

Du transistor à l'écriture des fonctions logiques

I. L'invention du transistor

Les premiers ordinateurs datent des années 1950 et utilisaient des **tubes à vide électroniques**.

La deuxième génération (1956-1963) est basée sur l'**invention du transistor en 1947**.

La troisième génération (1963-1971) est celle des ordinateurs à **circuit intégré**. Les plus simples sont des **portes logiques** (ET, OU et NOT), les plus complexes sont des **microprocesseurs** qui exécutent les instructions et traitent les données des programmes, et les plus denses sont les **mémoires**.

La quatrième génération constitue plus une évolution qu'une révolution : les circuits intégrés sont de plus en plus miniaturisés. En 1975, Moore énonça la loi selon laquelle le nombre de transistors des microprocesseurs sur une puce de silicium double tous les deux ans. Vérifier la cohérence à l'aide du graphe fourni à la fin du document entre les années 1980 et 2000. Cette loi devrait rester valable jusqu'en 2015 avant que l'on ne soit confronté aux effets quantiques que rencontre la miniaturisation. Aujourd'hui plus d'une centaine de millions de transistors (plusieurs dizaines de millions de portes logiques) représente un chiffre normal pour un microprocesseur.

II. Les conducteurs et les semi-conducteurs

1. La conduction

Rappel : Un atome est constitué d'un noyau chargé positivement (protons : charge $+e$ et neutrons de charge nulle forment les nucléons et le nombre de nucléons est noté A) et d'un nuage d'électrons (charge : $-e$) ; la neutralité de l'atome est assurée par un nombre identique de protons (Z =numéro atomique) et d'électrons. Les électrons se déplacent autour du noyau d'un atome un peu comme des satellites autour d'une planète (cette image est en fait une simplification car la mécanique qui fonctionne à cette échelle n'est pas la mécanique classique mais la mécanique quantique, l'un des tenants de cette mécanique étant le fait que les échanges d'énergie se font par paquets d'énergie ou quanta). La stabilité de leur orbite résulte d'un compromis entre la force électrostatique exercée par le noyau chargé positivement (en lieu et place de la force gravitationnelle pour les planètes) et la force centrifuge due à la rotation. En fait, contrairement aux satellites, seules certaines orbites sont possibles pour les électrons ; à chacune de ces orbites correspond un niveau d'énergie, et seuls certains niveaux d'énergie sont possibles ; on dit que l'énergie de l'atome est **quantifiée**. Il faut donc fournir de l'énergie pour qu'un électron puisse accéder à un niveau d'énergie supérieur et s'éloigner du noyau, mais pour cela l'atome doit absorber exactement la bonne quantité d'énergie sinon cette transition est impossible. Inversement un électron peut aller d'un niveau d'énergie haut (état excité) vers un niveau d'énergie inférieur (état intermédiaire ou état fondamental), la différence d'énergie entre les niveaux est libérée sous la forme d'un paquet d'énergie ou photon correspondant à un rayonnement.

Les électrons de la couche externe d'un atome sont des électrons dits de valence qui sont mis en commun avec les électrons de valence d'autres atomes pour former des liaisons rigides dites **liaisons de covalence**. D'après la règle de l'octet, un atome gagne en stabilité lorsqu'il s'entoure d'un octet d'électrons ; c'est en se liant à d'autres atomes et en mettant en commun leurs électrons que les atomes gagnent ainsi en stabilité.

Dans la matière, on peut distinguer la **bande de valence** qui comprend les niveaux d'énergie très proches des électrons de valence, et la **bande de conduction** qui n'est pas toujours remplie et qui comprend des niveaux d'énergie où l'électron peut se libérer du noyau et devenir ainsi un **électron libre**.

Dans le cas des **conducteurs** (métaux), la bande de valence et la bande de conduction se chevauchent ; il est donc très facile pour les électrons de valence de passer dans la bande de conduction, il suffit pour cela d'imposer un champ électrique avec un générateur et on crée un courant électrique dans le matériau ; le courant électrique résulte d'un déplacement d'électrons libres ; on parle de **conduction par électrons libres**.

Dans le cas des **isolants**, l'écart d'énergie entre la bande valence et la bande de conduction, appelé **bande interdite** (de l'ordre de plusieurs électronvolts), est tellement important que les électrons de valence ne peuvent pas accéder à la bande de conduction.

Les **semi-conducteurs intrinsèques** (corps purs simples : silicium, germanium ou corps purs composés : carbure de silicium, sulfure de plomb) ont une bande interdite relativement étroite (de l'ordre de l'électronvolt) et un

gain d'énergie fourni par l'agitation thermique permet le passage d'électrons de la bande de valence vers la bande de conduction. Ainsi les semi-conducteurs peuvent devenir conducteur si la température s'élève. Voir schéma.

2. Modification de la conduction : les semi-conducteurs extrinsèques

Les **semi-conducteurs extrinsèques** sont des semi-conducteurs dans lesquels ont été introduites des impuretés. Dans les semi-conducteurs intrinsèques au silicium Si ou au germanium Ge (situés tous les deux dans la même colonne que le carbone $^{12}_6C$ (K^2L^4) dans la classification périodique), les atomes possèdent 4 électrons de valence qu'ils peuvent mettre en commun avec 4 autres atomes pour former des édifices cristallins.

Dans les **semi-conducteurs extrinsèques de type N**, on introduit des atomes d'élément chimique différent tels que l'antimoine (Sb), le phosphore (P) ou l'arsenic (As) qui eux possèdent 5 électrons de valence (ils sont situés dans la même colonne de la classification périodique). En remplaçant un atome de germanium par un atome d'antimoine dans un cristal de germanium, on aboutit ainsi à une configuration peu stable où un électron de l'atome d'antimoine, non utilisé dans une liaison de covalence, a tendance à passer facilement dans la bande de conduction ; l'ion positif d'antimoine formé par le départ de l'électron devient ainsi très stable avec ses 8 électrons autour de lui. On dit que dans les semi-conducteurs extrinsèques de type N, **les électrons sont les porteurs majoritaires**. Voir schéma.

Dans les **semi-conducteurs extrinsèques de type P**, on introduit des atomes de bore (B), de gallium (Ga), d'indium (In) ou d'aluminium (Al) qui eux possèdent 3 électrons sur leur couche de valence (ils sont situés dans la même colonne de la classification périodique). En introduisant un atome de bore dans un cristal de germanium, on aboutit à une configuration peu stable où l'atome de bore peut capter un électron voisin conduisant à la formation d'un ion négatif stable de bore et à la formation d'un trou pouvant participer à la conduction. Le trou peut en effet capter un électron d'un atome voisin en y créant un nouveau trou et ainsi de suite ; on parle de **conduction par trous**. On dit que dans les semi-conducteurs de type P, **les trous sont les porteurs majoritaires**. Voir schéma.

III. La diode et le transistor

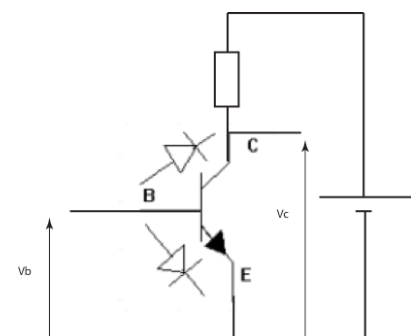
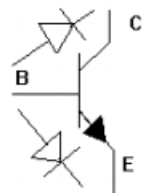
1. La diode

Une diode à jonction est constituée d'un semi-conducteur de type P auquel est accolé un semi-conducteur de type N. Lorsqu'on les accole, des électrons libres de la zone N vont venir combler des trous de la zone P. Cela aboutit, uniquement au niveau de la jonction, à une zone N contenant des ions positifs et à une zone P contenant des ions négatifs. Cette zone de charge d'espace ressemble à du silicium non dopé.

Si la diode est polarisée dans le sens direct, l'apparition de cette zone s'oppose au passage du courant de P vers N ; la diode est bloquée. Il faut donc imposer une tension supérieure à une certaine tension de seuil pour que la diode devienne **passante de P vers N**. Si la diode est polarisée dans le sens inverse, l'action du générateur renforce la zone de charge d'espace et la diode n'est pas conductrice. Voir schéma.

2. Le transistor

Un transistor est formé de deux jonctions NP ou diodes montées en sens inverse. Dans le cas du transistor NPN, la base est reliée au matériau P, le collecteur C ainsi que l'émetteur E sont reliés à deux matériaux N. Si le courant de base arrivant en B est faible, le transistor se comporte comme un interrupteur ouvert entre C et E, sinon il se comporte comme un interrupteur fermé entre C et E. Le transistor se comporte ainsi comme un interrupteur électrique entre C et E, ou commutateur électronique, qui est **commandé** par la base. Dans le montage ci-après : Si V_b est inférieure à une tension de seuil, le transistor se comporte comme un interrupteur ouvert entre C et E et, V_c est alors égale à la tension d'alimentation V_g . Par contre si V_b est supérieure à une tension de seuil, le



transistor se comporte comme un interrupteur fermé entre C et E, et V_c est égale à 0 V.

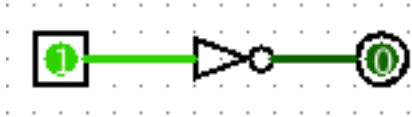
Le transistor se comporte ainsi comme une **porte NON** dans ce montage et il donne l'opposé du bit à l'entrée.

Basse tension V_b (bit 0) => Haute tension $V_c=V_g$ (bit 1) ; Haute tension V_b (bit1) => Basse tension $V_c=0$ V (bit 0)

IV. Les portes logiques et les fonctions booléennes avec le logiciel Logisim

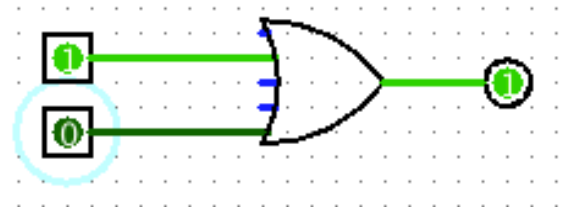
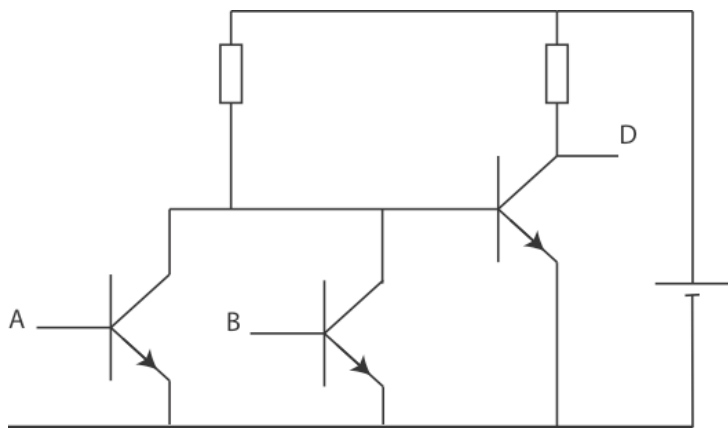
1. La porte NON (!)

Vue précédemment, elle est représentée symboliquement par :



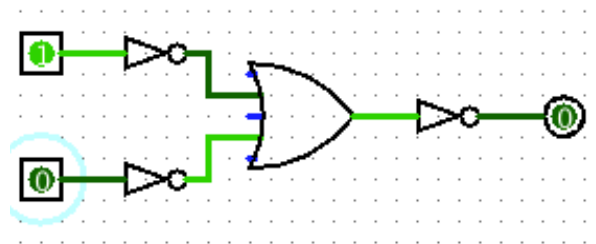
2. La porte OU (| |)

Montrer que le circuit électronique ci-dessous permet de réaliser la porte logique OU



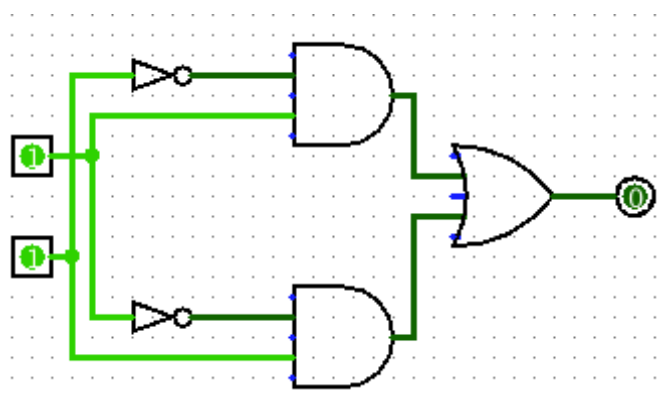
3. La porte ET (&&)

Utiliser le logiciel Logisim, simulateur de circuits logiques distribué gratuitement en Open Source, pour montrer que la porte ET peut s'obtenir par combinaison des portes NON et OU de la façon suivante :



4. La porte OUEx ou XOR (eXclusive OR)

Montrer, en dressant la table de vérité, que la combinaison suivante des portes NON, ET et OU permet de réaliser la fonction OUExclusif soit : $A \text{ XOR } B = (A \text{ ET non } B) \text{ OU } (\text{non } A \text{ ET } B)$



5. Théorèmes

Écrire les tables logiques pour vérifier deux théorèmes de l'algèbre booléenne :

$\neg(p \wedge q) = \neg p \vee \neg q$

$\neg(p \vee q) = \neg p \wedge \neg q$

6. Écriture des fonctions logiques en programmation JavaScript

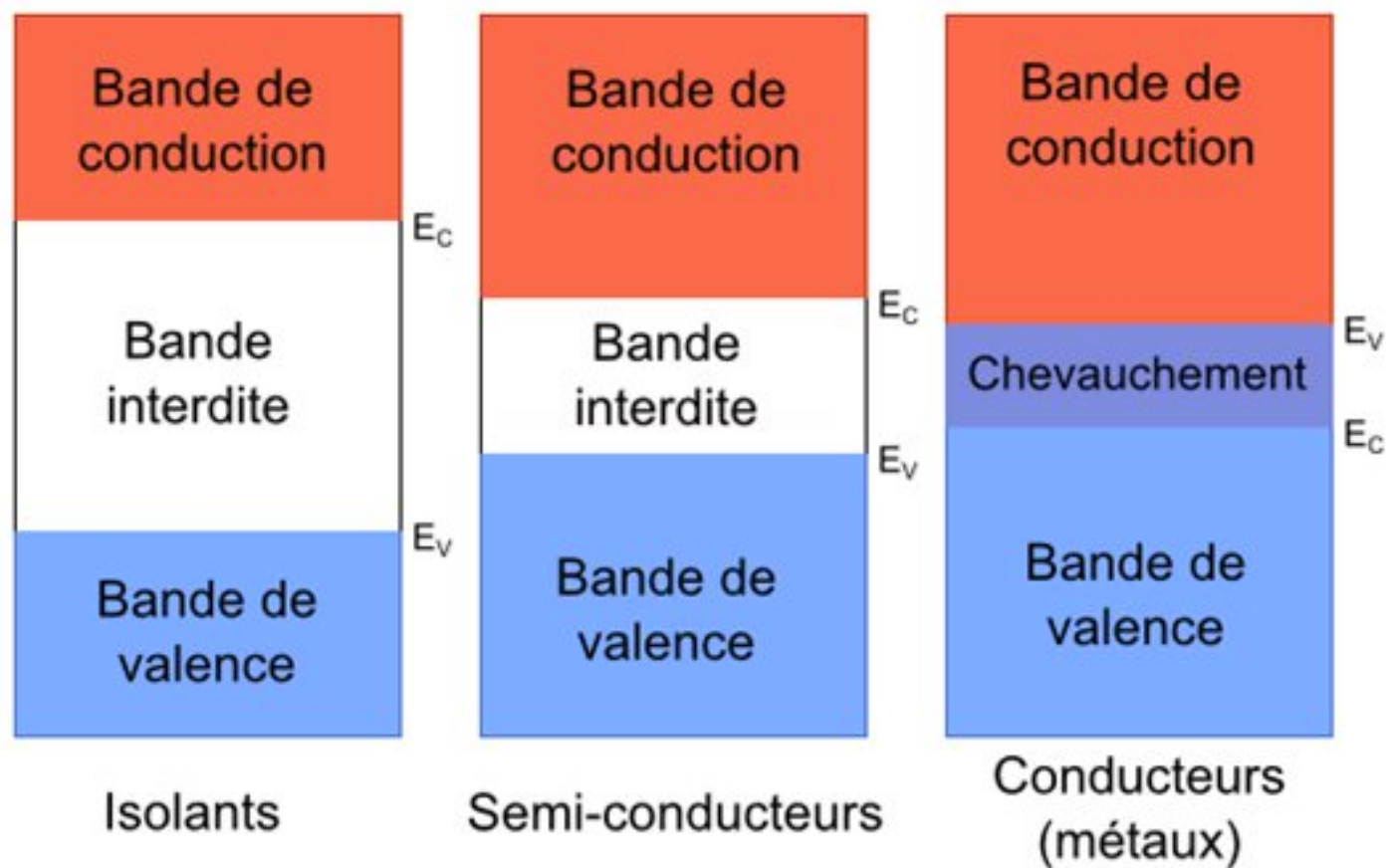
Modifier le code suivant pour réaliser la tâche suivante :

Demander à l'utilisateur son âge et sa taille en cm.

En utilisant le point 4, écrire la condition qui permet d'écrire « sélectionné » si l'âge est supérieur à 18 ou si la taille est inférieure à 180, mais « non sélectionné » si les deux conditions sont remplies en même temps.

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
<meta http-equiv="Content-Type" content="text/html; charset=UTF-8" />
</head>
<body>
<!-- Ecrire un nouveau paragraphe-->
<p>Renseignez votre âge et votre taille et cliquer sur le bouton :</p>
<input id="age"/>Votre âge ? <!-- Pose les questions -->
<br><!-- Passe à la ligne-->
<input id="taille"/>Votre taille en cm ?
<br>
<!--Place un bouton qui déclenche une fonction lorsqu'il est cliqué -->
<button onclick="myFunction()">Envoyez</button>
<!--Un paragraphe vide repéré par son id qui va accueillir la réponse -->
<p id="reponse"></p>
<script><!--Début du script -->
<!--Ecriture de la fonction appelée par le bouton -->
function myFunction() {
<!--Déclaration des variables qui récupèrent les valeurs des input -->
var age = document.getElementById("age").value;
var taille = document.getElementById("taille").value;
var proposition1=age>18;//booléen true ou false
var proposition2=taille<180; //booléen true ou false
<!--La condition à écrire en fonction de proposition1 et proposition2 -->
  if ( ..... ) {
    resultat = "selectionné";
  }
  else {
    resultat = "non selectionné";
  }
<!--Affichage de la réponse à l'endroit du paragraphe id="reponse" -->
  document.getElementById("reponse").innerHTML = resultat;
}
</script>
</body>
</html>
```

N.B: on utilisera la **console** de Firefox en écrivant `console.log(resultat);` juste avant ou après `document.getElementById("reponse").innerHTML = resultat` La barre | s'obtient avec la combinaison la **combinaison** `Alt Gr + 6`

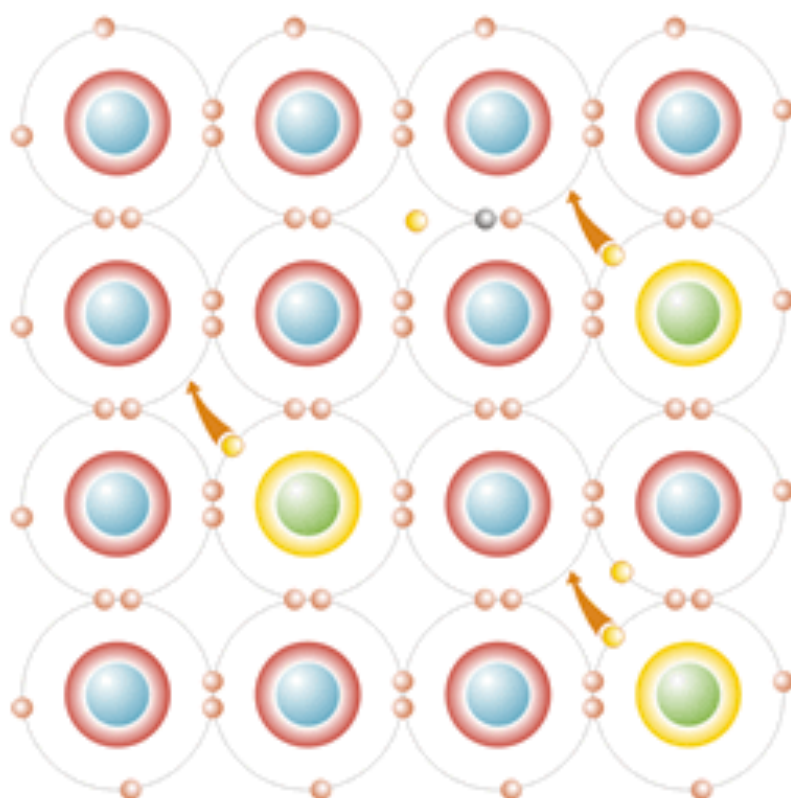


Semi-conducteur de type N



Atome donneur
(phosphore, arsenic, antimoine, ...)

Electron libre

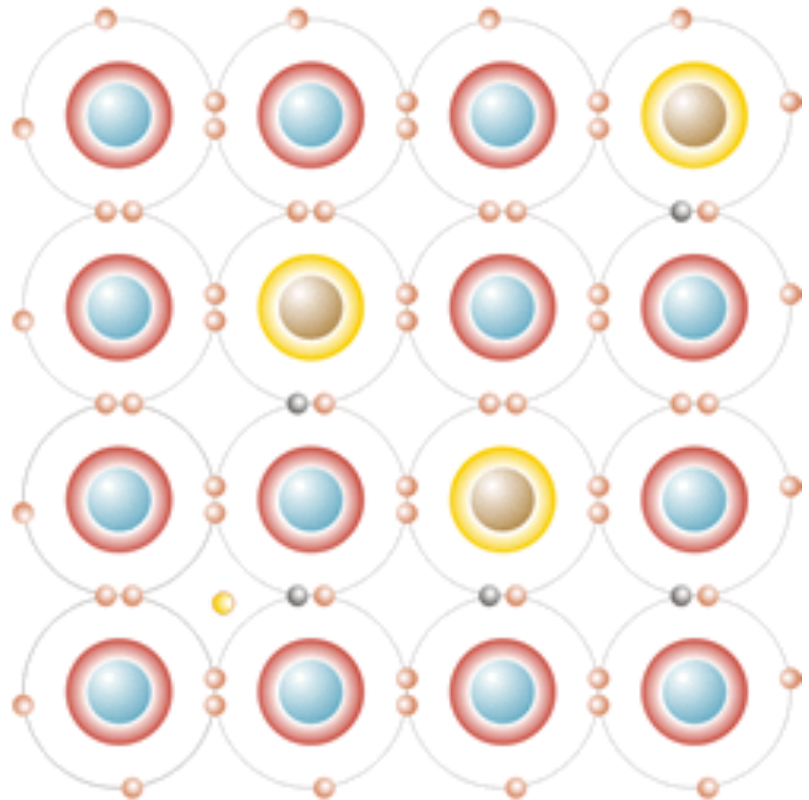


Semi-conducteur de type P



Atome récepteur
(bore, indium, gallium, aluminium, ...)

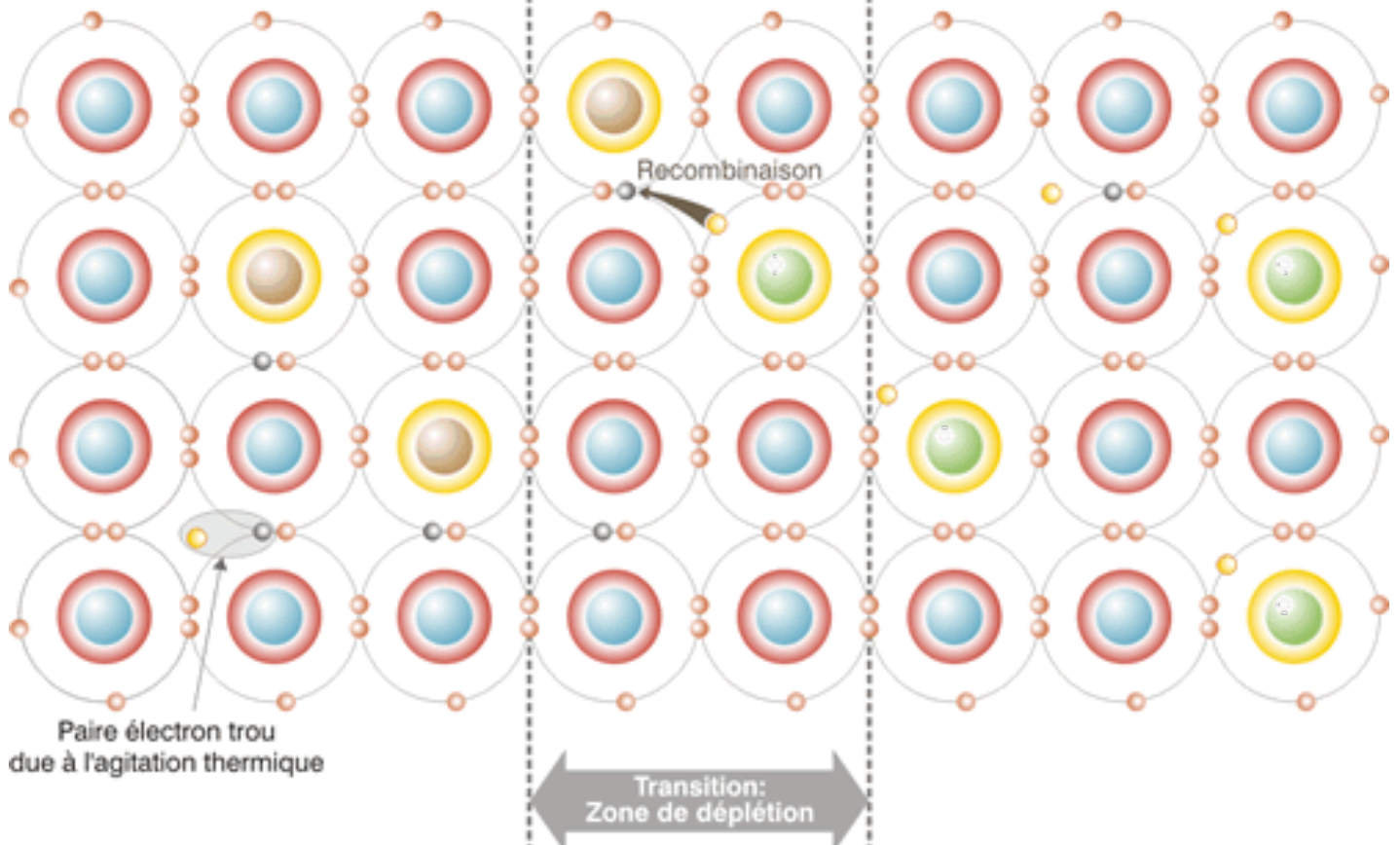
Trou



Jonction PN

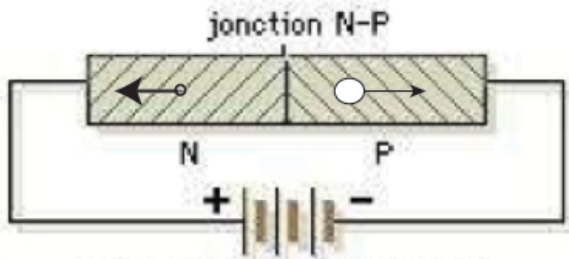
Zone P

Zone N



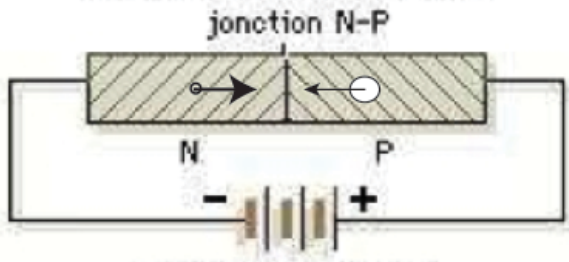
Principe de fonctionnement d'une diode

Une diode utilise une jonction N-P



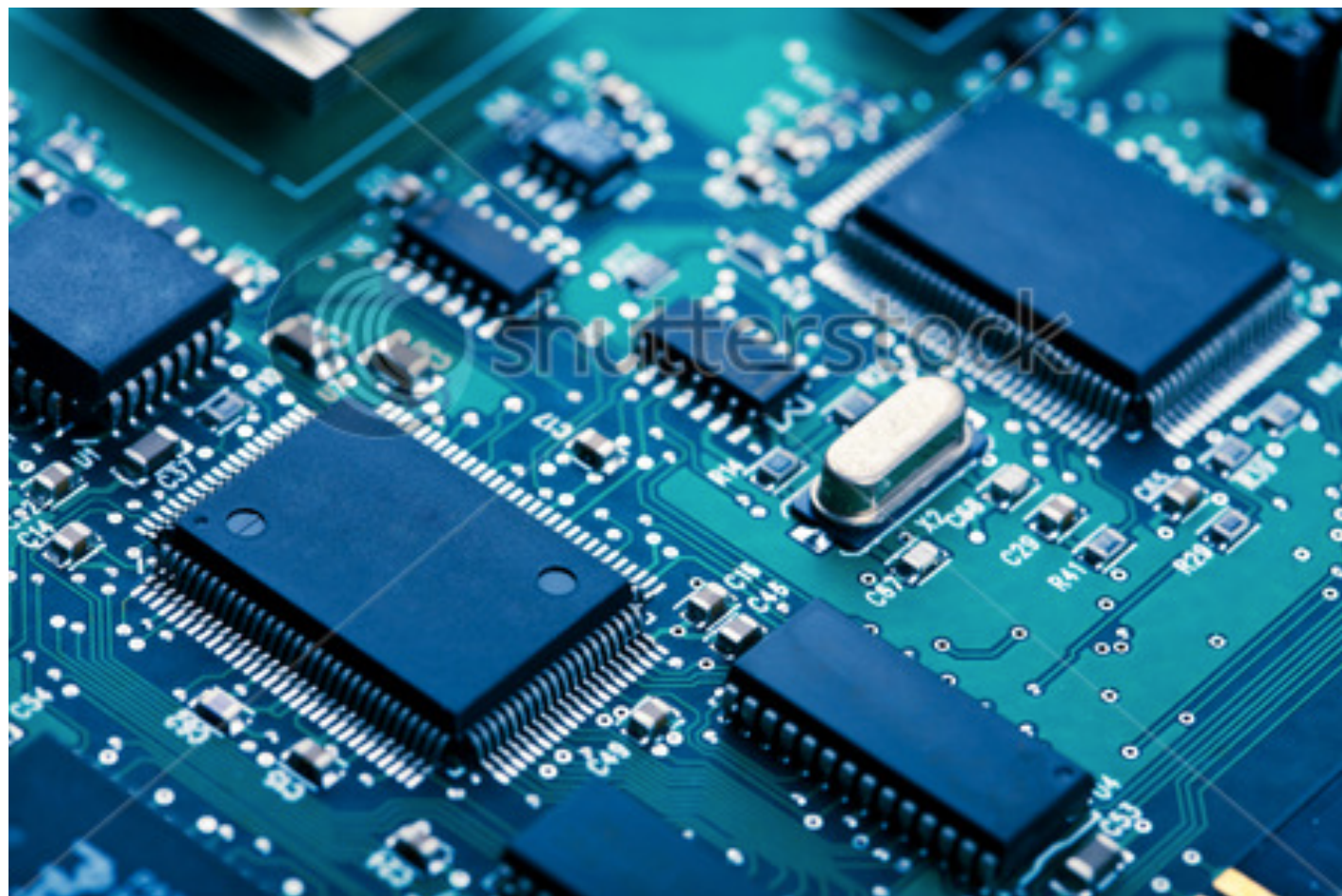
Le courant ne passe pas

Si on applique une tension positive du côté de la région N, les porteurs de charge s'éloignent de la jonction et le passage du courant est bloqué. La bande interdite n'est pas réduite.



Le courant passe

Si on applique une tension positive du côté de la région P, les trous sont repoussés vers la jonction et les électrons du côté N sont attirés vers la jonction, le courant peut circuler. La bande interdite a été réduite.



www.shutterstock.com · 69576301

Photographie d'un processeur

Moore's Law

