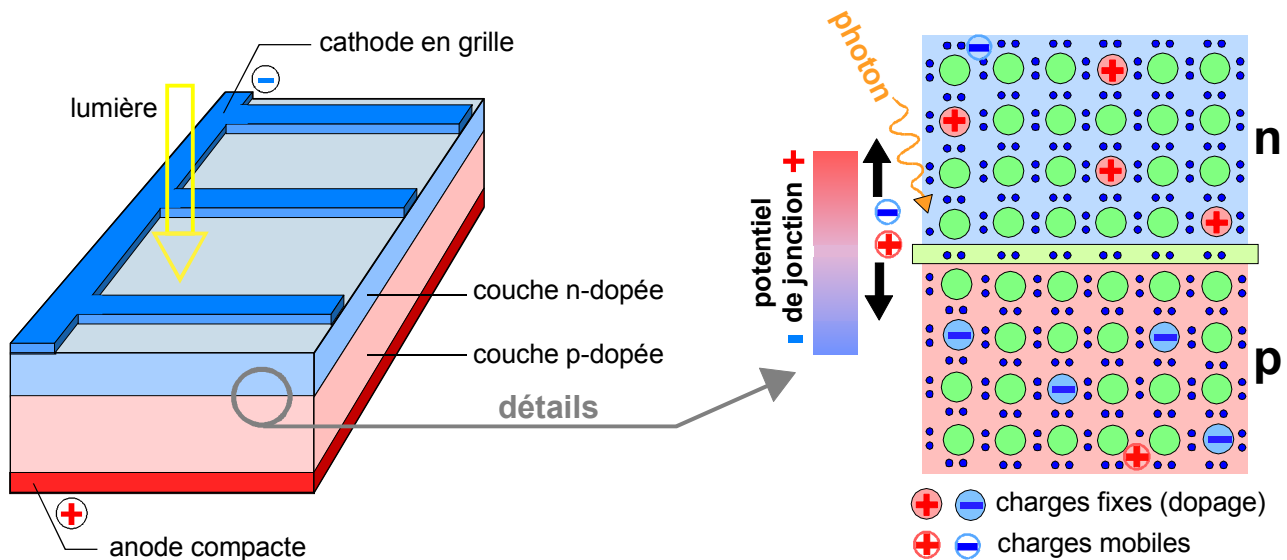


8) la cellule photovoltaïque (Solarzelle)

La cellule photovoltaïque convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique et sert de nos jours sur grande échelle pour l'exploitation de l'énergie solaire.

La cellule photovoltaïque est constituée d'une mince plaque de silicium d'environ 0,3 mm d'épaisseur, dopée « p » sur sa face inférieure et « n » sur sa face supérieure exposée à la lumière.

Au niveau de la jonction entre les 2 couches, les électrons mobiles de la couche « n » se combinent aux trous de la couche « p ». La déplétion en charges mobiles crée un potentiel de jonction dû aux charges fixes localisés sur les atomes dopants (voir figure ci-dessous).



Lorsqu'au niveau de la jonction un photon casse une liaison Si-Si, l'apport d'énergie fait avancer un électron depuis la bande de valence vers la bande de conduction, créant ainsi un électron mobile et un trou mobile. Le potentiel de jonction déplace l'électron mobile vers la couche « n » et le trou vers la couche « p ». Une cathode en forme de grille capte les électrons mobiles sur la face supérieure de la couche « n ». Les trous migrent vers une anode compacte disposée sur la face inférieure de la couche « p ».

La différence de potentiel entre la cathode et l'anode, plutôt indépendante de l'intensité de l'éclairage, vaut 0,56 V pour les cellules à base de silicium. L'intensité du courant électrique débité par la cellule dépend fortement de l'éclairage et vaut (pour une cellule courante) environ 200 A/m^2 de surface exposée à la verticale à la lumière solaire. Compte tenu du fait que la puissance maximale de la radiation solaire correspond à 1000 W/m^2 , un calcul simpliste montre que le rendement de la transformation ne dépasse guère 10 %.