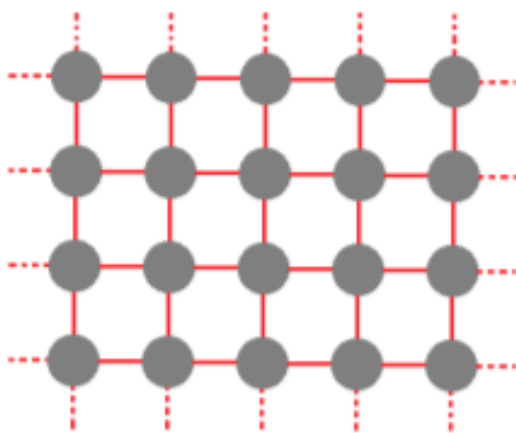


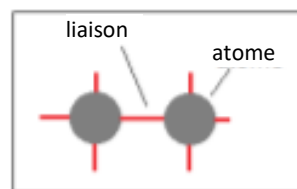
Matériaux conducteurs, semi-conducteurs et isolants

Le caractère conducteur ou isolant prend sa source dans la structure même des atomes : chaque élément du tableau périodique possède un certain nombre d'électrons qui sont agencés autour d'un noyau. C'est cet agencement sous la forme de couches d'électrons, différent selon les éléments, qui est responsable de la conductivité électrique. Les électrons d'un atome peuvent avoir plusieurs rôles au sein d'une structure d'atomes :

- électrons de cœur : ceux-ci sont proches du noyau et n'interagissent pas vraiment avec les autres atomes ;
- électrons de valence : ceux-ci sont sur les couches externes de l'atome et permettent de créer des liaisons interatomiques et ainsi de former le réseau régulier d'atomes qui forme le matériau ;



Le réseau d'atomes, un assemblage régulier d'atomes liés par covalence (électrons de valence)



- électrons de conduction : ceux-ci sont responsables de la circulation du courant électrique.

Pour comprendre la différence entre semi-conducteurs et isolants, il faut étudier comment des électrons peuvent transiter entre les bandes de valence et de conduction. Il est possible de dé-confiner un électron en lui fournissant assez d'énergie, ce qui lui permet de vaincre l'attraction atomique et de quitter l'atome. Un bon moyen pour cela est d'augmenter la température du solide, ce qui augmente l'énergie cinétique des électrons. Dit autrement, dé-confiner un électron demande juste de lui fournir assez d'énergie pour passer de la bande de valence vers la bande de conduction. L'énergie qu'il faut fournir pour cela, à savoir la différence d'énergie entre bande de valence et de conduction, est appelée le **gap d'énergie**. On peut le voir grossièrement comme une énergie d'ionisation pour un électron dans un solide.

La différence entre semi-conducteurs et isolants tient dans le gap d'énergie.

- Pour les isolants, le gap d'énergie est important : il faut fournir une grande quantité d'énergie énorme pour dé-confiner un électron. À des températures normales, la totalité des électrons sont des électrons liés aux atomes et le solide ne contient aucun porteur de charges. À de plus hautes températures, il est cependant possible de créer quelques électrons libres, mais rien de bien folichon.
- Pour les semi-conducteurs, il faut une faible énergie pour dé-confiner un électron. Une petite augmentation de température suffit pour faire passer des électrons de la

bande de valence vers la bande de conduction. Dit autrement, une augmentation de température assez faible permet de créer suffisamment d'électrons libres pour conduire le courant.

- Pour les métaux, il n'y a pas besoin de fournir de l'énergie pour dé-confiner les électrons. Le métal contient naturellement des électrons libres, même à de faibles températures. Il conduit donc naturellement le courant. Les métaux sont naturellement ionisés, et on peut les voir comme un cristal ionisé qui baigne dans un fluide d'électrons libres. La bande de valence et de conduction se chevauchent.

On peut schématiser l'ensemble sous la forme de couches. Sur le schéma suivant, on a représenté les couches d'électrons de valence et d'électrons de conduction :

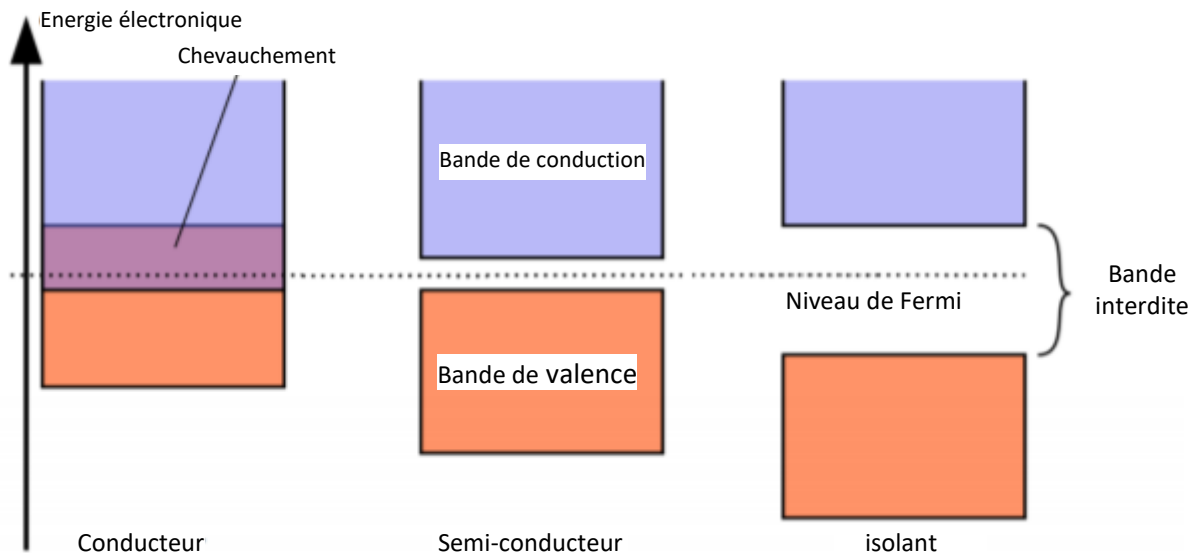


Illustration du gap d'énergie entre conducteurs, semi-conducteurs et isolants.

On voit que dans un métal, certains électrons sont à la fois dans la bande de valence et dans la bande de conduction. Cela signifie qu'un métal peut conduire le courant sans autre forme de traitement physico-chimique. Dans un isolant, par contre, les deux bandes sont séparées par un espace appelé bande interdite : cela signifie que les électrons ne peuvent pas s'y trouver. Dans le cas des isolants, les électrons externes sont tous dans la bande de valence et aucun ne se trouve dans la bande de conduction : ces matériaux ne peuvent donc pas conduire l'électricité. Enfin, dans le cas des semi-conducteurs, au milieu, il existe une bande interdite aussi, mais cette dernière est très fine. Il suffit d'une petite énergie pour que les électrons de valence puissent passer dans la bande de conduction et ainsi rendre le semi-conducteur ... conducteur. On parvient à faire ceci en donnant de l'énergie aux électrons, en l'excitant.

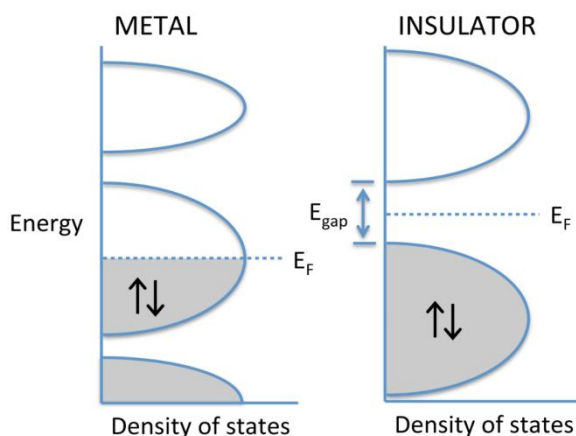
Un semi-conducteur est donc un isolant mais qui peut devenir un conducteur très facilement en excitant les électrons de valence : on fait ceci en chauffant le matériau, ou en l'éclairant, ou en le soumettant à une tension électrique bien définie. Par exemple, si on éclaire une plaque photovoltaïque, la plaque devient conductrice et on crée un courant électrique : c'est l'effet photoélectrique.

Les semi-conducteurs sont des solides dont la résistance varie selon la température ou d'autres paramètres physiques. Ce comportement s'explique par le fait que les électrons des atomes deviennent des électrons libres si on leur donne une énergie

suffisante. Les électrons arrachés aux atomes deviennent des porteurs de charge, qui peuvent alors conduire le courant. Le courant dans les semi-conducteurs est dominé par les électrons libres créés par "ionisation" du solide, ce qui fait que l'étude de cette "ionisation" est importante.

La **théorie des bandes** est une théorie physique qui décrit le fonctionnement des semi-conducteurs, mais aussi des conducteurs et des isolants. Nous allons la présenter sous une forme vulgarisée et particulièrement simplifiée. Pour résumer simplement, cette théorie dit que les électrons dans un solide peuvent être dans deux états : soit ils sont fortement liés aux atomes, soit ce sont des électrons libres. Si les électrons libres peuvent servir de porteurs de charges, ce n'est pas le cas des électrons liés. Là où les électrons libres peuvent parcourir la totalité du solide, les électrons liés confinés dans les atomes, d'où ils ne peuvent pas sortir. Les électrons liés appartiennent aux atomes (ils orbitent autour du noyau atomique) et participent aux liaisons chimiques entre atomes.

La différence entre les deux tient dans leur énergie : l'attraction atomique enlève un peu d'énergie aux électrons, pour des raisons que nous éludons ici. Les électrons de faible énergie sont liés aux atomes et ne peuvent pas servir de porteurs de charges. À l'inverse, les électrons à forte énergie sont des électrons libres, qui ont quitté l'attraction atomique du fait de leur forte énergie. Dans un solide, l'énergie d'un électron se trouve systématiquement dans deux intervalles possibles : un intervalle de faible énergie et un autre où elle est plus forte. Les électrons liés ont une énergie dans l'intervalle de faible énergie, appelé la **bande de valence**. À l'inverse, l'intervalle d'énergie des électrons libres est appelé la **bande de conduction**. Entre les deux, on peut trouver un intervalle d'énergie dans lequel aucun électron ne peut se trouver : la **bande interdite**.



Différence entre conducteurs et isolants en fonction de l'énergie de Fermi et des bandes de Valence/conduction.

On peut déjà comprendre pourquoi certains matériaux sont naturellement conducteurs ou non. Au zéro absolu, les porteurs de charge vont se répartir dans les bandes de conduction et de valence, selon leur énergie. L'énergie maximale que peut avoir un électron au zéro absolu est appelée l'**énergie de Fermi**. Selon que cette énergie de Fermi se situe dans la bande de conduction ou non, on se trouve face à deux situations différentes.

- Premier cas : l'énergie de Fermi se situe dans la bande de conduction. Des électrons se trouvent alors dans la bande de conduction, même au zéro absolu. Ce qui veut dire que le matériau contient naturellement des porteurs de charges pouvant conduire le courant et est donc conducteur.

- Deuxième cas : l'énergie de Fermi se situe dans la bande de valence ou interdite. Dans ce cas, tous les électrons seront dans la bande de valence. Tous les électrons du matériau sont donc liés et aucun porteur de charge n'est disponible. Le matériau est alors isolant ou semi-conducteur.

Les semi-conducteurs intrinsèques et extrinsèques :

Les semi-conducteurs se différencient selon leur densité de trous et d'électron, qui peut varier selon divers paramètres. La température est déterminante pour certains semi-conducteurs, alors qu'elle l'est moins pour d'autres. Cela permet de classer les semi-conducteurs en deux types :

- les semi-conducteurs intrinsèques ;
- les semi-conducteurs extrinsèques.

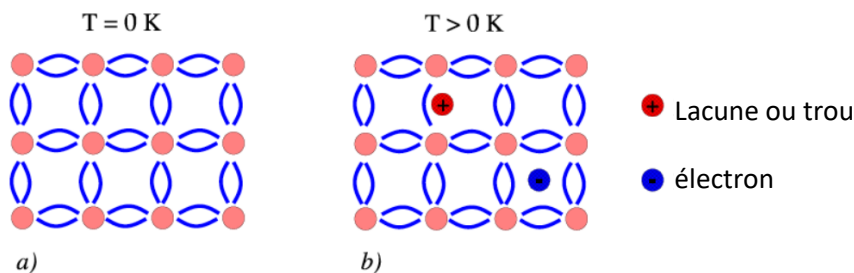
Les semi-conducteurs intrinsèques

Les **semi-conducteurs intrinsèques** sont des semi-conducteurs pour lesquels la résistance dépend de la température. Ils sont totalement isolants au zéro absolu, mais leur résistance diminue quand on les chauffe. Dans ces semi-conducteurs, la formation des électrons-libres est liée exclusivement à la température. La formation des paires électrons-trous a lieu quand un électron reçoit suffisamment d'énergie thermique pour s'arracher de son atome. Il va de soit que plus la température est forte, plus cela a de chances d'arriver : le nombre d'électrons libres augmente donc avec la température, ce qui se répercute sur la conductivité. On peut remarquer que, la formation de chaque électron libre laisse un trou dans le solide. Dit autrement, si on note n la concentration en électrons libres et p la concentration en trous, on a :

$$n = p = n_i$$

On peut aussi reformuler l'équation précédente de la manière suivante, qui a l'avantage d'être aussi valable pour les semi-conducteurs extrinsèques.

$$n_i^2 = n \times p$$



Semi-conducteur intrinsèque.

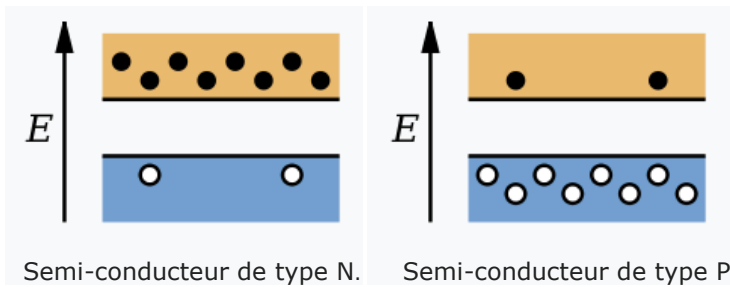
L'illustration montre que le nombre de trous et d'électrons y est le même. On voit aussi que les porteurs de charges n'apparaissent qu'au-delà d'une température suffisante.

Les physiciens ont démontré une formule qui permet de calculer directement la valeur de n (et donc de p). Dans celle-ci, on utilise les notations suivantes : A une constante qui dépend du matériau étudié, T pour la température, K pour la constante de Boltzmann, E_g la largeur de la bande interdite (la bande de Fermi). Ce dernier paramètre est l'énergie minimum qu'il faut pour générer une paire électron-trou. C'est aussi l'énergie nécessaire pour briser une liaison covalente entre deux atomes, ce qui permet de transformer un électron lié en électron libre.

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

Les semi-conducteurs extrinsèques

Mais à côté des semi-conducteurs intrinsèques, on trouve les **semi-conducteurs extrinsèques**, dont la conduction ne dépend pas que de la température. Leur caractéristique principale est qu'ils ont des porteurs de charges disponibles, même au zéro absolu. On distingue les semi-conducteurs qui contiennent des trous au zéro absolu de ceux qui ont des électrons libres. Les premiers sont appelés **semi-conducteurs P** et les seconds des **semi-conducteurs N**. Les schémas ci-dessous illustrent cette distinction. Les trous sont en blanc, alors que les électrons libres sont en noir.



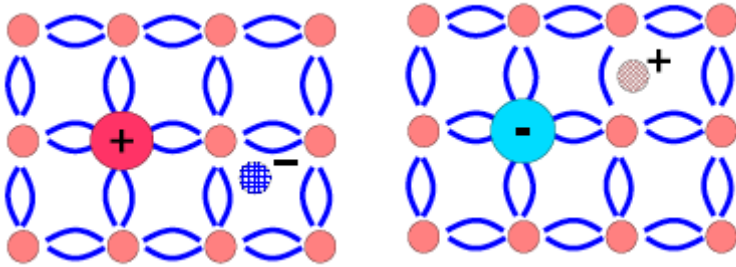
Il faut noter que des paires électrons-trous peuvent se former sous l'effet de la température, dans un semi-conducteur extrinsèque. Le semi-conducteur extrinsèque fonctionne donc comme un semi-conducteur intrinsèque, la différence étant dans le nombre de porteur de charge total. Là où le semi-conducteur intrinsèque n'a aucun porteur de charges au zéro absolu, le semi-conducteur extrinsèque part avec un peu d'avance. Cela fait que les semi-conducteurs extrinsèques ont naturellement une meilleure conductivité, vu qu'ils possèdent plus de porteurs de charges. Le nombre total de porteurs de charges dépend de la température, mais on peut cependant faire une remarque importante. Pour les deux types de semi-conducteurs, il se forme autant d'électrons libres que de trous sous l'effet de la température. Mais les semi-conducteurs extrinsèques possèdent un déséquilibre de charges au zéro absolu : ils vont avoir plus d'électrons que de trous au zéro absolu, ou l'inverse. Et cet excès n'est pas compensé par la formation de paires électrons-trous : ce déséquilibre est permanent. En clair, à la différence des semi-conducteurs intrinsèques, la quantité de trous n'est pas égale à la quantité d'électrons libres pour les semi-conducteurs extrinsèques. La relation entre nombre de porteurs de charges, valable pour les deux types de semi-conducteurs, est la suivante :

$$n \times p = n_i^2$$

Le dopage de semi-conducteurs

Les semi-conducteurs extrinsèques sont fabriqués en ajoutant des impuretés à un semi-conducteur intrinsèque. Les impuretés ajoutent des trous ou des électrons libres au matériau de base, initialement neutre électriquement, ce qui en fait un semi-conducteur extrinsèque. Ce processus d'ajout d'impuretés s'appelle le dopage, d'où le nom de **semi-conducteur dopé** qui est parfois donné aux semi-conducteurs extrinsèques. Lors du dopage, les impuretés vont se lier chimiquement aux atomes du semi-conducteur. Cependant, il restera un électron ou un trou en trop suite à ce processus, qui vont servir de porteurs de charges.

- Pour les semi-conducteurs de type N, les impuretés sont plus riches en électrons que les atomes du solide. Il y a alors un électron en trop après dopage, qui devient un électron libre.
- Pour les semi-conducteurs de type P, les impuretés sont plus pauvres en électrons que les atomes du solide. Il manque un électron suite au dopage, ce qui donne un trou.

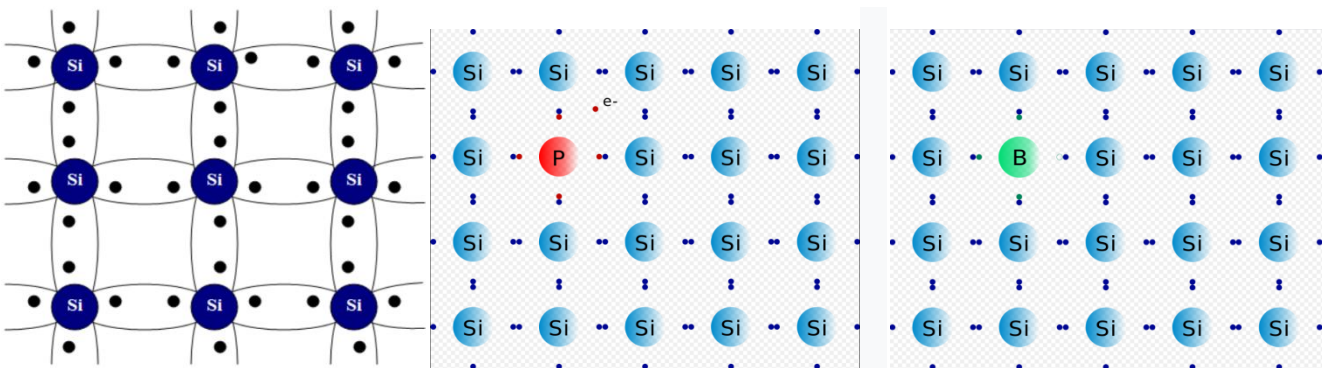


Dopage de type N.

Dopage de type P.

D'ordinaire, le dopage part d'un morceau de silicium et y ajoute des impuretés en Bore ou en Phosphore. Le silicium peut se lier chimiquement avec quatre atomes via une liaison covalente. Avec celle-ci, l'atome de Silicium partage un électron avec un atome voisin : l'électron appartient alors aux deux atomes. Vu que le silicium peut participer à quatre liaisons covalentes, il peut fournir quatre électrons en tout. Les impuretés vont aussi former des liaisons covalentes avec le silicium, sauf qu'elles peuvent partager 3 ou 5 électrons dans des liaisons covalentes.

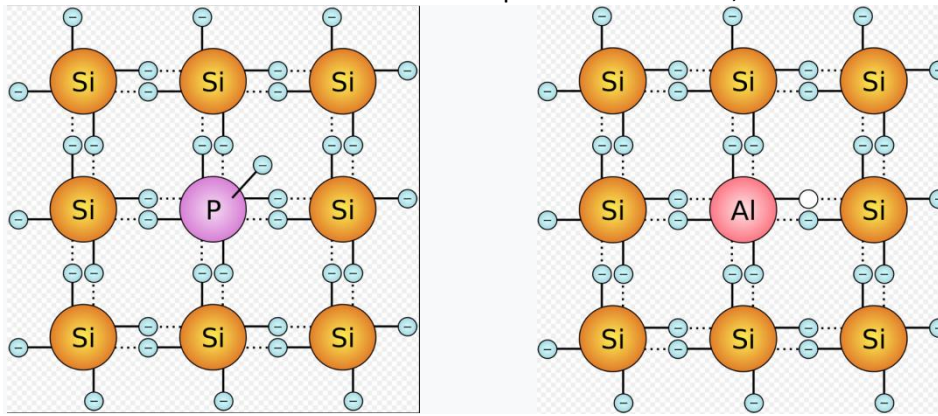
- Par exemple, le Phosphore partage 5 électrons, et peut former 5 liaisons covalentes. Un atome de Phosphore prendra la place d'un atome de Silicium dans le solide et ne tissera que quatre liaisons covalentes (il ne peut pas en faire plus pour des raisons assez compliquées). Quatre électrons seront donc utilisés dans ces liaisons, ce qui laisse un électron en trop, qui quitte l'atome et devient un électron libre. Le dopage obtenu est dit de type N, à savoir qu'il ajoute des électrons libres dans le Silicium.
- Le bore est dans la situation inverse, à savoir qu'il peut partager 3 électrons, ce qui donne trois liaisons covalentes. Il tisse bien quatre liaisons covalentes, le Silicium lui fournissant les électrons manquant, mais il manque quand même un électron. Ce manque n'est autre qu'un trou. Le dopage obtenu est dit de type P, à savoir qu'il ajoute des trous dans le Silicium.



Silicium normal, sans impuretés

Silicium dopé avec du Phosphore - dopage de type N.

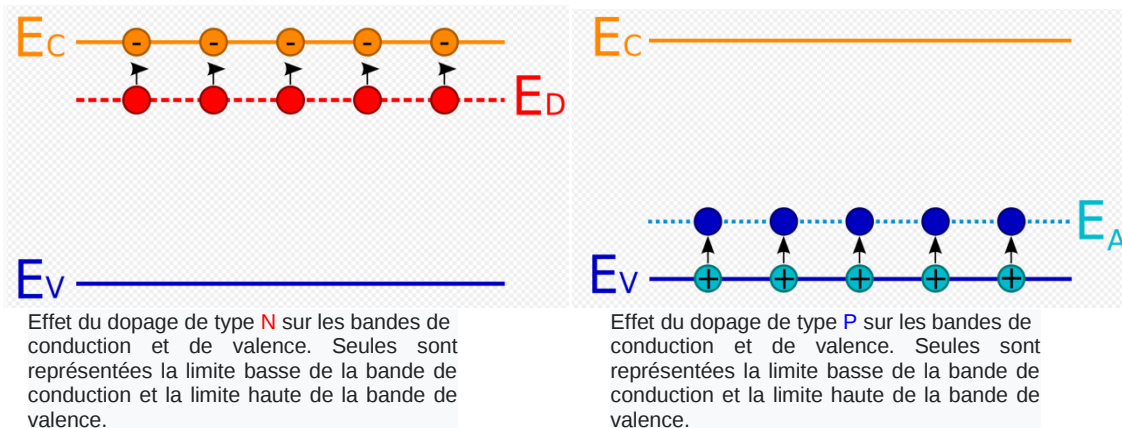
Silicium dopé avec du Bore - dopage de type P.



Silicium dopé avec du Phosphore - dopage de type N. Silicium dopé avec du Bore - dopage de type P.

Effet du dopage sur les bandes de conduction et de valence

Le dopage a un effet sur les bandes de valence et de conduction, en augmentant ou diminuant leurs extrémités. Le dopage de type N abaisse la bande de conduction, alors celui de type P remonte la bande de valence. Dans les deux cas, la bande interdite se réduit, ce qui facilite le dé-confinement des électrons.



NOTA :

Rappel sur les Semi-conducteurs, conducteurs et Isolants

Si l'on classe les éléments chimiques solides à la température ambiante en fonction de leurs résistivités, on constate qu'il se place dans leurs grande majorités en deux groupes.

Isolant

$$[10^{11} \leq \rho \leq 10^{19}] \Omega \text{ Cm}$$

Conducteur

$$[1.5 \cdot 10^{-6} \leq \rho \leq 10^{-4}] \Omega \text{ Cm}$$

Semi-conducteur Quelques éléments ont une résistivité intermédiaires. Pour cette raison ils ont le nom de semi-conducteur

$$[10^{-3} \leq \rho \leq 10^6] \Omega \text{ Cm}$$