

SEMI - CONDUCTEURS

COURS DE BASE
ELECTRONIQUE

Dans la dernière leçon, nous avons parlé d'un élément essentiel à la fabrication des transistors : les SEMI-CONDUCTEURS INTRINSEQUE.

La conductivité de ceux-ci se situe, rappelons-le, entre celle d'un BON CONDUCTEUR et celle d'un ISOLANT.

Or, pour les transistors on n'utilise jamais ces SEMI-CONDUCTEURS INTRINSEQUE, c'est-à-dire PURS, mais des SEMI-CONDUCTEURS DOPES.

Il s'agit là de SEMI-CONDUCTEURS INTRINSEQUE auxquels on a ajouté une certaine quantité de substances étrangères, en vue de modifier l'état électrique du réseau.

Cette leçon va précisément nous permettre d'étudier les conséquences de la présence d'atomes étrangers, dans le réseau cristallin de semi-conducteur intrinsèque.

I - SEMI-CONDUCTEURS N ET SEMI-CONDUCTEURS P

Supposons qu'il soit possible d'intervenir directement dans la structure d'un minuscule cristal de germanium très pur et parfait, à l'intérieur duquel il y a un nombre bien défini D'ELECTRONS LIBRES et un nombre égal de TROUS.

Dans ce cristal et à tout moment, une partie des électrons libres revient à la **BANDE DE VALENCE**, à la suite de pertes d'énergie dues aux chocs, mais en même temps, d'autres électrons passent de la bande de valence à celle de **CONDUCTION**. Si la température du cristal reste constante, le nombre des électrons libres et des trous reste lui aussi constant.

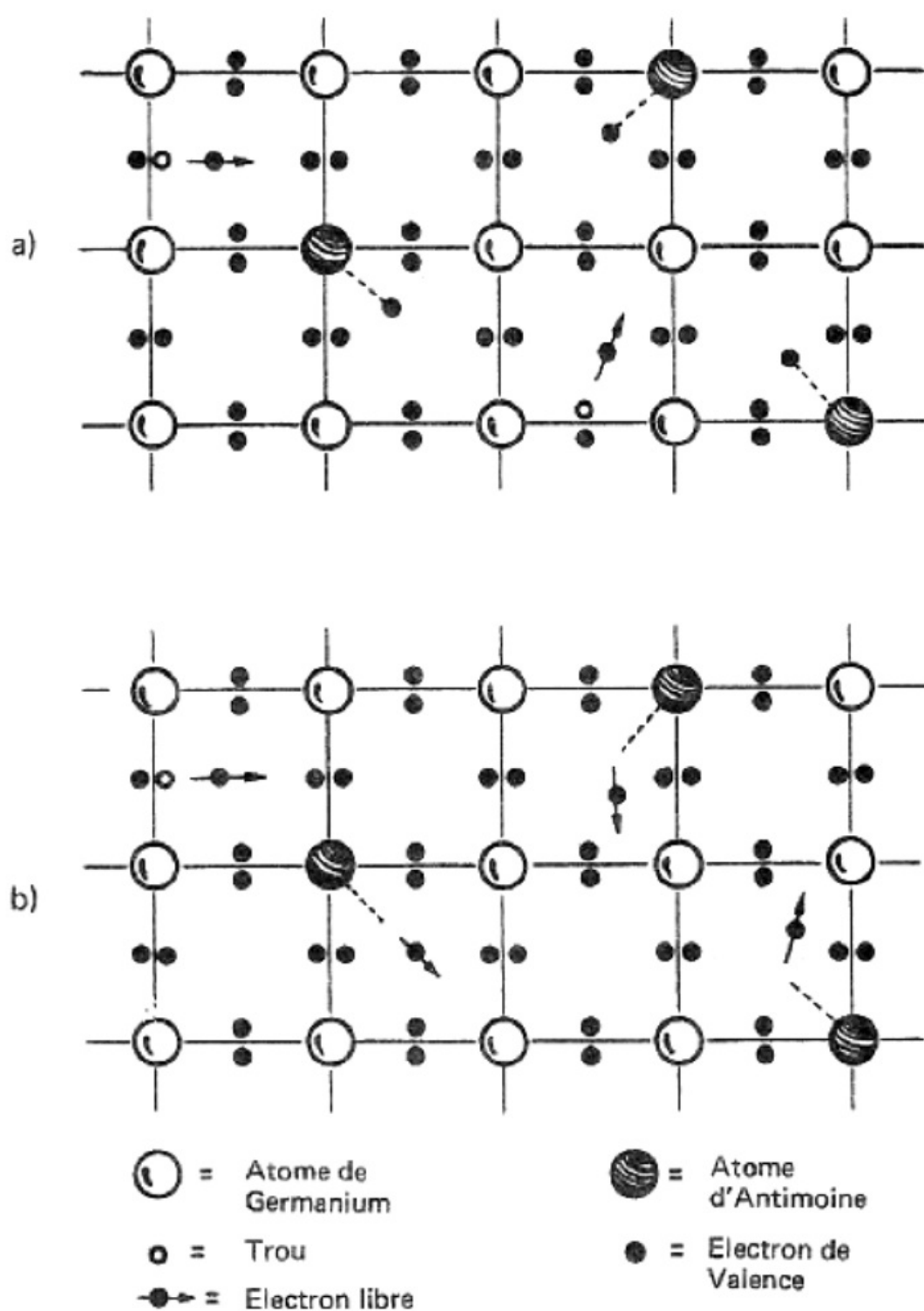
Imaginons maintenant que dans l'espace du réseau cristallin il y ait seulement deux électrons et deux trous. En intervenant dans la structure du cristal, on remplace trois atomes de germanium par autant d'atomes d'**ANTIMOINE** (figure 1-a).

Il s'agit là bien sûr d'un exemple dont le seul but est de faciliter la compréhension. En pratique, il n'arrive jamais qu'un cristal placé à la température ambiante normale, n'ait que deux électrons libres et deux trous et moins encore que le nombre des atomes d'antimoine corresponde à celui des électrons libres.

En réalité, les électrons libres et les trous contenus dans un centimètre cube de cristal sont plusieurs milliers de milliards et les atomes d'antimoine se trouvent à peu près dans le rapport de 1 sur 1 000 000 d'électrons libres.

L'antimoine est un élément qui appartient au groupe V de la classification de **MANDELEYEV**. La couche externe de son atome comporte en effet cinq électrons. Quatre de ces derniers contribueront à rétablir les **LIENS COVALENTS** avec les atomes de germanium proches, tandis que le cinquième, ne trouvant pas de place dans les liens covalents, restera lié à son propre atome.

Le lien entre le cinquième électron périphérique de l'antimoine et l'atome correspondant **N'EST TOUTEFOIS PAS AUSSI FORT QUE LES LIENS COVALENTS**. Il se cassera donc facilement et **LE CINQUIEME ELECTRON ENTRERA TRES RAPIDEMENT DANS LA BANDE DE CONDUCTION** pour se perdre dans les électrons libres du cristal.



CRISTAL DE GERMANIUM TYPE N

Figure 1

Revenons à l'exemple donné précédemment qui consistait à substituer trois atomes de germanium par trois atomes d'antimoine.

Par cette opération, on introduit dans le RETICULE du cristal, TROIS ELECTRONS LIBRES nouveaux qui, ajoutés aux deux premiers, portent le nombre des électrons libres, à cinq.

On pourrait penser que le réseau comprend ainsi cinq électrons libres et deux trous.

En réalité, passé un certain temps après la substitution du GERMANIUM par l'ANTIMOINE (et ceci lorsque la température reste constante), il peut n'y avoir dans le cristal que QUATRE ELECTRONS LIBRES et un SEUL TROU (figure 1-b).

On explique ce phénomène par le fait qu'un CERTAIN NOMBRE D'ELECTRONS libres OCCUPENT un NOMBRE EGAL DE TROUS, ce qui entraîne forcément la disparition des uns et des autres.

En définitif, par l'opération de SUBSTITUTION d'atomes de GERMANIUM par des atomes d'ANTIMOINE, on obtient bien une AUGMENTATION du nombre des ELECTRONS LIBRES, mais pas aussi importante que si tous les électrons fournis par les atomes d'antimoine, s'additionnaient aux électrons libres déjà existants.

Compte-tenu de ce qui vient d'être dit, nous pouvons déjà tirer la règle suivante :

Pour toute augmentation des électrons libres dans un cristal semi-conducteur à température constante, on a une diminution du nombre des trous, de manière à ce que le PRODUIT du nombre des électrons libres par le nombre des trous reste constant.

Dans l'exemple de la figure 1, nous avons au départ deux électrons libres et deux trous.

Le produit est donc de $2 \times 2 = 4$.

Après substitution des trois atomes de germanium par trois atomes d'antimoine, le nombre des électrons libres augmente, passant de 2 à 4, tandis que le nombre de trous diminue, passant de 2 à 1.

Le produit reste inchangé c'est-à-dire $4 \times 1 = 4$.

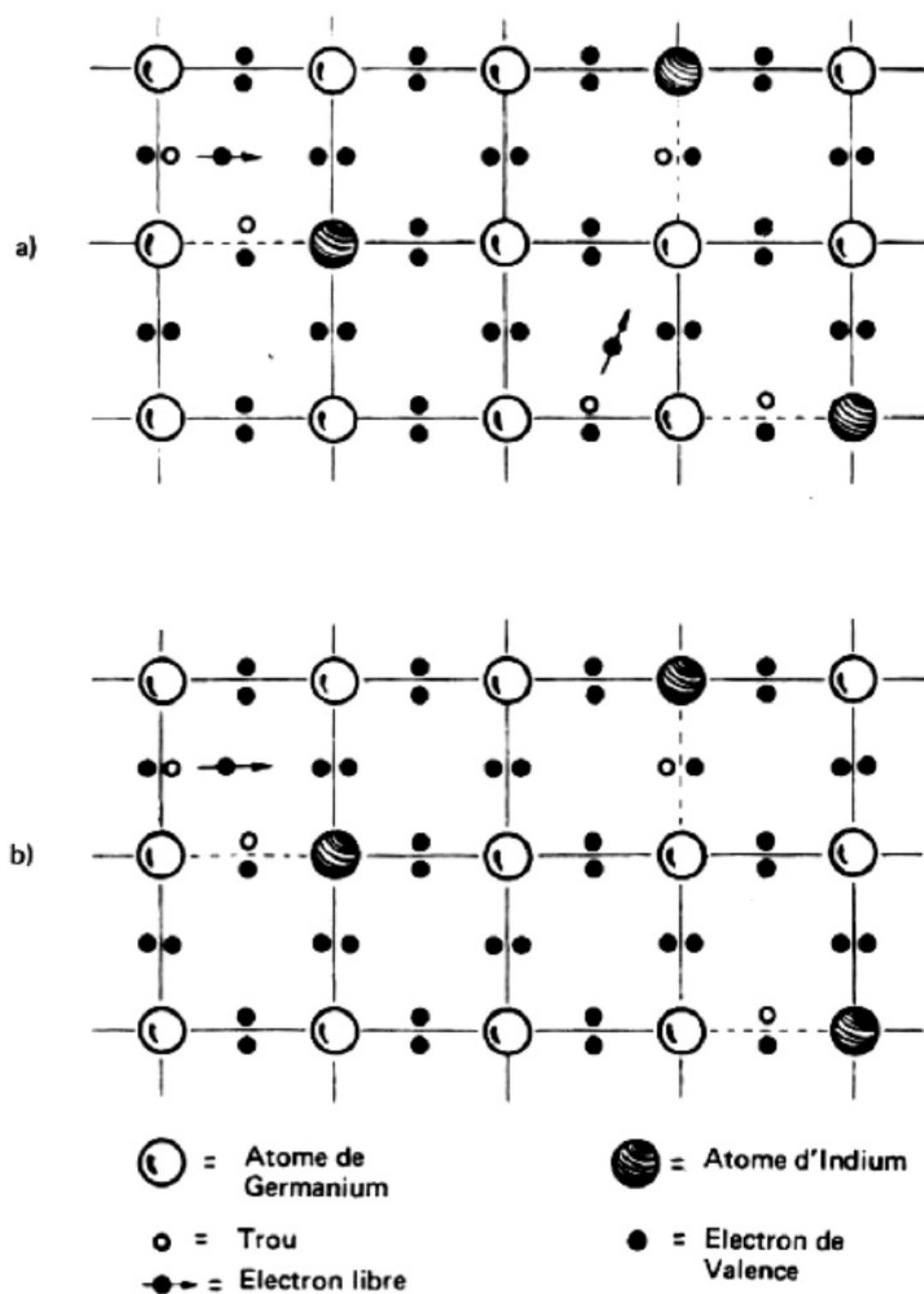
On obtient une situation analogue en remplaçant les trois atomes de germanium par trois atomes d'INDIUM (figure 2-a).

L'indium est un élément qui appartient au groupe III de la classification de MENDELEYEV. La couche externe de son atome comporte en effet trois électrons, c'est-à-dire un en moins par rapport aux quatre demandés pour compléter les liens covalents avec les atomes de germanium voisins.

Après substitution des TROIS ATOMES de GERMANIUM par TROIS ATOMES D'INDIUM, nous avons à l'intérieur du RETICULE CRISTALLIN, TROIS liens covalents AFFAIBLIS par l'absence de TROIS ELECTRONS, donc formation de TROIS NOUVEAUX TROUS.

Les liens affaiblis sont représentés figure 2 par les lignes en pointillé, allant des atomes d'indium à l'un des quatre atomes de germanium environnants.

LES TROUS qui apparaissent AVEC LES LIENS AFFAIBLIS sont représentés par des petits ronds blancs, comme ceux qui se sont formés dans les liens covalents, à la suite de la libération d'un électron de valence.



CRISTAL DE GERMANIUM TYPE P

Figure 2

Si l'on ajoute les TROIS TROUS introduits avec les atomes d'indium aux deux autres trous existant dans le germanium intrinsèque, nous devrions avoir cinq trous et deux électrons libres.

En réalité et toujours pour une température constante, nous pouvons n'avoir après substitution du germanium par l'indium que quatre trous et un seul électron libre (figure 2-b).

Là encore, on explique ce phénomène par le fait qu'une partie des électrons libres tombe dans les trous et y demeure.

En définitif, par l'opération de substitution d'atomes de GERMANIUM par des atomes D'INDIUM, on obtient bien une AUGMENTATION du nombre des TROUS, mais pas aussi importante que si tous les trous formés par la présence de l'INDIUM, s'ajoutaient aux TROUS déjà existants.

Nous pouvons ici encore en tirer la conclusion suivante :

POUR TOUTE AUGMENTATION DE TROUS dans un semi-conducteur à température constante, ON A UNE DIMINUTION D'ELECTRONS LIBRES, de manière à ce que le produit du nombre des trous par les électrons libres reste constant.

Dans l'exemple de la figure 2, comme dans celui de la figure 1, le produit initial des trous par les électrons libres est égal à 4.

Après substitution des trois atomes de germanium par les trois atomes d'indium, le nombre des trous augmente, passant de 2 à 4, tandis que le nombre des électrons libres diminue, passant de 2 à 1.

Le produit reste bien inchangé ($4 \times 1 = 4$).

Compte-tenu de ce qui vient d'être dit, on peut déjà départager les semi-conducteurs en trois catégories distinctes :

- LES SEMI-CONDUCTEURS INTRINSEQUE possédant un nombre d'électrons libres égal à celui des trous (figure 3-a).

- LES SEMI-CONDUCTEURS N, obtenus en introduisant dans un cristal semi-conducteur des atomes d'éléments appartenant au groupe V du tableau de MENDELEYEV. Ici, le nombre des électrons libres est bien supérieur à celui des trous (figure 3-b).

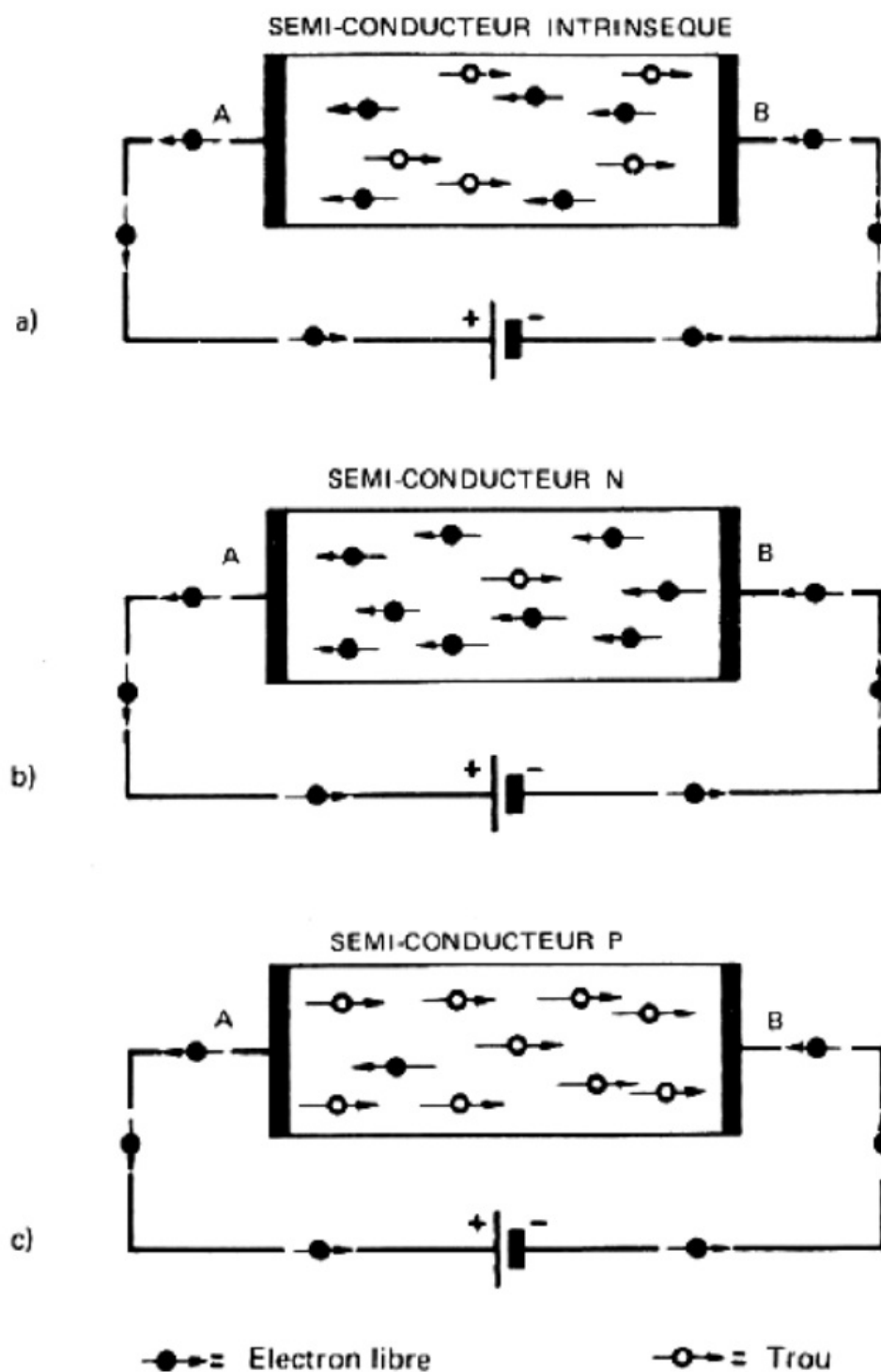
- LES SEMI-CONDUCTEURS P, obtenus en introduisant dans un cristal semi-conducteur des atomes d'éléments appartenant au groupe III du tableau de MENDELEYEV. Ici, le nombre des trous est bien supérieur à celui des électrons libres (figure 3-c).

Les éléments du groupe V du tableau de MENDELEYEV utilisés pour former les semi-conducteurs N sont l'ANTIMOINE, l'ARSENIC et le PHOSPHORE ; on les appelle **DONNEURS**.

Les éléments du groupe III utilisés pour former les semi-conducteurs P sont l'INDIUM, le BORE, le GALLIUM et l'ALUMINIUM ; on les appelle **ACCEPTEURS** ou **RECEVEURS**.

Voyons maintenant comment s'effectue la conduction électrique dans les trois types de semi-conducteurs énumérés ci-dessus.

a) La figure 3-a représente un petit bloc de germanium **INTRINSEQUE** traversé par le courant que produit une pile. On remarque à l'intérieur du semi-conducteur, la naissance de deux flux de charges électriques.



CIRCULATION DU COURANT ELECTRIQUE DANS LES SEMI-CONDUCTEURS

Figure 3

Le premier est constitué d'électrons libres qui vont de l'extrémité B (côté négatif de la pile) à l'extrémité A (côté positif de la pile). Le second flux est constitué de trous qui en se déplaçant d'un atome à l'autre à l'intérieur du réseau cristallin, vont dans le sens opposé au précédent, c'est-à-dire de l'extrémité A vers l'extrémité B.

Les deux flux sont constitués de quantités égales de charges électriques, puisque dans le semi-conducteur intrinsèque, le nombre des électrons est égal à celui des trous.

Les liaisons placées entre l'extrémité du semi-conducteur et la pile sont au contraire traversées par un seul flux constitué **UNIQUEMENT PAR DES ELECTRONS**.

Signalons que le courant produit par une pile est continu et que son intensité est invariable dans chaque section et en tout point du conducteur.

Cela signifie qu'à tout instant, la même quantité d'électrons entre dans le fil conducteur par l'extrémité A et sort par l'extrémité B. La même quantité d'électrons sort et entre également par les extrémités du petit bloc (figure 3-a).

Pour simplifier tout cela, imaginons qu'à l'intérieur du semi-conducteur et à tout instant, **UN ELECTRON** sort par l'extrémité A et qu'un autre électron entre par l'extrémité B. Nous constatons donc que le nombre des électrons entrants est toujours égal à celui des électrons sortants.

L'électron sortant appartient à la **BANDE DE CONDUCTION**, c'est-à-dire qu'il s'agit d'un électron libre. Ainsi, n'ayant pas de liens avec le réseau cristallin, il peut librement quitter le semi-conducteur et se diriger vers le positif de la pile.

A l'autre extrémité, l'électron entrant rencontre les trous qui peuvent se déplacer dans le réseau et se concentrer dans l'extrémité reliée au négatif de la pile, mais ne peuvent toutefois pas quitter le réseau. Ces trous sont en effet constitués essentiellement de places vides dans la bande de valence des atomes du semi-conducteur.

Lorsque l'électron provenant du négatif de la pile rencontre les trous, il occupe une place vide dans la bande de valence, faisant ainsi disparaître un trou.

En résumant ce qui vient d'être dit, nous pouvons tirer la conclusion suivante :

Lorsqu'un électron sort et qu'un autre entre, on a en permanence dans le semi-conducteur, la perte d'un électron libre et la disparition d'un trou.

Si ce processus se répétait autant de fois qu'il y a d'électrons libres ou de trous, on pourrait s'attendre à ce qu'à un certain moment le semi-conducteur reste sans électrons libres et sans trou.

En réalité, le nombre d'électrons libres et de trous présents dans le réseau dépend exclusivement de la température du matériau.

En effet, si la température du bloc semi-conducteur reste constante, POUR CHAQUE COUPLE ELECTRON-TROU DISPARU, IL SE FORME EN UN POINT DU SEMI-CONDUCTEUR UN AUTRE ELECTRON LIBRE ET UN AUTRE TROU.

Ainsi, les deux flux, celui des électrons libres (qui va de l'extrémité B à l'extrémité A) et celui des trous (qui dans le même semi-conducteur circule en sens inverse) sont alimentés en continuité, tant que dure la production de courant par la pile.

b) Dans un bloc de semi-conducteur N traversé par le courant délivré par une pile (figure 3-b), les phénomènes de la conduction électrique diffèrent de ceux qui viennent d'être décrits, étant donné que le nombre d'électrons libres est supérieur au nombre de trous.

Dans ce cas, il se forme à l'intérieur du semi-conducteur deux flux de charges électriques, l'un étant plus fort que l'autre. Les électrons libres qui constituent le flux supérieur sont appelés **PORTEURS MAJORITAIRES**, tandis que les trous qui constituent le flux inférieur sont appelés **PORTEURS MINORITAIRES**.

Il y a en effet, dans le semi-conducteur N, beaucoup plus d'ELECTRONS LIBRES que de TROUS.

On peut donc facilement comprendre qu'une grande partie des électrons provenant de l'extrémité B, traverse facilement le bloc semi-conducteur, en restant toujours dans la bande de conduction.

c) Dans le semi-conducteur P (figure 3-c), il se forme également deux flux, mais cette fois, **LE FLUX LE PLUS FORT EST CONSTITUE DE TROUS** (porteurs majoritaires) et **LE FLUX LE PLUS FAIBLE, d'ELECTRONS LIBRES** (porteurs minoritaires).

Il est donc peu probable qu'un électron libre puisse traverser tout le bloc de l'extrémité B à l'extrémité A.

Les électrons libres qui sortent du semi-conducteur et les trous qui vont d'une extrémité à l'autre de ce même semi-conducteur, prennent naissance en général à proximité de l'extrémité A.

A partir de ce point, les deux charges opposées se séparent. L'électron se dirige vers le pôle positif de la pile à travers la liaison et le trou se dirige vers l'extrémité B du bloc, où il disparaîtra dès que sa place sera occupée par un électron provenant du négatif de la pile.

Après avoir examiné la structure interne et le comportement des semi-conducteurs, voyons l'utilisation pratique de ceux-ci.

II - DISPOSITIFS A SEMI-CONDUCTEURS

La famille des dispositifs utilisant les semi-conducteurs comprenant principalement le TRANSISTOR est très importante et s'est encore accrue durant ces dernières années ; mais elle n'est toutefois pas aussi nouvelle que le récent intérêt pour les transistors peut le faire croire.

En effet, les premiers composants électriques utilisant les semi-conducteurs sont antérieurs à l'apparition du tube électronique et même de la radio. Quelques dates suffiront à indiquer les principales étapes du développement des semi-conducteurs.

- 1834 - M. FARADAY, étudie le comportement de certaines substances (les semi-conducteurs) qui conduisent l'électricité de façon inhabituelle.

- 1870 - BRAUN et SCHUSTER découvrent l'effet redresseur des pointes métalliques au contact des cristaux de sulfures métalliques, BRANLY, en poursuivant ces études, découvre l'effet redresseur dans le cuivre oxydé.

- 1876 - Construction de la première photocellule au sélénium.

- 1879 - HALL découvre l'action exercée par les champs magnétiques sur la distribution du courant dans les semi-conducteurs ainsi que dans les métaux.

- 1886 - WINKLER découvre le germanium.

- 1889 - Construction des premiers redresseurs au sulfure de plomb (galène).
- 1920 - Construction des premiers redresseurs au sélénium.
- 1925 - Construction des premiers redresseurs à oxyde de cuivre.
- 1938 - Construction des premiers redresseurs à cristal de silicium.
- 1940 - Construction des premières thermistances (résistances dont la valeur diminue avec l'augmentation de la température).
- 1941 - Construction des premières diodes au germanium.
- 1946 - Construction de la première phot cellule au silicium.
- 1948 - J. BARDEEN et W. H. BRATTAIN construisent le premier transistor à pointe.
- 1951 - Apparition du transistor à jonction, étudié théoriquement par W. SHOCKLEY.
- 1952 - Construction de la tétrode à semi-conducteurs.
- 1955 - Construction du transistor au silicium.
- 1956 - Construction du transistor à diffusion.
- 1957 - Construction de la diode tunnel.
- 1958 - Construction du circuit intégré.

Depuis 1960, on a assisté à de remarquables perfectionnements dans la technique de la diffusion (transistors planars, épitaxiaux, à effet de champ "F.E.T", à unijonction "U.J.T").

On a également approfondi les techniques existant déjà en réalisant de nouveaux composants, comme les diodes de régulation "ZENER", les diodes à capacité variable "VARICAP", les diodes servant à capter la lumière "PHOTODIODE".

Avant d'aborder l'étude du principal dispositif à semi-conducteurs, c'est-à-dire le TRANSISTOR, voyons pour commencer le fonctionnement et le rôle de la DIODE A CRISTAL.

III - LA DIODE A CRISTAL

Parmi les premiers dispositifs à semi-conducteurs, nous trouvons le REDRESSEUR A GALENE, dont l'emploi fut très répandu comme détecteur aux débuts de la radio.

Le détecteur à galène était essentiellement constitué d'un aggloméré de cristaux de sulfure de plomb et d'une pointe métallique. En manipulant la pointe à l'aide d'une poignée isolante, on établissait un contact sur la surface du cristal.

Le contact entre la pointe et le cristal était généralement provisoire et précaire, mais lorsqu'on le maintenait, il se comportait comme une diode électronique c'est-à-dire qu'il manifestait LA PROPRIETE DE LAISSER PASSER LE COURANT SEULEMENT DANS UN SENS ET S'OPPOSAIT A SON PASSAGE DANS LE SENS OPPOSE.

De nos jours, le détecteur à galène n'est plus utilisé et a très avantageusement été remplacé par la **DIODE ELECTRONIQUE** et plus récemment par la diode **A CRISTAL DE SILICIUM** et par la diode **à CRISTAL DE GERMANIUM**, encore appelées **DIODES A POINTE**.

Les diodes à pointe sont constituées comme on peut le voir figure 4. On utilise une plaquette de germanium du type N et une pointe de tungstène (figure 4-a). Cette pointe n'est pas soudée sur la plaquette, mais simplement maintenue en contact avec elle (la pointe faisant ressort).

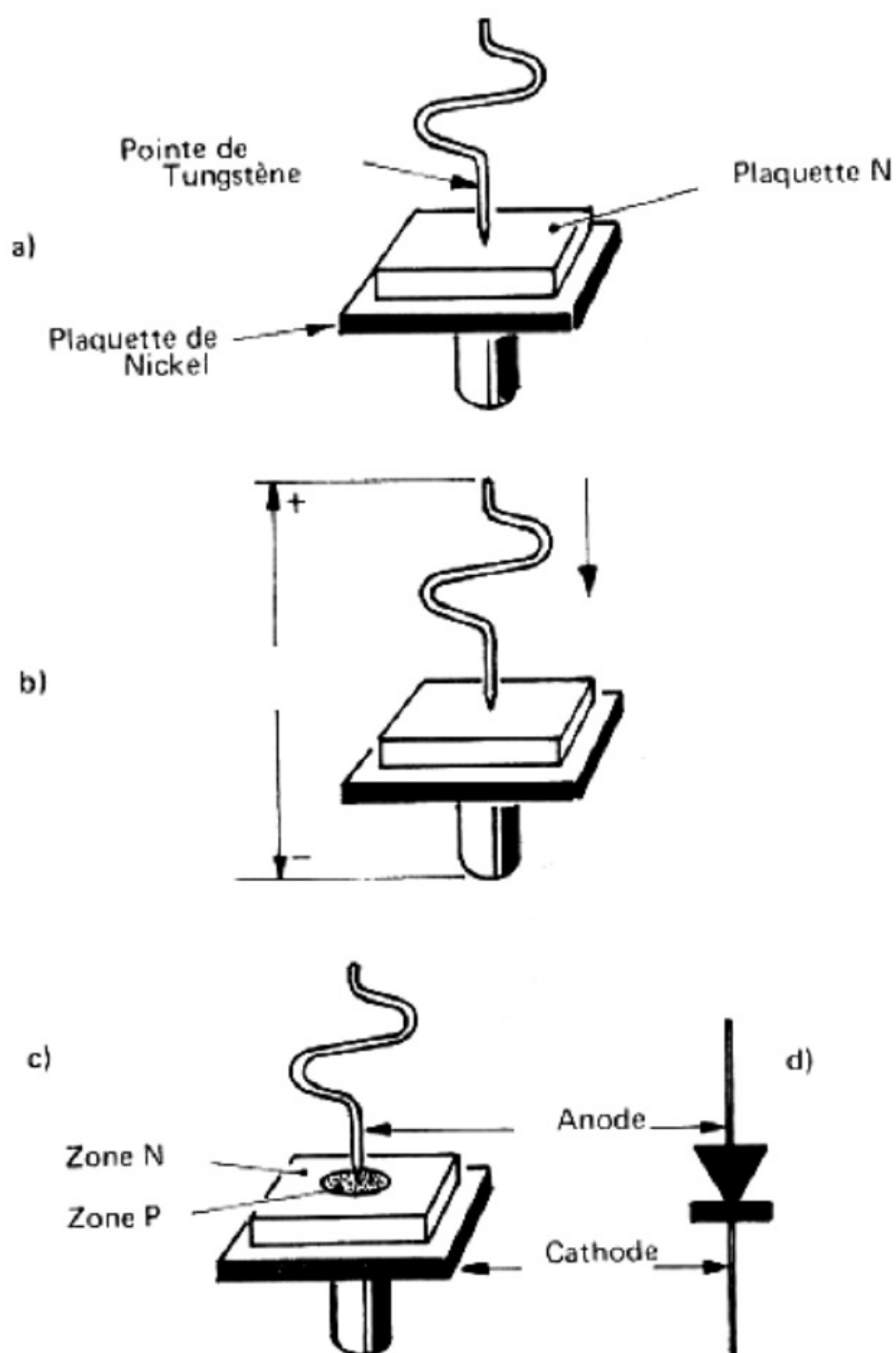
Après la fermeture de l'enveloppe de protection, on fait passer un courant d'intensité donnée, à travers la pointe de tungstène et la plaquette de germanium, dans le sens indiqué figure 4-b.

Au point de contact, il se produit une fusion, assurant ainsi une connexion parfaite. Cette opération a aussi un autre but. Les atomes de tungstène en se répandant dans le germanium, forment une zone P, au voisinage immédiat de la pointe (figure 4-c).

On obtient ainsi une jonction P.N. La zone P, correspondant au côté de la pointe est dite **ANODE (a)** tandis que la zone N, constituée par la plaquette, initialement mise en contact avec la pointe est appelée **CATHODE (K)**. La figure 4-d représente le signe graphique utilisé pour la représentation schématique d'une diode.

IV - LA JONCTION P.N.

Les propriétés de la diode à cristal dépendent uniquement de phénomènes qui se manifestent aux points de contact situés entre la zone P et la zone N du semi-conducteur.



CONCEPTION D'UNE DIODE A POINTE

Figure 4

Nous savons déjà que les cristaux de type P contiennent des trous comme porteurs majoritaires tandis que les cristaux de type N contiennent des électrons libres comme porteurs majoritaires.

Voyons le comportement des porteurs majoritaires lorsqu'il se forme une JUNCTION entre deux semi-conducteurs de types différents, c'est-à-dire entre un cristal P et un cristal N (figure 5-a).

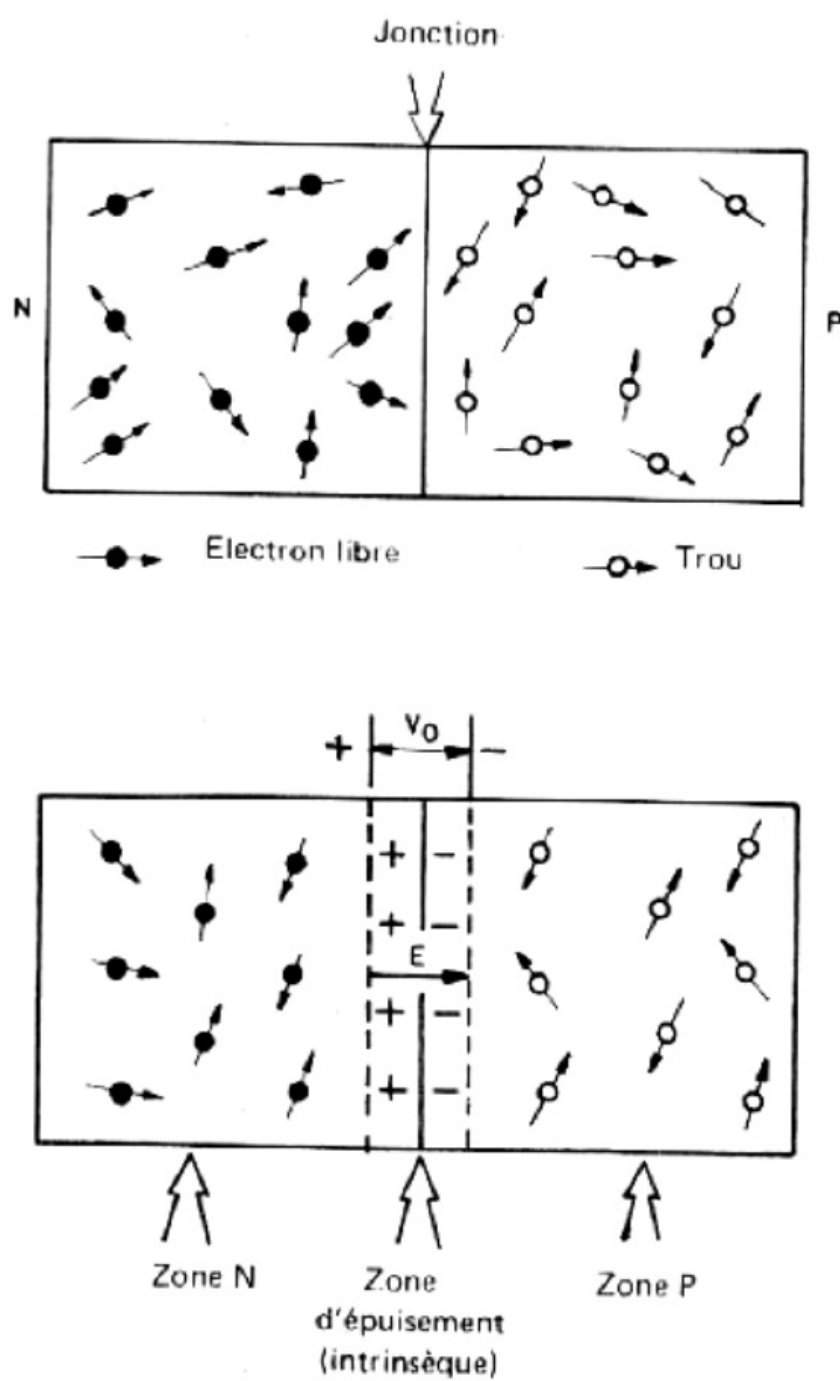
En pratique, la jonction s'établit en formant par des moyens techniques spéciaux une zone P dans un monocristal N ou inversement, une zone N dans un monocristal P. Par contre, il est impossible d'unir deux cristaux de types différents pour former une jonction P.N.

Toutefois et ceci afin de mieux comprendre ce qui se passe au niveau d'une jonction, nous représenterons cette dernière par l'union de deux plaquettes différentes de germanium.

Lorsque la jonction est effectuée, une partie des électrons libres du cristal N, sous l'effet de l'agitation thermique, commence à se répandre dans le cristal P et en même temps, toujours sous la poussée de l'agitation thermique, une partie des trous du cristal P commence à se répandre dans le cristal N.

Dans un premier temps, la diffusion des électrons et des trous s'effectue avec une certaine régularité dans les deux sens. Théoriquement, si l'on maintient ce rythme pendant un temps suffisamment long, on arrive à un état final dans lequel les électrons libres et les trous sont uniformément distribués dans les deux cristaux.

En réalité, la diffusion s'arrête, bien avant d'occuper entièrement les deux cristaux et ainsi, il se forme autour de la surface de jonction une seule zone (relativement mince), dans laquelle sont mélangés en quantités égales les électrons libres et les trous.



FORMATION D'UNE JONCTION P.N.

Figure 5

Dans la phase finale, nous obtenons donc trois zones distinctes :

- Une zone N : constituée par la partie N du cristal, non occupée par les trous provenant du cristal P.
- Une zone P : constituée par la partie du cristal P, non occupée par les électrons libres provenant du cristal N.

Nous trouvons enfin sur les bords de la surface de jonction, LA NOUVELLE ZONE QUE L'ON PEUT APPELER "INTRINSEQUE", en considérant qu'elle contient un nombre égal d'électrons libres et de trous (figure 5-b). Il ne faut toutefois pas considérer cette nouvelle zone comme rigoureusement intrinsèque.

En effet, la distribution des charges libres n'est pas uniforme comme dans les semi-conducteurs intrinsèques. Pour qualifier ce phénomène, on utilise l'appellation anglaise DEPLETION REGION, que l'on peut traduire par ZONE D'ÉPUISEMENT, rappelant ainsi que dans la zone en question, la poussée de diffusion des charges libres provenant des deux cristaux réunis, s'épuise.

En étudiant les phénomènes qui prennent naissance tout de suite après la formation d'une jonction P.N, nous nous sommes limités jusqu'ici à observer les déplacements des électrons libres et des trous, sans tenir compte des réticules cristallins dans lesquels s'effectue la diffusion des charges.

En réalité, les deux réticules cristallins exercent une grande influence sur la diffusion. En effet, c'est à partir des caractéristiques électriques des réticules, que naît le plus grand obstacle pour l'achèvement de la diffusion des charges dans les deux cristaux.

Lorsque les électrons qui sortent du cristal N entre dans le réticule du cristal P et que les trous sortant du cristal P se propagent dans le réticule du cristal N, il se produit aux extrémités des deux réticules en contact, deux nouveaux états électriques.

En effet, sur l'extrémité du cristal N, il se forme une accumulation d'électricité positive, due à la perte d'électrons et à l'acquisition de trous, tandis qu'à l'extrémité du cristal P, nous trouvons une accumulation d'électricité négative, due à la perte de trous et à l'acquisition d'électrons.

La séparation des charges de signes opposés produit un champ électrique E , circulant de l'extrémité positive du cristal N à l'extrémité négative du cristal P (figure 5-b).

Ce champ électrique agit de façon à s'opposer à la diffusion des charges à travers la jonction, dans la mesure où il tend à ramener les trous du cristal N au cristal P et les électrons du cristal P au cristal N.

Avec la croissance de l'intensité du champ E et la diffusion des charges qui se poursuit, la force de rappel des charges augmente également. Ainsi, la poussée de la diffusion trouvera de plus en plus d'opposition, jusqu'à ce que l'équilibre entre les forces opposées soit atteint, provoquant alors la cessation de toute diffusion des charges dans les deux cristaux.

Avec l'équilibre établi entre la force du champ électrique et la poussée de diffusion, il se forme aussi une SEPARATION entre une certaine quantité de charges positives et négatives sur les deux bords de la ZONE D'EPUISEMENT.

Par conséquent, aux bords de cette dernière, une certaine différence de potentiel (V_0 de la figure 5-b) reste constante et pour cette raison on l'appelle couramment mais improprement, POTENTIEL DE CONTACT ou encore POTENTIEL DE DIFFUSION.

A l'avenir, lorsque nous parlerons de cette différence de potentiel V_0 , nous utiliserons la dénomination BARRIERE DE POTENTIEL.

Ce terme, plus correct que le précédent, rappelle l'obstacle que le potentiel V_0 représente, pour la diffusion ultérieure des charges électriques d'un cristal à l'autre.

C'est donc de cette BARRIERE DE POTENTIEL V_0 qui se forme au niveau de la jonction P.N. QUE DEPENDENT toutes LES PROPRIETES DE LA DIODE A CRISTAL.

V - POLARISATION DES DIODES

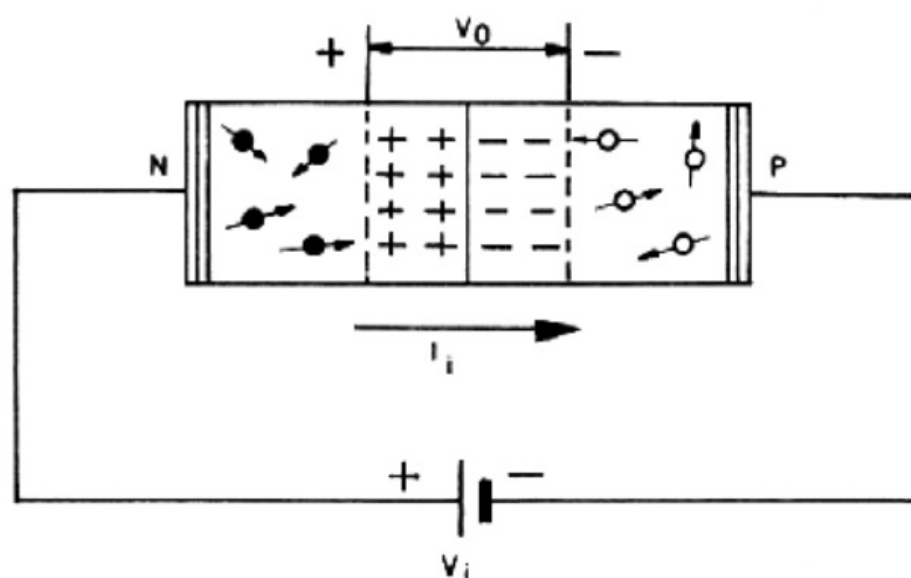
Après avoir examiné la formation d'une jonction entre deux semi-conducteurs de types différents, voyons maintenant le comportement de celle-ci lorsqu'elle est POLARISEE, c'est-à-dire lorsque la tension délivrée par une source d'alimentation continue est appliquée aux deux zones du cristal.

La tension peut être appliquée dans les deux sens c'est-à-dire, en reliant le positif de la pile à la zone N et le pôle négatif à la zone P ou inversement, en reliant le positif à la zone P et le négatif à la zone N.

Dans le premier cas, on dit que la jonction (c'est-à-dire, la diode) est polarisée INVERSEMENT, tandis que dans le second cas la diode est polarisée DIRECTEMENT.

Que se passe-t-il au niveau de la jonction P.N. lorsque celle-ci est polarisée INVERSEMENT ?

La figure 6 montre qu'à l'instant où le circuit est fermé, une partie des ELECTRONS LIBRES se détache de la zone N du cristal et se dirige vers le pôle positif de la batterie d'alimentation.



TENSION ET COURANT INVERSE DE LA DIODE

Figure 6

Au même instant, une certaine quantité d'électrons émis par le négatif de la batterie, rejoignent la zone P du cristal, où ils feront disparaître une partie des trous.

Si maintenant nous admettons que dans la zone P, il n'y a pas d'électrons libres qui puissent rejoindre la zone N pour remplacer ceux qui sont repoussés vers le positif de la pile et que dans la zone N, il n'y ait pas de trous qui puissent se propager jusqu'à la zone P afin de remplacer ceux qui ont disparu, nous pourrions conclure à la cessation du mouvement des charges circulant du cristal à la batterie et de la batterie au cristal.

En effet, le nombre des électrons libres présents dans la zone N du cristal est incontestablement très grand, mais non illimité ; il en est de même pour les trous présents dans le cristal P.

Le fait que les électrons et les trous sont en nombre limité dans l'une ou l'autre zone du cristal et l'impossibilité de les remplacer lorsqu'ils s'éloignent et qu'ils disparaissent, sont déjà suffisants pour justifier l'annulation du courant produit par la pile aussitôt après fermeture du circuit.

Dans la réalité, le déplacement des charges et par conséquent, le courant produit par la pile, cesse avant même que la zone N ne se soit libérée de ses électrons et la zone P de ses trous.

Pour expliquer ce phénomène, sachons que la barrière de potentiel se renforce rapidement avec la diminution des électrons libres et des trous dans les zones respectives et son amplitude augmente en passant de V_0 à V_0' (comparez à ce sujet les figures 5-b et 6).

La nouvelle différence de potentiel V_0' peut ainsi annuler l'effet de la tension extérieure V_i , avant que tous les électrons de la zone N ne soient repoussés vers le positif de la pile et avant que tous les électrons de la zone P n'aient disparu.

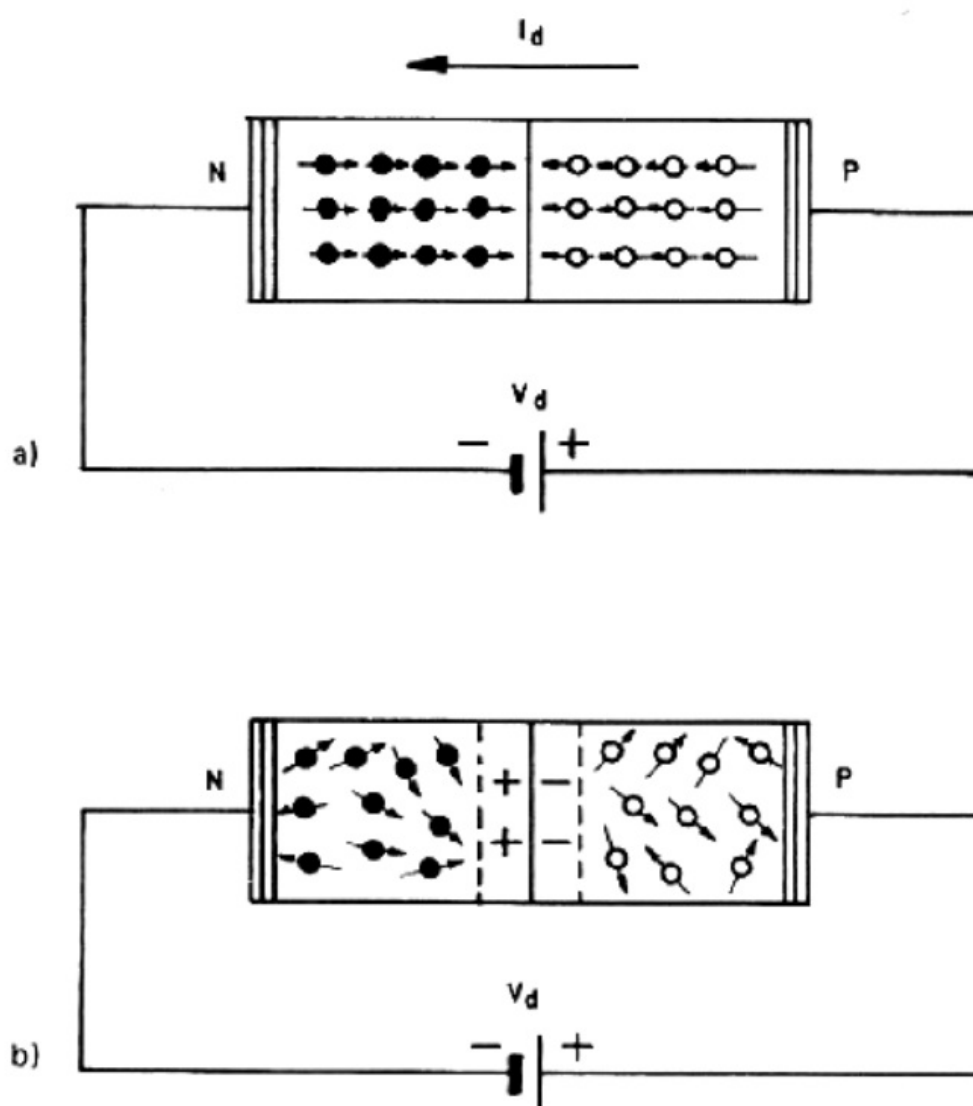
La tension V_i appliquée aux bornes de la diode (figure 6) est dite TENSION INVERSE. Si l'on tient compte de ce qui a été dit précédemment, le courant circulant dans la diode (aux bornes de laquelle on a appliqué une tension inverse) devrait s'annuler rapidement.

En réalité, le courant ne s'annule pas complètement du fait de la présence des porteurs minoritaires, c'est-à-dire de la présence de trous dans la zone N du cristal et d'électrons libres dans la zone P.

Un certain nombre de porteurs minoritaires réussit toujours à traverser la jonction, provoquant ainsi un remplacement partiel des électrons libres dans la zone N et des trous dans la zone P.

On constate donc la présence d'un courant très faible, circulant de l'extrémité N à l'extrémité P du cristal. Ce courant est appelé **COURANT INVERSE** (I_i).

Voyons maintenant le phénomène inverse, c'est-à-dire lorsque la jonction P.N. est **DIRECTEMENT POLARISEE** (figure 7-a).



TENSION ET COURANT DIRECT DE LA DIODE

Figure 7

Lorsque le circuit est fermé (figure 7-a) la force électro-motrice de la batterie met en mouvement les électrons libres de la zone N et les trous de la zone P, qui convergent tous deux vers la jonction (figure 7-a), à l'intérieur de laquelle les électrons tombent dans les trous, ce qui entraîne la disparition des uns et des autres.

Cependant, les électrons libres qui tombent dans les trous, sont continuellement remplacés par d'autres, provenant du négatif de la source d'alimentation.

Ainsi, tous les trous disparus sont remplacés par d'autres, qui se forment du côté de la zone P, vers le positif de la batterie. Le flux des charges se reproduit donc perpétuellement, formant un COURANT CONTINU. On le constate d'ailleurs en mesurant la résistance directe de la diode.

Le courant continu I_d est dit COURANT DIRECT, la tension extérieure, V_d qui est à l'origine de la formation du courant I_d , est dite TENSION DIRECTE.

La figure 7-b illustre le cas où la tension continue V_d est inférieure à la différence de potentiel V_o (figure 5-d), qui constitue LA BARRIERE DE POTENTIEL. Ainsi, tant que la tension V_d est inférieure ou égale à V_o , le courant est pratiquement nul. Ce courant n'existe pratiquement que lorsque la tension V_d dépasse la valeur de V_o .

VI - FONCTIONNEMENT DE LA DIODE A CRISTAL

La diode à cristal (germanium ou silicium) présente les mêmes propriétés que celles de la diode électronique. Sa particularité essentielle

est comme nous le savons déjà de CONDUIRE LE COURANT DANS UN SENS ET S'OPPOSER A SON PASSAGE DANS L'AUTRE.

Cette définition un peu sommaire peut-être exprimée de façon plus complète en utilisant la COURBE CARACTERISTIQUE TENSION-COURANT.

Pour le relevé de cette courbe caractéristique, il est nécessaire de réaliser deux circuits. Le premier pour mesurer la TENSION DIRECTE et le COURANT DIRECT (circuit A, figure 8) et l'autre pour mesurer la TENSION INVERSE et le COURANT INVERSE (circuit B, figure 8).

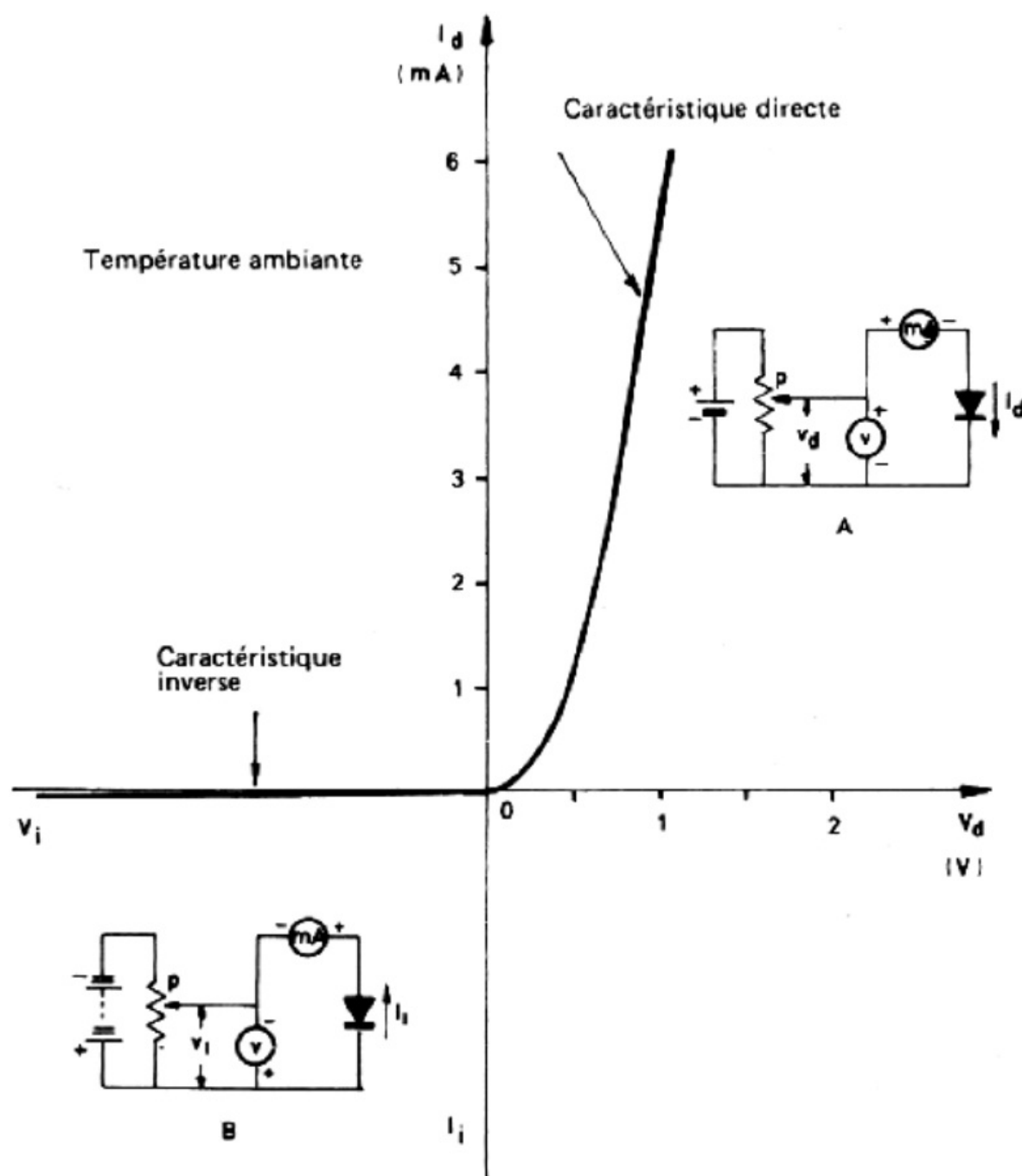
Avec le premier circuit, il est possible de construire la CARACTERISTIQUE DIRECTE de la diode ; avec le second, on construit la CARACTERISTIQUE INVERSE, en prolongeant la courbe à gauche de l'origine (0) du système d'axes cartésiens (figure 8).

L'ensemble des caractéristiques DIRECTE et INVERSE constitue la caractéristique TENSION-COURANT de la diode.

Nous remarquons que la caractéristique directe est pratiquement semblable à celle de la diode électronique étudiée dans les leçons de Théorie. Par contre, il n'en est pas de même pour la caractéristique inverse.

On explique facilement cette différence en rappelant qu'à travers la jonction P.N, il passe un certain courant même lorsqu'on applique à la diode une tension inverse (V_i) c'est-à-dire lorsque passe le courant inverse (I_i).

Par contre, il n'y a aucun passage de courant lorsqu'on applique une tension inverse entre l'anode et la cathode d'une diode, c'est-à-dire lorsque l'anode est négative par rapport à la cathode.



COURBE CARACTERISTIQUE D'UNE DIODE AU GERMANIUM (OA81)

Figure 8

La différence est toutefois plus apparente que réelle, puisqu'en pratique, le courant inverse de la diode à semi-conducteur reste toujours négligeable pendant le fonctionnement normal. On peut donc ne pas tenir compte de la caractéristique inverse et ne considérer que la caractéristique directe.

Les données techniques des diodes à cristal, publiées par les constructeurs, renseignent souvent sur la caractéristique inverse pour les redresseurs au silicium et pour certains types de redresseurs au germanium.

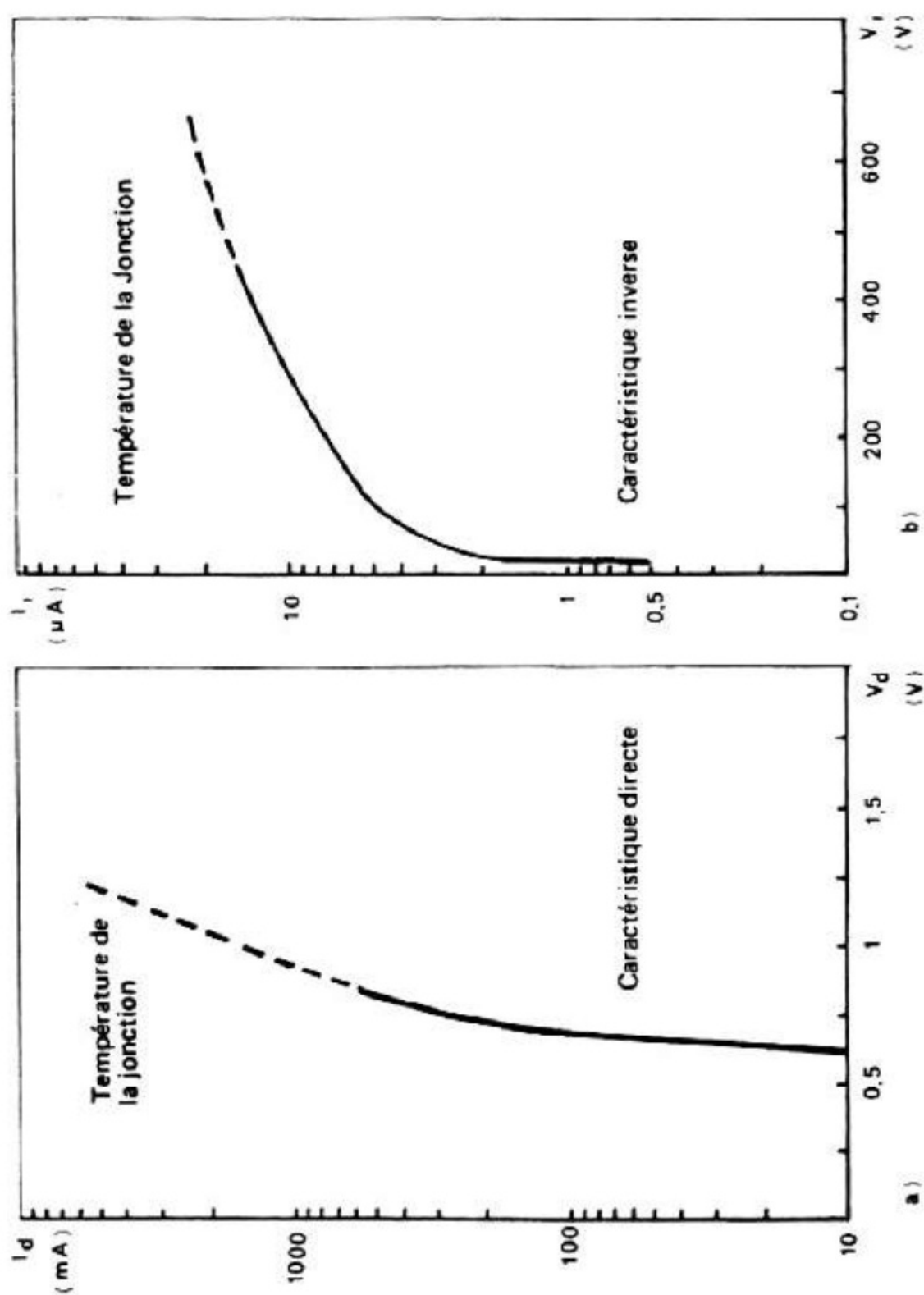
Certains donnent également les deux caractéristiques dans des graphiques séparés, en exprimant le courant direct (I_d) en milliam-pères (mA) et le courant inverse (I_i) en microampères (μA).

La séparation des graphiques et l'emploi des divers sous-multiples pour exprimer les courants ($1 \text{ mA} = 1000 \mu A$) sont justifiés par le fait que les courants inverses sont très faibles, alors que les tensions correspondantes sont relativement hautes.

D'autre part, les courants directs sont considérablement plus intenses que les courants inverses, alors que les tensions directes sont relativement basses.

L'exemple de la figure 9, donne les deux caractéristiques de la diode au silicium BY 114. Dans la figure 9-a, on trouve la CARACTERISTIQUE DIRECTE, dans la figure 9-b, on trouve au contraire la CARACTERISTIQUE INVERSE. Dans l'un et l'autre des graphiques, on utilise des échelles logarithmiques pour représenter les courants I_d et I_i .

L'emploi d'échelles logarithmiques (et non d'échelles linéaires normales ainsi que l'extension des valeurs du courant direct I_d et de la tension inverse V_i) font que les deux caractéristiques apparaissent dans une forme un peu différente de celles des caractéristiques directe et inverse de la figure 8. Il ne s'agit toutefois que d'une différence de forme. En pratique, l'allure des valeurs est identique pour l'un et l'autre cas.



COURBE CARACTERISTIQUE D'UNE DIODE AU SILICIUM (BY114)

Figure 9

Remarquons enfin qu'en plus des caractéristiques, on indique souvent la température à laquelle ont été relevés la tension et le courant. Il s'agit en effet de la TEMPERATURE AMBIANTE (figure 8) c'est-à-dire, la température relevée dans l'espace environnant la diode.

Dans certains cas, on précise au contraire LA TEMPERATURE DE LA JONCTION (figure 9), relevée pendant le fonctionnement de la diode, température qui, dans les redresseurs, est bien supérieure à la température ambiante.

Il existe enfin une troisième indication mentionnée par les constructeurs pour les diodes qui utilisent non pas une enveloppe de verre comme c'est le cas pour les diodes de faible puissance, mais un boîtier métallique. Il s'agit de la TEMPERATURE DU BOITIER.

Ces indications sont importantes car en effet, la pente de la caractéristique d'une diode à cristal varie considérablement avec la température. Lorsqu'il y a lieu de choisir une diode pour un circuit quelconque, il faut tenir compte des conditions thermiques durant le fonctionnement de celle-ci.

Avec la prochaine leçon, nous poursuivrons notre étude sur les semi-conducteurs. Nous étudierons les caractéristiques d'un autre type de diode : la diode ZENER. Nous aborderons également le principe de fabrication des SEMI-CONDUCTEURS DOPES.

NOTIONS A RETENIR

- Les semi-conducteurs utilisés pour la fabrication des diodes et des transistors ne sont pratiquement jamais du type INTRINSEQUE. Par des moyens techniques spéciaux, on ajoute au semi-conducteur intrinsèque, une certaine quantité de substances étrangères qui, en se répandant dans tout le cristal, MODIFIENT L'ETAT ELECTRIQUE DU RETICULE.
- Pour toute augmentation des électrons libres dans un cristal semi-conducteur à température constante, on a une diminution du nombre des trous, de manière à ce que le PRODUIT des électrons libres par le nombre des trous RESTE CONSTANT.
- Pour toute augmentation des trous dans un semi-conducteur à température constante, on a une diminution du nombre d'électrons libres, de manière à ce que le produit du nombre des trous par les électrons libres reste constant.
- Les semi-conducteurs peuvent être classés en trois catégories distinctes à savoir :
 - LES SEMI-CONDUCTEURS INTRINSEQUE, possédant un nombre d'électrons libres égal à celui des trous.
 - LES SEMI-CONDUCTEURS N, obtenus en introduisant dans un cristal semi-conducteur, des atomes d'éléments appartenant au groupe V du tableau de MENDELEYEV. Ici, le nombre des électrons libres est bien supérieur à celui des trous.

- **LES SEMI-CONDUCTEURS P**, obtenus en introduisant dans un cristal semi-conducteur, des atomes d'éléments appartenant au groupe III du tableau de MENDELEYEV. Ici le nombre des trous est bien supérieur à celui des électrons libres.

- Le nombre d'électrons libres et de trous présents dans le réseau, dépend exclusivement de la température du matériau. En effet, lorsque la température est constante, on admet que **POUR CHAQUE COUPLE ELECTRON-TROU DISPARU, IL SE FORME EN UN POINT DU SEMI-CONDUCTEUR UN AUTRE ELECTRON LIBRE ET UN AUTRE TROU.**
- La **BARRIERE DE POTENTIEL** d'une Jonction P.N, est la couche exempte de porteurs libres, où ne subsistent que des atomes liés au réseau cristallin. Au niveau de cette couche il existe une **DIFFERENCE DE POTENTIEL** d'une certaine valeur, qui s'oppose au courant de diffusion des charges à travers la Jonction.
- La **DIODE** laisse passer le courant **SEULEMENT LORSQU'ELLE EST POLARISEE DANS LE SENS DIRECT.** Elle s'oppose au passage du courant lorsqu'elle **EST POLARISEE EN SENS INVERSE.**
- La courbe caractéristique d'une diode à cristal, représente la valeur du courant I_d en fonction de la tension V_d et la valeur du courant I_i en fonction de la tension V_i .



EXERCICE DE REVISION SUR LA LECON SEMI-CONDUCTEUR 2

- 1) Qu'appelle-t-on semi-conducteurs intrinsèques ?
- 2) Qu'appelle-t-on semi-conducteurs type N ?
- 3) Qu'appelle-t-on semi-conducteurs type P ?
- 4) Comment obtient-on une jonction P.N ?
- 5) Qu'appelle-t-on potentiel de contact, potentiel de diffusion, barrière de potentiel d'une jonction P.N ?



REPONSES A L'EXERCICE DE REVISION SUR LA
LECON SEMI-CONDUCTEURS 1

- 1) Il y a quatre électrons sur la couche externe des atomes de CARBONE, de GERMANIUM et de SILICIUM. Ceux-ci appartiennent en effet à la classe des éléments TETRAVALENTS.
- 2) Il existe entre les atomes des cristaux de diamant, de germanium et de silicium des LIENS dits COVALENTS.
- 3) Les semi-conducteurs sont des substances dont la conductibilité électrique est INTERMEDIAIRE entre celle des conducteurs et celle des isolants.
- 4) Les électrons de valence sont les électrons qui, tout en se déplaçant d'un atome à l'autre, restent toujours liés aux espaces du réseau cristallin.
- 5) On appelle "TROU", l'espace libre qui se crée dans un cristal lorsqu'un lien covalent se rompt. Le trou est essentiellement constitué d'une charge électrique positive.

