

I. Introduction à la physique des composants électroniques

1. Constitution de la matière : de l'électron à l'atome, de l'atome au cristal

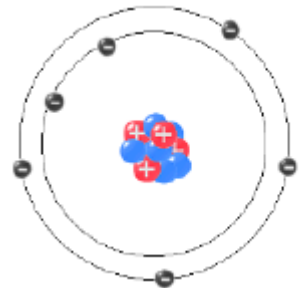
- **L'électron :**

L'électron appartient à l'atome (grain constitutif de la matière)

Un atome : schématiquement constitué d'un noyau, autour duquel tournent un à plusieurs électrons (charge <0)

Noyau constitué de particules : protons (charge >0) et de neutrons (charge neutre) (appelées encore nucléons)

Chaque e- a une probabilité de se trouver à tel ou tel endroit du noyau : nuage électronique



particule	Charge électrique (C)	Masse (kg)
Électron	-e	$m_e = 9.10953 \cdot 10^{-31}$
Neutron	0	$m_n = 1.67495 \cdot 10^{-27}$
proton	+e	$m_p = 1.67265 \cdot 10^{-27}$

$$e = 1.6021891 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

- **L'atome isolé :**

Répartition des e- sur différentes couches discrètes correspondant aux états électroniques en s'éloignant du noyau :

couche	K	L	M	N	O	P	Q
Sous-couches	1s	2s,2p	3s,3p,3d	4s,4p,4d,4f	5s,5p,5d,5f,5g	6s,6p,6d,6f	7s,7p
Nbre d'e-	2	8	18	32	32	18	8

Propriétés chimiques et électriques des atomes déterminées par l'arrangement des électrons sur la couche externe (couche de Valence)

Permettent de 'lier' les atomes entre eux régulièrement pour constituer la matière

Participent à la conduction des matériaux conducteurs et SC en se comportant comme des particules quasi-libres

Les e⁻ se rangent sur les sous-couches par ordre croissant :

1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, 4f, 5d, etc...

- **Le solide :**

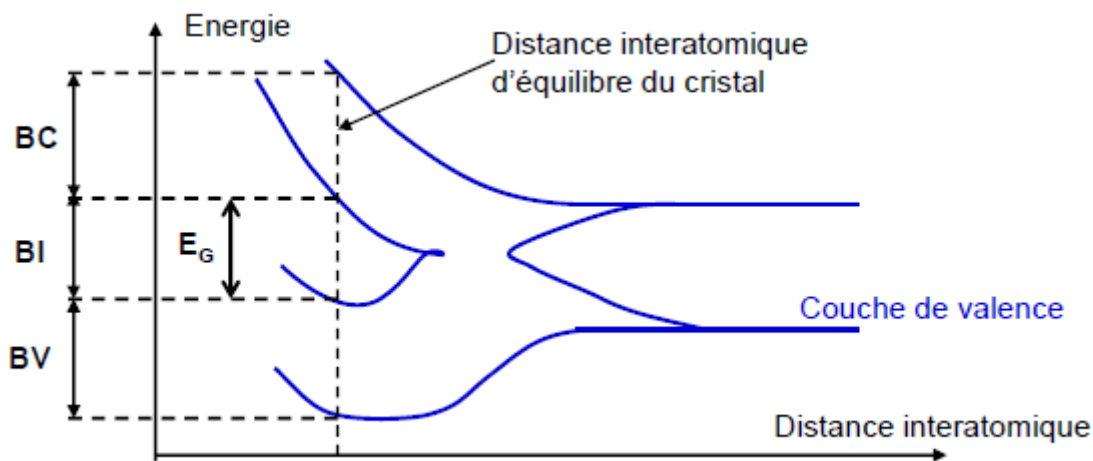
Les états électroniques sont très nombreux :

- Théorie des bandes d'énergie : théorie physique qui examine le comportement des e⁻ dans un solide

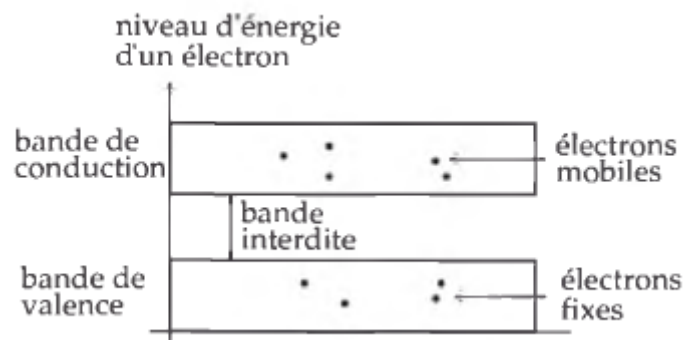
2 bandes, séparées par la bande interdite ou gap, sont distinguées :

- Bande de valence : basse énergie, dernière bande contenant les e⁻
- Bande de conduction : haute énergie, première bande vide d'e⁻

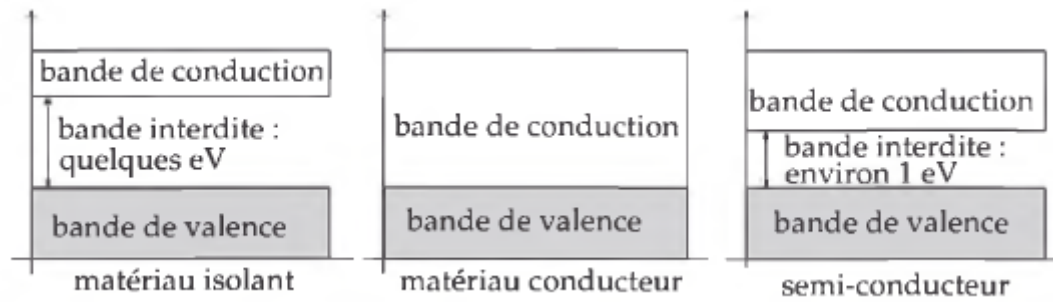
Le mélange s'opère lorsqu'on rapproche les atomes :



2. Les matériaux : isolant, conducteur, semiconducteur :



En fonction de la disposition de ces bandes, et surtout de la largeur de la bande interdite, les matériaux peuvent être isolants, conducteurs ou semi-conducteurs.



La principale différence entre un conducteur et un semi-conducteur réside dans le fait que dans le premier, il n'y a pas ou peu de bande interdite, voire même chevauchement des bandes de valence et de conduction. Les électrons sont donc a priori mobiles et l'application d'un faible champ électrique génère une circulation de nombreux électrons. Dans un semi-conducteur, il y a beaucoup moins d'électrons mobiles. Le matériau est donc moins conducteur.

- **La conduction électrique dans les solides**

Dans un matériau à structure cristalline, les atomes sont liés entre eux par des liaisons dites covalentes qui consistent en des combinaisons d'électrons entre atomes voisins. Si cette liaison est faible, un apport d'énergie extérieur, par exemple un champ électrique, peut être suffisant pour mobiliser ces électrons : ces électrons sont dits « libres », libres de se déplacer dans la structure cristalline : c'est le phénomène de la conduction électrique intrinsèque. En quittant sa position initiale, un électron devenu libre laisse derrière lui un « trou ».

Ce trou peut bien sûr être comblé par un autre électron libre venu d'un atome voisin. Dans ce cas, le trou « se déplace » en sens contraire du déplacement de l'électron. La conduction électrique peut tout aussi bien être interprétée comme un déplacement de trous que comme un déplacement d'électrons.

Les électrons libres sont appelés porteurs de charge négatifs. Les trous sont les porteurs de charge positifs.

L'énergie d'un électron se mesure en électron-volts (eV) : $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

- **Semi-conducteurs extrinsèques**

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques lui conférant des propriétés électriques adaptées aux applications électroniques (diodes, transistors, etc...) et optoélectroniques (émetteurs et récepteurs de lumière, etc...).

Semi-conducteurs de type P

Un semi-conducteur type P est un semi-conducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type accepteurs (ex : Bor B).

Lorsque la température augmente, il y a génération de paires électrons-trou qui s'ajoutent aux porteurs précédents.

La majorité des porteurs sont des trous (positifs). Le semiconducteur dopé par atome trivalent est appelé semiconducteur de type P.

Les trous sont les porteurs majoritaires.

Les électrons sont les porteurs minoritaires.

Semi-conducteurs de type N

Un semi-conducteur type N est un semi-conducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type donneurs (ex : arsenic As).

Lorsque la température augmente, il y a génération de paires électrons-trous qui s'ajoutent aux porteurs précédents.

La majorité des porteurs sont des électrons (négatifs). Le semiconducteur dopé par atome pentavalent est appelé semiconducteur de type N.

Les électrons sont les porteurs majoritaires.

Les trous sont les porteurs minoritaires.

II. Composants passifs

Définition : Un composant est dit passif lorsqu'il ne permet pas d'augmenter la puissance d'un signal (dans certains cas, le composant réduit la puissance disponible en sortie, souvent par effet Joule) : résistance, condensateur, bobine ainsi que tout assemblage de ces composants.

Résistance

La résistance électrique d'un conducteur est le quotient de la tension appliquée à ses bornes par l'intensité du courant qui le traverse.

Symbole de la résistance électrique: R

La résistivité (ρ) est l'unité qui mesure la propriété d'un corps à avoir des électrons libres dans la bande de conduction. Elle s'exprime en ohm-mètre. Elle est variable en fonction de la température. La résistivité à la température T(°C) par rapport à 0°C se déduit de la relation suivante :

$$\rho_T = \rho_0(1 + \alpha T)$$

$$\rho_{Ag} = 15.0 \text{ n}\Omega\cdot\text{m à } 0^\circ\text{C}$$

$$\alpha_{Ag} = 0.00411 \text{ [1/}^\circ\text{C]}$$

$$\rho_{Cu} = 15.9 \text{ n}\Omega\cdot\text{m à } 0^\circ\text{C}$$

$$\alpha_{Cu} = 0.00427 \text{ [1/}^\circ\text{C]}$$

$$\rho_{Al} = 26.0 \text{ n}\Omega\cdot\text{m à } 0^\circ\text{C}$$

$$\alpha_{Al} = 0.00439 \text{ [1/}^\circ\text{C]}$$

α est le coefficient de température qui peut être positif (la plus part de conducteurs) ou négatif (un grand nombre de semiconducteurs, isolants et quelques alliages). L'ordre de grandeur des résistivités pour les conducteurs correspond à quelques n $\Omega\cdot\text{m}$ et pour les isolants, il atteint $10^{18} \Omega\cdot\text{m}$.

La résistance électrique

La résistance d'un corps dépend de sa résistivité et de ses dimensions.

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

R résistance en ohm [Ω]

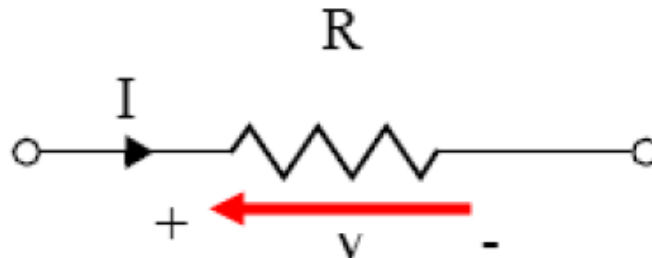
L longueur en mètre [m]

S section en mètre carré [m^2]

ρ résistivité en ohm-mètre [$\Omega\cdot\text{m}$]

Modèle d'une résistance parfaite

Le symbole utilisé pour représenter une résistance parfaite dans les schémas de circuit est le Suivant. (Le courant va dans le sens des potentiels décroissants comme indiqué sur la figure).



La loi d'Ohm (caractérise une résistance parfaite)

Il s'agit d'une relation entre la tension et le courant (relation V-I) qui caractérise le comportement d'une résistance. La loi d'Ohm s'écrit :

$$V = R.I$$

On a aussi:

$$R = \frac{V}{I}$$

et

$$G = \frac{1}{R}$$

R résistance en ohm [Ω]

I courant en ampère [A]

V tension en volt [V]

G conductance en siemens [S ou $1/\Omega$]

La puissance dissipée dans une résistance parfaite

Les chocs des électrons dans le conducteur, libèrent une énergie qui est transformée en chaleur (effet joule). Cette transformation est analogue à un frottement mécanique.

La puissance dissipée sous forme de chaleur est :

$$P=V.I=R.I^2$$

P puissance en watt [W]

R résistance en ohm [Ω]

I courant en ampère [A]

V tension en volt [V]

Les différents types de résistances

Les résistances bobinées de puissance dissipent une puissance élevée. Elles ne peuvent pas être employées en haute fréquence à cause de leur inductance parasite élevée.

Les résistances bobinées de précision présentent un volume plus important à puissance égale que les résistances bobinées normales. Elles offrent une très haute stabilité, un coefficient de température et une tension de bruit négligeables et sont utilisées comme étalon dans les circuits nécessitant une grande précision.

Les résistances à couche peuvent être soit au carbone, soit à film métallique. Elles ont une bonne stabilité, un coefficient de température et un coefficient de tension très bas. Leur fiabilité est remarquable. Leur couche est très mince et elles peuvent être endommagées par une surcharge ou par une maladresse au cours du montage. Celles à film métallique sont les plus intéressantes pour les hautes fréquences.

Les résistances agglomérées sont petites et les plus utilisées en raison de leur prix. Elles ont une bonne fiabilité si elles sont correctement utilisées dans des circuits admettant leurs caractéristiques.

Les caractéristiques publiées par les constructeurs

Chaque fabricant donne des spécifications techniques pour ses résistances :

Résistance nominale : C'est la valeur indiquée sur le corps de la résistance.

Tolérance : C'est un pourcentage, en plus ou en moins autour de la valeur nominale, que le fournisseur s'engage à respecter.

Tension maximale aux bornes : C'est la tension aux bornes de la résistance à ne pas dépasser. Elle se déduit de la relation suivante :

$$V = \sqrt{P \cdot R}$$

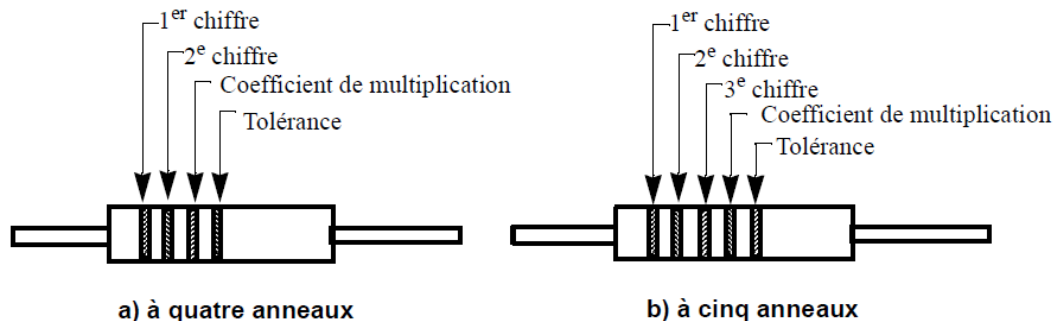
Coefficient de température (α) : Il exprime la variation de la valeur de la résistance par degré d'élévation de température. Comme cette variation est très faible, il est mesuré en [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$].

Stabilité : On dit qu'une résistance est stable lorsque, après un long usage, sa valeur reste proche de celle qu'elle avait à l'origine. Cette variation de valeur dépend du type et de la technologie de fabrication. La stabilité est indiquée par le fabriquant pour chacun de ses modèles.

Tension de bruit : Toutes les résistances produisent aux bornes une tension parasite générée par l'agitation thermique des molécules en fonction de la température absolue. Il n'est pas possible de réduire ou modifier ce bruit, appelé "bruit blanc" à une température donnée.

Le marquage des résistances :

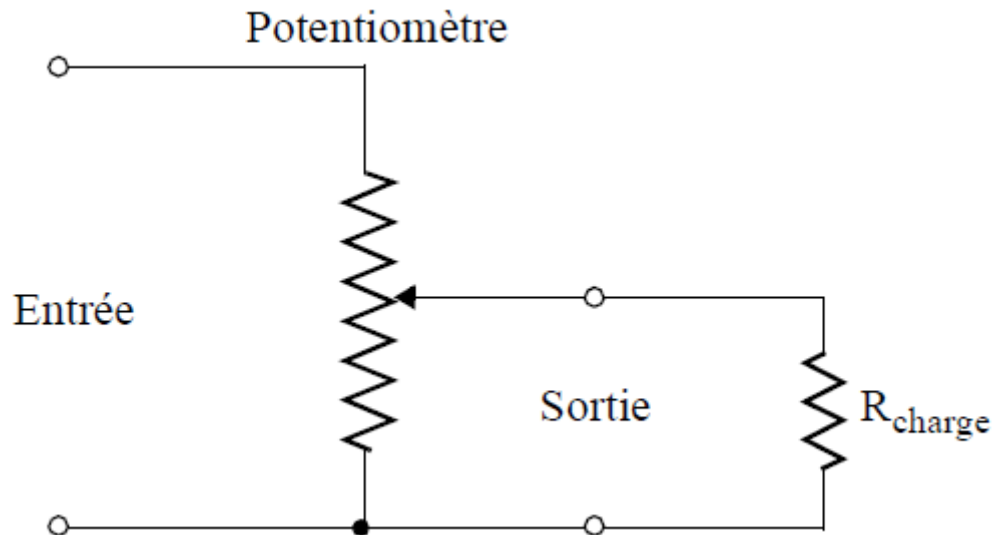
Code des couleurs : Pour les résistances agglomérées ou à couche d'usage courant. Le code de couleur est indiqué sur la figure suivantes :



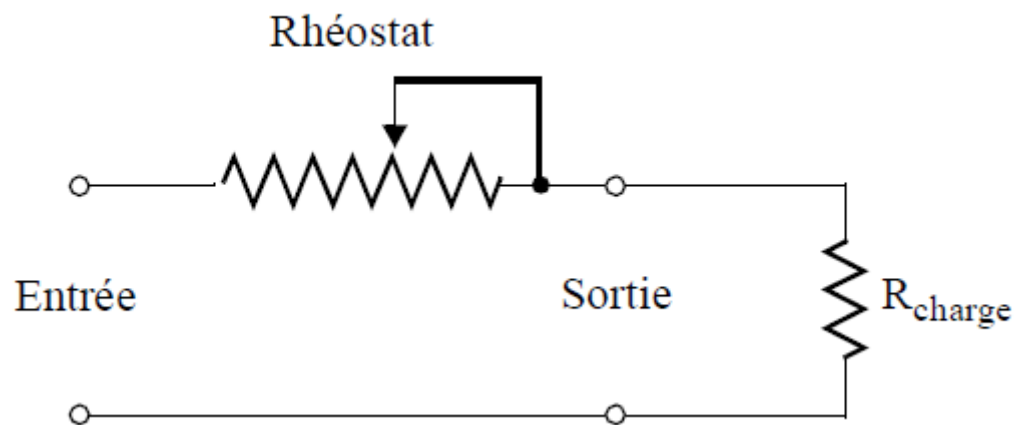
Mnémotechnique Initiale du mot = Initiale Couleur	Chiffres significatifs	Multiplicateur	Tolérance	Coeff. de température
Ne	Noir : 0	x 1 Ω		± 200
Mangez	Marron : 1	x 10 Ω	$\pm 1 \%$	± 100
Rien	Rouge : 2	x 100 Ω	$\pm 2 \%$	± 50
Ou	Orange : 3	1 k Ω		± 15
Je	Jaune : 4	10 k Ω		± 15
Vous	Vert : 5	100 k Ω	$\pm 0,5 \%$	
Battrai	Bleu : 6	1 M Ω	$\pm 0,25 \%$	
VIOlement	Violet : 7	10 M Ω	$\pm 0,1 \%$	
Grand	Gris : 8			
BOA ←	Blanc : 9			
		Argent : x 0,01 Ω	$\pm 10 \%$	
		Or : x 0,1 Ω	$\pm 5 \%$	

Les résistances variables

Potentiomètres : On utilise les trois bornes de la résistance variable séparément pour régler la tension aux bornes de la charge (montage parallèle).



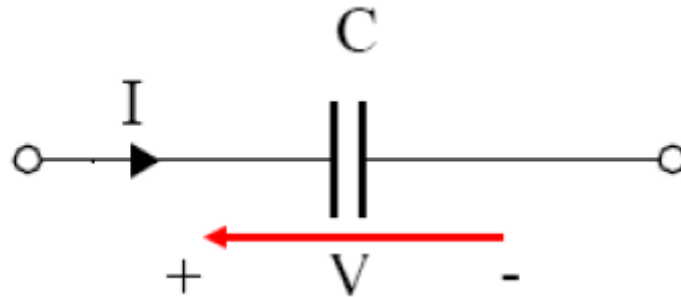
Rhéostats : On utilise deux bornes de la résistance variable pour régler l'intensité du courant dans la charge (montage série).



Les condensateurs

Définition : Un condensateur est un dipôle constitué de 2 lames métalliques (les armatures) séparées par un isolant, se charge d'une quantité d'électricité (Q) lorsqu'il est soumis à une tension. Cette charge Q dépend de la tension et de la durée auquel il a été soumis à cette tension.

Sur un schéma électrique, le symbole du condensateur est reconnaissable par 2 traits parallèles qui représentent les 2 armatures conductrices :



Quantité de charge et énergie stockée par un condensateur parfait

La quantité de charge électrique emmagasinée par un condensateur est :

$$Q = C \cdot U$$

Q : Charge électrique en coulomb [C]

C : Capacité en farad [F] est donné par la relation $C = 8,85 \times 10^{12} \epsilon_0 \frac{S}{e}$

U : Tension en volt [V]

La quantité d'énergie emmagasinée par un condensateur dépend directement de la tension à ses bornes et de la valeur de la capacitance.

$$E = \frac{1}{2} C U$$

Relation V-I pour un condensateur parfait

Le condensateur idéal est un élément de circuit (dipôle) qui laisse passer un courant proportionnellement aux taux de changement de la tension appliquée entre ses bornes. On a :

Caractéristiques d'un condensateur

- Capacité (en pF, nF ou μF)
- Tension de service (en V)
- Tolérance (en %)
- Coefficient de température (en ppm/°C)
- Polarité éventuelle (condensateurs polarisés)

Équation différentielle :

- D'après la loi d'additivité des tensions (ou loi des mailles), $E = Ri + u$
- A l'aide de la relation intensité tension du paragraphe précédent, on en déduit que $E = RC \frac{du}{dt} + u$

Équation différentielle du circuit RC :

$$\frac{E}{RC} = \frac{du}{dt} + \frac{1}{RC}u$$

La solution de cette équation différentielle est de la forme $u(t) = Ae^{-kt} + B$

- Au bout d'un temps infini, le condensateur est chargé et le courant ne circule plus dans le circuit, ainsi la tension aux bornes de R est nulle et nous avons $E = u$, ce qu'on écrit quand $t \rightarrow \infty$, $u = B$ d'où $B = E$
- Comme u est une fonction continue du temps, elle doit valoir zéro à $t = 0$ puisque le condensateur était déchargé, ce qui nous permet de trouver que : $u(0) = 0 = A + B$
 $A = -B = -E$
- Enfin, pour trouver k , il faut se servir de l'équation différentielle : puisque la forme proposée est solution de celle-ci, remplaçons u par son expression dans celle-ci :

$$\begin{aligned}\frac{d(-Ee^{-kt} + E)}{dt} + \frac{1}{RC}(-Ee^{-kt} + E) &= \frac{E}{RC} \\ -k(-Ee^{-kt}) + \frac{1}{RC}(-Ee^{-kt} + E) &= \frac{E}{RC} \\ -k(-Ee^{-kt}) + \frac{1}{RC}(-Ee^{-kt}) + \frac{E}{RC} &= \frac{E}{RC} \\ -Ee^{-kt}(-k + \frac{1}{RC}) &= 0\end{aligned}$$

Cette équation devant être valable pour toute valeur de t , et notamment pour $t = 0$, c'est donc que $-k + \frac{1}{RC} = 0$ dont nous déduisons $k = \frac{1}{RC}$

- Solution de l'équation différentielle :

Tension aux bornes du condensateur en fonction du temps lors de la charge :

$$u(t) = -Ee^{-kt} + E$$

$$u(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

Les bobines :

Définition : La bobine est un composant passif non polarisé (indépendant du sens du courant qui la traverse, ce qui n'est pas le cas des diodes et de certains condensateurs).

Une bobine est constituée d'un enroulement d'un fil conducteur (ou de plusieurs) à spires jointives. Elle fonctionne grâce à ses propriétés électromagnétiques. En effet, le courant qui parcourt la bobine génère un champ électromagnétique autour et à l'intérieur des spires.

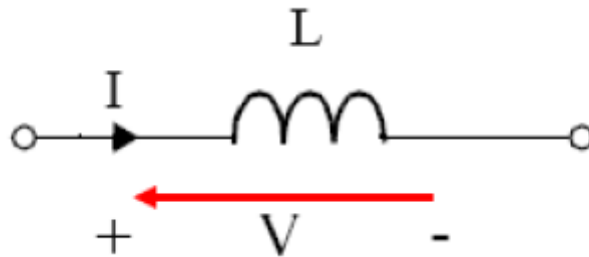
L'inductance d'une bobine :

Quand du courant traverse un fil conducteur, il engendre un champ magnétique autour de lui. Ce champ est décrit par un paramètre, appelé le **flux magnétique** Φ . Ce dernier est de plus proportionnel au courant. Le coefficient de proportionnalité porte le nom d'**inductance** et se mesure en Henry.

$$\Phi = L \cdot I$$

Modèle d'une bobine parfaite

Le symbole utilisé pour représenter une bobine parfaite dans les schémas de circuit est montré dans Figure suivant :



Relation V-I pour une bobine parfaite

Cette relation est déduite de la loi de Lenz :

$$V = \frac{d\Phi}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt}$$

Énergie stockée par une bobine parfaite

La quantité d'énergie emmagasinée est stockée sous la forme d'énergie magnétique. Elle dépend du courant qui circule dans ses enroulements. L'intensité du courant est limitée par la nature des fils des enroulements. Lorsqu'elle dépasse une certaine valeur, l'isolation entre les fils est détruite suite à un échauffement excessif et il y a l'apparition de courants de court-circuit.

$$W = \frac{\Phi I}{2} = \frac{L \cdot I^2}{2}$$

Caractéristiques d'une inductance

Valeur de l'inductance (μH , nH , mH , H)

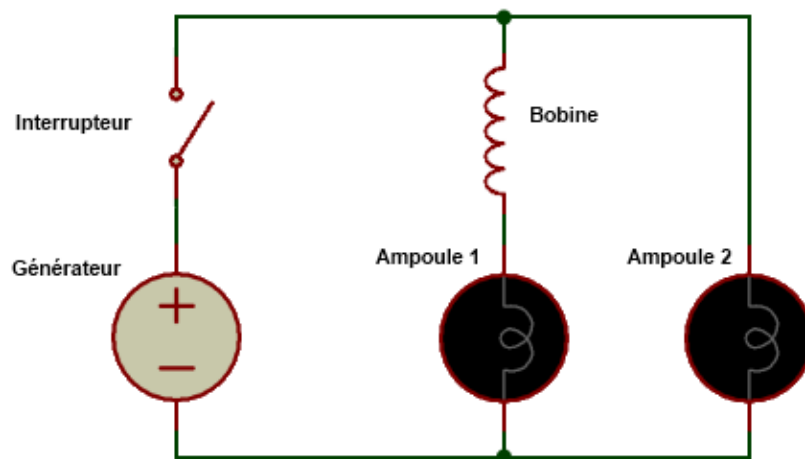
Résistance ohmique

Courant admissible (saturation magnétique)

En HF, coefficient de surtension ($Q = L\omega/R$)

Influence d'une bobine dans un circuit

Effectuons un petit montage :



A un instant, on ferme l'interrupteur. Immédiatement, la lampe 2 s'allume. Par contre, on remarque que la lampe 1 ne s'allume pas.

Quelques instants plus tard, à l'instant la lampe 1 s'allume à son tour.

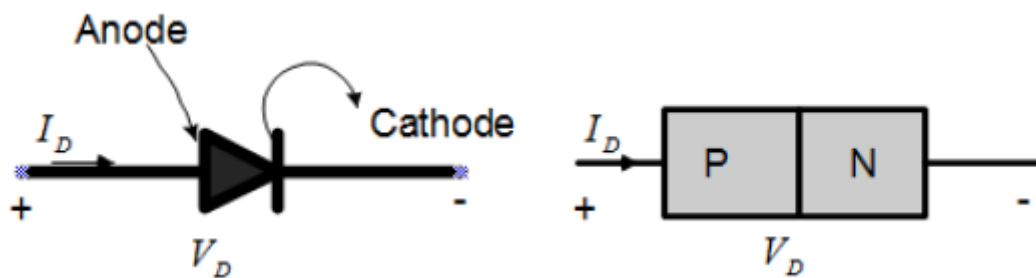
Une bobine s'oppose aux variations du courant. Une fois que le courant est stabilisé, la bobine se comporte comme un simple fil.

III. Composants actifs :

Un composant actif est un composant électronique qui permet d'augmenter la puissance d'un signal (tension, courant, ou les deux). On peut citer en majorité des semi-conducteurs, on y classe : diode, transistor, thyristor, triac, diac, le transistor à effet de champ (TEC ou FET).

La diode est un élément actif comportant deux électrodes désignées généralement par anode et cathode. La diode PN résulte de la jonction de deux éléments semi-conducteurs généralement en silicium. L'un des éléments a subi un dopage type P, l'autre un dopage type N.

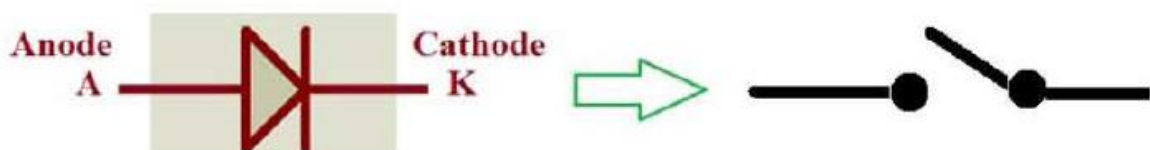
Schéma équivalent d'une diode :



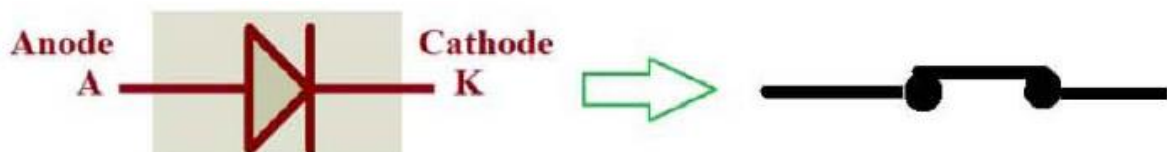
- La région P est représentée par l'anode.
- La région N est représentée par la cathode.

Une diode se comporte comme :

Un interrupteur ouvert lorsqu'elle est polarisé en inverse.

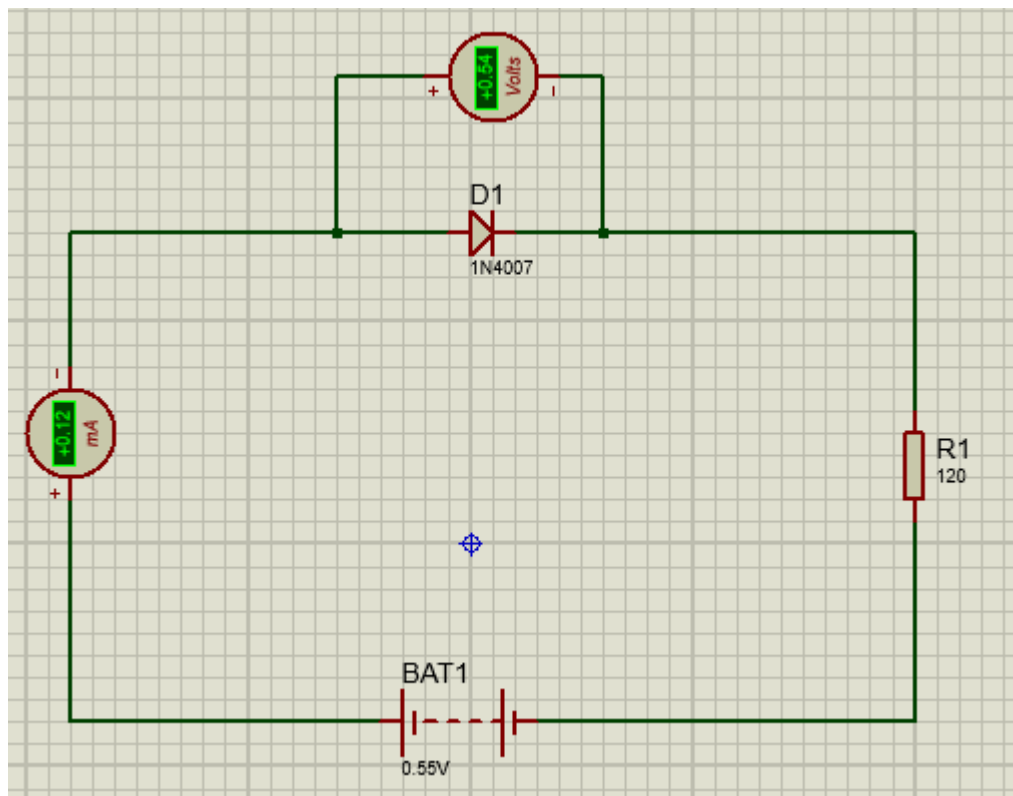


- Un interrupteur fermé lorsqu'elle est polarisé en directe

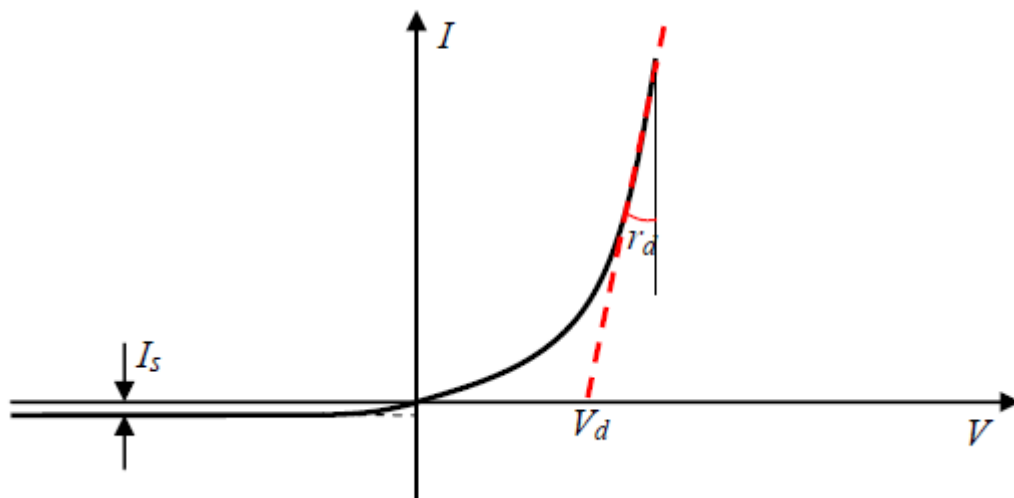


Caractéristique d'une diode :

Caractéristique directe



<u>Ud(v)</u>	<u>Id(mA)</u>
0.1	0
0.2	0
0.3	0
0.4	0
0.5	0.04
0.54	0.12
0.57	0.28
0.58	0.36
0.59	0.51
0.61	0.79
0.64	2.14
0.77	65.2
0.78	68.5
0.8	118



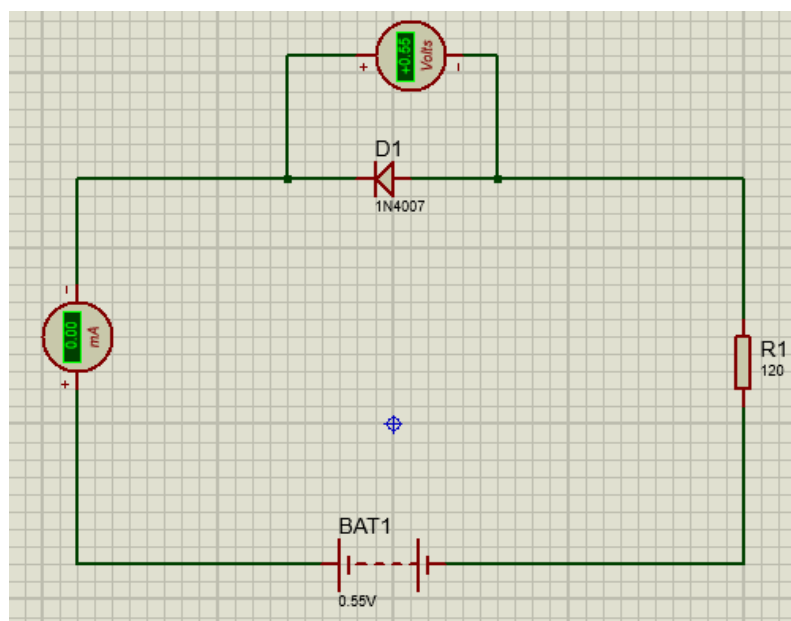
Interprétation de la courbe :

On constate que le courant I_d qui traverse la diode reste pratiquement nul quand U_d est inférieur U_s . Cette tension appelée tension de seuil de la diode.

Lorsque U_d dépasse cette tension de seuil, le courant I_d croît très rapidement.

Caractéristique inverse :

On réalise le schéma suivant :



On fait varier la tension du générateur E et on prélève la tension U_i au borne de la diode ainsi que le courant I_i qui la traverse.

$U_i(V)$	$I_i (\mu A)$
1	0
2	0
3	0
5	0.05
10	0.1
20	0.2

Interprétation de la courbe :

Le courant I_i traversant la diode en inverse est généralement négligeable (quelque μA) ; Si l'on augmente la tension inverse appliquée à une diode, celle-ci claque lorsque la tension atteint une valeur appelée TENSION DE CLAQUAGE U_c .

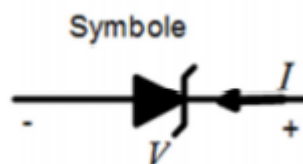
Le courant inverse croît rapidement d'une valeur négligeable à une valeur importante

Puissance dissipée dans une diode

En sens direct, la diode parcourue par un courant I et présentant à ses bornes une différence de potentiel V , dissipe (en général sous forme d'énergie calorifique) la puissance $P = VI$. Toute diode possède une puissance limite admissible P_{max} . Graphiquement, cette puissance définit une zone de fonctionnement possible pour la diode.

Modèle de la diode Zener

Dans le sens direct, cette diode se comporte comme une diode normale, dans le sens inverse la diode zener est équivalente à une source de tension de f.e.m V_z et de résistance interne r_z



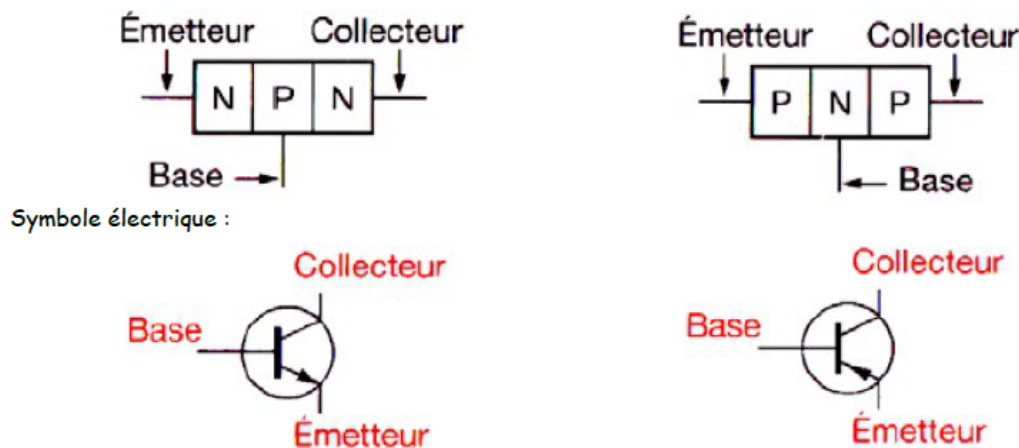
En polarisation directe : une diode Zener est équivalente à une diode normale.

En polarisation inverse : la diode conduit lorsque la tension inverse U_i devient supérieure à la tension Zener U_z . La caractéristique linéarisée conduit à l'équation : $U_i = U_z + R_z \cdot I_i$ où R_z est la résistance dynamique inverse.

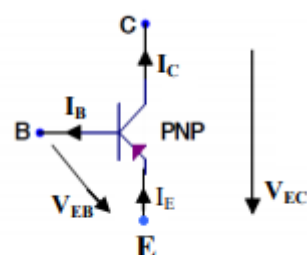
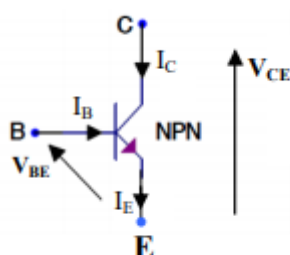
Transistor :

1. Structure d'un transistor bipolaire.

Un transistor est constitué de 2 jonctions PN (ou diodes) montées en sens inverse. Selon le sens de montage de ces diodes on obtient 2 types de transistors

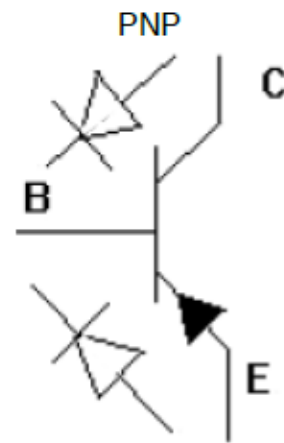
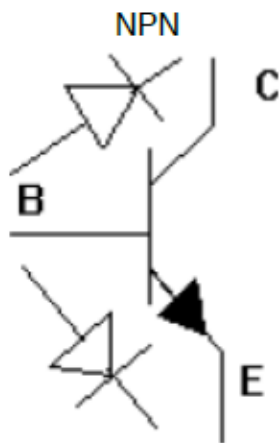


Un transistor comporte trois connexions : L'émetteur (E), la base (B) et le collecteur (C)	
Le transistor NPN	Le transistor PNP
La base, zone de type P, est située entre deux zones de type N.	La base, zone de type N, est située entre deux zones de type P.



Remarques :

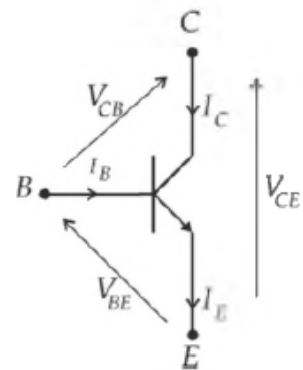
L'émetteur est toujours repéré par une flèche qui indique le sens du courant dans la jonction entre base et émetteur. C'est l'effet transistor qui permet à la diode qui est en inverse de conduire quand une tension est appliquée sur la base.



2. Les grandeurs électriques associées au transistor

Considérons un transistor NPN quelconque. En tant que dispositif électrique possédant trois bornes, il est possible de lui associer six grandeurs électriques : trois courants, I_B , I_C et I_E , ainsi que trois différences de potentiels, V_{BE} , V_{CE} et V_{CB} . Ces grandeurs sont bien sûr liées entre elles :

$$I_E = I_B + I_C \text{ et } V_{CB} = V_{CE} + V_{EB}.$$



Deux sources d'alimentation sont nécessaires pour assurer un fonctionnement correct du transistor. Elles sont souvent notées :

- V_{BB} : alimentation du circuit Base
- V_{CC} : alimentation du circuit Collecteur

Principe

C'est un petit courant dans la base (I_B) qui permet le passage d'un courant beaucoup plus fort du collecteur vers l'émetteur (I_C). Le courant de base est multiplié par un coefficient β :

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

Ce coefficient β (gain en courant du transistor) est souvent noté H_{fe} dans les catalogues constructeurs. Il est parfois aussi appelé coefficient d'amplification statique en courant.

En règle générale β varie de 30 à 300.