

1

INTRODUCTION AUX SEMI-CONDUCTEURS

■ APERÇU DU CHAPITRE

- 1-1 Structure atomique
- 1-2 Semi-conducteurs, conducteurs et isolants
- 1-3 Liens covalents
- 1-4 Conduction des semi-conducteurs
- 1-5 Semi-conducteurs de type *N* et de type *P*
- 1-6 Jonction *PN*
- 1-7 Polarisation de la jonction *PN*
- 1-8 Caractéristique courant-tension de la jonction *PN*
- 1-9 Diode

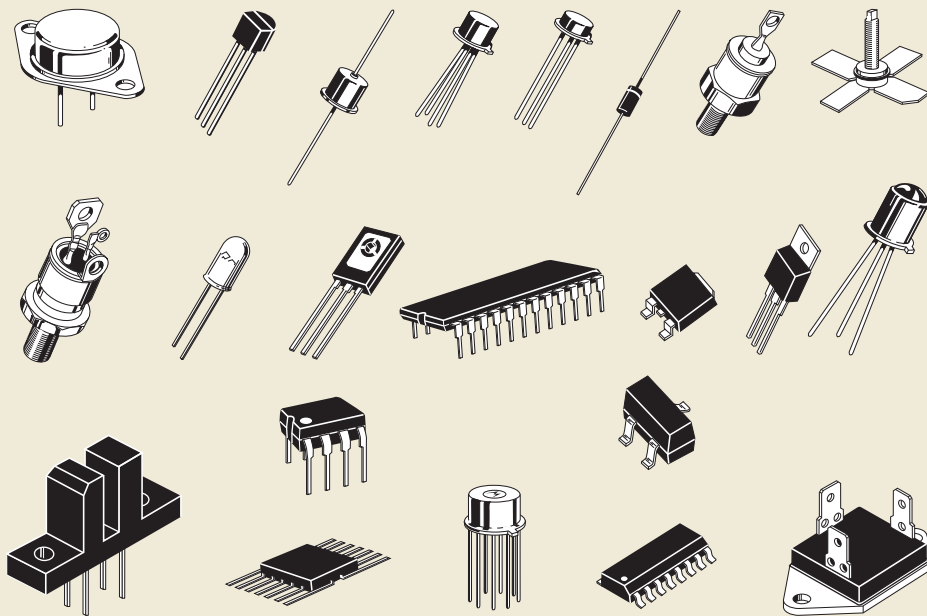
■ OBJECTIFS DU CHAPITRE

- Discuter de la structure de base d'un atome
- Discuter des semi-conducteurs, des conducteurs, des isolants et de leurs distinctions de base
- Discuter des liaisons covalentes du silicium
- Décrire comment le courant se produit dans un semi-conducteur
- Décrire les propriétés des semi-conducteurs de type *N* et de type *P*
- Décrire une jonction *PN* et la façon dont elle est créée
- Discuter de la polarisation d'une jonction *PN*
- Analyser la courbe caractéristique courant-tension (*I-V*) d'une jonction *PN*
- Discuter du fonctionnement de la diode et expliquer les trois modèles de diode

Les composants électroniques tels que les diodes, les transistors et les circuits intégrés sont fabriqués à partir d'un matériau semi-conducteur. Pour comprendre le fonctionnement de ces composants, vous devez posséder une connaissance de base

de la structure des atomes et de l'interaction des particules qui les composent. La jonction *PN*, concept important introduit dans ce chapitre, est formée de deux types différents de matériaux à semi-conducteurs joints ensemble.

La jonction *PN* est fondamentale au fonctionnement des composants comme la diode et certains types de transistors. De plus, la fonction de la jonction *PN* est un facteur essentiel pour que les circuits électroniques puissent opérer adéquatement.



1-1 ■ STRUCTURE ATOMIQUE

Toute matière est composée d'atomes et tout atome est composé d'électrons, de protons et de neutrons. Dans cette section, il sera question de la structure de l'atome, de l'orbite et de la couche d'un électron, des électrons de valence, des ions et de deux matériaux semi-conducteurs: le silicium et le germanium. Le matériau semi-conducteur est important puisque la configuration de certains électrons dans un atome est le facteur clé qui détermine à quel point un matériau donné conduit le courant électrique.

Après l'étude de cette section, vous pourrez

■ **Décrire la structure de base d'un atome**

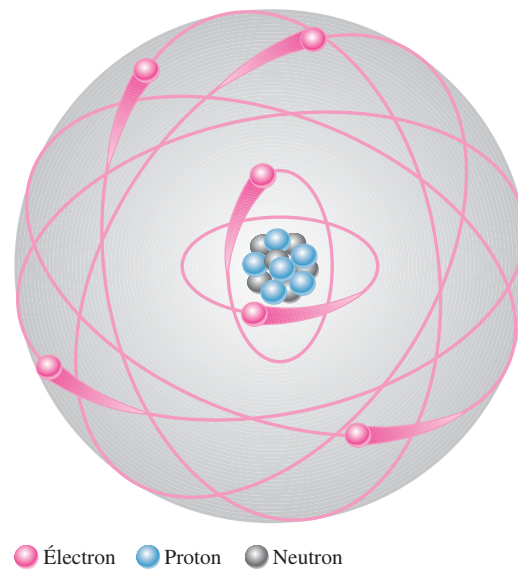
- Définir *noyau, proton, neutron* et *électron*
- Définir le *numéro atomique*
- Définir une *couche*
- Définir un *électron de valence*
- Décrire l'*ionisation*

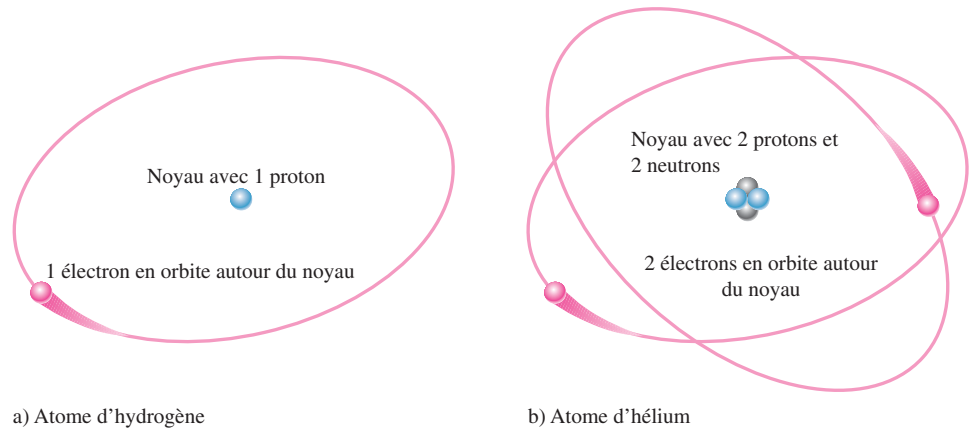
Un **atome** est la plus petite particule d'un élément qui possède les caractéristiques de cet élément. Chacun des 109 éléments connus possède des atomes différents de ceux des autres éléments. Ceci donne à chaque élément une structure atomique unique. Selon la théorie classique de Bohr, les atomes possèdent une organisation de type planétaire avec un noyau au centre et des électrons en orbite autour de lui, comme l'illustre la figure 1-1. Le **noyau** est constitué de particules chargées positivement, qu'on appelle **protons** et de particules non chargées appelées **neutrons**. Les particules élémentaires qui portent la charge négative sont appelées **électrons**.

Chaque type d'atome contient un certain nombre d'électrons et de protons qui le distinguent des atomes de tous les autres éléments. Par exemple, l'atome le plus simple qu'on connaisse est l'hydrogène, constitué d'un proton et d'un électron (figure 1-2 a).

FIGURE 1-1

Le modèle atomique de Bohr illustrant les électrons en orbite autour du noyau. Les «queues» des électrons indiquent qu'ils se déplacent.



**FIGURE 1-2**

Les deux atomes les plus simples: l'hydrogène et l'hélium.

Un autre exemple, l'atome d'hélium illustré à la figure 1-2 b), possède deux protons et deux neutrons dans son noyau, ainsi que deux électrons en orbite autour du noyau.

Numéro atomique

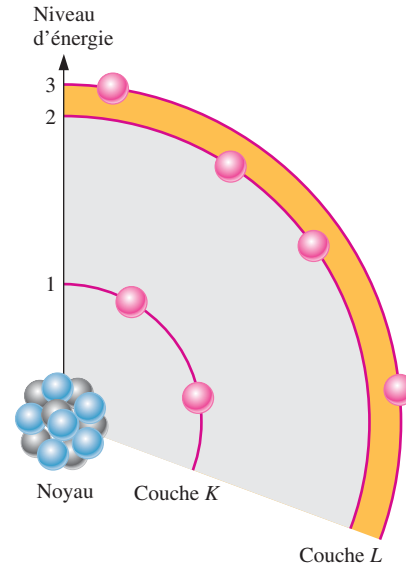
Tous les éléments trouvent place dans le tableau périodique des éléments et sont classés dans l'ordre de leur **numéro atomique**. Le numéro atomique équivaut au nombre de protons du noyau, qui correspond également au nombre d'électrons pour un atome équilibré électriquement (neutre). Par exemple, le numéro atomique de l'hydrogène est 1 et celui de l'hélium est 2. Dans leur état normal (ou neutre), tous les atomes d'un élément donné possèdent le même nombre de protons que d'électrons, de sorte que les charges positives sont neutralisées par les charges négatives. Ainsi, la charge nette de l'atome est nulle.

Couches d'électrons et orbites

Les électrons gravitent autour du noyau d'un atome à certaines distances de celui-ci. Les électrons près du noyau possèdent moins d'énergie que ceux situés sur des orbites plus éloignées. Il n'existe que des quantités d'énergie électronique discrètes (séparées et distinctes) à l'intérieur des structures atomiques. Les électrons doivent donc demeurer en orbite seulement à ces distances du noyau.

Niveaux d'énergie À chaque éloignement distinct (**orbite**) du noyau correspond un certain niveau énergétique. Dans un atome, les orbites sont regroupées en bandes énergétiques appelées **couches**. Un atome donné possède un nombre fixe de couches. Chaque couche possède un nombre maximal fixe d'électrons pour des niveaux d'énergie admissibles (orbites). Les différences entre les niveaux d'énergie à l'intérieur d'une couche sont beaucoup plus petites que la différence d'énergie entre les couches. Les couches sont désignées *K*, *L*, *M*, *N*, et ainsi de suite, *K* étant celle la plus près du noyau. Ce concept énergétique est illustré à la figure 1-3, qui montre la couche *K* avec un niveau d'énergie et la couche *L* avec deux niveaux d'énergie. Des couches additionnelles peuvent exister pour d'autres types d'atomes selon l'élément.

FIGURE 1-3
Le niveau d'énergie augmente à mesure qu'on s'éloigne du noyau de l'atome.



Électrons de valence

Les électrons sur les orbites plus éloignées du noyau ont une énergie plus grande et sont moins fortement liés à l'atome que ceux situés plus près du noyau. Ceci s'explique du fait que la force d'attraction entre les charges positives du noyau et les charges négatives des électrons diminue à mesure qu'on s'éloigne du noyau. Les électrons avec les niveaux d'énergie les plus élevées existent dans la couche la plus éloignée d'un atome et sont relativement moins liés à cet atome. La couche la plus éloignée est connue sous le nom de couche de **valence** et les électrons dans cette couche sont appelés *électrons de valence*. Ces électrons de valence contribuent aux réactions chimiques et aux liaisons à l'intérieur de la structure d'un matériau, déterminant ses propriétés électriques.

Ionisation

Lorsqu'un atome absorbe de l'énergie d'une source de chaleur ou de lumière, les niveaux énergétiques des électrons sont augmentés. Lorsqu'un électron acquiert de l'énergie, il se déplace vers une orbite plus éloignée du noyau. Puisque les électrons de valence possèdent plus d'énergie et qu'ils sont moins étroitement liés à l'atome que les électrons situés à proximité du noyau, ils peuvent bondir vers des orbites supérieures plus facilement lorsqu'une énergie externe est absorbée.

Si un électron de valence reçoit une quantité suffisante d'énergie, il peut en fait s'échapper de la couche extérieure et de l'emprise de l'atome. Le départ d'un électron de valence laisse un atome, précédemment de charge neutre, avec un excédent de charge positive (plus de protons que d'électrons). Le processus de la perte d'un électron de valence est appelé **ionisation**, l'atome résultant de charge positive étant appelé *ion positif*. Par exemple, le symbole chimique de l'hydrogène est H. Lorsqu'il perd son électron de valence et qu'il devient un ion positif, on le désigne alors H^+ . L'électron de valence qui s'est échappé est appelé **électron libre**. Lorsqu'un électron libre chute vers la couche extérieure d'un atome d'hydrogène neutre, cet atome devient chargé négativement (plus d'électrons que de protons) et est appelé *ion négatif*, désigné H^- .

Nombre d'électrons dans chaque couche

Le nombre maximal d'électrons (N_e) pouvant exister sur chaque couche d'un atome est un processus naturel et peut être calculé à l'aide de la formule

$$N_e = 2n^2 \quad (1-1)$$

où n est le numéro de la couche. La couche la plus rapprochée (K) porte le numéro 1, la couche L le numéro 2, la couche M le numéro 3 et ainsi de suite. Le nombre maximal d'électrons pouvant exister sur la couche la plus rapprochée (couche 1) est

$$N_e = 2n^2 = 2(1)^2 = 2$$

Le nombre maximal d'électrons pouvant exister sur la seconde couche est

$$N_e = 2n^2 = 2(2)^2 = 2(4) = 8$$

Le nombre maximal d'électrons pouvant exister sur la troisième couche est

$$N_e = 2n^2 = 2(3)^2 = 2(9) = 18$$

Le nombre maximal d'électrons pouvant exister sur la quatrième couche est

$$N_e = 2n^2 = 2(4)^2 = 2(16) = 32$$

Toutes les couches d'un atome doivent être remplies d'électrons, à l'exception de la couche la plus éloignée, la couche de valence.

SECTION 1-1 RÉVISION

1. Décrivez ce qu'est un atome.
2. Qu'est-ce qu'un électron?
3. Qu'est-ce qu'un électron de valence?
4. Qu'est-ce qu'un électron libre?
5. Comment les ions sont-ils formés?

1-2 ■ SEMI-CONDUCTEURS, CONDUCTEURS ET ISOLANTS

Par leurs propriétés électriques, les matériaux peuvent être classés en trois groupes: les conducteurs, les semi-conducteurs et les isolants. Dans cette section, nous allons examiner les propriétés des semi-conducteurs et les comparer aux conducteurs et aux isolants.

Après l'étude de cette section, vous pourrez

- **Discuter des semi-conducteurs, des conducteurs et des isolants ainsi que de leurs distinctions de base**
 - Définir le coeur d'un atome
 - Décrire la structure atomique du cuivre, du silicium, du germanium et du carbone
 - Énumérer les quatre meilleurs conducteurs
 - Énumérer quatre semi-conducteurs
 - Discuter de la différence entre les conducteurs et les semi-conducteurs
 - Discuter de la différence entre les semi-conducteurs au silicium et au germanium
 - Expliquer pourquoi le silicium est plus largement utilisé que le germanium

Tout matériau est constitué d'atomes. Ces atomes contribuent aux propriétés électriques d'un matériau, incluant son habileté à conduire le courant électrique.

Afin de discuter de ses propriétés électriques, un atome peut être représenté par la couche de valence et un coeur constitué de toutes les couches intérieures et du **noyau**. Ce concept est illustré à la figure 1-4 pour un atome de carbone. Le carbone est utilisé dans plusieurs modèles de résistances électriques. Notez que l'atome de carbone possède quatre électrons sur la couche de valence et deux électrons sur la couche intérieure (*K*). Le noyau est constitué de six protons et de six neutrons, +6 indiquant la charge positive des six protons. Le coeur possède une charge nette de +4 (+6 pour le noyau et -2 pour les deux électrons de la couche intérieure).

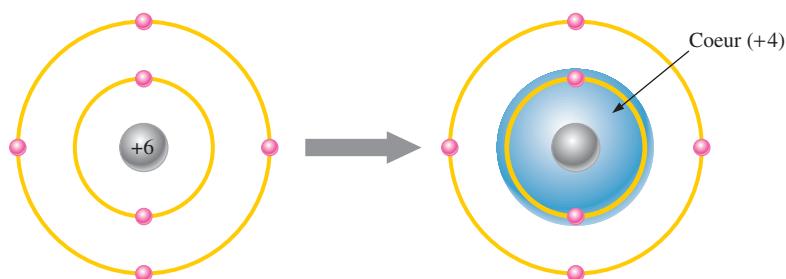


FIGURE 1-4
Diagramme d'un atome de carbone et de sa représentation sous la forme d'un coeur et d'une couche de valence.

Conducteurs

Un **conducteur** est un matériau qui conduit aisément le courant électrique. Les meilleurs conducteurs sont des matériaux constitués d'un seul élément comme le cuivre, l'argent, l'or et l'aluminium, ces éléments étant caractérisés par des atomes ayant un seul électron de valence faiblement lié à l'atome. Ces électrons de valence peu retenus peuvent facilement se détacher de leur atome respectif et devenir des électrons libres. Par conséquent, un matériau conducteur possède beaucoup d'électrons libres qui, lorsqu'ils se déplacent tous dans la même direction, engendrent le **courant**.

Isolants

Un **isolant** est un matériau qui ne conduit pas le courant électrique sous des conditions normales. La plupart des bons isolants sont des matériaux composés de plusieurs éléments, contrairement aux conducteurs. Les électrons de valence sont solidement rattachés aux atomes, laissant très peu d'électrons libres de se déplacer dans un isolant.

Semi-conducteurs

Par son habileté à conduire le courant, un **semi-conducteur** est un matériau se situant entre le conducteur et l'isolant. Un semi-conducteur à l'état pur (intrinsèque) n'est pas un bon conducteur ni un bon isolant. Les éléments uniques les plus utilisés pour les semi-conducteurs sont le **silicium**, le **germanium** et le **carbone**. Des éléments composés tels l'arseniure de gallium sont aussi couramment utilisés pour les semi-conducteurs. Les semi-conducteurs à élément unique se caractérisent par des atomes à quatre électrons de valence.

Bandes d'énergie

Rappelons-nous que la couche de valence d'un atome représente une bande d'un certain niveau énergétique et que les électrons de valence sont confinés à cette bande. Lorsqu'un électron acquiert assez d'énergie additionnelle d'une source externe, il peut quitter la couche de valence, devenir un électron libre et exister dans ce que l'on désigne comme étant la *bande de conduction*.

En terme d'énergie, la différence entre la bande de valence et la bande de conduction est appelée un *écart énergétique*. Il s'agit en fait de la quantité d'énergie que doit avoir un électron pour sauter de la bande de valence vers la bande de conduction. Une fois dans la bande de conduction, l'électron est libre de se déplacer à travers le matériau et n'est plus lié à aucun atome particulier.

La figure 1-5 montre les diagrammes d'énergie pour un isolant, un semi-conducteur et un conducteur. Notez à la partie a) le vaste écart énergétique entre les bandes. Les électrons de valence ne peuvent sauter vers la bande de conduction sauf lors d'une détérioration provoquée par des tensions extrêmement élevées appliquées au matériau. À la partie b), on remarque qu'un semi-conducteur possède un écart énergétique plus restreint, permettant à quelques électrons de sauter vers la bande de conduction et de devenir des électrons libres. Par contraste, la partie c) illustre les bandes énergétiques se chevauchant dans un conducteur. Dans un matériau conducteur, il existe toujours un grand nombre d'électrons libres.

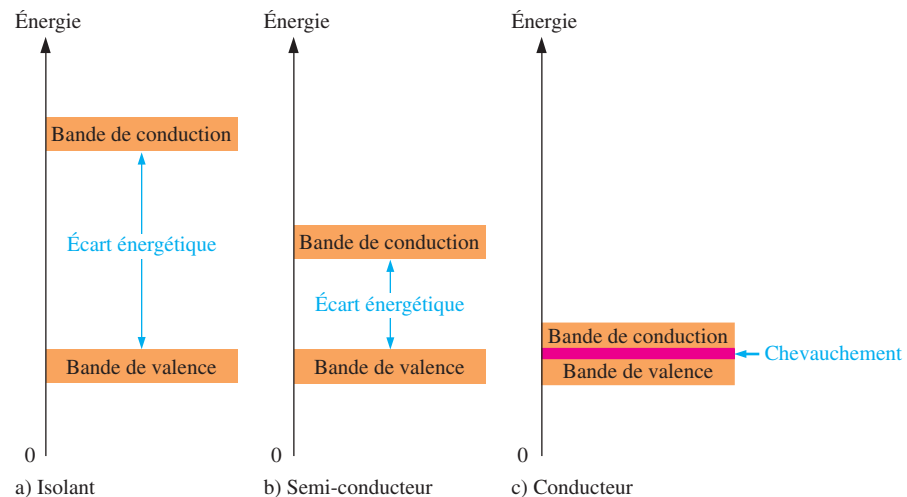


FIGURE 1-5

Diagrammes énergétiques pour les trois types de matériaux.

Comparaison entre l'atome d'un semi-conducteur et l'atome d'un conducteur

Examinons maintenant quelques raisons qui font du silicium un semi-conducteur et du cuivre un conducteur. Les diagrammes des atomes de silicium et de carbone sont illustrés à la figure 1-6. Notez que le noyau d'un atome de silicium possède une charge nette de +4 (14 protons – 10 électrons) et que le noyau de l'atome de cuivre a une charge nette de +1 (29 protons – 28 électrons).

L'électron de valence dans l'atome de cuivre «ressent» une force d'attraction de +1 comparativement à celui du silicium qui lui ressent une force d'attraction de +4. Il y a donc quatre fois plus de force essayant de retenir un électron de valence à l'atome dans le silicium que dans le cuivre. L'électron de valence du cuivre est dans la quatrième couche, ce qui correspond à une plus grande distance du noyau que celui du silicium qui se situe dans la troisième couche. Souvenez-vous que les électrons les plus éloignés du noyau possèdent le plus d'énergie.

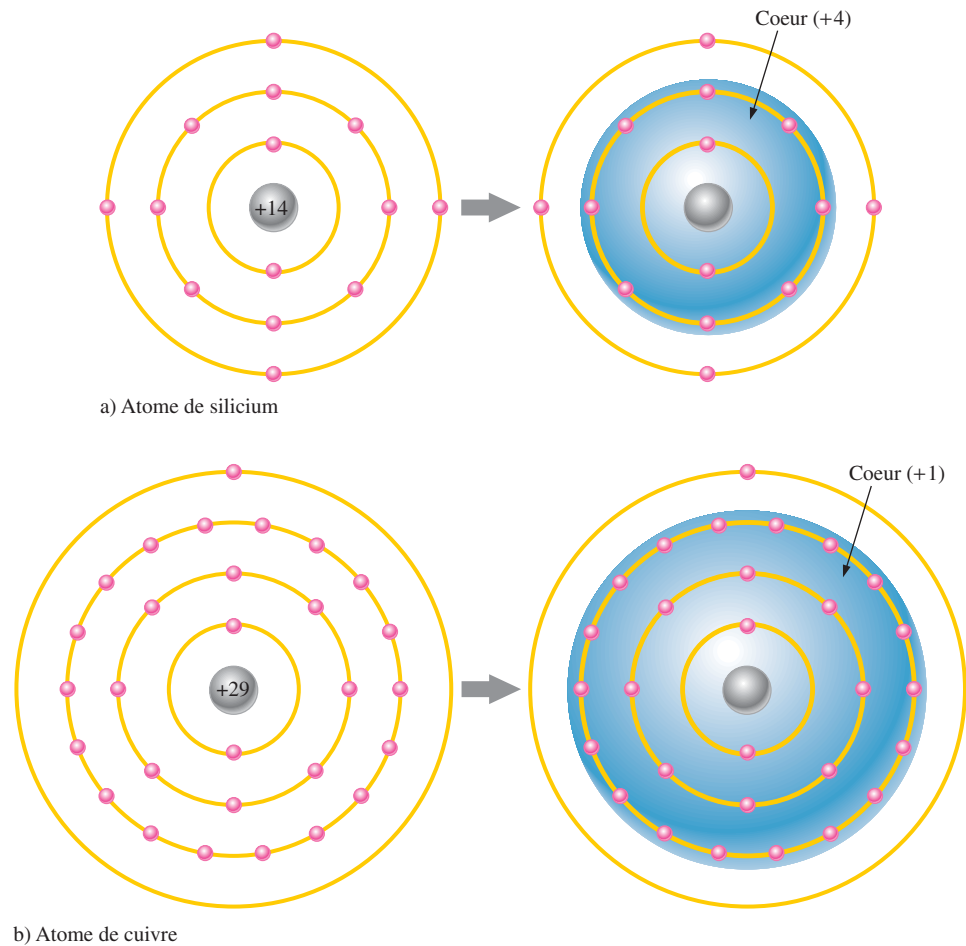


FIGURE 1-6
Diagrammes des atomes de silicium et de cuivre.

Par conséquent, il y a moins de force qui retient l'électron de valence à l'atome de cuivre que pour le silicium. De plus, l'électron de valence du cuivre possède plus d'énergie que l'électron de valence du silicium. Il est donc plus facile aux électrons de valence du cuivre d'acquies suffisamment d'énergie additionnelle pour s'échapper de leurs atomes et devenir des électrons libres dans la bande de conduction qu'il en est pour le silicium. En fait, un grand nombre d'électrons de valence du cuivre ont déjà assez d'énergie pour être des électrons libres, comme l'indique le chevauchement des bandes de valence et de conduction.

Silicium et germanium

Les structures atomiques du silicium et du germanium sont illustrées à la figure 1-7. Le silicium est le matériau le plus largement utilisé pour les diodes, les transistors, les circuits intégrés et autres composants à semi-conducteurs. Notez que le silicium et le germanium ont en commun la même caractéristique: quatre électrons de valence.

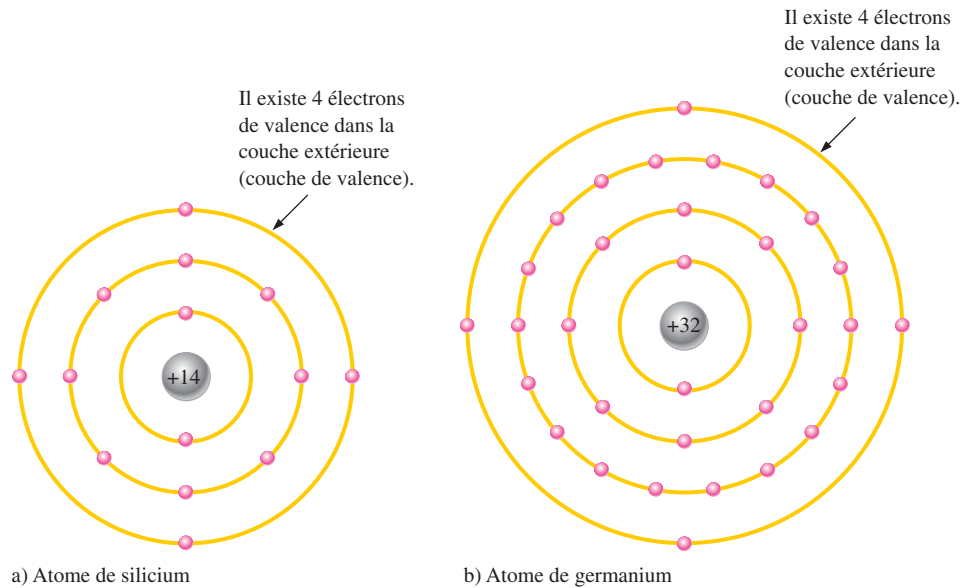


FIGURE 1-7
Diagrammes des atomes de silicium et de germanium.

Les électrons de valence du germanium se situent dans la quatrième couche tandis que ceux du silicium sont dans la troisième couche, plus près du noyau. Cela signifie que les électrons de valence du germanium sont à des niveaux d'énergie supérieurs à ceux du silicium. Par conséquent, ils demandent une plus petite quantité d'énergie additionnelle pour s'échapper de l'atome. Cette propriété rend le germanium plus instable à des températures élevées; c'est la raison principale pour laquelle le silicium est le matériau semi-conducteur le plus largement utilisé.

SECTION 1-2 RÉVISION

1. Quelle est la différence de base entre les conducteurs et les isolants?
2. Comment les semi-conducteurs diffèrent-ils des conducteurs et des isolants?
3. Combien d'électrons de valence un conducteur comme le cuivre possède-t-il?
4. Combien d'électrons de valence un semi-conducteur possède-t-il?
5. Nommez trois des meilleurs matériaux conducteurs.
6. Quel est le matériau semi-conducteur le plus largement utilisé?
7. Pourquoi un semi-conducteur possède-t-il moins d'électrons libres qu'un conducteur?

1-3 ■ LIENS COVALENTS

Lorsque certains atomes se combinent en molécules pour former un matériau solide, ils se disposent en un modèle fixe appelé cristal. Les atomes à l'intérieur de la structure du cristal sont retenus ensemble par des liens covalents qui sont créés par l'interaction des électrons de valence de chaque atome. Un morceau solide de silicium est un matériau cristallin.