4/2 Préface

L'électronique comprend la commande et la transmission de signaux et d'informations. Elle émane de l'électrotechnique, qui est elle-même une partie de la physique, et s'est développée grâce à l'invention de composants électroniques actifs qui permettent d'amplifier et de commander des signaux électriques. Les premiers composants actifs ont été les tubes électroniques, inventés en 1906 par Lee de Forest et R. von Lieben. Vers la fin des années 40, les Américains Bardeen et Brattain ont créé les premiers composants actifs à semi-conducteur, les transistors C'est également aux Etats-Unis que les premiers circuits intégrés (IC ou CI) ont vu le jour au début des années 60. Et c'est alors que l'électronique a entamé sa marche triomphale qui l'a menée à nos technologies de pointe actuelles. Le principe fondamental — l'association de composants électroniques pour former des circuits fonctionnels — est resté inchangé jusqu'à nos jours.

Mais l'extraordinaire baisse des coûts des circuits électroniques n'a été rendue possible que par les techniques d'intégration qui permettent, à peu de frais, la reproduction de sous-ensembles fonctionnels. Même les amateurs utilisent quantité de circuits intégrés pour leurs montages électroniques. De sorte que l'amateur éclairé est en mesure de construire lui-même tous ses montages, du simple amplificateur jusqu'à l'ordinateur.

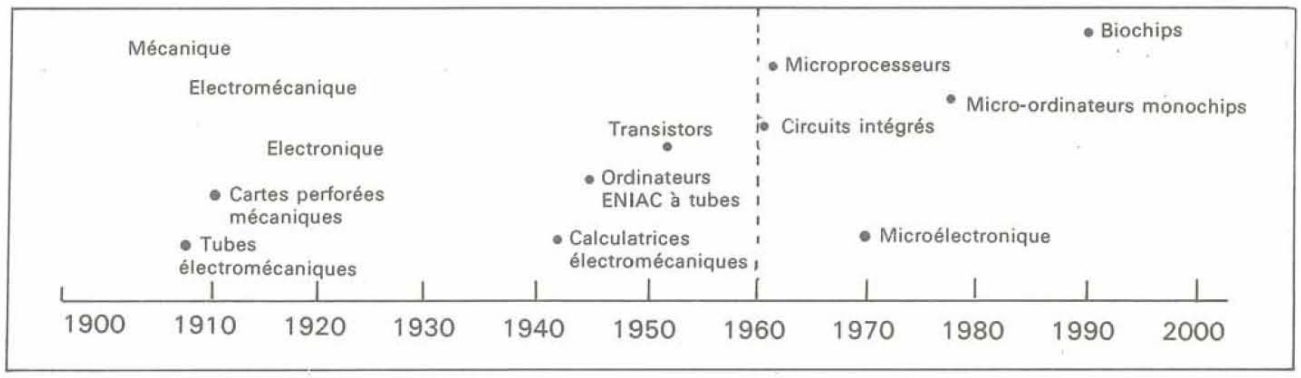


Fig. 1 : La grande révolution s'est opérée au début des années soixante avec la création des circuits intégrés. Alors qu'à l'époque le taux d'intégration ne comportait que quelques fonctions par chip, ce taux atteint au début des années quatre-vingts près d'un million de fonctions. Il est difficile de prévoir que cette tendance puisse se ralentir ou s'arrêter

Pour comprendre dans le détail la manière dont sont réalisés tous les circuits électroniques modernes, il est indispensable de procéder à une étude théorique. Aujourd'hui, pratiquement toutes les réalisations, aussi bien purement électroniques qu'électrotechniques, mettent en œuvre des semi-conducteurs dont la gamme s'étend des composants discrets (diodes ou transistors) jusqu'aux circuits à très large intégration (VLSI) tels que microprocesseurs et circuits programmables spécialisés. Les principes de fonctionnement demeurent les mêmes.

Pour la petite histoire, nous rappellerons que les premières réceptions de « Télégraphie Sans Fil » en 1980 utilisèrent le « cohéreur » de Branly (1844-1940), système de 3 pointes devenant conductrices sous l'influence d'une onde hertzienne. Ensuite, les premiers postes de TSF employèrent les propriétés semi-conductrices du sulfure de plomb, c'est-à-dire de la galène. Ce furent les premières diodes semi-conductrices.

La découverte des tubes électroniques et leurs propriétés d'amplification aisées à mettre en œuvre firent oublier les semi-conducteurs pendant quelques années. Mais depuis, que de progrès !

Le chapitre 2.2 sera consacré à cette étude théorique.

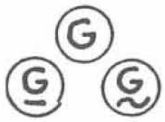
4/2.1

Symboles graphiques utilisés en électronique et électrotechnique

	courant continu
	courant alternatif
400Hz	indication de la fréquence
1 2 m	courant: monophasé diphasé polyphasé
	courant continu et alternatif
	courant ondulé
1 50Hz	système monophasé, 50 Hz
3 50Hz 220V	système triphasé, 50 Hz, 220 V
3+N 50Hz 380V	système triphasé avec conducteur neutre 50 Hz, 380 V
	conducteur flexible
	deux conducteurs (deux variantes)
n	n conducteurs

	croisement de 2 conducteurs sans connexion électrique
	croisement de 2 conducteurs avec connexion électrique (2 variantes)
	dérivation (3 variantes)
	terre
	masse (2 variantes)
	masse mise à la terre
	élément de pile ou d'accumulateur
	batterie d'accumulateurs ou de piles
12 éléments 100Ah	indication des caractéristiques des éléments

2.1 Symboles graphiques utilisés en électronique et électrotechnique



générateur :
à courant continu
à courant alternatif

moteur :
à courant continu
à courant alternatif

wattmètre

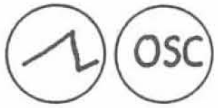
phasemètre

fréquencemètre

ohmmètre

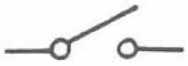
ondemètre

thermomètre
pyromètre



oscilloscope
(2 variantes)

tachymètre



interrupteur

disjoncteur

contacteur

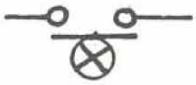
rupteur

contact

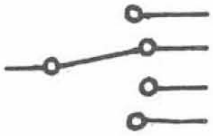
fiche et jack
bipolaire

bouton poussoir
ouvert au repos

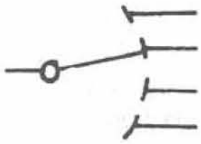
bouton poussoir
fermé au repos



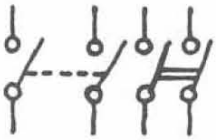
bouton poussoir
lumineux



commutateur
manœuvrable
en charge

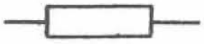


commutateur
manœuvrable à vide



interrupteur bipolaire
(2 variantes)

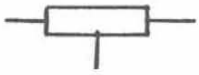
impédance



résistance

résistance
non réactive
2 variantes

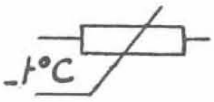
résistance
potentiométrique
fixe



résistance
potentiométrique
à contact
mobile

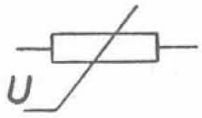
résistance
à variabilité
extrinsèque

résistance
à ajustabilité
prédéterminée



thermistance

2.1 Symboles graphiques utilisés en électronique et électrotechnique



résistance VDR

variabilité intrinsèque linéaire

variabilité intrinsèque non linéaire

variabilité extrinsèque linéaire

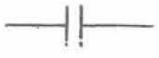
variabilité extrinsèque non linéaire

ajustabilité prédéterminée

variabilité extrinsèque continue

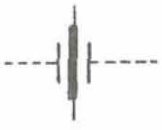
variabilité extrinsèque par échelons

indication du nombre d'échelons



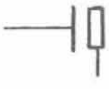
capacité condensateur

condensateur avec indication de l'armature extérieure

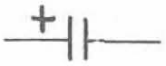


condensateur de traversée sans connexion de sortie

condensateur de traversée avec connexion de sortie sur une armature



condensateur à résistance intrinsèque en série



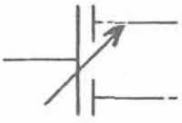
condensateur polarisé

condensateur électrolytique

condensateur électrolytique non polarisé

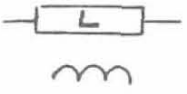
condensateur variable

condensateur à ajustabilité *prédéterminée*

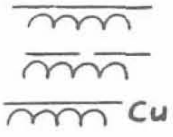


condensateur différenciel réglable
C1 + C2 = constante

condensateur variable à double armature mobile C1 ≈ C2

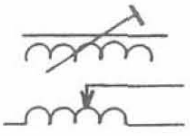


inductance (2 variantes)

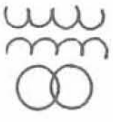


bobinage :
à noyau magnétique
avec entrefer
à noyau cuivre

inductance à noyau magnétique à variabilité extrinsèque



inductance :
avec ajustabilité prédéterminée
avec contact mobile

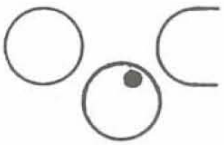


transformateur de tension (2 variantes)

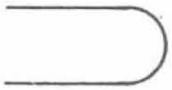
2.1 Symboles graphiques utilisés en électronique et électrotechnique

transformateur de courant (2 variantes)

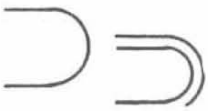
autotransformateur



enveloppe de tube ajouter un point pour tube à gaz



cathode



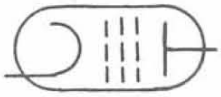
cathode : chauffage direct chauffage indirect

cathode liquide : symbole général avec igniteur

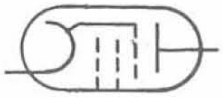
diode à vide

triode

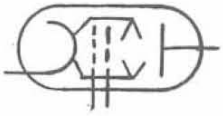
double triode



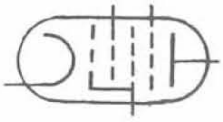
pentode



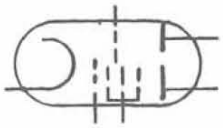
pentode avec connexion interne de G3



tétrode à faisceau électronique

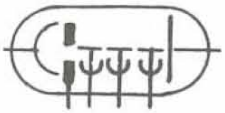


hexode



triode-hexode

tube à rayons X



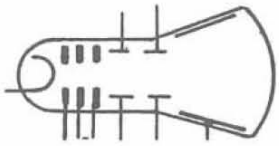
photomultiplicateur

diode à gaz

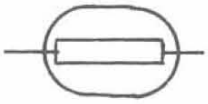
thyratron

stabilisateur de tension

indicateur d'accord

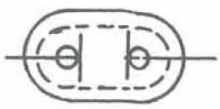


oscilloscope



lampe à incandescence

lampe luminescente



lampe fluorescente

2.1 Symboles graphiques utilisés en électronique et électrotechnique

tube photoélectrique

tube à gaz limiteur de tension

couple thermoélectrique

ligne de séparation d'un appareil

liaison mécanique

variante s'il n'y a que peu d'espace disponible

translation

rotation

commande par levier entraînement rectiligne circulaire

bornes

fusible

fiche de prise de courant

fiche de connecteur

socle de prise de courant

prise de connecteur

barrette de connexion

fiche et prise associées

fiche coaxiale

prise coaxiale

voyant lumineux

voyant mécanique

câble coaxial

câble coaxial dont le conducteur externe est relié à la masse

câble coaxial sous écran

redresseur à semi-conducteur

diode à semi-conducteur

diode liée à la température

diode à capacité variable

diode tunnel

diode régulatrice de tension (diode Zener)

diode régulatrice de tension bidirectionnelle

photodiode

fusible (variante)

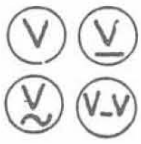
thyristor diode

thyristor-triode bloqué en inverse PNP

2.1 Symboles graphiques utilisés en électronique et électrotechnique

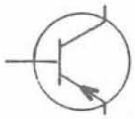
thyristor-triode bloqué en inverse NPN

thyristor bidirectionnel



voltmètre général
à courant continu
à courant alternatif
à courants alternatifs différentiels

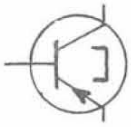
ampèremètre général
à courant continu
à courant alternatif



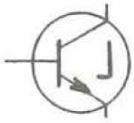
transistor PNP

ancienne représentation des transistors PNP pour les NPN inverser la flèche

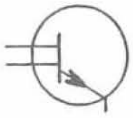
transistor NPN avec collecteur au boîtier



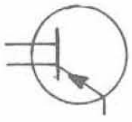
transistor tunnel (PNP)



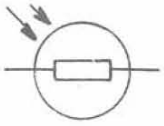
transistor avalanche (NPN)



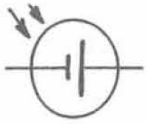
transistor unijonction avec base P



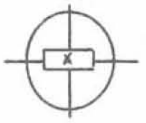
transistor unijonction avec base N



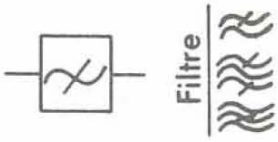
cellule photo conductive



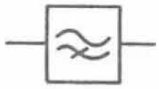
cellule photovoltaïque



générateur de Hall

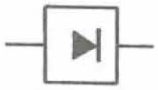


passe-bas
passe-bande
éliminateur



filtre passe haut

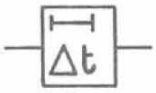
écrêteur



détecteur

correcteur de distorsion

modulateur ou démodulateur

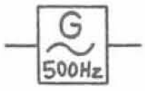


dispositif à retard

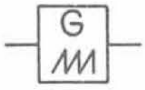
ligne d'affaiblissement

amplificateur magnétique

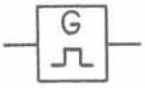
générateur de signaux



générateur de tensions sinusoïdales



générateur de signaux en dents de scie



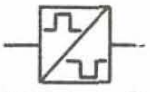
générateur d'impulsions

changeur de fréquence

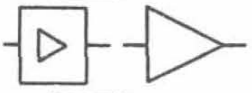
2.1 Symboles graphiques utilisés en électronique et électrotechnique

multiplicateur de fréquence

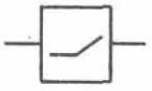
diviseur de fréquence



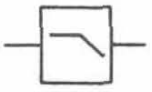
inverseur d'impulsion



amplificateur (2 variantes)

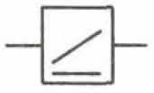


étage de préaccentuation

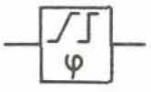


étage de désaccentuation

compresseur

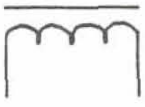


extenseur

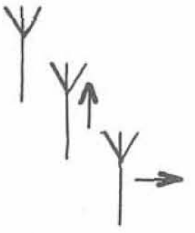


compensateur de phase

cadre d'antenne



antenne à barreau de ferrite



antennes

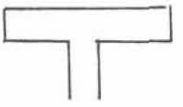
à polarisation verticale

à polarisation horizontale

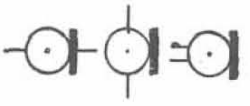
antenne d'émission

antenne de réception

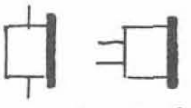
doublet



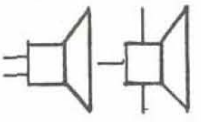
doublet replié



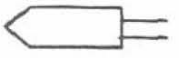
microphone (3 représentations différentes)



récepteur téléphonique (2 variantes)



haut-parleur (2 variantes)



tête de transducteur

tête de transducteur piézo-électrique et stéréophonique

4/2.2
Les semi-conducteurs

Généralités

Un atome est formé d'un noyau entouré d'électrons. Ce noyau est constitué de deux types de particules appelées nucléons. Dans ces nucléons, nous distinguerons les particules fondamentales appelées neutrons et celles appelées protons.
Les neutrons, comme leur nom le sous-entend, ne sont aucunement chargés. Les protons, quant à eux, ont une charge positive élémentaire notée $+e$.
D'une manière générale, nous caractérisons un noyau par deux nombres :
Z : nombre atomique. Il indique le nombre de protons et donne ainsi la valeur de la charge électrique totale du noyau ($+Ze$).
A : nombre de masse. Il correspond au nombre total de nucléons (protons et neutrons). Neutrons et protons ayant à peu près la même masse, ce nombre donne une bonne approximation de la masse du noyau.
Citons deux exemples de caractérisation de noyaux d'atomes souvent utilisés en électronique : le silicium et le germanium dont les symboles chimiques sont respectivement Si et Ge.

	Z	A
Ge	32	73
Si	14	28

Dans ce tableau de caractéristiques, nous pouvons déduire le nombre de neutrons de chaque atome. Le noyau de silicium comprend donc 14 neutrons et celui du germanium 41.
Après avoir succinctement présenté le noyau de l'atome, voyons maintenant les électrons qui gravitent autour de celui-ci. La charge électrique globale de l'atome étant neutre, nous pouvons donc déduire son nombre d'électrons grâce à son nombre atomique Z. En effet, l'atome comporte autant de protons que d'électrons ; c'est ce qui explique sa neutralité électrique.

La masse des électrons est négligeable par rapport à celle du noyau. Nous pouvons donc considérer comme une bonne approximation de prendre la masse du noyau comme masse de l'atome.
Tous les électrons ne sont pas liés de la même manière au noyau. Ils sont plus ou moins éloignés de celui-ci et, de ce fait, ne réagissent pas de la même façon.
Les électrons dits internes sont fortement liés au noyau de l'atome. Par contre, les électrons que l'on nomme périphériques sont peu liés à celui-ci.
Il existe donc un ensemble d'électrons périphériques par atome. Cet ensemble est souvent appelé couche externe.
Prenons comme exemple le silicium :
$Z = 14$
$A = 28$

Il a donc 14 électrons dont 4 forment la couche externe.
Nous venons de voir qu'il existe généralement plusieurs couches d'électrons gravitant autour du noyau de l'atome à des distances différentes.
Les recherches spectrographiques sur les atomes ont permis de déterminer le nombre Z

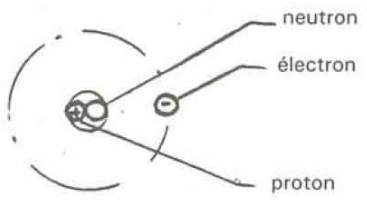


Fig. 1 : Schéma d'un atome d'hydrogène

d'électrons de l'atome considéré et leur répartition en couches successives.
Sur une même couche électronique, nous trouvons des électrons ayant un niveau d'énergie sensiblement égal.
Les chercheurs ont défini une appellation originale de ces couches successives. Dans l'ordre croissant des énergies, ces couches ont pour nom :
K, L, M, N, O, P, Q
Pour chacune de ces couches, il a été déterminé un nombre maximal d'électrons. Ce nombre est de :
2 électrons pour la couche K
8 électrons pour la couche L
18 électrons pour la couche M
32 électrons pour la couche N
Quand le nombre maximal d'électrons pour une couche donnée est atteint, il est dit que cette couche est saturée.
Les passionnés de suites logiques ont dû remarquer que les nombres 2, 8, 18, 32 qui représentent le maximum d'électrons par couche ne sont autres que les résultats de la formule : 2n pour laquelle le nombre n représente la suite des entiers 1, 2, 3, 4.
Ainsi, nous sommes arrivés à connaître assez précisément les structures intimes de la matière, des fluides...
Evidemment, les points éclaircis précédemment sont très théoriques. C'est-à-dire que dans la réalité tout ne fonctionne pas, ne tourne pas d'une manière aussi régulière.
Néanmoins, cette explication de la structure des atomes nous permettra de comprendre beaucoup mieux les phénomènes électroniques auxquels nous devons les résistances, les diodes, les transistors, les circuits intégrés...
Les hommes aimant l'ordre, ils ont classé les atomes dans un tableau dont nous avons reproduit uniquement les premières colonnes en figure 2. Il faut savoir qu'en 1850, il n'y avait pas encore de recherche spectrographique au niveau de l'atome et que le Russe, Monsieur Mendeleiff (en 1871), et le Français, Monsieur Chancourtois (en 1862), proposèrent de classer les atomes en suivant l'ordre de leur masse atomique. Le classement assuré par Monsieur Mendeleieff fut tellement retentissant et révolutionnaire que le tableau actuel est encore fort souvent appelé classification de Mendeleieff.

Nous voyons donc en regardant le tableau présenté en figure 2 qu'il existe plusieurs groupes d'atomes : le groupe 8 représente les atomes ayant leur couche périphérique saturée, c'est-à-dire les atomes très stables, et le groupe 1 symbolise les atomes ayant une couche périphérique à un électron.

Mais, comme il existe, pour un même nombre d'électrons en couche périphérique, plusieurs atomes différents, il a fallu les discriminer par leur masse atomique (verticalement dans le tableau).
Ce tableau montre l'importance de la couche périphérique (critère de classification) ; il est vrai qu'elle joue un rôle essentiel car ce sont ses électrons qui interviennent lors des phénomènes chimiques. Ainsi, un corps constitué d'atomes dont la couche périphérique est saturée s'alliera très difficilement avec un autre corps. Prenons par exemple l'hélium : chacun sait qu'il s'agit là d'un gaz stable ; eh bien, ceci s'explique par le fait que sa couche périphérique, qui comporte deux électrons, c'est-à-dire le maximum pour la couche K, est saturée. Vous pouvez le vérifier par vous-même dans le tableau.

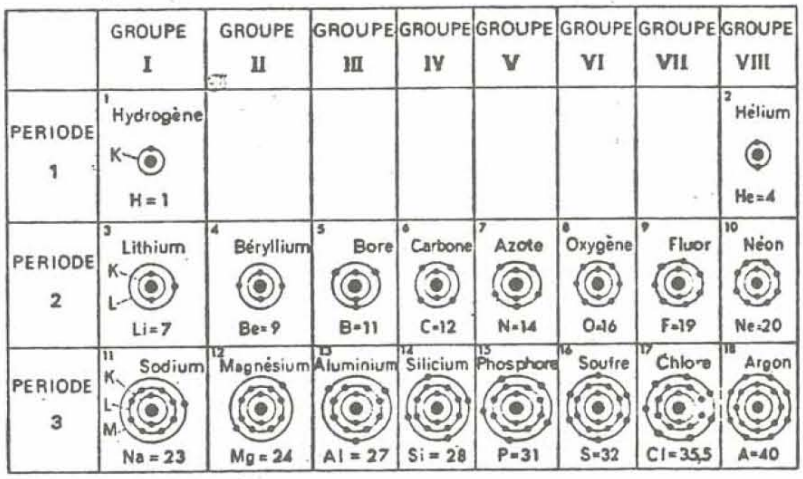


Fig. 2 : Classification de Mendeleieff (1871)

Si nous regardions, à l'aide d'un microscope, la structure atomique d'un gaz ou d'un liquide, nous verrions un désordre total au niveau du placement des atomes. Ceci peut se comprendre quand on connaît les effets physiques des liquides et des gaz qui sont totalement différents de ceux des solides.
A l'intérieur d'un corps liquide ou d'un gaz, les atomes sont constamment en déplacement. En ce qui concerne les gaz, la distance d'un atome à l'autre est très grande par rapport au rayon de l'orbite d'un électron. De ce fait, les électrons ne reçoivent aucune sollicitation de la part des atomes voisins.
Pour les liquides, la distance inter-atomes est environ égale à celle du rayon atomique. Ainsi, les atomes peuvent glisser les uns contre les autres.
Pour les solides, les atomes sont très proches les uns des autres. Des sollicitations entre noyau et électrons d'atomes voisins peuvent donc se produire. C'est ce phénomène qui explique la rigidité des solides.
En observant les cristaux (pierres précieuses...), on s'aperçoit qu'il existe un ordre surprenant dans l'édifice atomique de leur structure (arrangement régulier des atomes). Les solides moins purs comportent également des parties bien structurées. Les chercheurs se sont rendu compte que les propriétés mécaniques d'un solide sont liées principalement à cet ordre.

Un cristal est très rarement parfaitement ordonné. On définit alors les mono-cristaux qui eux présentent un ordre parfait. Mais, d'un mono-cristal à l'autre, l'ordre se trouve rompu. Quelquefois, on peut rencontrer des impuretés, un atome différent s'étant glissé à l'intérieur du mono-cristal. Bien souvent, ce sont ces impuretés qui fixent la couleur du cristal considéré.

Pour garder un caractère concret à notre exposé, nous vous présentons quelques caractéristiques dimensionnelles d'un cristal.

La distance entre deux atomes d'un même cristal :
environ 1 Å, soit 0,1 nm
Le rayon d'un noyau supposé sphérique :
environ 10 Å, soit 1 nm
Un Angström (Å) vaut 10^{-10} mètre. Cette unité n'est plus légale, bien qu'encore employée ; l'on utilise aujourd'hui le nanomètre (= 10 Å).

A ce stade de notre étude, peut-être vous posez-vous la question :
Qu'est ce qui fait que le cristal est solide ?

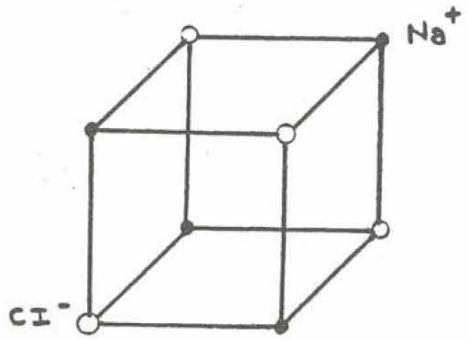


Fig. 3 : Motif élémentaire du chlorure de sodium

Il s'agit en effet d'une question fondamentale qui va nous conduire à définir deux types de liaisons qui assurent le maintien des atomes entre eux. Nous pouvons également parler de cohésion des atomes.

La liaison électrovalente :

Prenons le cas d'un cristal de chlorure de sodium.
La représentation de son organisation atomique est un cube (motif élémentaire) que nous vous avons dessiné en figure 3.
Chaque sommet de ce cube est un atome ionisé. L'atome de sodium (Na) ayant perdu l'électron unique de sa couche périphérique est devenu un ion positif (Na^+) (l'électron représentant une charge négative, et comme un atome possède une charge neutre au départ, si celui-ci pert un électron, il devient de fait chargé positivement). L'atome de chlore va récupérer l'électron perdu par le sodium et devenir un ion négatif (Cl^-). Maintenant la couche périphérique de cet ion est complète.
Les sommets de ce cube qui représente le motif élémentaire du chlorure de sodium étant soit du Na^+, soit du Cl^-, il se crée des forces électrostatiques qui assurent le maintien et la cohésion de l'édifice atomique de ce cristal. Il s'agit là de la liaison électrovalente.

La liaison covalente :

Au contraire de la liaison précédente, deux atomes voisins d'un cristal vont mettre en commun des électrons au niveau de leurs couches périphériques.
Prenons comme exemple le silicium : chaque atome de ce cristal (Si) met en commun ses quatre électrons périphériques avec les quatre atomes de silicium voisins (voir Fig. 4).
Dans ce cas, il y a encore cohésion entre les atomes de silicium grâce à cette mise en com-

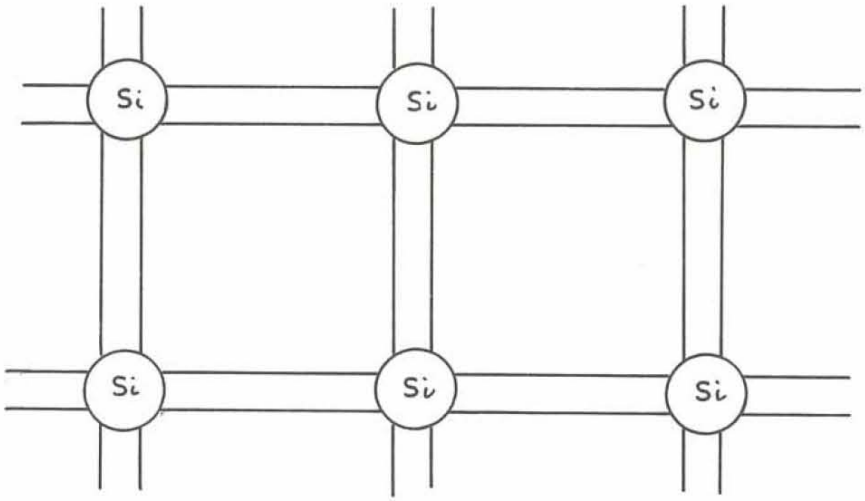


Fig. 4 : Liaison covalente du silicium
Les traits représentent chacun un électron mis en commun et symbolisent les covalences

mun d'électrons. C'est ce que nous appelons une liaison covalente.

Nous pouvons maintenant définir l'état d'un cristal du point de vue de ses propriétés électriques.
Le cristal pourra être :
soit conducteur,
soit isolant.
Parmi les cristaux isolants se trouve la catégorie qui nous intéresse. Ce sont les cristaux semi-conducteurs. Mais, auparavant, nous allons définir conducteurs et isolants.

1. Les conducteurs

Le cuivre, l'aluminium sont de bons conducteurs. Les conducteurs ont beaucoup d'électrons libres, de sorte qu'il existe toujours une agitation électronique désordonnée au sein de leur structure (Fig. 5). Lors de l'application d'une différence de potentiel (DDP), aux bornes extrêmes d'un conducteur, nous créons à l'intérieur de celui-ci un champ électrique (Fig. 6). Les électrons libres du conducteur sont alors sollicités par ce champ électrique et, comme leur charge est négative, ils se déplacent dans le même sens que le champ électrique (Fig. 7). Pour citer un exemple concret, nous avons environ 10^{28} électrons libres par mètre/cube de cuivre.

2. Les isolants

Ils ont peu d'électrons libres : ce qui implique qu'ils conduisent mal l'électricité. Un isolant peut avoir une concentration en électrons libres d'environ 10^7 électrons libres par mètre/cube.
Si l'on augmente la température d'un isolant, on remarque que sa résistivité diminue. En effet, l'agitation des électrons libres devient plus grande et déjà certaines liaisons covalentes vont se rompre. Ceci va entraîner un accroissement du nombre des électrons libres.

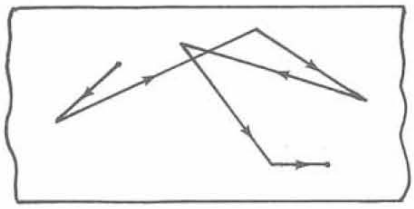


Fig. 5 : Agitation électronique dans un conducteur sans champ électrique

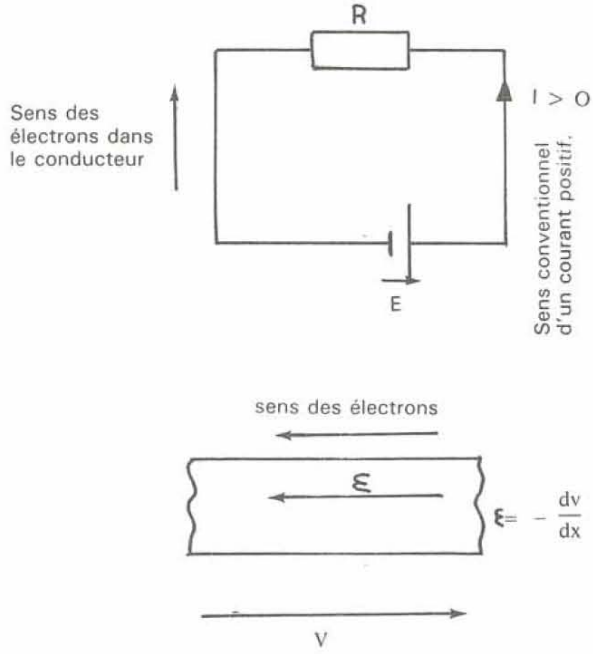


Fig. 6 : Conducteur soumis à un champ électrique

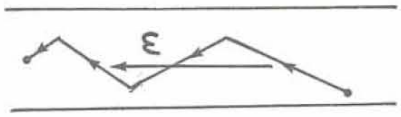


Fig. 7 : Mouvement des électrons dans un conducteur en présence d'un champ électrique

Lorsque nous soumettons un isolant à un champ électrique peu intense, il n'y a pratiquement aucune réaction car il existe trop peu d'électrons libres pour véhiculer une énergie non négligeable.
Par contre, avec un champ électrique intense, nous pouvons arriver au « claquage » de l'isolant. C'est-à-dire que beaucoup de liaisons covalentes vont être rompues et il existera alors un courant non négligeable qui traversera l'isolant.

3. Les semi-conducteurs

A température ordinaire, ce sont de mauvais isolants. Il ne faut plus beaucoup d'énergie, à température ambiante, pour rompre des liaisons covalentes.
Nous entendons par liaison covalente rompue, le fait qu'un électron périphérique ait quitté l'atome afin de devenir un porteur de charge, électron libre. Ainsi, l'atome qui a perdu cet électron se trouve ionisé et sa charge est globalement positive ; il devient un ion positif. Nous pouvons chiffrer cette énergie nécessaire à l'ionisation d'un atome. Elle s'exprime en électron-volt (eV). L'énergie d'ionisation (Wi) du silicium à 27 degrés Celsius est d'environ 1,1 eV, celle du germanium est de 0,7 eV alors que, pour un bon isolant, comme le diamant par exemple, Wi est de 6 eV.
Pour un semi-conducteur donné, nous pouvons avoir une ionisation thermique qui augmente le nombre d'électrons libres. Nous avons représenté en figure 8 une ionisation d'un atome de cristal de silicium.

L'atome nommé A sur la figure 8 est donc devenu un ion positif fixe. Il est fixe car il fait partie du réseau cristallin du silicium. Par contre, l'électron libéré est dit mobile ; il devient ainsi un porteur de charge, électron libre ou bien, formulé différemment, un porteur de charge mobile.

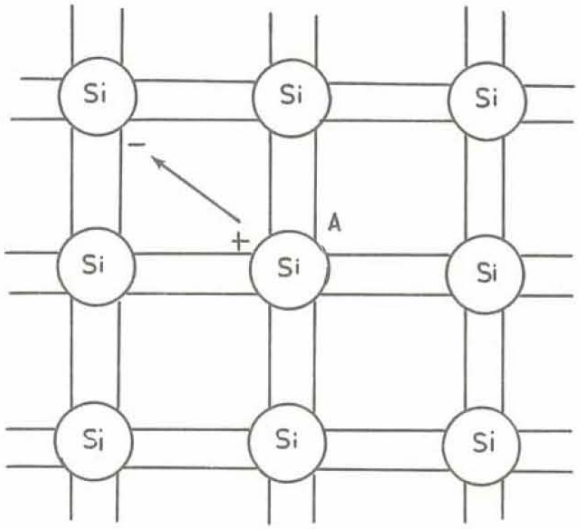


Fig. 8 : Représentation d'une ionisation d'un atome de silicium

Dans un semi-conducteur, les seuls porteurs de charges mobiles négatives sont les électrons libres. Il faut cependant prévenir que l'ionisation thermique touche peu d'atomes dans un cristal pur de semi-conducteur. Pour un cristal pur de silicium, il n'y aura environ que 3 atomes ionisés sur 10 000 milliards d'atomes à 27 degrés Celsius (300° K).
Comme pour les conducteurs, les électrons libres d'un semi-conducteur se déplacent de façon désordonnée. Il arrive alors de temps en temps qu'un électron libre se trouve à proximité d'un ion positif (atome auquel il manque un électron). Dans ce cas, l'ion positif capture l'électron libre pour retrouver une liaison covalente régulière. Ion positif et électron (−e) s'attirent car ils sont d'un potentiel opposé. Cet état de fait s'appelle la recombinaison. Dans un cristal, les phénomènes d'ionisation et de recombinaison existent simultanément.
Si nous prenons l'ionisation de l'atome A qui vient de se créer, nous pouvons la représenter par la figure 8. Supposons qu'à proximité, se crée une autre ionisation, celle de l'atome A1, cela nous donnera la figure 9.

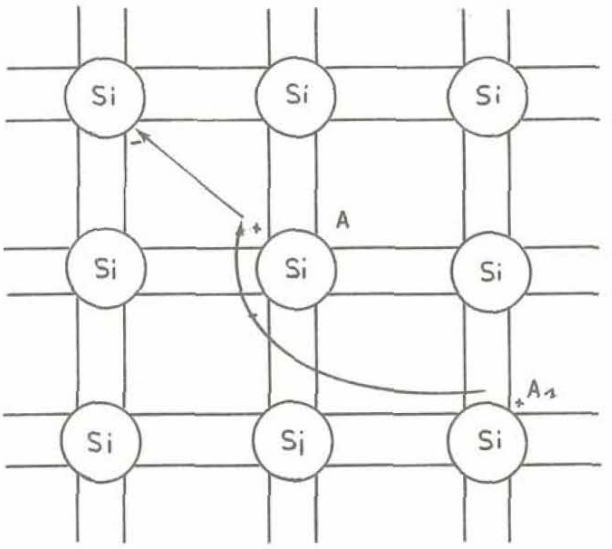


Fig. 9 : Deux ions positifs

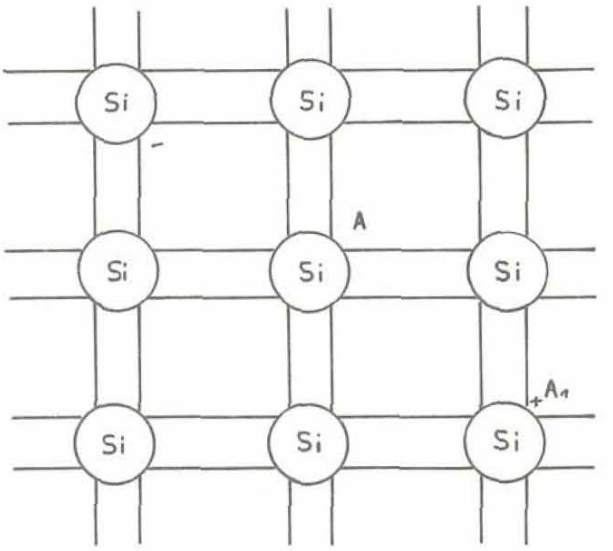


Fig. 10 : Recombinaison de l'atome A

Nous pouvons voir qu'il existe de fortes chances pour que l'électron parti de A1 se recombine avec l'atome A. Cela peut, en final, se représenter comme nous le montre la figure 10.

Si nous observons les figures 8 et 10, nous pouvons déduire que la charge positive s'est déplacée et cela sans que les atomes n'aient bougé. Ce phénomène est rendu possible grâce aux déplacements des électrons. Mais, d'un point de vue électrique, une charge positive s'est réellement déplacée. Nous avons l'habitude d'appeler le déplacement de cette charge positive le déplacement d'un trou. Ainsi, dans un cristal semi-conducteur, une charge négative peut circuler par l'intermédiaire d'un électron mais il peut y avoir des charges positives qui circulent ; c'est ce que l'on nomme le déplacement des trous.
Dans un semi-conducteur, l'électron libre est une charge mobile négative (− e), le trou est une charge mobile positive (+ e).

Les chercheurs ont imaginé d'injecter, dans un cristal pur, quelques atomes différents de ceux qui le constituent. Cela a pour effet d'augmenter la conductivité électrique du cristal semi-conducteur. Ce phénomène, appelé le dopage, est à la base de la réalisation des circuits semi-conducteurs pour l'électronique. Si, par exemple, nous injectons, dans un cristal semi-conducteur de silicium, un atome d'arsenic (As) appelé dans ce cas impureté, nous augmentons sensiblement la conductivité électrique du silicium. Il faut savoir que l'arsenic possède une couche périphérique de cinq électrons.

Quand les techniciens injectent des impuretés, ils le font en très petite quantité (1 pour 1 million) ; il n'empêche que l'effet qu'elles produisent est loin d'être négligeable.
Dans le cas de l'impureté d'arsenic placée dans un cristal de silicium, les études aux rayons X montrent que l'atome d'arsenic s'intègre très bien dans les liaisons covalentes du cristal. Mais, comme il possède cinq électrons périphériques, l'un d'entre eux n'est pas utilisé. Ce dernier sera donc très faiblement lié à son noyau. Nous pouvons prévoir une énergie d'ionisation de cet atome d'environ Wi = 0,05 eV. Une fois l'atome d'arsenic ionisé, le cristal semi-conducteur aura un

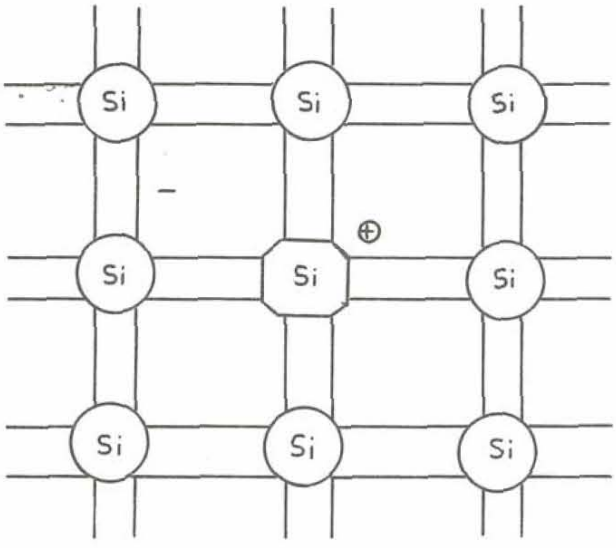


Fig. 11 : Ion positif fixe

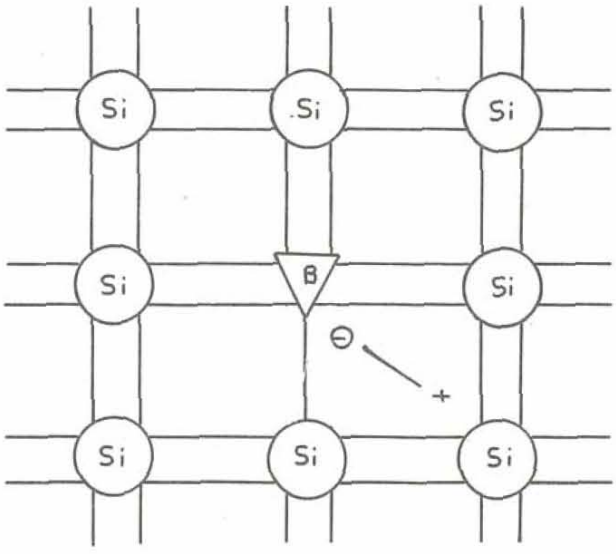


Fig. 12 : Ion néfatif fixe

électron libre de plus et un ion positif fixe également en plus.
Nous précisons que cet ion positif est réellement fixe, c'est-à-dire qu'il ne peut pas être considéré comme un trou (vu précédemment) car son pouvoir de recombinaison est très faible. Et, même si cette recombinaison se forme quelquefois, il est de nouveau très vite ionisé. Pour cela, nous sommes obligés d'introduire un nouveau symbole relatif à cet ion positif fixe (Fig. 11).

Ce dopage est effectué par atomes donneurs (un atome, l'arsenic, donne un électron libre au semi-conducteur).
Nous avons vu que, dans un cristal dopé avec des atomes donneurs, le nombre d'électrons libres se trouve supérieur au nombre de trous.
Nous retiendrons de cette observation que :
— les porteurs majoritaires sont les électrons libres,
— les porteurs minoritaires sont les trous.
Ce type de cristal ainsi dopé est appelé cristal dopé de type N car les porteurs majoritaires sont les électrons libres qui transportent des charges négatives.

De même que nous avons réussi à doper un cristal avec des atomes donneurs, il est possible de doper un cristal semi-conducteur avec des atomes accepteurs.
Dans un cristal semi-conducteur, les atomes accepteurs auront une couche périphérique de trois électrons (par exemple le Bore (B). La concentration d'atomes de bore sera de un atome pour un million d'atomes de silicium.

L'atome de bore s'intègre très bien dans la structure atomique du silicium mais il lui manque un électron pour que ses liaisons covalentes soient régulières. Alors, son principal but sera de capturer un électron libre du cristal.
L'atome de bore deviendra un ion négatif et, de fait, libérera un trou mobile (Fig. 12).
Cet ion négatif peut être considéré comme fixe car ses liaisons électroniques sont très fortes.

Ce dopage crée un cristal semi-conducteur dopé positivement (P) car :
— les porteurs majoritaires sont les trous (porteurs de charges positives),

— les porteurs minoritaires sont les électrons libres.

Si nous appliquons un champ électrique ϵ à un barreau de semi-conducteur, les électrons libres se déplaceront en sens inverse de ϵ et les trous dans le même sens.

Vous en savez maintenant assez pour aborder sans complexe la théorie de l'effet semi-conducteur, notre but étant de vous initier aux théories qui régissent l'électronique afin de mieux comprendre celle-ci.