



SEMI - CONDUCTEURS

COURS DE BASE
ELECTRONIQUE

EURELEC

COURS DE BASE ELECTRONIQUE

(13)

SEMI-CONDUCTEURS 1

Nous avons vu dans les leçons précédentes et plus particulièrement dans les fascicules théoriques, les principaux composants PASSIFS, utilisés en Electronique.

Précisons immédiatement que l'on appelle composants PASSIFS, tous dispositifs qui ne peuvent QU'ABSORBER de la puissance ACTIVE (résistances, condensateurs, bobines, etc ...).

Nous allons voir maintenant les COMPOSANTS ACTIFS, qui d'une structure plus complexe que les composants passifs, sont en MESURE D'AGIR directement sur la puissance et plus généralement peuvent délivrer un signal de puissance supérieure à la puissance du signal appliqué.

Il existe actuellement deux types caractéristiques de COMPOSANTS ACTIFS :

a) Les composants dont le fonctionnement est lié aux déplacements des ELECTRONS dans le VIDE.

b) Les composants dont le fonctionnement est lié aux déplacements des ELECTRONS dans un SOLIDE de nature déterminée.

Les dispositifs du premier type appartiennent à la catégorie des TUBES ELECTRONIQUES (lampes électroniques) et ceux-ci seront étudiés en détails dans les leçons "THEORIE" de ce cours.

Les dispositifs du second type appartiennent à la catégorie des SEMI-CONDUCTEURS (TRANSISTORS) et sont traités en détails dans les leçons SEMI-CONDUCTEURS qui commencent avec ce premier fascicule.

Nous croyons utile de bien insister sur le fait que l'étude des TUBES ELECTRONIQUES ne doit pas être négligée. En effet, s'il est exact que les TRANSISTORS tendent à remplacer les tubes dans presque tous les domaines, il existe encore à l'heure actuelle de nombreux montages non transistorisés et même les plus récents Téléviseurs "entièrement transistorisés", comportent au moins un tube électronique : le cathoscope, c'est-à-dire l'écran.

D'autre part, dans le cadre d'une étude, il n'est pas possible de passer sous silence ces composants, car rien ne permet d'affirmer que les tubes disparaîtront complètement un jour.

LES TUBES A AFFICHAGE par exemple (plus connus sous le nom de tubes NIXIE, utilisés pour la visualisation des chiffres dans les machines à calculer) occupent toujours la première place.

Aussi, pour une solide formation de base, il est bon d'étudier tous les composants, même si certains de ceux-ci semblent en "perte de vitesse" (pour des motifs qui ne sont d'ailleurs pas toujours dus aux seuls critères techniques).

Mais revenons aux TRANSISTORS.

Pour comprendre le fonctionnement de ceux-ci, il est nécessaire de bien connaître les SEMI-CONDUCTEURS, c'est-à-dire leurs propriétés physiques et électriques.

Ces propriétés sont attachées à l'infiniment petit, c'est-à-dire appartiennent au monde des ATOMES et des ELECTRONS.

Les premières découvertes dans ce domaine, datent de 1834. A cette époque, le savant Michel FARADAY découvrit que le SULFURE D'ARGENT présente un COEFFICIENT DE RESISTANCE NEGATIF, c'est-à-dire que sa RESISTANCE ELECTRIQUE diminue avec l'augmentation de la température contrairement aux autres corps.

Par la suite de nouvelles découvertes furent faites, telles que la PHOTO-CONDUCTIVITE, la PHOTO-ELECTRICITE et l'effet REDRESSEUR de certains corps.

D'autres études et applications au cours desquelles on obtint les REDRESSEURS SECS au SELENIUM et à l'OXYDE DE CUIVRE, permirent d'arriver à une bonne connaissance des SEMI-CONDUCTEURS et à la découverte des TRANSISTORS.

Pour compléter cette brève introduction, précisons encore que les avantages du TRANSISTOR par rapport au tube électronique sont nombreux : dimensions nettement inférieures (voir figure 1), absence de chauffage, plus grande résistance mécanique aux chocs, plus longue durée de vie.

Toutefois, il convient aussi de souligner les inconvénients du TRANSISTOR, parmi lesquels il faut citer :

a) FRAGILITE du point de vue électrique. Il suffit en effet d'un court-circuit, d'une tension trop élevée, d'une mauvaise manoeuvre lors d'une mesure pour provoquer la destruction du transistor.

b) ABSENCE DE STABILITE sous l'effet d'une augmentation de la température.

c) **VARIATION** dans les **CARACTERISTIQUES** pour des transistors de même type. Ainsi, lorsqu'un circuit nécessite deux transistors parfaitement identiques, il faut procéder à une sélection à l'aide d'instruments de mesures. Pour cette raison, on trouve dans le commerce des transistors **APAIRES**, c'est-à-dire vendus par couple.

Nous verrons plus en détails tous ces points dans la suite du cours et allons dès maintenant commencer l'étude des transistors, en examinant la **STRUCTURE** des corps utilisés pour la fabrication de ces composants.

I - LIENS ENTRE ATOMES

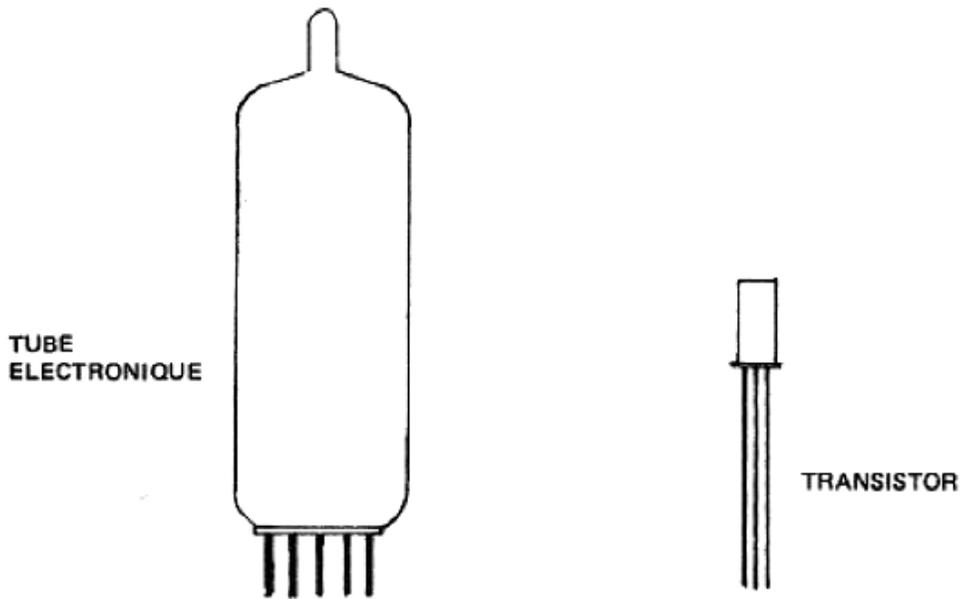
Toutes les expériences de chimie démontrent que les atomes de corps différents, s'attirent ou se repoussent, lorsqu'ils sont placés à petite distance les uns des autres.

Il faut préciser tout de suite que lorsqu'il s'agit de distance entre **ATOMES**, on utilise comme unité de mesure l'**ANGSTROM** (symbole **Å**) équivalent au dix millionième de millimètre **OU LE MILLIMICRON** (symbole $m\mu$) correspondant au millionième de millimètre.

L'attraction qui se manifeste entre les atomes est appelée **ATTRACTION DE VAN DER VAALS** ; elle est en général relativement faible et ne commence à s'exercer que lorsque les atomes sont à des distances de quelques **ANGSTROMS** (figure 2).

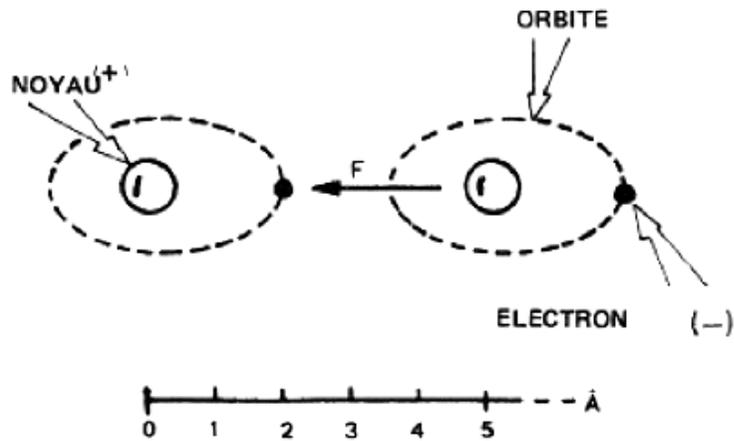
A plus faible distance, lorsque les orbites externes des électrons se touchent, il peut s'établir un **LIEN** plus **ETROIT**, appelé **LIEN CHIMIQUE**, ou au contraire il peut se produire une forte **REPULSION**.

L'attraction de **VAN DER VAALS** est essentiellement un phénomène de nature **ELECTROSTATIQUE**, dû à la force électrique d'attraction, s'exerçant entre le noyau électriquement **POSITIF** et les **ELECTRONS** de l'atome voisin, électriquement **NEGATIFS**.



TUBE ELECTRONIQUE ET TRANSISTOR, GRANDEUR NATURE.

Figure 1



ATTRACTION DE VAN DER WAALS

Figure 2

Le LIEN CHIMIQUE et la REPULSION sont au contraire dus à la constitution de la DERNIERE COUCHE DES ELECTRONS, tournant autour du noyau, c'est-à-dire la COUCHE EXTERNE.

En général, les couches INTERNES des électrons sont STABLES et ne sont pas concernées par les phénomènes chimiques et électriques.

La couche EXTERNE au contraire peut présenter une certaine instabilité, car elle peut PERDRE ou GAGNER des électrons ou encore les mettre en commun avec les électrons de la couche externe d'un atome voisin.

Pour expliquer la formation du lien chimique dans certains cas et de la répulsion dans d'autres cas, il faut se référer à un principe physique, connu sous le nom de PRINCIPE DE PAULI.

D'après ce principe, DANS CHAQUE ORBITE ELECTRONIQUE PLACEE AUTOUR DU NOYAU D'UN ATOME, IL NE PEUT Y AVOIR QU'UN ELECTRON AYANT UNE ENERGIE DETERMINEE.

Cependant, si l'on admet que tous les électrons sont exactement égaux entre-eux et, qu'un électron sur son orbite tourne aussi sur lui-même dans un sens ou dans l'autre, on peut modifier l'expression précédente du principe de PAULI et écrire : dans l'orbite d'un noyau, il ne peut tourner plus de deux électrons et ces deux électrons tournant sur eux-mêmes, doivent tourner en sens inverse l'un de l'autre (principe de PAULI généralisé).

Dans les explications qui suivent, nous nous baserons sur cette seconde version du principe de PAULI.

Imaginons maintenant que deux atomes d'hydrogène se rapprochent l'un de l'autre. On peut représenter les atomes de l'hydrogène comme sur la figure 2 ; ils sont constitués d'un noyau et d'un seul électron tournant sur la couche K (THEORIE 1 - Figure 12).

Lorsque les noyaux des deux atomes se trouvent à une distance de quelques **ANGSTROMS** (5 Å environ), l'attraction de **VAN DER VAALS** commence à se manifester.

Si la distance diminue, l'attraction électrostatique augmente et à partir de 0,75 Å, le **LIEN CHIMIQUE** intervient.

Ce lien assure l'union stable des deux atomes et détermine ainsi la formation de la **MOLECULE D'HYDROGENE**.

Le **LIEN CHIMIQUE** n'est pas uniquement constitué par une forte attraction électrostatique entre le noyau et les électrons, mais aussi par un échange d'énergie entre les **ATOMES**, échange se produisant par l'intermédiaire des électrons passant successivement et indifféremment de l'orbite d'un atome à l'orbite d'un autre atome.

Lors du continuel passage des électrons d'un atome à l'autre, il arrive évidemment que sur l'orbite d'un atome d'hydrogène il se trouve **DEUX ELECTRONS** au lieu d'un.

Cette possibilité est évoquée dans le principe de **PAULI** généralisé, puisque dans chaque orbite on peut trouver deux électrons.

Considérons maintenant un autre cas : imaginons que deux atomes d'hélium se sont rapprochés l'un de l'autre.

Les atomes d'hélium sont constitués d'un **NOYAU** et de **DEUX ELECTRONS** gravitant sur la couche **K**.

Cette couche, c'est-à-dire la couche la plus proche du noyau est constituée d'une seule orbite.

Pour l'**HELIUM** cette couche est complète, car elle comprend deux électrons et ne peut, d'après le principe de **PAULI**, en accueillir d'autres.

Lorsque les noyaux des deux atomes d'HELIUM se trouvent à une distance de quelques ANGSTROMS, l'attraction de VAN DER VAALS peut se manifester ; toutefois à une distance plus faible, il se produit une forte REPULSION au lieu du LIEN CHIMIQUE.

Cette répulsion entre les deux atomes d'HELIUM est due aux interactions de leurs électrons.

En effet, nous savons que les électrons ont tous la même charge et qu'ils se repoussent entre-eux.

D'autre part il est impossible d'obtenir une répartition stable des électrons autour des deux noyaux comme dans le cas de l'hydrogène, car d'après le principe de PAULI généralisé, l'orbite de chaque atome d'HELIUM est considérée comme complète.

Nous n'avons jusqu'ici examiné que des atomes simples, ne comportant qu'une seule couche d'électrons, la couche K.

Dans le cas d'atomes à deux ou plusieurs couches (THEORIE 1 - Figure 12), il faut non seulement tenir compte du principe de PAULI, mais aussi du fait que la STABILITE MAXIMUM des électrons est obtenue, lorsque la COUCHE EXTERNE comprend HUIT ELECTRONS gravitant sur QUATRE ORBITES.

Les éléments ayant huit électrons sur la couche externe, sont réunis dans le groupe IX du tableau de MENDELEYEV, donné figure 14 de la leçon PHYSIQUE 4.

A l'exception de l'HELIUM, tous les éléments de ce groupe, c'est-à-dire le NEON, L'ARGON, le CRYPTON, le XENON et le RADON, ont leur couche externe complète avec HUIT ELECTRONS.

Ces éléments sont parfaitement STABLES et refusent tout LIEN CHIMIQUE entre-eux ou avec d'autres éléments.

Par contre si un atome a **MOINS DE HUIT ELECTRONS** dans une couche externe, différente de la couche K, il aura tendance à **ACCEPTER LE LIEN CHIMIQUE** avec d'autres atomes.

Cette capacité de l'atome de se lier chimiquement avec d'autres atomes est dite **VALENCE**.

Il existe une certaine relation entre la **VALENCE** d'un atome et le nombre d'électrons que comprend sa couche externe.

a) Lorsque la couche externe est complète avec huit électrons, on dit que l'atome a une **VALENCE ZERO**.

b) Lorsque la couche externe ne comprend :

1) qu'un seul électron, ou

2) sept électrons,

on dit que l'atome a la **VALENCE UN** ou encore qu'il est **MONOVALENT**.

c) Lorsque la couche externe ne comprend :

1) que deux électrons ou

2) six électrons,

on dit que l'atome a la **VALENCE DEUX** ou encore qu'il est **BIVALENT**.

d) Lorsque la couche externe comprend :

1) trois électrons, ou

2) cinq électrons,

on dit que l'atome a la **VALENCE TROIS** ou encore qu'il est **TRIVALENT**.

c) Enfin si la couche externe comprend **QUATRE ELECTRONS**, on dit que l'atome a la **VALENCE QUATRE** ou encore qu'il est **TETRAVALENT**.

Ce critère pour distinguer les VALENCES n'est cependant pas toujours valable ; il y a même de nombreuses exceptions.

Par exemple l'ANTIMOINE, L'ARSENIC et le PHOSPHORE ne possèdent que cinq électrons sur leur couche externe et peuvent par conséquent être TRIVALENTS d'après le critère ci-dessus, mais peuvent également avoir une VALENCE CINQ.

Dans ce cas, ils sont dits PENTAVALENTS.

On trouve aussi des atomes pouvant avoir une VALENCE SIX (HEXAVALENTS) et une VALENCE SEPT (HEPTAVALENTS).

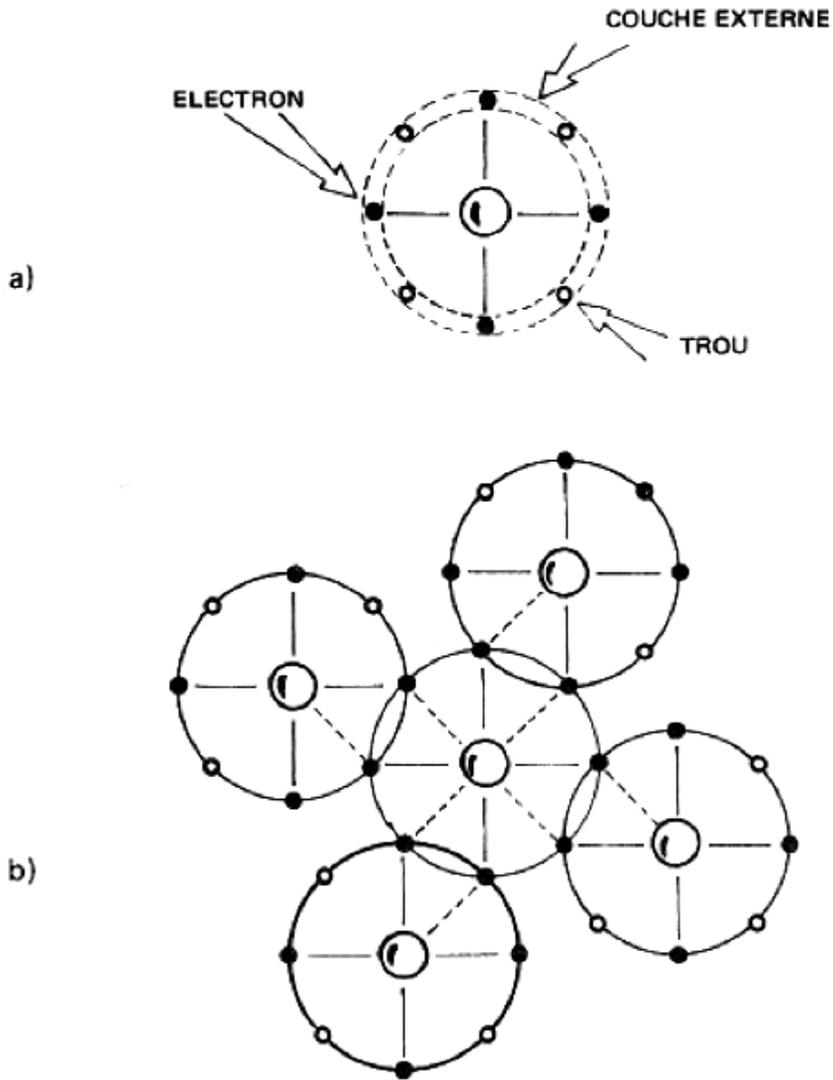
Il n'est pas nécessaire d'approfondir le concept général de VALENCE, concept lié à des études très complexes sortant du cadre de ce cours, mais il est utile par contre de bien mettre en évidence le LIEN CHIMIQUE entre les atomes d'un même élément.

Nous avons précédemment considéré le lien qui s'établit entre deux atomes d'hydrogène, lorsque leurs noyaux respectifs se trouvent à une distance de 0,75 Å. Ce type particulier de lien chimique entre atomes de la même espèce est dit LIEN COVALENT ou encore LIEN HOMOPOLAIRE.

Voyons comment peut s'établir un LIEN COVALENT entre ATOMES, ayant plus de deux électrons et moins de huit dans leur couche externe.

Prenons par exemple quelques atomes d'un élément TETRAVALENT, c'est-à-dire un élément possédant quatre électrons sur sa couche périphérique.

Pour simplifier la représentation, on n'a fait figurer sur le dessin de la figure 3-a que le noyau des atomes et les quatre électrons périphériques (les électrons des autres couches n'étant pas concernés).



VALENCE ET LIENS COVALENTS

Figure 3

Bien entendu, en réalité les quatre électrons périphériques de chaque atome, occupent plusieurs orbites, mais pour plus de clarté il suffit de n'en représenter qu'une seule.

Entre les électrons périphériques, on a aussi dessiné quatre **TROUS**, QUI REPRESENTENT LES PLACES LIBRES, dans lesquelles pourraient venir quatre autres électrons, de façon à compléter la couche externe.

Le croquis de la figure 3-a peut représenter tous les atomes des éléments **TETRAVALENTS** classés dans le groupe IV du tableau de **MENDELEYEV** (figure 14 - **PHYSIQUE 4**), c'est-à-dire le **CARBONE**, le **SILICIUM**, le **TITANE**, le **GERMANIUM**, le **ZIRCONIUM**, l'**ETAIN**, l'**HAFNIUM** et le **PLOMB**.

Imaginons maintenant que quatre atomes **TETRAVALENTS** se rapprochent d'un atome du même type. Lorsque ces atomes se trouvent à quelques **ANGSTROMS**, les forces de **VAN DER VAALS** se manifestent, mais à de plus faibles distances, il s'établit un **LIEN COVALENT** entre l'atome considéré et chacun des quatre atomes qui se sont rapprochés.

Les quatre **LIENS COVALENTS** sont représentés figure 3-b, par les quatre rayons en pointillé.

Ce phénomène est facile à comprendre.

En effet, au centre nous avons un atome instable avec quatre électrons sur la couche externe, atome qui peut soit récupérer soit céder des électrons.

A proximité de cet atome, quatre autres atomes du même type se sont rapprochés jusqu'à ce que les orbites soient en contact les unes avec les autres.

Tout naturellement l'atome du centre, comble donc ses quatre **TROUS** (voir figure 3-a) avec les électrons instables des quatre autres atomes.

L'atome du centre a ainsi sa couche externe complète avec huit électrons.

En réalité ces huit électrons n'appartiennent pas exclusivement au même atome ; ils se subdivisent en QUATRE COUPLES et chaque COUPLE D'ELECTRONS APPARTIENT MANIFESTEMENT A L'ATOME CENTRAL ET A UN ATOME PERIPHERIQUE.

Le LIEN COVALENT existant entre l'atome central et les quatre atomes périphériques, CONSISTE EN UN ECHANGE REPETE D'ENERGIE, DU AU PASSAGE D'ELECTRONS D'UN ATOME A L'AUTRE.

II - STRUCTURES DES CRISTAUX

Le fonctionnement des TRANSISTORS, dépend des propriétés de la couche externe des atomes de certains corps, dits CORPS SEMI-CONDUCTEURS, mais il est basé sur l'état d'AGREGATION de ces corps.

Dans la première leçon de physique, nous avons vu que l'on peut généralement distinguer TROIS ETATS D'AGREGATION :

- a) L'état SOLIDE,
- b) L'état LIQUIDE,
- c) L'état GAZEUX.

Les caractéristiques physiques fondamentales des SEMI-CONDUCTEURS, se manifestent exclusivement lorsque le matériau est à l'état SOLIDE.

Il faut en plus que ce matériau se trouve dans un état solide particulier, dit ETAT CRISTALLIN.

C'est pour cette raison que l'on dit souvent que les transistors ou les diodes à semi-conducteurs sont des **DISPOSITIFS A CRISTAL**.

L'état cristallin se distingue des autres états solides, par le fait que les atomes occupent dans l'**AGREGAT**, une position fixe, selon un **DESSIN GEOMETRIQUE REPETE**, plus ou moins complexe.

Prenons par exemple un **CRISTAL TRES DUR DE CHLORURE DE SODIUM** (sel de cuisine).

Le **CHLORURE DE SODIUM** est un composé constitué d'atomes de **CHLORE** et de **SODIUM** en parties égales.

Si nous pouvions agrandir cinquante millions de fois un minuscule grain de chlorure de sodium, les atomes apparaîtraient comme sur la figure 4-a.

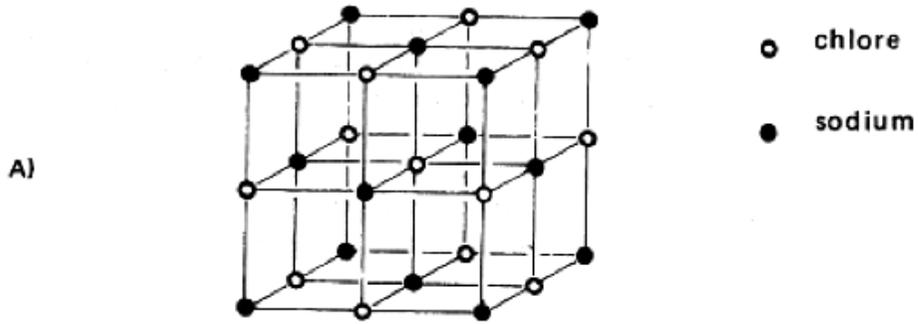
Cette disposition se répète, toujours égale à elle-même, à mesure qu'augmentent les dimensions du grain de cristal.

La structure **RETICULAIRE** de la figure 4-a est fondamentale pour de nombreux types de cristaux. Il existe évidemment d'autres structures réticulaires cristallines de substances simples et composées.

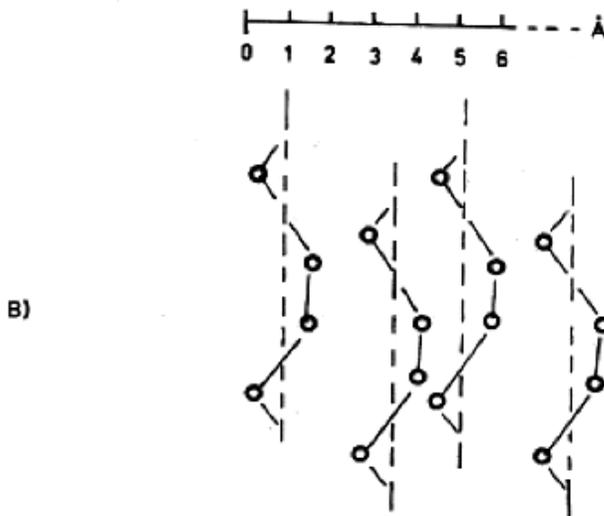
On peut voir figure 4-b, la représentation du cristal de **SELENIUM**, substance simple employée dans la fabrication des **REDRESSEURS SOLIDES**.

Les atomes, dans la structure cristalline du **SELENIUM**, sont disposés en **SPIRALE** autour d'axes parallèles et ces spirales se regroupent en couches superposées.

Parmi les structures cristallines, celle du **DIAMANT** a une grande importance dans l'étude des **SEMI-CONDUCTEURS**.



CHLORURE DE SODIUM



SELENIUM

STRUCTURES DE CRISTAUX

Figure 4

Le **DIAMANT** (figure 5-a), est constitué d'atomes de carbone, disposés de telle sorte que chaque atome se trouve entouré par quatre autres, tous à égale distance de l'atome central et uniformément distribué dans l'espace environnant (figure 5-b).

La distance d , entre l'atome central et les quatre atomes voisins est **CONSTANTE** en tous points du réseau (cette distance est d'environ 2 **ANGSTROMS**).

Les atomes du cristal sont maintenus ensemble par des liens covalents, du même type que ceux de la figure 3-b.

En nous rappelant ce qui vient d'être dit sur la nature de ce lien, nous pouvons comprendre que tout l'espace entre les atomes est occupé par une **INTENSE CIRCULATION ELECTRONIQUE**.

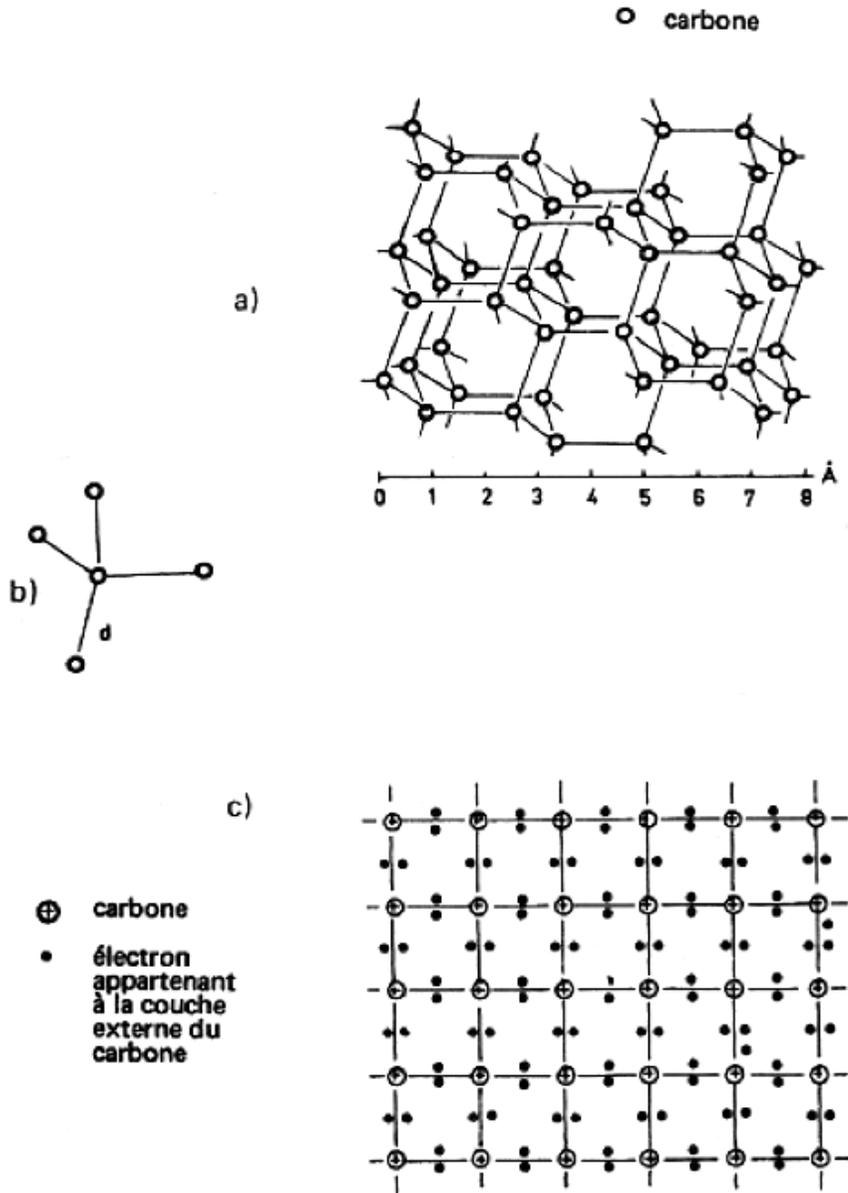
Les électrons se promènent en effet dans les espaces vides du réseau cristallin, en passant d'une orbite à l'autre, **MAIS ILS NE SONT JAMAIS VRAIMENT LIBRES** : ils restent toujours liés au réseau formé par les atomes auxquels ils appartenaient initialement.

ILS NE POURRAIENT PAS, sous l'action d'un champ électrique extérieur, **FORMER UN FLUX CONTINUEL DE COURANT**.

En d'autres termes cela signifie que le **DIAMANT EST UN MAUVAIS CONDUCTEUR D'ELECTRICITE**.

Pour représenter de façon plus simple la structure cristalline du diamant, on peut avoir recours à la représentation plane (figure 5-c).

Cette figure met mieux en évidence le fait que les distances entre atomes sont égales et permet de mieux comprendre l'existence des **LIENS COVALENTS**.



RESEAU CRISTALLIN DU DIAMANT

Figure 5

III - SEMI-CONDUCTEURS INTRINSEQUES

On appelle **SEMI-CONDUCTEURS**, les substances dont la **CONDUCTIVITE ELECTRIQUE** est intermédiaire entre celle des **CONDUCTEURS** et celle des **ISOLANTS**.

Le **PROTOXYDE DE CUIVRE** et le **SELENIUM**, utilisés dans certains types de redresseurs, sont des **SEMI-CONDUCTEURS**, de même que divers autres oxydes et sels métalliques, mais ce sont le **GERMANIUM** et le **SILICIUM** qui ont le plus d'importance.

La figure 6 représente l'atome de chacun de ces deux éléments.

On peut remarquer que pour ces deux corps, la couche externe des atomes ne comprend que quatre électrons.

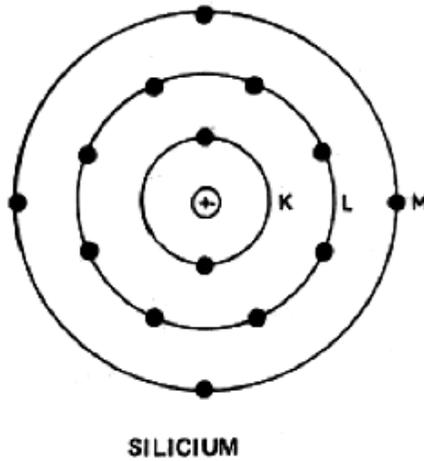
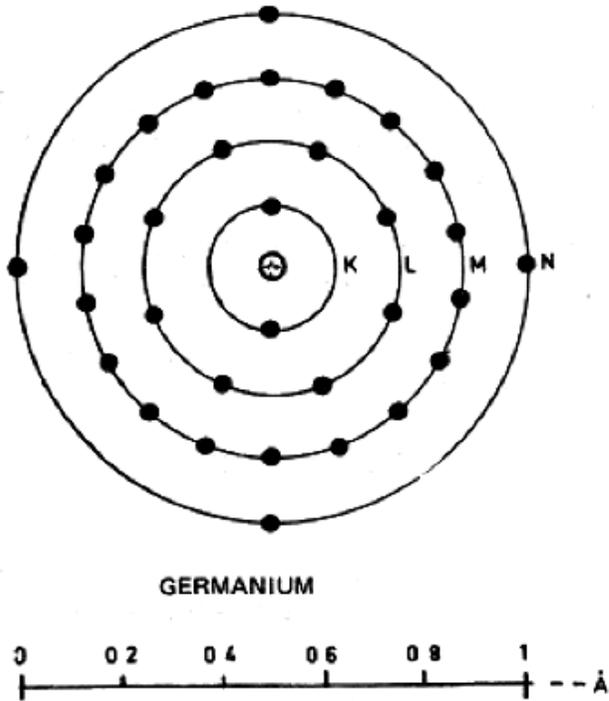
Ces éléments sont donc du type **TETRAVALENT**, comme le carbone pur (diamant).

Remarquons aussi que le carbone, le silicium et le germanium, appartiennent au même groupe dans la classification de **MENDELEYEV** (groupe IV, figure 14 de la **PHYSIQUE 4**).

Ainsi, tout ce qui a été dit sur le réseau cristallin du carbone et sur les liens covalents de ce corps, reste valable pour le **GERMANIUM** et le **SILICIUM**.

Cependant en étudiant le réseau cristallin du diamant, on a signalé que les électrons appartenant à la couche externe de chaque atome, vont d'une orbite à l'autre **MAIS QU'ILS RESTENT LIES** et qu'ils ne peuvent participer à la formation d'un courant électrique.

Or, pour certains cristaux, la circulation électronique peut être influencée plus ou moins par des causes extérieures (un champ électrique par exemple) et dans ce cas de nombreux électrons peuvent se réunir en un flux de courant.



ATOMES DU GERMANIUM ET DU SILICIUM

Figure 6

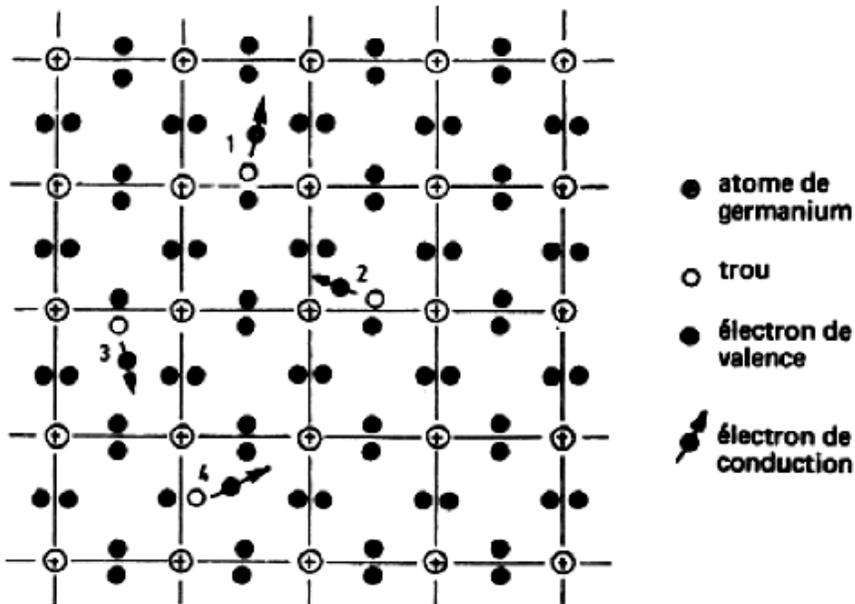
Cela signifie que L'ON PEUT AVOIR DES CRISTAUX PLUS OU MOINS BONS CONDUCTEURS D'ELECTRICITE ou des cristaux isolants, comme le diamant.

Les cristaux de germanium et de silicium sont dans la première catégorie et nous allons voir comment se produit la conduction électrique.

Pour clarifier les explications, subdivisons les électrons des couches externes en deux catégories :

a) Les ELECTRONS DE VALENCE, représentés figure 7 par des points noirs.

b) Les ELECTRONS DE CONDUCTION, représentés sur cette même figure par des points noirs traversés d'une flèche.



COUPLE ELECTRON - TROU DANS LE CRISTAL DE GERMANIUM

Figure 7

Les **ELECTRONS DE VALENCE** sont ceux, qui tout en se déplaçant d'un atome à l'autre, restent liés au réseau (comme dans le cas du diamant).

Les **ELECTRONS DE CONDUCTION** sont ceux, qui pendant les divers déplacements, acquièrent assez d'énergie pour rompre les **LIENS COVALENTS**.

Dans un cristal **TRES PUR**, géométriquement parfait et maintenu à une température très proche du zéro absolu ($- 273,16^{\circ}\text{C}$), tous les électrons des atomes appartiennent à la catégorie des électrons de valence, ou pour utiliser une expression courante en physique, appartiennent à la **BANDE DE VALENCE**.

En élevant la température ou sous l'effet d'une déformation du réseau ou encore en plaçant le cristal dans un champ électrique intense, une partie des **ELECTRONS DE VALENCE** gagne une certaine énergie et peut se libérer du réseau, c'est-à-dire passer de la **BANDE DE VALENCE** à la **BANDE DE CONDUCTION**.

Ce phénomène peut être plus ou moins important, selon le type de cristal.

Pour le **DIAMANT** maintenu à la température ambiante, ce phénomène est négligeable ; pour le **GERMANIUM**, à la température ambiante de 18°C environ, **UN ELECTRON SUR UN MILLIARD D'ATOMES**, passe de la **BANDE DE VALENCE** à la **BANDE DE CONDUCTION** (un électron sur 4 milliards d'électrons de valence, devient libre).

A première vue, en fonction des nombres donnés, on pourrait croire qu'un électron sur quatre milliards, constitue une quantité négligeable.

En réalité il faut tenir compte du fait que dans **UN CENTIMETRE CUBE DE GERMANIUM**, il y a environ 1×10^{22} atomes, ce qui donne environ dix mille milliards d'électrons libres.

Cette quantité n'est donc plus négligeable et suffit à rendre le cristal conducteur.

Mais que se passe-t-il dans le cristal, dans lequel un électron est devenu libre ?

CET ELECTRON SE PROMENE DE FACON DESORDONNEE DANS LES ESPACES DU RESEAU, contrairement aux ELECTRONS DE VALENCE qui parcourent les mêmes espaces sur des orbites bien définies.

D'autre part, à partir du moment où le **LIEN COVALENT** est rompu et que l'électron laisse une place libre, **IL SE CREE UN VIDE SUR UNE ORBITE.**

En un point du réseau, il existe donc un **TROU** (on dit aussi **CAVITE** ou **LACUNE**).

Ce phénomène est mis en évidence sur la figure 7 où l'on peut voir **QUATRE ELECTRONS LIBRES** (électrons de conduction) et aussi **QUATRE TROUS** (portant les numéros 1-2-3 et 4).

Le **TROU** représente une **CHARGE ELECTRIQUE** égale à celle de l'électron mais de signe inverse.

En effet, **L'ATOME EST NEUTRE AVEC TOUS SES ELECTRONS**. S'il en perd un, cet électron disponible représente une **CHARGE NEGATIVE DISPONIBLE** ; mais l'atome n'est plus **NEUTRE** puisqu'il a perdu un électron ; il acquiert donc une **CHARGE POSITIVE**, charge provenant des **PROTONS** dont l'influence n'est plus compensée par le même nombre d'électrons qu'à l'origine.

La figure 8 permet de mieux comprendre cette explication.

Ainsi, lorsque dans le cristal très pur il y a de nombreux électrons libres, il existe autant de trous.

Il ne faut pas cependant croire que ces trous occupent une position immuable.

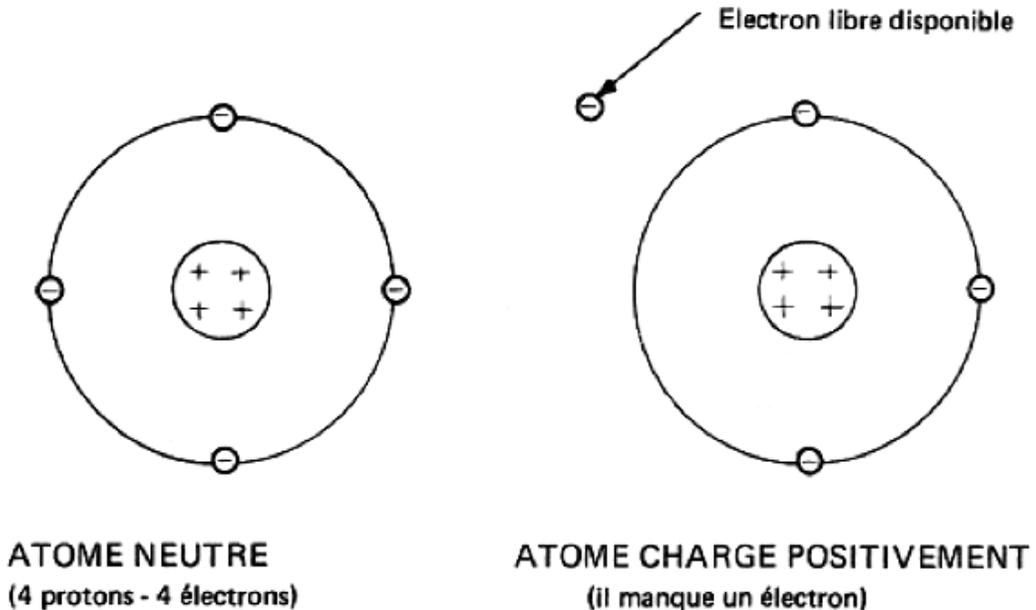


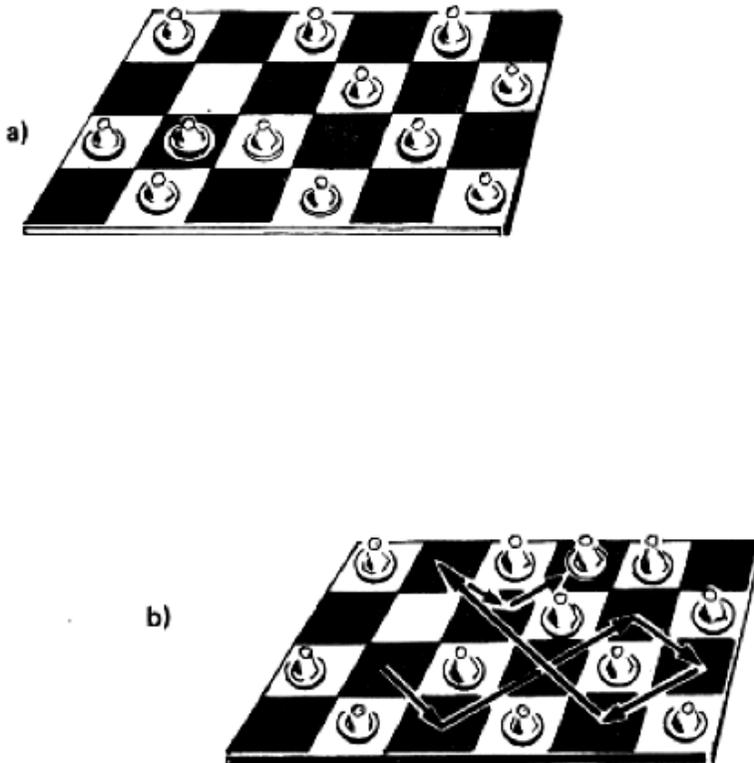
Figure 8

En effet, dès qu'un trou vient d'être créé par fuite d'un électron, il est presque instantanément occupé par un électron de valence. Ce trou disparaît donc, mais se reforme ailleurs dans la place laissée libre par l'électron de valence ci-dessus et ainsi de suite.

Nous pouvons donc retenir que les TROUS se déplacent d'un point à un autre du réseau, de façon imprévisible et désordonnée comme les électrons libres.

Le mouvement désordonné des ELECTRONS de CONDUCTION et DES TROUS, CONSTITUENT l'aspect fondamental de la conduction électrique dans les SEMI-CONDUCTEURS.

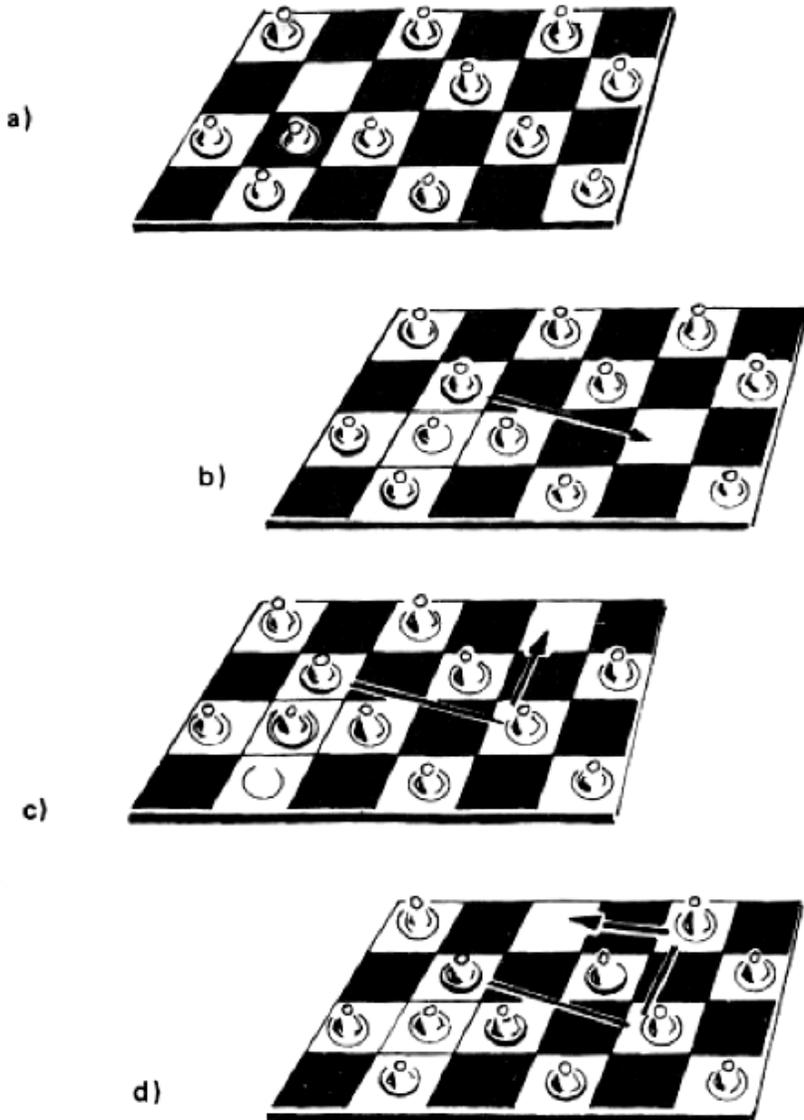
Les figures 9 et 10 permettent de bien illustrer les phénomènes décrits précédemment.



**REPRESENTATION DES DEPLACEMENTS D'UN ELECTRON LIBRE
DANS UN CRISTAL SEMI-CONDUCTEURS**

Figure 9

SEMI-CONDUCTEURS 1



REPRESENTATION DES DEPLACEMENTS D'UN TROU DANS UN CRISTAL SEMI-CONDUCTEURS

Figure 10

L'échiquier de la figure 9-a représente le réseau d'un cristal SEMI-CONDUCTEURS. Les pions se trouvant dans les cases blanches correspondent aux ELECTRONS de VALENCE et le PION se trouvant dans la case noire, à l'ELECTRON DE CONDUCTION.

La case blanche vide, représente le TROU créé par l'électron libre lors de son passage de la BANDE DE VALENCE à la BANDE DE CONDUCTION.

L'électron peut se déplacer de façon libre et désordonnée dans les espaces du réseau, tout comme le pion se trouvant dans la case noire peut être déplacé sur l'échiquier (figure 9-b).

Dans le même temps le TROU se déplace de façon désordonnée; son parcours n'est pas aussi simple que celui de l'électron libre.

En effet, pour qu'un TROU se déplace, il faut qu'un ELECTRON DE VALENCE vienne l'occuper, laissant ainsi un nouveau TROU libre, exactement comme pour déplacer la case blanche libre de la figure 10-a, il faut qu'elle soit occupée par le pion d'une autre case blanche.

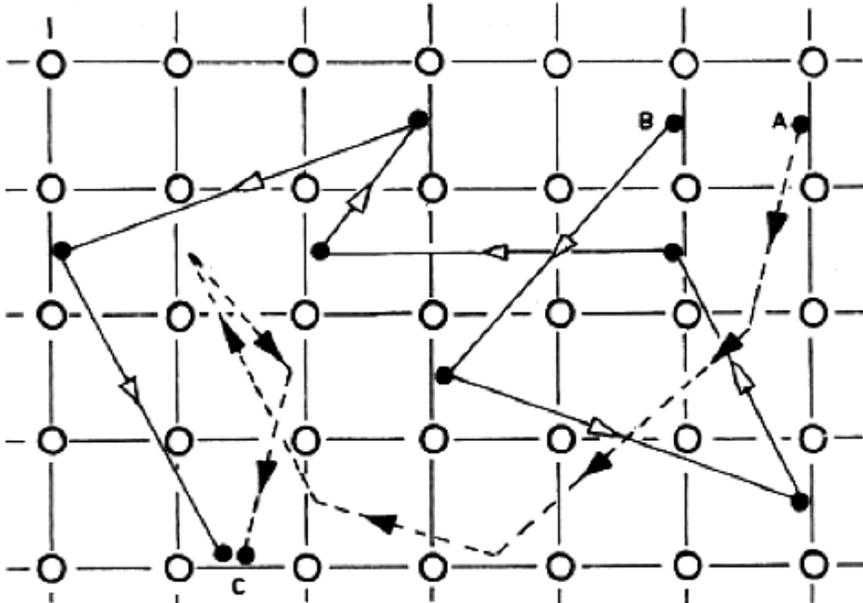
En répétant ce jeu avec d'autres pions (figures 10-b, 10-c et 10-d), la case blanche libre semble se promener de façon incohérente à travers l'échiquier, tout comme les TROUS dans le réseau du cristal.

En général le mouvement d'un ELECTRON LIBRE et celui d'un TROU, n'ont pas une durée illimitée.

En effet, en raison de l'agitation thermique de toutes les particules du cristal, l'électron libre à un moment donné, heurte un autre électron et perd ainsi son énergie.

De ce fait il est attiré par un TROU qui cesse ainsi d'exister.

La figure 11 illustre le parcours effectué par un électron libre et par un TROU.



PARCOURS D'UN ELECTRON ET D'UN TROU DANS UN CRISTAL - SEMI-CONDUCTEURS.

Figure 11

L'électron part de A et suit par exemple le chemin représenté en pointillé, pour arriver au point C.

En principe il se déplace le long de trajectoires rectilignes en changeant de direction toutes les fois qu'il heurte d'autres particules.

Quant au TROU, partant du point B et suivant la ligne en trait continu, il arrive lui aussi au point C où il disparaît, l'électron ayant perdu toute son énergie à la suite des chocs subis avec les particules.

Nous venons de voir jusqu'à présent les CRISTAUX SEMI-CONDUCTEURS TRES PURS et géométriquement PARFAITS, dans lesquels le nombre des électrons libres est exactement égal au nombre de trous.

Ces semi-conducteurs s'appellent des **SEMI-CONDUCTEURS INTRINSEQUES**.

Pour utiliser ceux-ci afin de réaliser des transistors, il faut modifier leur structure par un traitement approprié.

C'est ce que nous verrons dans la prochaine leçon **SEMI-CONDUCTEURS 2**.

NOTIONS A RETENIR

- LES TUBES ELECTRONIQUES et les TRANSISTORS font partie des COMPOSANTS ACTIFS, c'est-à-dire des composants en mesure de délivrer un signal, de puissance supérieure à la puissance du signal appliqué.
- Par rapport aux tubes électroniques, les transistors présentent les avantages suivants :
 - a) Dimensions nettement inférieures,
 - b) Absence de courant de chauffage,
 - c) Plus grande résistance mécanique,
 - d) Plus longue durée de vie.

Cependant, ils présentent aussi les inconvénients suivants :

- a) Fragilité électrique,
 - b) Stabilité médiocre,
 - c) Dispersion des caractéristiques (un transistor d'un type donné n'est pas forcément parfaitement identique à un transistor du même type).
- Pour évaluer les distances dans le domaine des ATOMES, on utilise comme unité de mesure l'ANGSTROM (symbole Å) correspondant au dix millionième de millimètre (1×10^{-7} mm) ou le MILLIMICRON (symbole $m\mu$) correspondant au millionième de millimètre (1×10^{-6} mm).

LE MILLIMICRON vaut donc 10 ANGSTROMS.

LES LIENS entre ATOMES sont constitués par l'ATTRACTION DE VAN DER VAALS et les LIENS CHIMIQUES.

- L'ATTRACTION de VAN DER VAALS est essentiellement ELECTROSTATIQUE.
- LES LIENS CHIMIQUES sont liés à un principe physique, connu sous le nom de PRINCIPE DE PAULI.
- LE LIEN CHIMIQUE est fonction de la VALENCE des atomes.
- LE LIEN COVALENT pouvant exister entre plusieurs atomes, consiste en un ECHANGE REPETE D'ENERGIE, dû au passage d'électrons d'un atome à un autre.
- LE GERMANIUM et le SILICIUM sont du type TETRAVALENT (quatre électrons sur la couche externe).
- Le terme TROU, CAVITE ou LACUNE représente une CHARGE ELECTRIQUE égale à celle de l'ELECTRON, MAIS DE SIGNE CONTRAIRE.
- UN SEMI-CONDUCTEUR est un corps dont la RESISTIVITE, TRES INFERIEURE A CELLE DES ISOLANTS mais bien SUPERIEURE A CELLE DES CONDUCTEURS, diminue lorsque la température augmente.



EXERCICE DE REVISION SUR LA LECON SEMI-CONDUCTEURS 2.

- 1) **Combien y-a-t-il d'électrons dans la couche externe des atomes de carbone, de germanium et de silicium ?**
- 2) **Quel lien existe-t-il entre les atomes, dans les cristaux du diamant, du germanium et du silicium ?**
- 3) **Qu'appelle-t-on les SEMI-CONDUCTEURS ?**
- 4) **Que désigne l'appellation : électrons de valence ?**
- 5) **Qu'appelle-t-on un TROU, dans un réseau cristallin ?**

