

Notes de cours

Module : Electronique

Niveau : M1 Génie Mécanique

Cours d'Electronique M1 génie Mécanique (Construction+Energétique)

Chapitre I : Notions préliminaires

I. Généralités

I.1 Définition de l'électronique :

La commission de l'électrotechnique internationale (CEI) définit l'électronique comme : La partie de la science et de la technique qui étudie les phénomènes de conduction dans le vide, dans les gaz ou dans les semiconducteurs et qui utilise les dispositifs basés sur ces phénomènes.

Par extension, nous pouvons dire que l'électronique est l'ensemble des techniques qui utilisent des signaux électriques pour capter, transmettre et exploiter une information. Une exception est l'électronique de puissance utilisée pour la conversion électrique-électrique de l'énergie.

Le champ d'application des dispositifs électroniques est vaste. Le tableau ci-dessous en donne un aperçu :

Télécommunications	Télégraphie, téléphonie, Transmission de données Radiodiffusion, télévision Télémesure, télécommande
Systemes de détection	Radar, sonar, télédétection
Electroacoustique	Enregistrement et reproduction des sons
Traitement de l'information	Ordinateurs, calculatrices, périphériques
Electronique industrielle	Commandes et réglages automatiques installations de surveillance
Instruments de mesures	Equipements industriels Equipements scientifiques
Machines de bureau	Ordinateur, fax, ...
Electronique biomédicale	Pace Maker, prothèses, ...
Horlogerie électronique	Horloge atomique, montres, ...

1.2 Circuits électriques

Un circuit électrique est un ensemble de *composants électriques* interconnectés d'une manière quelconque par des *conducteurs*.

– Un composant électrique est :

– dans le cas le plus simple un élément à deux bornes (on dit aussi un *dipôle*), que l'on représente sous la forme suivante :



Les bornes a et b servent à la connexion avec d'autres composants. Dans cette catégorie on trouve par exemple les résistances, les condensateurs, les bobines, piles,...etc.).

1.3 Courant, tension, puissance

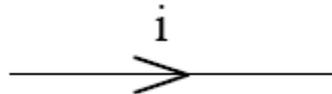
1.3.1 Courant électrique

Un courant électrique est un déplacement d'ensemble ordonné de charges électriques dans un conducteur. On le caractérise par une grandeur, l'*intensité*, définie comme étant le débit de charges électriques dans le conducteur. Cette grandeur est souvent notée I . Quand, pendant un temps dt , il passe dq Coulombs, l'intensité vaut

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

L'unité légale dans laquelle s'exprime l'intensité du courant électrique est l'*ampère* (A). Le courant dans le schéma d'un circuit électrique est représenté par une flèche. Il est à noter que du fait de la définition de l'intensité ($I = +\frac{dQ}{dt}$) et de la charge de l'électron (charge négative), le sens de déplacement effectif des électrons est l'opposé du sens positif du courant.

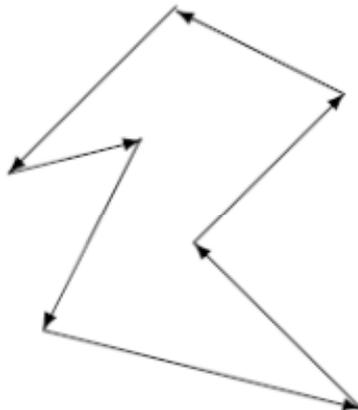
On représente un courant électrique par une flèche sur un conducteur, indiquant le sens positif de l'intensité :



Cette flèche indique que si les électrons passent de droite à gauche, on comptera une intensité positive ; négative s'ils vont de gauche à droite.

1.3.2 Différence de potentiel

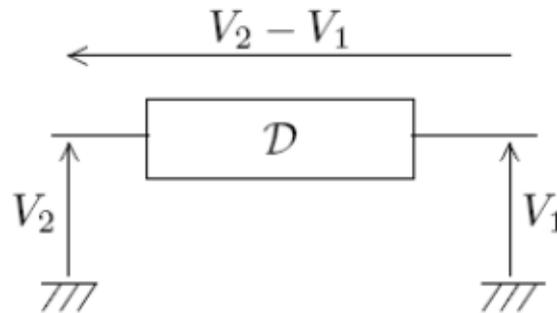
Au repos, les charges électriques d'un conducteur sont en mouvement continu sous l'effet de l'agitation thermique



Cependant, ce mouvement, à une vitesse non nulle, ne se traduit pas par un déplacement global susceptible de se traduire en courant électrique. Pour mettre en mouvement ces charges dans une direction donnée, il est nécessaire d'appliquer un *champ électrique* aux bornes du conducteur. En appliquant le potentiel électrique V_1 et le potentiel V_2 à ces deux bornes, on crée une *différence de potentiel* qui met les électrons en mouvement.

La valeur de la différence de potentiel est appelée la *tension*, et son unité est le *Volt* (V). Le *Volt* est défini de telle manière qu'une charge d'un Coulomb accélérée sous une tension de 1V acquiert une énergie de 1J : $1V=1J/C$.

On représente une différence de potentiel par une flèche à côté du composant, comme sur le schéma suivant :



Dans le bas de ce schéma, les symboles rayés indiquent la *référence de potentiel nulle*, appelée la *masse*, par rapport à laquelle sont définis les potentiels V_1 et V_2

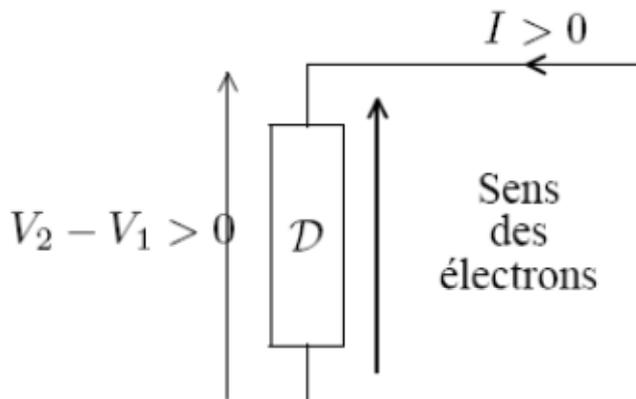
1.3.3 Energie, puissance

L'application d'une différence de potentiel aux bornes d'un conducteur permet de mettre en mouvement les charges électriques libres qu'il renferme. Ce faisant, on leur a communiqué de l'énergie cinétique en apportant de l'énergie électrostatique sous la forme de la différence de potentiel imposée. En se ramenant à une unité de temps, on peut introduire une *puissance électrique* définie comme étant le produit de la tension par le flux de charges par unité de temps dans le conducteur, autrement dit par l'intensité. Il est facile de vérifier que ce produit est effectivement homogène à une puissance : $1V \cdot 1A = 1(J/C) \cdot 1(C/s) = 1(J/s) = 1W$.

1.4 Conventions générateur/récepteur

- **Convention récepteur :**

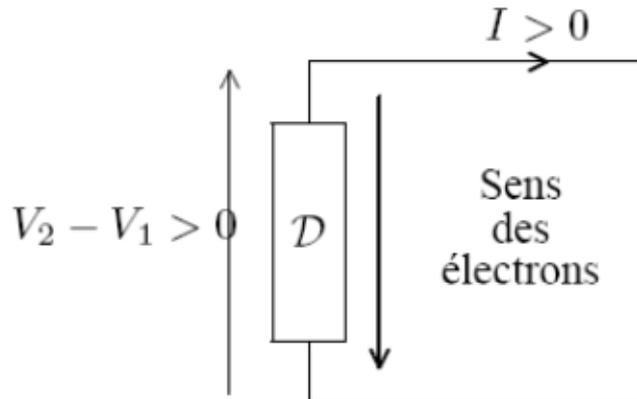
Considérons un dipôle capable uniquement de recevoir de l'énergie électrique. On impose aux bornes de ce dipôle une ddp $V_2 - V_1$, avec $V_2 > V_1$. Les électrons, de charges négatives, vont se diriger vers le pôle de potentiel le plus élevé. Par conséquent, le courant sera positif dans le sens contraire. Il s'ensuit que l'on peut définir une *convention récepteur* pour les sens positifs des courants et tensions, comme suit :



On notera que la flèche de la tension et celle du courant sont de sens opposés.

- **Convention générateur :**

Il s'agit cette fois-ci pour le dipôle d'imposer la tension à ses bornes et l'intensité du courant qui le traverse. En fait, on définit la *convention générateur* d'après la convention récepteur. Si l'on veut pouvoir brancher l'un en face l'autre un récepteur et un générateur, il faut nécessairement que les conventions de signe pour ce dernier soient les suivantes, pour qu'il n'y ait pas d'incompatibilité entre les définitions :

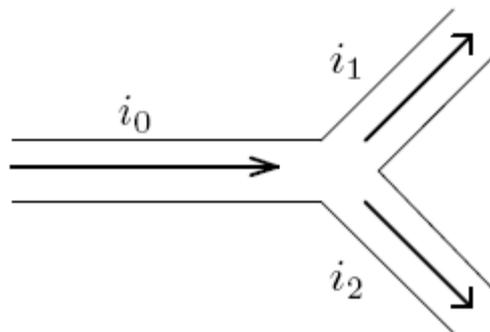


On notera que cette fois-ci, les deux flèches sont dans le même sens.

1.5 Lois de Kirchhoff

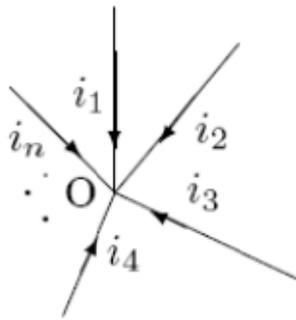
1.5.1 Loi des nœuds

Cette loi se déduit facilement de la notion de courant électrique. Supposons que l'on ait un flux $i_0 = \frac{dq}{dt}$ d'électrons dans un conducteur arrivant à un nœud d'un circuit électrique :



Les électrons venant de la gauche partiront soit dans la première, soit dans la deuxième branche. Mais le nombre total d'électrons par seconde restera le même que celui qui arrive en permanence par la gauche, et donc $i_0 = i_1 + i_2$ (avec les sens des courants définis suivant la figure précédente).

Dans la théorie des réseaux de Kirchhoff, un *nœud* est un point de convergence de plusieurs conducteurs.

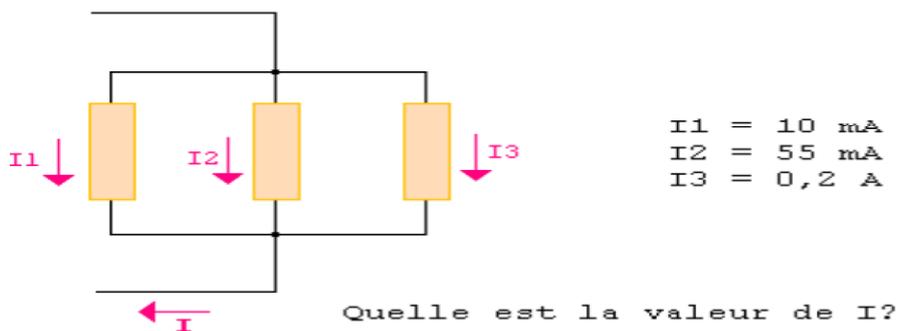


La loi des nœuds stipule alors que *la somme algébrique des courants arrivant à un nœud est constamment nulle* :

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0$$

Exemple :

Soit le schéma ci-contre. Quelle est la valeur du courant I?

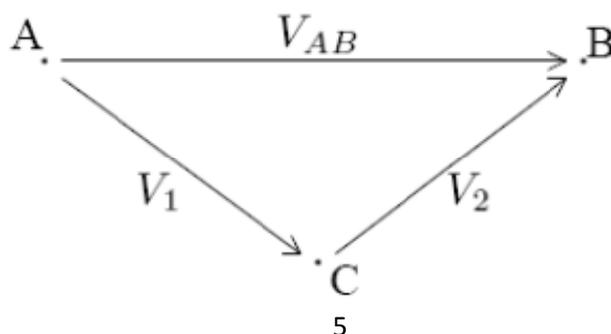


Appliquant la loi des nœuds

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 + I_3 \\ &= 10 \text{ mA} + 55 \text{ mA} + 200 \text{ mA} = 265 \text{ mA ou } 0,265 \text{ A} \end{aligned}$$

1.5.2 Loi des mailles

Cette loi découle de la remarque selon laquelle entre deux points quelconques, la différence de potentiel est bien définie. Considérons par exemple trois points A, B et C. On mesure entre A et B la tension $V_{AB} = V_B - V_A$, entre A et C la tension V_1 et entre C et B la tension V_2 :

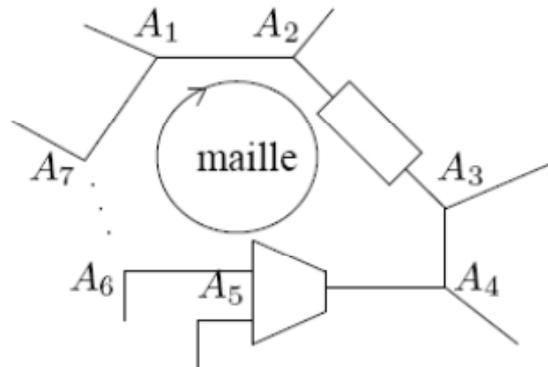


Par définition de V_1 , on a $V_1 = V_C - V_A$ et de même pour V_2 , $V_2 = V_B - V_C$. Il s'ensuit que

$$V_1 + V_2 = (V_C - V_A) + (V_B - V_C) = V_B - V_A = V_{AB}$$

Cela s'apparente à une relation vectorielle.

Dans la théorie des réseaux de Kirchhoff, une *maille* est une chaîne de conducteurs et de composants électriques, partant d'un point, et arrivant à ce même point, par exemple :



La loi des mailles stipule que la somme algébrique des tensions le long de la maille est constamment nulle :

$$\sum_{k=2}^n V_{A_k A_{k-1}} = 0$$

1.6 Dipôles électriques

Un dipôle électrique est un système accessible par deux bornes dans lequel peut circuler un courant électrique. Le comportement d'un dipôle est caractérisé par la relation entre la tension à ses bornes et le courant le traversant.

On distingue plusieurs types de dipôles :

1.6.1 La résistance

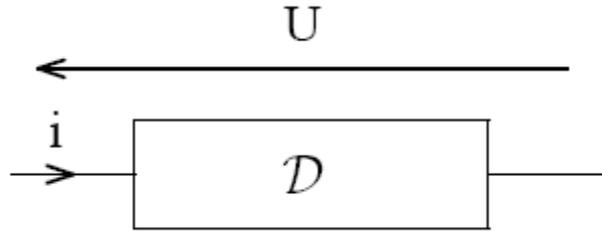
1.6.1.1 L'effet résistif

On considère un conducteur, aux bornes duquel on impose une différence de potentiel. On a déjà indiqué que ce conducteur serait alors traversé par un courant électrique, un flux d'électrons. Cependant, tous les matériaux ne conduisent pas l'électricité aussi facilement : certains offrent plus ou moins de *résistance* au passage des électrons. C'est ce phénomène que l'on appelle l'*effet résistif*.

1.6.1.2 Loi d'Ohm

Cette loi exprime que certains matériaux ont une réponse linéaire en courant à une différence de potentiel imposée.

Si l'on considère un tel dipôle, noté D aux bornes duquel on impose la différence de potentiel U , et traversé par le courant i . Ce dipôle est une résistance :



Quel que soit l'instant t , U et i vérifient la relation de proportionnalité

$$U(t) = R \cdot i(t)$$

où R est appelée *résistance*, et s'exprime en *Ohms* (Ω)

1.6.1.3 Aspect énergétique

On a déjà dit que la résistance traduisait la difficulté avec laquelle les électrons peuvent circuler dans le matériau.

Cette difficulté s'accompagne d'un échauffement : c'est ce qu'on appelle l'*effet Joule*. Cet échauffement, du point de vue du circuit électrique, est une perte d'énergie par dissipation thermique. Pour une résistance R , parcourue par un courant i et aux bornes de laquelle on mesure la tension U , cette puissance perdue P_J est égale à :

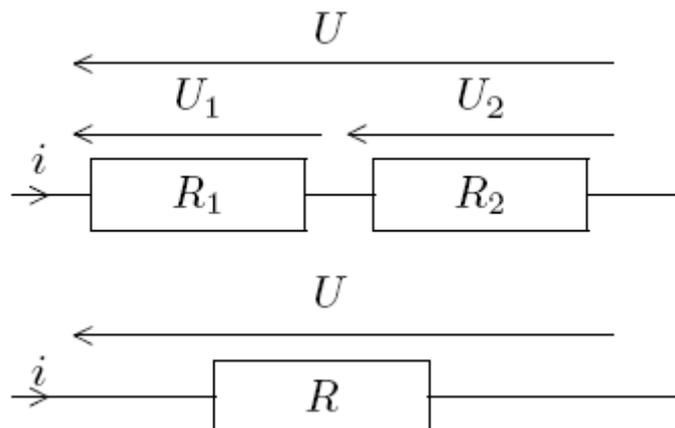
$$P_J = Ri^2 = \frac{U^2}{R}$$

Par exemple, une résistance $R = 10\Omega$ parcourue par un courant de $i = 0,5$ A dissipe 2,5 W.

1.6.1.4 Associations de résistances

Considérons deux résistances R_1 et R_2 . On peut les associer de deux manières : soit elles sont parcourues par le même courant (association en *série*), soit elles sont soumises à la même différence de potentiel (association en *parallèle*). On cherche dans chaque cas la résistance R équivalente à l'ensemble de R_1 et R_2 .

1. **Association en série** : Les deux résistances sont associées ainsi :



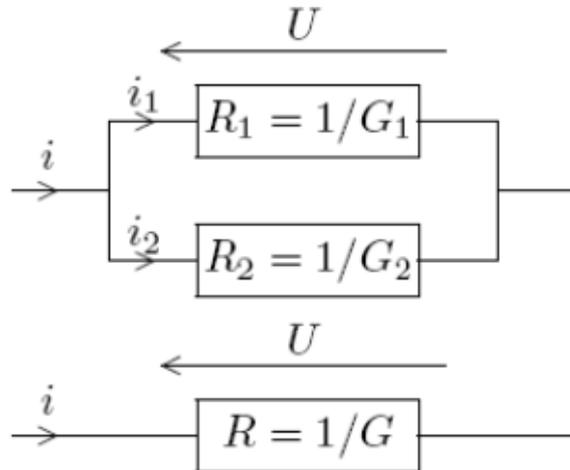
La loi des mailles nous permet d'écrire $U = U_1 + U_2$. Or on a aussi $U_1 = R_1 i$ et $U_2 = R_2 i$.

Il vient donc $U = (R_1 + R_2)i$, soit $R = R_1 + R_2$.

Pour N résistance en série $R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N$

La résistance équivalente à deux résistances mises en série est égale à la somme des résistances.

2. **Association en parallèle :** les deux résistances sont associées ainsi



La loi des nœuds nous permet d'écrire $i = i_1 + i_2$.

On a aussi :

$$i = \frac{U}{R} \quad \text{et} \quad i_1 = \frac{U}{R_1} \quad \text{et} \quad i_2 = \frac{U}{R_2}$$

Alors :

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

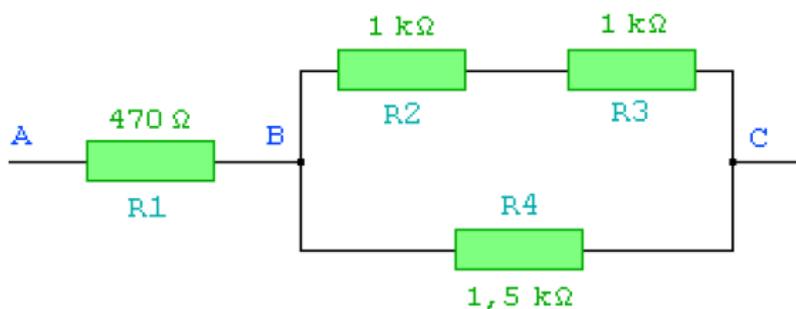
On a finalement :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

L'inverse de la résistance équivalente est égal à la somme des inverses des résistances.

Exemple :

Soit le schéma ci-dessous. Calculez la résistance équivalente entre "A" et "C".



Solution :

$$R_2 + R_3 = 1 \text{ k} + 1 \text{ k} = 2 \text{ k}$$

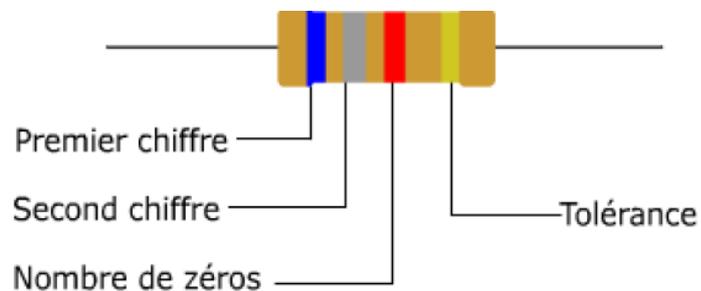
$$R_{BC} = \frac{(R_2 + R_3) \times R_4}{(R_2 + R_3) + R_4} = \frac{2 \text{ k} \times 1,5 \text{ k}}{2 \text{ k} + 1,5 \text{ k}} = 857$$

$$R_{eq} = R_1 + R_{BC} = 470 + 857 = 1327 = \boxed{1,327 \text{ k}\Omega}$$

1.6.1.5 Code de couleur dans le calcul des résistances

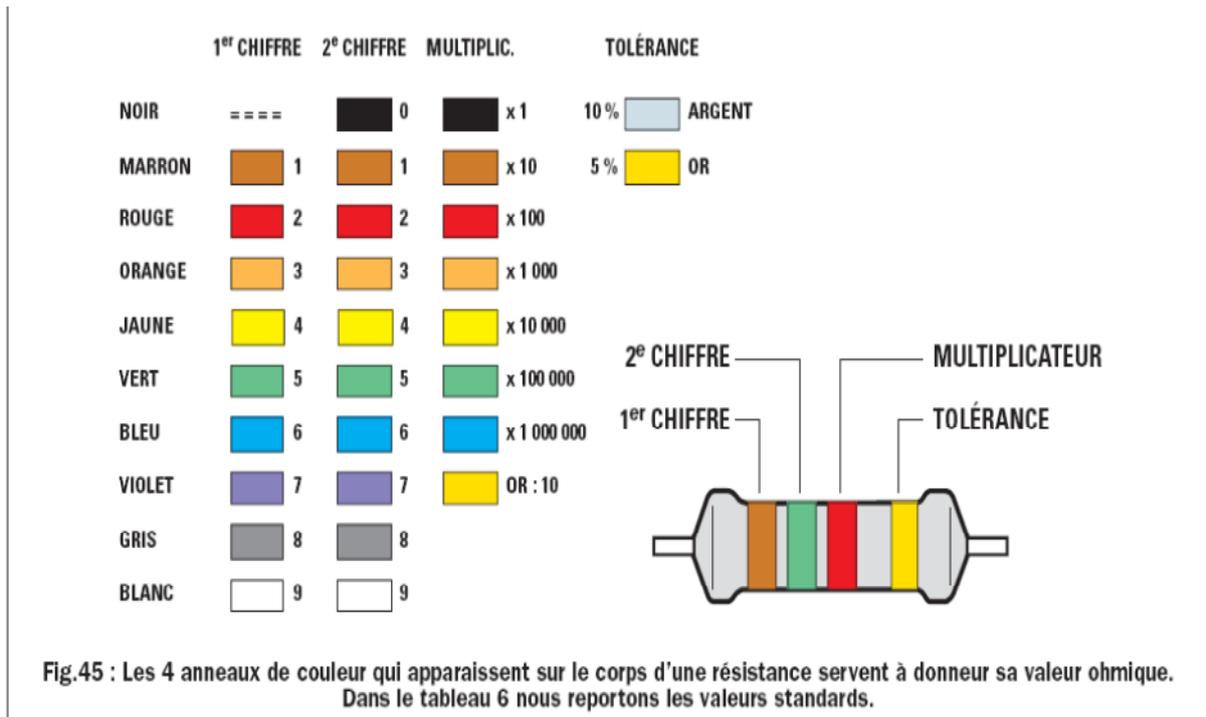
Les valeurs des résistances y sont codées avec des anneaux de couleur.

Le premier anneau est celui qui est le plus proche du bord. Les premiers anneaux servent à coder des chiffres significatifs. L'avant dernier anneau sert à indiquer le nombre de zéros et le dernier anneau argenté ou doré sert à indiquer la tolérance.



Code des couleurs

Noir	Brun	Rouge	Orange	Jaune	Vert	Bleu	Violet	Gris	Blanc
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

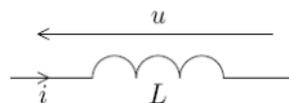


1.6.2 La bobine

Une bobine est un enroulement de spires conductrices. Lorsqu'une bobine est parcourue par courant, un champ magnétique apparaît. Cette propriété est l'origine de la relation courant-tension aux bornes d'une bobine.

$$U = L \frac{dI}{dt}$$

Où L est appelée l'*inductance* de la bobine et s'exprime en Henri (H). Dans un circuit électrique, on représente une bobine sous la forme suivante :



En **régime continu**, une bobine est équivalente à un fil (**interrupteur fermé**). La tension à ses bornes est nulle quelque soit le courant qui la traverse.

1.6.2.1 Aspect énergétique

Le phénomène physique correspond au stockage d'énergie sous forme magnétique. Le stockage est momentané et l'énergie est restituée au circuit en courant. L'énergie accumulée par la bobine vaut :

$$E_{mag}(t) = \frac{1}{2} Li(t)^2$$

1.6.3 Le condensateur

Les condensateurs sont composants constitué de :

- Deux conducteurs qui se font face, ce sont les armatures.
- Un isolant (diélectrique) situé entre les armatures.

Il existe plusieurs types de condensateurs de géométries différentes : plan, cylindrique, sphériques,...

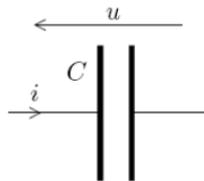
Expérimentalement, lorsqu'on applique une tension U aux bornes d'un condensateur, on observe que les armatures s'électrisent et acquièrent des charges respectivement (q) et ($-q$). Cette charge est proportionnelle à la tension appliquée U .

$$q = CU$$

La capacité C représente la capacité du condensateur à emmagasiner de la charge sous une tension donnée. Elle dépend de la géométrie du condensateur et du diélectrique utilisé. Elle s'exprime en Farad (F)

On utilisera couramment la relation tension-courant aux bornes du condensateur :

$$i = C \frac{du}{dt}$$



Remarque : En **régime continu**, le condensateur se comporte comme un **interrupteur ouvert**, le courant qui le traverse est nul quelque soit la tension appliquée à ses bornes.

1.6.3.1 Aspect énergétique

Le phénomène physique correspond au stockage d'énergie sous forme électrostatique. Le stockage est momentané et cette énergie est restituée au circuit sous forme de tension. L'énergie accumulée par le condensateur vaut :

$$E_{stat}(t) = \frac{1}{2} Cu(t)^2$$

Remarque : association des condensateurs

Association en série : l'inverse de la capacité équivalente est la somme des inverses des capacités en série.

Association en parallèle : la capacité équivalente est la somme des capacités en parallèle.

I. Le régime monophasé.

I.1. Rappels sur la description des grandeurs sinusoïdales.

a. Écriture des grandeurs sinusoïdales.

On écrira une tension sinusoïdale sous la forme

$$u = U_m \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (\text{rigoureusement pour une tension instantanée } u(t) = \dots)$$

avec

- U_m amplitude (V)
- ω pulsation (rad.s⁻¹)
- φ phase initiale (rad)
- $\omega t + \varphi$ phase instantanée (rad)

b. Valeur moyenne d'une grandeur périodique.

$$\langle u \rangle = 1/T \cdot \int_T u dt \quad (\text{pour un signal sinusoïdal } \langle u \rangle = 0)$$

c. Valeur efficace d'une grandeur périodique.

C'est la racine carré de la valeur moyenne du carré de la grandeur considérée.

$$U = \sqrt{1/T \cdot \int_T u^2 dt} \quad (\text{rms pour root mean square chez les anglo-saxons})$$

Pour une tension sinusoïdale on trouve :

$$U = U_m / \sqrt{2} \quad \text{ainsi on écrira souvent } u = U\sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

La valeur efficace est celle indiquée par les voltmètres et les ampèremètres. En électrotechnique on donne toujours la valeur efficace des tensions et des courants. Ainsi quand on parle du réseau électrique domestique à 220 V il s'agit bel et bien de la valeur efficace de la tension.

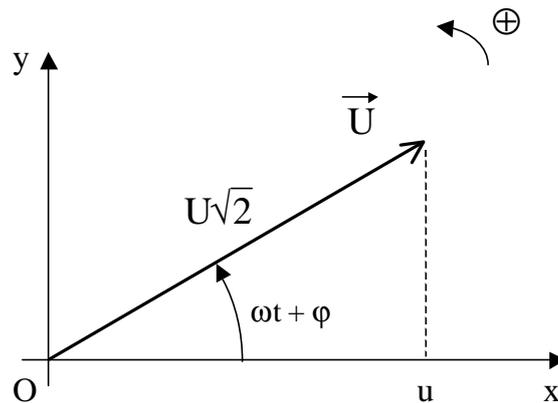


: au type d'appareil de mesure utilisé. Les voltmètres et ampèremètres ferromagnétiques et électrodynamiques indiquent la valeur efficace quelque soit la forme du signal mesuré (sinusoïdal ou non) ; tandis que les appareils magnétoélectriques ne donnent une valeur efficace exacte que pour des grandeurs sinusoïdales.

d. Représentation vectorielle (vecteurs de Fresnel).

On peut faire correspondre à toute fonction sinusoïdale un vecteur de Fresnel partant de l'origine du repère, de module l'amplitude de la fonction et faisant un angle égale à sa phase instantanée avec l'axe (Ox) pris comme origine des phases, grâce à sa projection sur l'axe (Ox).

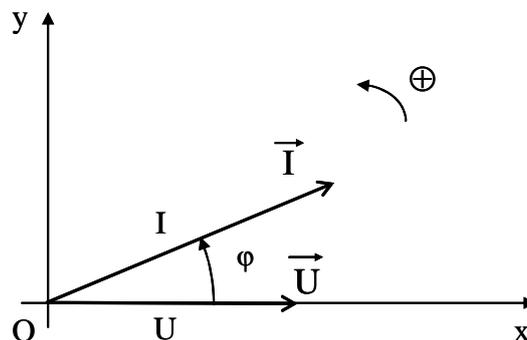
Par exemple, pour une tension $u = U\sqrt{2}.\cos(\omega t + \varphi)$ quand on dessine \vec{U} le vecteur de Fresnel associé :



on retrouve bien u en projection sur (Ox).

Par **convention** on représentera les vecteurs de Fresnel à $t = 0$ et avec comme module la valeur efficace de la grandeur considérée.

Par exemple, pour une tension $u = U\sqrt{2}.\cos(\omega t)$ et un courant $i = I\sqrt{2}.\cos(\omega t + \varphi)$ on dessine



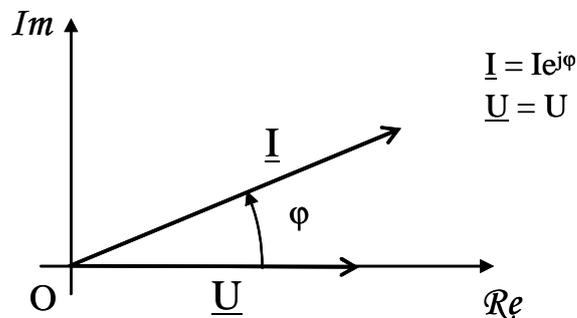
φ est le déphasage entre les deux vecteurs (on prendra souvent les tensions comme référence pour les déphasages).



: dans un même diagramme de Fresnel on ne peut représenter que des grandeurs ayant la même pulsation.

e. Notation complexe.

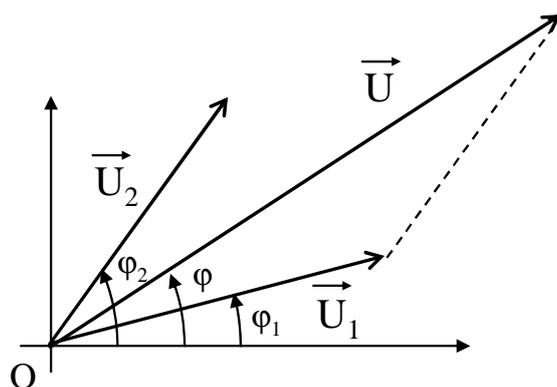
On caractérise également les grandeurs sinusoïdales par les composantes de leurs vecteurs représentatifs dans le plan complexe.



Addition/soustraction

L'addition (ou la soustraction) de deux grandeurs sinusoïdales de même pulsation, $u_1 = U_1\sqrt{2}.\cos(\omega t + \varphi_1)$ et de $u_2 = U_2\sqrt{2}.\cos(\omega t + \varphi_2)$, est une grandeurs sinusoïdale de même pulsation $u = U\sqrt{2}.\cos(\omega t + \varphi)$.

La détermination de u est peu évidente à effectuer par le calcul ; on obtient une solution bien plus rapidement par construction graphique en utilisant les propriétés d'addition (ou de soustraction) vectorielle : $\vec{U} = \vec{U}_1 + \vec{U}_2$, ou bien en utilisant les propriétés d'addition des complexes.



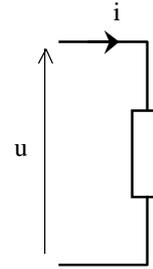
Dérivation / Intégration

La dérivation ou l'intégration d'une grandeur sinusoïdale donne une grandeur sinusoïdale de nature différente mais de même pulsation.

Graphiquement, dériver revient à multiplier le module de la grandeur considérée par ω et à la déphaser en avant de $\pi/2$; intégrer revient à diviser son module par ω et à la déphaser en arrière de $\pi/2$.

I.2. Puissances en régime monophasé.

Avec la convention de signe récepteur si la puissance est positive alors le système considéré reçoit de l'énergie, si la puissance est négative alors il cède de l'énergie.



a. Puissance instantanée.

$$\mathbf{p} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{i} \quad (\text{watt} - \mathbf{W})$$

b. Puissance active (puissance moyenne).

La puissance active est la valeur moyenne de la puissance instantanée ; dans le cas de grandeurs périodiques de période T :

$$\mathbf{P} = \langle \mathbf{p} \rangle = 1/T \cdot \int_T \mathbf{p} dt \quad (\text{watt} - \mathbf{W})$$

C'est l'énergie effectivement récupérable par la charge (sous forme de travail mécanique, de chaleur, etc.).

Dans le cas d'un courant et d'une tension sinusoïdales $u = U\sqrt{2} \cdot \cos(\omega t)$ et $i = I\sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \varphi)$ on trouve¹

$$\mathbf{p} = UI \cdot \cos\varphi + UI \cdot \cos(2\omega t + \varphi)$$

d'où $\mathbf{P} = UI \cdot \cos\varphi$ la puissance active en régime sinusoïdal monophasé.

On retrouve ce résultat en écrivant $\mathbf{P} = \vec{U} \cdot \vec{I}$ (produit scalaire des vecteurs associés à la tension et à l'intensité)

c. Puissance apparente.

On définit la puissance apparente par :

$$\mathbf{S} = \mathbf{UI} \quad (\text{volt-ampère} - \mathbf{VA})$$

Ce qui permet d'introduire le facteur de puissance :

$$\mathbf{k} = \mathbf{P} / \mathbf{S} \quad (\text{sans unité})$$

En régime sinusoïdal on trouve donc $k = \cos\varphi$.

¹ $2 \cdot \cos a \cdot \cos b = \cos(a + b) + \cos(a - b)$

d. Puissance réactive en régime sinusoïdal.

La puissance réactive en régime sinusoïdal est donnée par

$$Q = UI \cdot \sin\varphi \quad (\text{volt-ampère réactifs – VAR})$$

On peut alors écrire

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

et un certain nombre de relation utiles lors des résolutions d'exercices :

$$\tan\varphi = Q / P \quad \cos\varphi = P / S \quad \sin\varphi = Q / S$$

Vectoriellement on peut exprimer la puissance réactive sous la forme d'un produit scalaire :

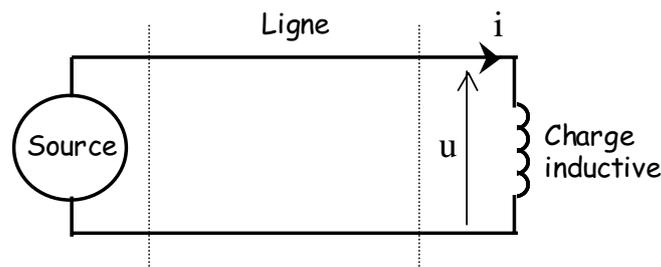
$$Q = \vec{U}' \cdot \vec{I} \quad \text{avec } \vec{U}' \text{ vecteur déphasé en arrière de } \pi/2 \text{ par rapport à } \vec{U} \text{ et de même norme.}$$

Interprétation physique.

La puissance réactive traduit les échanges d'énergie, à valeur moyenne nulle entre une source et une inductance ou une capacité.

Ainsi si on considère une source de tension sinusoïdale alimentant une charge purement inductive via une ligne, la puissance active consommée par la charge est nulle. En effet dans l'inductance la tension est en avance de $\varphi = \pi/2$ par rapport au courant, d'où $P = UI \cdot \cos\varphi = 0$.

La puissance réactive est égale à la puissance apparente $Q = UI \cdot \sin\varphi = UI = S$ et $k = 0$.



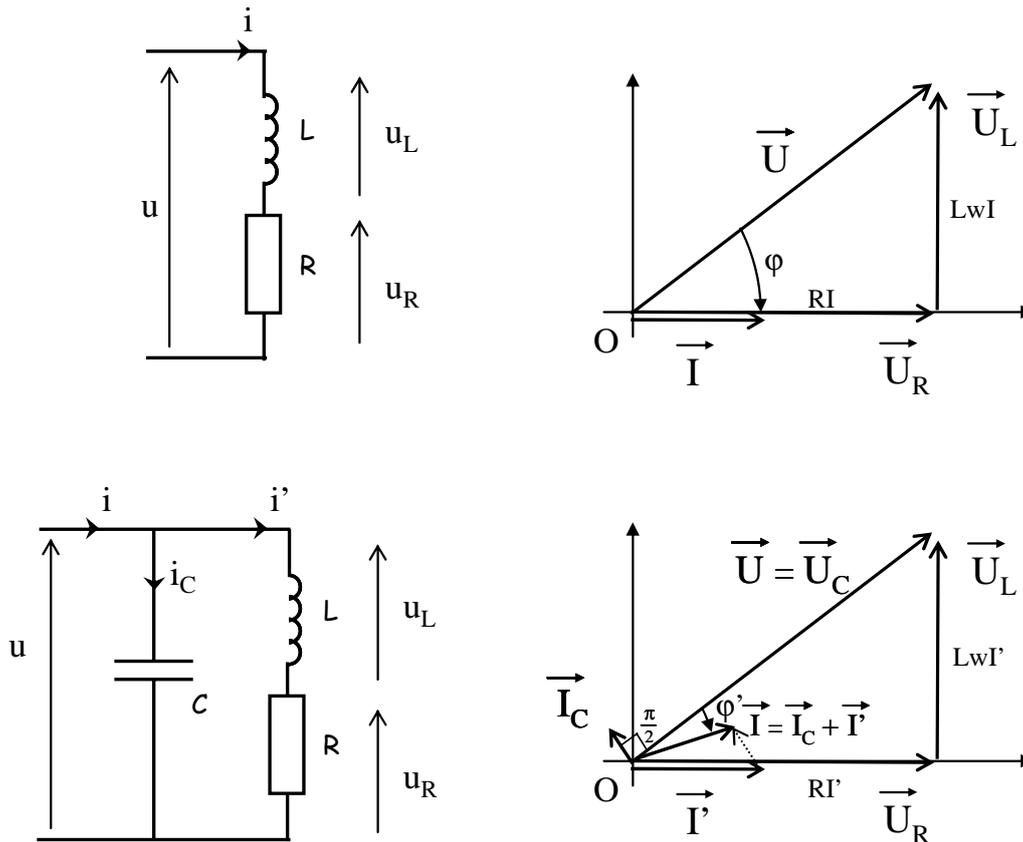
Périodiquement, l'inductance stocke une certaine énergie magnétique fournie par la source puis la restitue ; cet échange d'énergie se fait via la ligne électrique. C'est la puissance apparente qui permet de dimensionner la ligne, cette dernière est parcourue par l'énergie électrique échangée et est le siège de pertes par effet Joule.

Les installations industrielles sont en général inductives (à cause des enroulements des moteurs), de plus les compteurs électriques mesurent et permettent de facturer la puissance active consommée par un abonné. Ainsi si le facteur de puissance d'un abonné est faible les

pertes joule dans le réseau électrique sont élevées par rapport à la puissance active qui lui est facturée. Aussi EDF impose-t-il une valeur minimale du facteur de puissance (un $\cos\varphi$ minimal), sous peine de pénalités financières, aux utilisateurs.

Le facteur de puissance k , définit en quelque sorte un taux d'activité "utile" de la ligne.

Pour relever le facteur de puissance d'une charge inductive il suffit de placer en parallèle de la charge des condensateurs en batterie, cette technique est illustrée figure suivante (la tension U étant imposée par le réseau elle n'est pas modifiée) :



$$\cos\varphi' > \cos\varphi$$

A noter que la capacité ajoutée ne consomme pas de puissance active.

e. Théorème de Boucherot.

Dans un réseau, à fréquence constante, il y a conservation de la puissance active d'une part et de la puissance réactive d'autre part.



: le théorème de Boucherot n'est pas valable pour la puissance apparente.

Ainsi si on considère l'association de k dipôles, qu'ils soient placés en série, en parallèle ou en toute combinaison série-parallèle possible, on a :

$$\mathbf{P} = \sum_k \mathbf{P}_k \quad \mathbf{Q} = \sum_k \mathbf{Q}_k \quad \mathbf{S} \neq \sum_k \mathbf{S}_k$$

avec P , Q et S les puissances actives, réactives et apparentes de l'ensemble et P_k , Q_k et S_k celles associées à chacun des dipôles.

La démonstration du théorème de Boucherot est donnée en annexe.

f. Puissance complexe.

On définit également une puissance complexe

$$\underline{\mathcal{P}} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = P + jQ$$

Chapitre 3

Du semi-conducteur aux transistors

Remarque : ce chapitre est très largement inspiré de la partie correspondante du remarquable *Cours d'électronique pour ingénieurs physiciens* de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, accessible par Internet à <http://c3iwww.epfl.ch/teach>

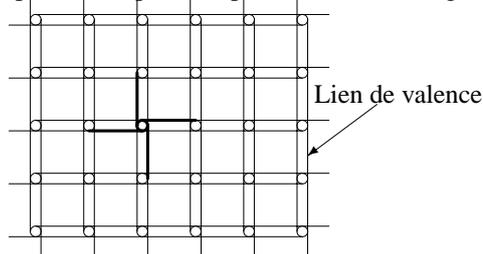
3.1 Les semi-conducteurs

Cette partie va présenter quelques modèles simples de semi-conducteurs, en vue d'expliquer rapidement le fonctionnement des dispositifs les utilisant, tels que diode, transistor à effet de champ, transistor bipolaire, etc.

3.1.1 Semi-conducteurs intrinsèques

3.1.1.1 Réseau cristallin

Un cristal de semi-conducteur intrinsèque est un solide dont les noyaux atomiques sont disposés aux noeuds d'un réseau géométrique régulier. La cohésion de cet édifice est assurée par les liens de valence qui résultent de la mise en commun de deux électrons appartenant chacun à deux atomes voisins de la maille cristalline. Les atomes de semi-conducteur sont tétravalents^{3.1} et le cristal peut être représenté par le réseau de la figure suivante :



3.1.1.2 Définitions

L'électron qui possède une énergie suffisante peut quitter la liaison de valence pour devenir un *électron libre*. Il laisse derrière lui un *trou* qui peut être assimilé à une charge libre positive ; en effet, l'électron quittant la liaison de

3.1. Chaque atome peut former quatre liaisons de valence. Un atome trivalent peut former trois liaisons, et un atome pentavalent peut former cinq liaisons.

valence à laquelle il appartenait démasque une charge positive du noyau correspondant. Le trou peut être occupé par un autre électron de valence qui laisse, à son tour, un trou derrière lui : tout se passe comme si le trou s'était déplacé, ce qui lui vaut la qualification de charge libre. La création d'une paire électron libre-trou est appelée *génération* alors qu'on donne le nom de *recombinaison* au mécanisme inverse.

La température étant une mesure de l'énergie cinétique moyenne des électrons dans le solide, la concentration en électrons libres et en trous en dépend très fortement.

3.1.1.3 Exemples

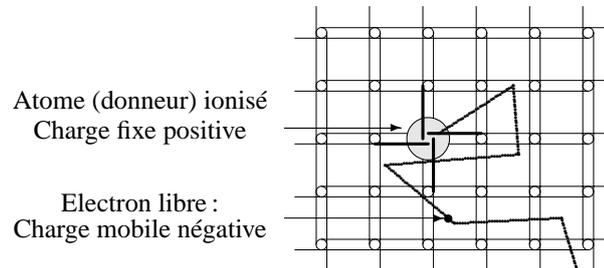
Le silicium a un nombre volumique d'atomes de 5.10^{22} par cm^3 . A 300K (27°C), le nombre volumique des électrons libres et des trous est de $1,5.10^{10} \text{ cm}^{-3}$, soit une paire électron libre-trou pour $3,3.10^{12}$ atomes.

Le nombre volumique des atomes dans le germanium est de $4,4.10^{22}$ par cm^3 . A 300K, le nombre volumique des électrons libres et des trous est $2,5.10^{13} \text{ cm}^{-3}$, soit une paire électron libre-trou pour $1,8.10^9$ atomes.

3.1.2 Semi-conducteurs extrinsèques de type *n*

3.1.2.1 Réseau cristallin

Un semiconducteur dans lequel on aurait substitué à quelques atomes tétravalents des atomes pentavalents est dit *extrinsèque de type n* :



Quatre électrons de la couche périphérique de l'atome pentavalent prennent part aux liens de valence alors que le cinquième, sans attache, est libre de se mouvoir dans le cristal. L'électron libre ainsi créé neutralise la charge positive, solidaire du réseau cristallin, qu'est l'atome pentavalent ionisé.

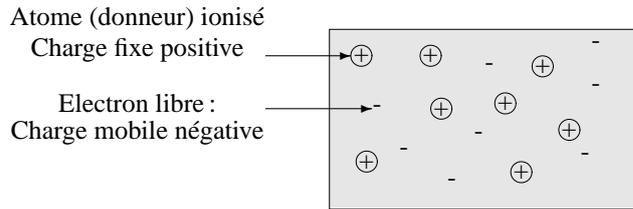
3.1.2.2 Définitions

Le *dopage* est l'action qui consiste à rendre un semiconducteur extrinsèque. Par extension, ce terme qualifie également l'existence d'une concentration d'atomes étrangers : on parle de dopage de type *n*. On donne le nom d'*impuretés* aux atomes étrangers introduits dans la maille cristalline. Dans le cas d'un semiconducteur extrinsèque de type *n*, les impuretés sont appelées *donneurs* car chacune d'entre elles donne un électron libre.

3.1.2.3 Modèle

Les dopages courants sont d'environ 10^{16} à 10^{18} atomes par cm^3 . On peut admettre que le nombre volumique des électrons libres est égal au nombre volumique des impuretés et que le nombre volumique des trous (charges libres

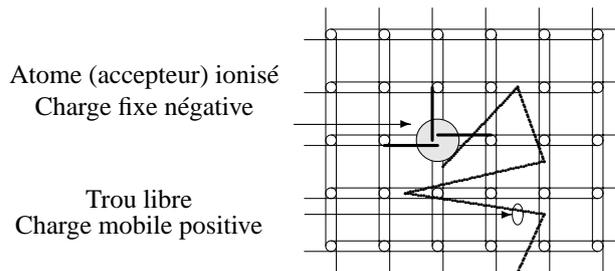
positives) est négligeable. Etant données ces considérations, on établit le modèle de semiconducteur représenté ci-dessous dans lequel n'apparaissent que les charges essentielles, à savoir les électrons libres et les donneurs ionisés. Les charges fixes sont entourées d'un cercle.



3.1.3 Semi-conducteurs extrinsèques de type p

3.1.3.1 Réseau cristallin

Si l'on introduit des atomes trivalents dans le réseau cristallin du semiconducteur, les trois électrons de la couche périphérique de l'impureté prennent part aux liens de valence, laissant une place libre. Ce trou peut être occupé par un électron d'un autre lien de valence qui laisse, à son tour, un trou derrière lui. L'atome trivalent est alors ionisé et sa charge négative est neutralisée par le trou (voir figure ci-dessous). Le semi-conducteur est alors dit *extrinsèque de type p*. Les impuretés, pouvant accepter des électrons, sont appelées *accepteurs*.

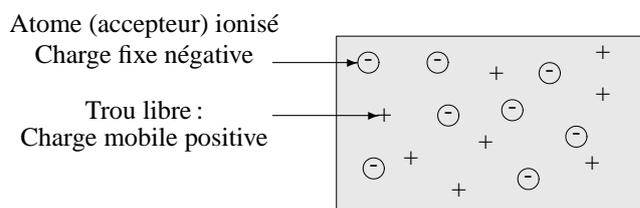


3.1.3.2 Définition

Les impuretés, dans un semi-conducteur extrinsèque de type p, sont appelées *accepteurs* au vu de leur propriété d'accepter un électron situé dans un lien de valence.

3.1.3.3 Modèle

On peut faire les mêmes considérations qu'au paragraphe 3.1.2.3 concernant le nombre volumique des trous : il est approximativement égal au nombre volumique des impuretés. Le nombre volumique des électrons libres est alors considéré comme négligeable. Il s'ensuit un modèle, représenté à la figure ci-dessous, dans lequel n'apparaissent que les charges prépondérantes : les trous et les accepteurs ionisés.



Remarque : il faut remarquer que le semiconducteur extrinsèque, type p ou type n , est globalement neutre. On peut le comparer à un réseau géométrique dont certains nœuds sont chargés et dans lequel stagne un « gaz » de charges mobiles qui neutralise les charges fixes du réseau. On élargit, par la suite, la notion de semiconducteur de type n à un semiconducteur dont le nombre volumique des donneurs l'emporte sur celui des accepteurs et celle de semiconducteur de type p à un semiconducteur dans lequel le nombre volumique des accepteurs est prépondérant.

Ce qu'il faut retenir

- la nature d'un semi-conducteur intrinsèque ;
- le dopage (type n et p) et ses conséquences.

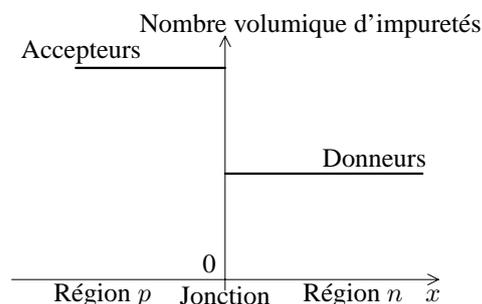
3.2 La jonction PN

3.2.1 Introduction

Le dopage non uniforme d'un semiconducteur, qui met en présence une région de type n et une région de type p , donne naissance à une jonction pn . Une telle jonction est aussi appelée *diode*. Dans la présente section, on étudie, qualitativement, les phénomènes qui ont pour siège la jonction pn . On donne également la relation exponentielle qui lie courant et tension dans une telle jonction.

3.2.2 Description

Soit le semiconducteur à dopage non uniforme ci-dessous qui présente une région p à nombre volumique d'atomes accepteurs constant, suivie immédiatement d'une région n à nombre volumique de donneurs constant également.



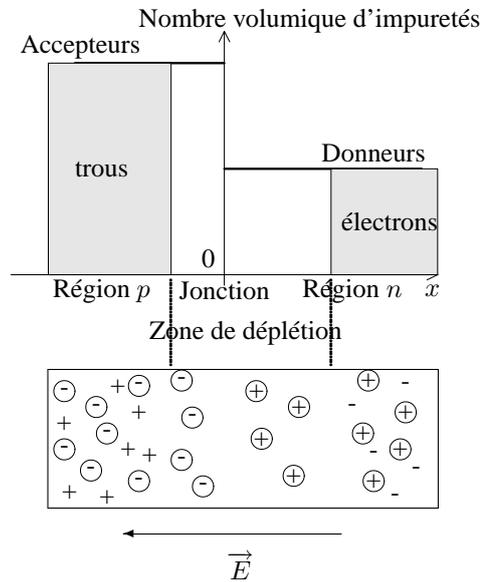
La surface de transition entre les deux régions est appelée jonction pn abrupte. Du fait de la continuité du réseau cristallin, les « gaz » de trous de la région p et d'électrons de la région n ont tendance à uniformiser leur concentration dans tout le volume à disposition. Cependant, la diffusion des trous vers la région n et des électrons libres vers la région p provoque un déséquilibre électrique si bien que, dans la zone proche de la jonction, la neutralité électrique n'est plus satisfaite. On trouve, dans la région p , des atomes accepteurs et des électrons, soit une charge locale négative, et dans la région n , des atomes donneurs et des trous, soit une charge locale positive. Il s'est donc créé un dipôle aux abords de la jonction et, conjointement, un champ électrique. Une fois l'équilibre atteint, ce champ électrique est tel qu'il s'oppose à tout déplacement global de charges libres.

3.2.3 Définitions

La région dans laquelle la neutralité n'est pas satisfaite est appelée *zone de déplétion* ou *zone de charge spatiale* alors que les autres régions sont dites *régions neutres*.

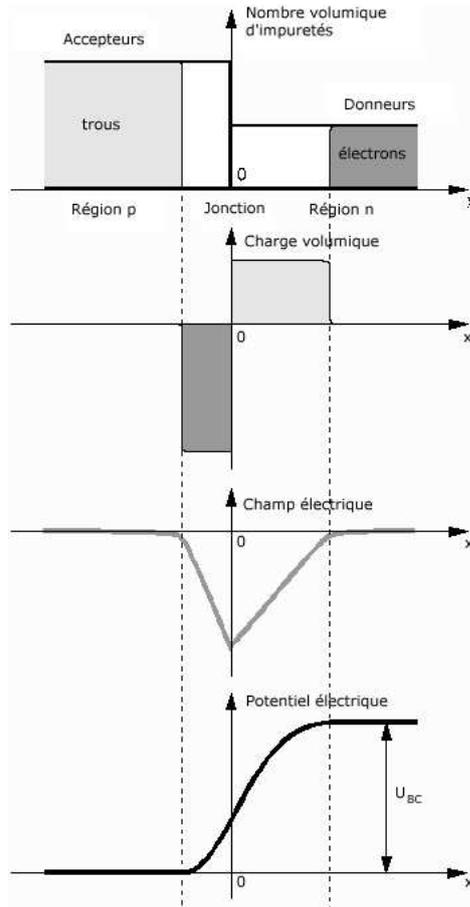
Le champ électrique interne créé par le dipôle est nommé *champ de rétention de la diffusion* car il s'oppose à toute diffusion des charges mobiles.

Remarque : généralement, la concentration des charges mobiles dans la zone de charge spatiale est négligeable vis-à-vis du nombre volumique des charges fixes. On idéalise cet état de fait et l'on admet qu'il n'y a pas de charges mobiles dans la zone de déplétion :



3.2.4 Barrière de potentiel

Il existe, entre la région p et la région n, une barrière de potentiel U_{B0} énergétique pour les charges mobiles. L'existence de cette barrière se traduit par une différence de potentiel électrique liée au champ de rétention de la diffusion :



Exemple : pour une jonction pn au silicium avec un dopage $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ dans la région p et un dopage $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ dans la région n, la hauteur de la barrière de potentiel à 300 K (27°C) à l'équilibre vaut 872mV.

Remarque : la hauteur de la barrière de potentiel à l'équilibre est telle que les trous qui sont dans la région p ont une énergie moyenne qui est juste assez insuffisante pour leur interdire de passer la barrière de potentiel. Il en va de même pour les électrons qui se trouvent dans la région n.

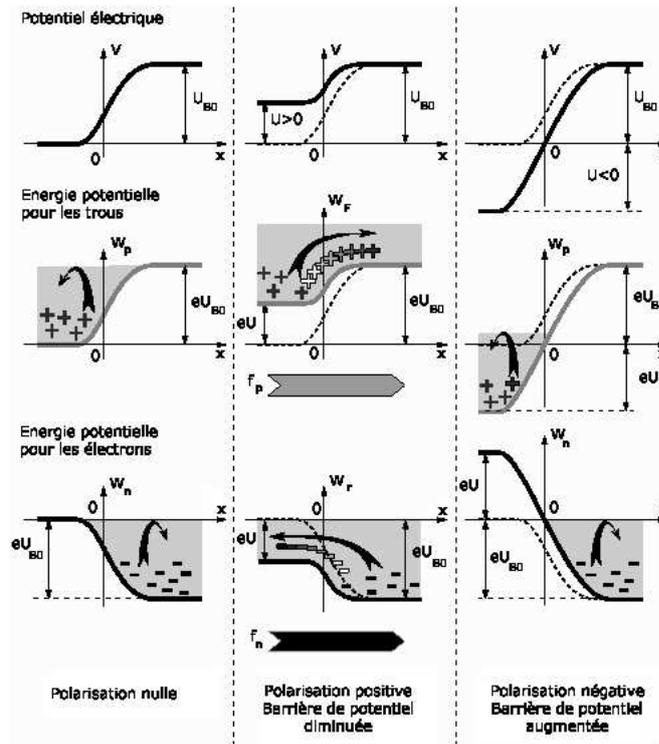
3.2.5 Caractéristique électrique

3.2.5.1 Description

Si l'on applique une tension U à la jonction, cette tension se reporte presque entièrement à la zone de déplétion qui présente une résistivité très grande due à la quasi-absence de charges mobiles. Une tension U négative renforce le champ de rétention de la diffusion et augmente, par conséquent, la hauteur de la barrière de potentiel, de telle sorte qu'aucune charge libre ne traverse la zone de charge spatiale.

Au contraire, si l'on applique une tension U positive, le champ électrique de rétention de la diffusion est diminué et les charges mobiles qui ont une énergie supérieure à celle que représente la hauteur de la barrière de potentiel peuvent traverser la zone de charge spatiale.

Ces situations sont résumées dans le schéma ci-dessous :



3.2.5.2 Définitions

L'application d'une tension qui diminue la hauteur de la barrière de potentiel par rapport à l'équilibre est appelée *polarisation directe* par opposition à la *polarisation inverse* qui augmente la hauteur de la barrière de potentiel par rapport à l'équilibre.

3.2.5.3 Caractéristique et définitions

Une polarisation directe permet le passage d'un courant électrique dans la jonction alors qu'une polarisation inverse l'empêche. *Simultanément*, un « courant de trous » et un « courant d'électrons » se superposent. Le résultat en est un courant unique, et l'on peut montrer qu'il peut s'exprimer sous la forme :

$$I = I_s \left[\exp \left(\frac{U}{nU_T} \right) - 1 \right]$$

... où

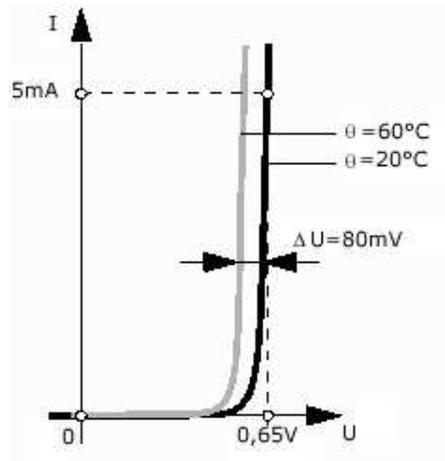
- le courant I_s est appelé *courant inverse de saturation* . C'est la valeur asymptotique du courant traversant la jonction en polarisation inverse ;
- U_T est la *tension thermodynamique* qui vaut

$$U_T = \frac{kT}{e}$$

où k est la constante de Boltzmann, T la température absolue en K et e la charge électrique élémentaire. A 25°C, $U_T = 25\text{mV}$;

- n est le *coefficient d'émission* . Il dépend du matériau, voisin de 1 dans les jonctions de transistors au silicium et dans les diodes au germanium, et compris entre 1 et 2 dans les diodes au silicium.

On obtient donc la caractéristique suivante :



Remarque : le courant inverse de saturation des jonctions au silicium est de l'ordre de grandeur de 10^{-12} à 10^{-15} A de telle sorte qu'on peut généralement le considérer comme nul en polarisation inverse.

Ce qu'il faut retenir

- le principe de la jonction PN ;
 - la notion de polarisation (directe, inverse) ;
 - la caractéristique courant-tension d'une diode.
-

3.3 Le transistor bipolaire

3.3.1 Généralités

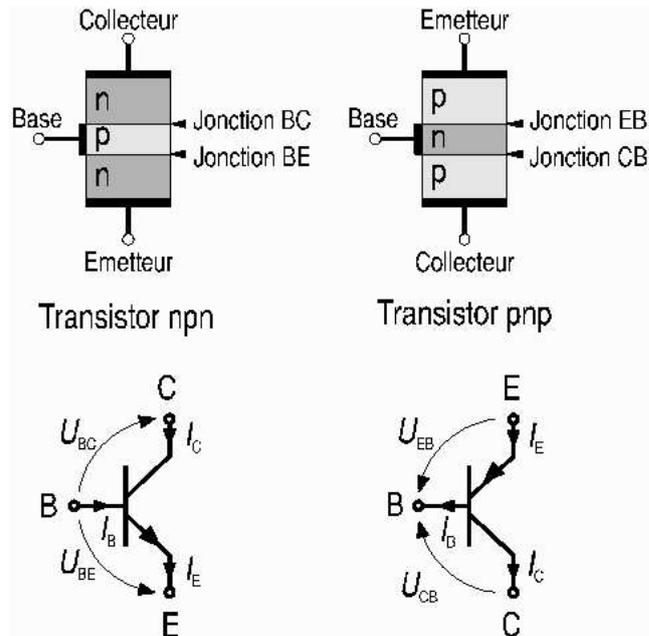
3.3.1.1 Introduction

Le transistor bipolaire est l'un des dispositifs à semiconducteur les plus utilisés à l'heure actuelle dans les rôles d'amplificateur et d'interrupteur. C'est un élément composé de deux jonctions pn.

3.3.1.2 Définitions

Le *transistor bipolaire*^{3.2} est un dispositif présentant trois couches à dopages alternés npn ou pnp :

^{3.2.} Ou *Bipolar Junction Transistor*.



La couche médiane est appelée *base*. Leur géométrie et leur nombre volumique en impuretés distinguent les deux couches externes : *émetteur* et *collecteur*. Par extension, on appelle également base, émetteur et collecteur les trois électrodes qui donnent accès aux trois couches correspondantes.

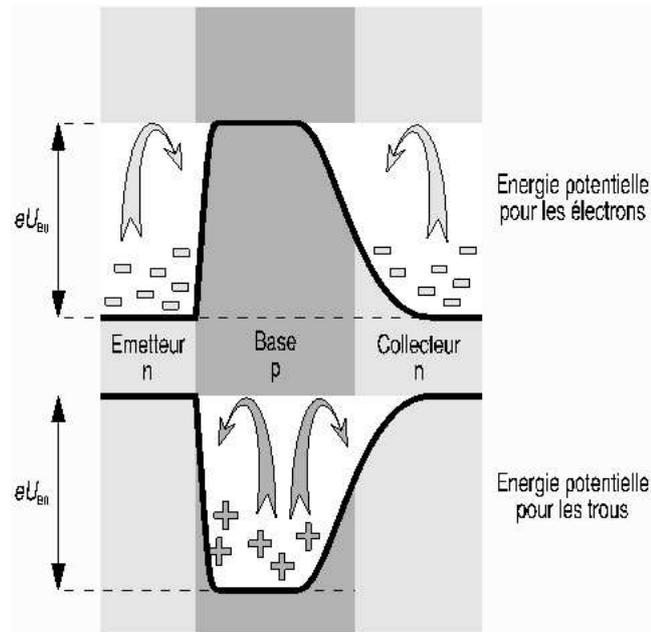
Les deux jonctions qui apparaissent dans le transistor sont désignées par le nom des deux régions entre lesquelles elles assurent la transition : on trouve, par conséquent, la jonction base-émetteur (BE) également dénommée *jonction de commande* et la jonction base-collecteur.

3.3.1.3 Hypothèse

Le principe de superposition s'applique aux charges injectées par la jonction BE et aux charges injectées par la jonction BC. On peut donc étudier séparément l'effet de chaque jonction.

3.3.1.4 Transistor au repos

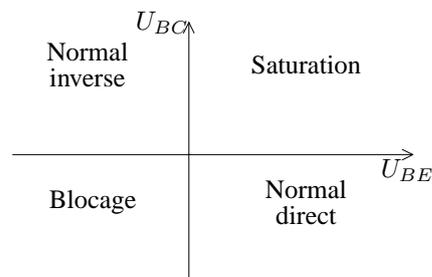
La figure suivante montre les barrières de potentiel énergétique pour les électrons et les trous. Au repos, elles sont telles que ni les électrons de l'émetteur et du collecteur, ni les trous de la base ne peuvent les franchir.



3.3.2 Modes de fonctionnement du transistor

3.3.2.1 Définitions

Les divers cas de fonctionnement du transistor dépendent des valeurs des tensions aux jonctions BE et BC. Si l'on considère l'état bloqué et l'état passant de chaque jonction, on dénombre quatre modes de fonctionnement possibles :



- le transistor est *bloqué* lorsque ses deux jonctions sont en polarisation inverse ;
- le transistor est en *fonctionnement normal direct* lorsque la jonction de commande BE est en polarisation directe et que la jonction BC est en polarisation inverse ;
- le transistor est en *fonctionnement normal inverse* lorsque la jonction de commande BE est en polarisation inverse et que la jonction BC est en polarisation directe ;
- le transistor est *saturé* lorsque ses deux jonctions sont en polarisation directe.

3.3.2.2 Blocage

Aucun courant ne circule dans un transistor bloqué puisque ses deux jonctions sont polarisées en sens inverse. Le transistor se comporte comme un circuit ouvert de telle sorte que le collecteur est isolé de l'émetteur.

3.3.2.3 Fonctionnement normal inverse

La jonction BE détermine le débit des électrons. La jonction BC, polarisée en inverse, n'influence d'aucune manière le débit des électrons. On peut montrer qu'un courant circule alors de l'émetteur vers le collecteur, de la forme

$$I_E = I_{sE} \left[\exp \left(\frac{U_{BE}}{U_T} \right) - 1 \right]$$

où U_T désigne la tension thermodynamique (cf. 3.2.5.2). Un courant s'installe aussi entre base et collecteur :

$$I_B = I_{sB} \left[\exp \left(\frac{U_{BE}}{U_T} \right) - 1 \right]$$

On montre également que :

- le courant base-collecteur est négligeable devant le courant émetteur-collecteur, et que par conséquent le courant « sortant » par le collecteur est approximativement égal au courant « entrant » par l'émetteur ;
- le rapport β entre le courant de collecteur et le courant de base est une constante, caractéristique du transistor, et est appelé *gain de courant en mode direct*, ou *en mode F* (F pour *forward*).

Lors de la fabrication des transistors on met tout en œuvre pour que le courant de base en mode direct soit le plus faible possible. En particulier, l'émetteur est dopé beaucoup plus fortement que la base pour que les électrons injectés dans cette dernière soient plus nombreux que les trous injectés dans l'émetteur. De plus, on réalise des bases aussi étroites que possible de telle sorte que, pendant leur transit, les électrons n'aient que peu de chance de s'y recombiner. Le gain de courant en mode direct atteint des valeurs se situant entre 100 et 1000 pour des transistors de petite puissance (inférieure à 1W).

3.3.2.4 Fonctionnement normal inverse

La jonction BC détermine l'injection dans la base puis dans l'émetteur, indépendamment de la jonction BE. Les électrons de l'émetteur ne peuvent franchir la barrière de potentiel de la jonction BE ; il n'y aura par conséquent aucune influence de la tension U_{BE} sur le débit des électrons. Les relations liant tension et courant sont similaires à celles du mode normal direct, à ceci près que la tension à considérer est U_{BC} . On définit de même le gain β_R (R pour *reverse*) entre le courant de base et celui de collecteur, gain que l'on appelle *gain de courant inverse*, ou *gain de courant en mode R*.

Le gain de courant inverse, du fait de la technologie, est plus petit que le gain de courant direct : dans un transistor discret de petite puissance il peut être compris entre 1 et 10 alors qu'il devient beaucoup plus petit que 1 dans les transistors *intégrés*, c'est-à-dire fabriqués à partir de la même matrice en silicium.

3.3.2.5 Saturation

En saturation, les deux jonctions du transistor conduisent. Il est à remarquer que le courant qui circule de l'émetteur au collecteur est *inférieur* à celui qui circulerait si seulement l'une ou l'autre jonction était polarisée en sens direct sous même tension.

Ce qu'il faut retenir

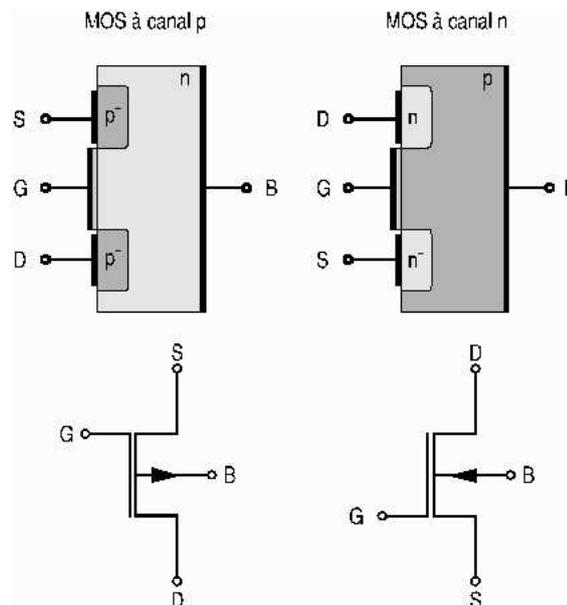
- la nature d'un transistor npn (juxtaposition de deux jonctions) ;
- les modes de fonctionnement (surtout blocage et saturation).

3.4 Le transistor MOS

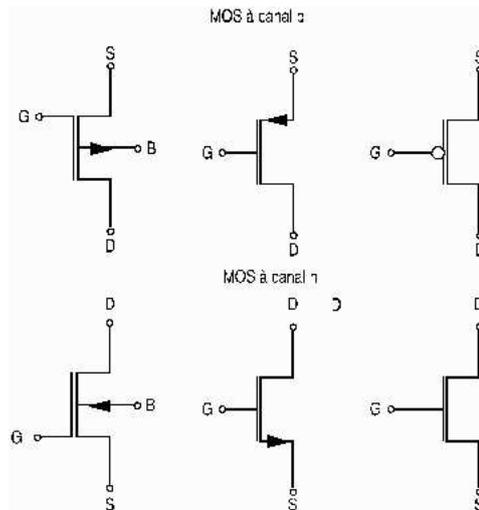
3.4.1 Introduction

En 1930, L. LILIENTHAL de l'Université de Leipzig dépose un brevet dans lequel il décrit un élément qui ressemble au transistor MOS (Metal Oxide Semiconductor) actuel. Cependant, ce n'est que vers 1960 que, la technologie ayant suffisamment évolué, de tels transistors peuvent être réalisés avec succès. En particulier, les problèmes d'interface oxyde-semiconducteur ont pu être résolus grâce à l'affinement de la technologie dans le domaine bipolaire, affinement requis pour obtenir des transistors de meilleure qualité. Aujourd'hui le transistor MOS constitue, par sa simplicité de fabrication et ses petites dimensions, l'élément fondamental des circuits intégrés numériques à large échelle.

3.4.2 Définitions et principe de fonctionnement



Le transistor MOS est un transistor dit « à effet de champ » constitué d'un substrat semiconducteur (B) recouvert d'une couche d'oxyde sur laquelle est déposée l'électrode de *grille* (G). Par le biais d'une différence de potentiel appliquée entre grille et substrat, on crée, dans le semiconducteur, un champ électrique qui a pour effet de repousser les porteurs majoritaires loin de l'interface oxyde-semiconducteur et d'y laisser diffuser des minoritaires venus de deux îlots de type complémentaire au substrat, la source (S) et le drain (D). Ceux-ci forment une couche pelliculaire de charges mobiles appelée *canal*. Ces charges sont susceptibles de transiter entre le drain et la source situés aux extrémités du canal (cf figure ci-dessus). Dans cette même figure, on a également représenté les symboles des transistors MOS à canal n et à canal p. La flèche indique le sens de conduction des jonctions substrat-source (BS) et substrat-drain (BD). Sauf près de l'interface oxyde-semiconducteur, ces jonctions sont polarisées en sens inverse. Dans la figure ci-dessous, on a représenté différents symboles couramment utilisés pour les transistors MOS.



Ce qu'il faut retenir

- le principe de fonctionnement d'un transistor à effet de champ ;
 - les symboles d'un transistor MOS.
-