

Chapitre I

De l'électron au circuit

On s'est tous amusés à frotter une règle en plastique et à la rapprocher de petits morceaux de papier posés sur une table. Ces bouts de papier se déplacent et se soulèvent, attirés par la règle. On a simplement modifié les caractéristiques de l'espace environnant pour créer des forces. Ces forces ont elles-mêmes engendré une vitesse de déplacement et produit un travail. En fait, tout commence par de la mécanique !

Il existe dans la matière des charges électriques de deux natures différentes. Des charges positives (+) et des charges négatives (-). La matière à l'état naturel est électriquement neutre. Il y a autant de charges positives que de charges négatives. Un atome possède autant d'électrons (-) que de protons (+). Pour pouvoir créer un courant électrique, il faut faire en sorte que ces charges élémentaires puissent se déplacer dans la matière. Ce sont les électrons qui ont la possibilité de se déplacer d'atomes en atomes dans certains matériaux. En quittant un atome, l'électron laisse derrière lui une charge positive appelée « trou », c'est-à-dire un atome auquel il manque un électron. Ces trous se déplacent donc dans le sens inverse de celui des électrons. C'est ce sens des charges positives qui sera adopté par la suite pour le sens conventionnel du courant électrique. Maintenant, le problème consiste à exercer sur les électrons des forces qui les obligent à tous se déplacer dans le même sens afin de créer un courant électrique.

1. Forces appliquées aux particules chargées

Une charge ponctuelle q produit à un point M situé dans son environnement proche, un champ électrique \vec{E}_q dont l'intensité a pour expression :

$$E_q = \frac{q}{4.\pi.\varepsilon_0.x^2}$$

Avec :

x : distance du point M de la charge (en m).

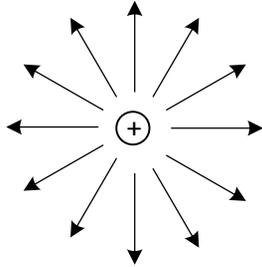
q : valeur de la charge exprimée en coulomb (en C).

ε_0 : Permittivité du vide ($\varepsilon_0 = \frac{1}{36.\pi} . 10^{-9}$).

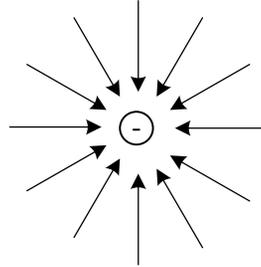
Le champ électrique est radial par rapport à la charge q et s'exprime en V/m.

Champ électrique produit par :

Une charge positive.



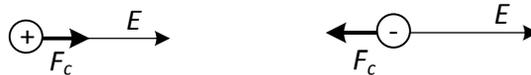
Une charge négative



A un point M donné de l'espace, il existe un champ électrique E qui est le champ résultant produit par toutes les charges environnantes.

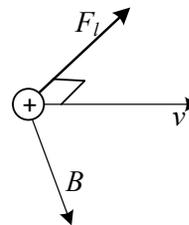
Si une particule chargée est placée dans un champ électrique, elle est alors soumise à une force F appelée force de Coulomb telle que :

$$\vec{F}_c = q \cdot \vec{E}$$



Il peut exister également un champ magnétique B qui est produit par l'ensemble des charges électriques en mouvement. Il existe alors une autre force qui ne s'applique qu'aux particules chargées se déplaçant à la vitesse v .

$$\vec{F}_l = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$$



Lorsque la particule chargée q se déplace dans l'espace à la vitesse v , elle est alors soumise à une force, dite force de Lorentz produite par les deux champs (électrique et magnétique) telle que :

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

On s'intéressera pour l'instant uniquement au champ électrique. Le champ magnétique et ses effets seront étudiés au Chapitre X

Un dispositif capable de créer un champ électrique susceptible de mettre en mouvement des électrons est un **générateur**. Mais cela ne suffit pas. Il faut également que les électrons aient la possibilité de se déplacer. Pour cela, on distingue deux principales catégories de matériaux :

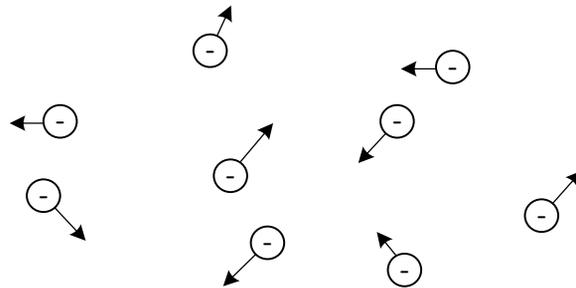
Les **diélectriques** dans lesquelles les électrons restent solidaires de l'atome. Ils n'ont pas la possibilité de se déplacer. Ce sont les matériaux dits **isolants**.

Les matériaux **conducteurs**, généralement les métaux, dans lesquels les électrons sont libres. Ils peuvent se déplacer d'atome en atome.

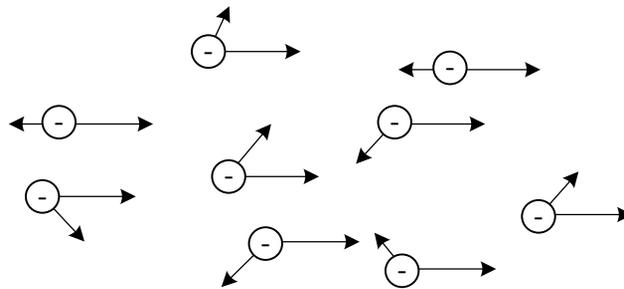
Il existe également les **semi-conducteurs** qui peuvent être soit conducteur, soit isolant selon leur état de polarisation. Ils sont utilisés dans les composants électroniques (diodes, transistors, thyristors...)

2. Création d'un courant électrique

En absence de champ électrique, les électrons libres se déplacent de façon aléatoire, par agitation thermique. La moyenne de tous les déplacements élémentaires est nulle.

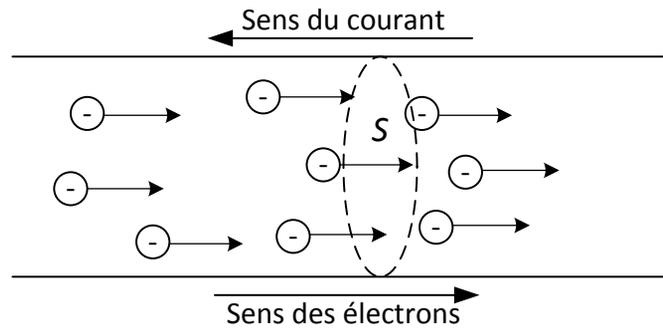


En présence d'un champ électrique dans un milieu conducteur, les forces électrostatiques vont produire un déplacement de l'ensemble des électrons dans le même sens à condition que le circuit soit bouclé, et ainsi produire un courant électrique.



3. Courant dans un fil conducteur

Soit S la section d'un fil conducteur et dq la quantité d'électricité (en coulomb) qui traverse la section S pendant l'intervalle de temps dt .



On définit le courant électrique i qui circule dans le conducteur par la relation :

$$i = \frac{dq}{dt}$$

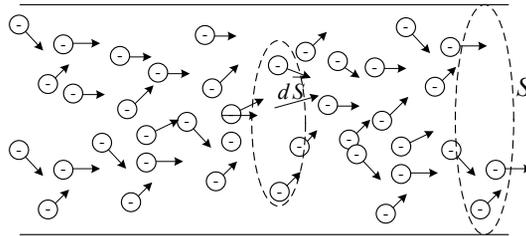
Le courant i s'exprime en A (Ampère)

Un courant de 1A correspond à la circulation d'une quantité d'électricité de 1 coulomb par seconde.

4. Densité de courant

$d\vec{S}$ est un élément de surface orienté placé à l'intérieur d'un milieu conducteur.

dq est la quantité d'électricité qui traverse $d\vec{S}$ pendant un temps dt .



On définit localement la densité de courant \vec{j} (exprimée en A/m²) telle que :

$$\frac{dq}{dt} = \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

Le courant i qui circule dans l'ensemble du conducteur de section S vaut :

$$i = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

Si, dans la plupart des cas, la densité de courant est uniforme dans tout le conducteur, le courant s'exprime par la relation simple :

$$\boxed{i = j \cdot S}$$

5. Loi d'Ohm locale

Une particule chargée placée dans un champ électrique dans le vide est soumise à une force de Coulomb. Elle se déplace alors librement selon un mouvement uniformément accéléré. C'est ce qui se passe à l'intérieur des tubes cathodiques des anciens oscilloscopes. Par contre, dans un milieu conducteur, la présence de nombreux atomes gêne la circulation des électrons. Au cours de leurs déplacements, ils vont subir une multitude de chocs et seront ralentis dans leur trajectoire. Ils vont rencontrer une certaine résistance et il leur faudra de l'énergie pour vaincre cette résistance au déplacement.

On désigne par ρ la **résistivité** du matériau. (Exprimée en $\Omega \cdot m$)

Le déplacement de charges électrique dans un milieu conducteur va produire localement un champ électrique tel que :

$$\vec{E} = \rho \cdot \vec{j}$$

Cette circulation de courant va produire de la chaleur par effet Joule.

Si on considère un fil conducteur de section S et de longueur l , parcouru par un courant I uniforme, il est le siège d'une différence de potentiel à ses bornes telle que :

$$U = E \cdot l = \rho \cdot j \cdot l = \rho \cdot \frac{l}{S} \cdot I$$

L'expression $\rho \cdot \frac{l}{S}$ est la résistance R (en Ω ohm) du conducteur :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \text{ et donc } U = R \cdot I$$

L'inverse est $G = \frac{S}{\rho \cdot l} = \sigma \cdot \frac{S}{l}$ est la conductance exprimée en siemens (S) On appelle

$\sigma = \frac{1}{\rho}$ la **conductivité** d'un matériau noté.

6. Puissance dissipée dans un conducteur

La puissance dissipée par effet Joule est

$$P = R \cdot i^2 = \rho \cdot \frac{l}{S} \cdot (j \cdot S)^2 = \rho \cdot j^2 \cdot S \cdot l$$

L'expression $P_{vol} = \rho \cdot j^2$ est la puissance volumique dissipée par effet Joule dans un matériau soumis à une densité de courant j .

7. Exercices

7.1 Mise en vitesse d'une particule chargée

On place dans le vide une particule de masse M et de charge q immobile à la position $x=0$. Elle est soumise à un champ électrique E . Décrire son mouvement.

Réponse :

La particule est soumise à une force de Coulomb telle que $F_C = q.E = M \frac{dv}{dt}$

Elle décrit un mouvement uniformément accéléré avec $v = \frac{q.E}{M}.t$ et $x = \frac{q.E}{2.M}.t^2$

7.2 Effet d'un champ électrique.

Une particule de masse M et de charge q entre à la vitesse initiale V_0 dans un champ électrique E orienté de façon perpendiculaire à sa vitesse initiale. Déterminer l'expression de sa trajectoire $y=f(x)$.

Réponse :

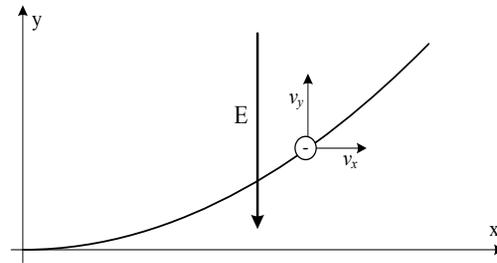
La particule est soumise à une force de Coulomb sur l'axe Oy telle que

$F_y = q.E = M \frac{dv_y}{dt}$ C'est une force

d'accélération sur l'axe Oy . Sur l'axe Ox , la composante de vitesse v_x reste constante. $v_x = V_0$. On a alors :

$$x = V_0.t \text{ et } \frac{dv_y}{dt} = \frac{q.E}{M}$$

donc $v_y = \frac{q.E}{M}.t$ $y = \frac{q.E}{2.M}.t^2$ alors



$$y = \frac{q.E}{2.M.V_0}.x^2$$

La particule décrit une

parabole.

7.3 Effet d'un champ magnétique

Une particule de masse M et de charge q entre à la vitesse initiale V_0 dans un champ magnétique B orienté de façon perpendiculaire à sa vitesse. Décrire la trajectoire de la particule dans l'espace.

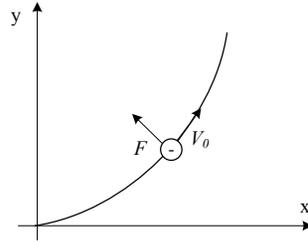
Réponse :

La particule subit une force de Laplace orientée perpendiculairement à sa vitesse. Son module a pour expression : $F_L = q.v.B$

Cette force ne fournit aucun travail. C'est une force d'accélération qui va dévier la particule de sa trajectoire initiale selon un rayon de courbure R . Elle

est équilibrée par la force centrifuge $F_C = M \cdot \frac{V_0^2}{R}$

trajectoire est donc un arc de cercle de rayon $R = \frac{M.V_0}{q.B}$

**7.4 Puissance dissipée dans un matériau conducteur.**

On considère un bloc de cuivre de $0,5 \text{ m}^3$ soumis à une densité de courant de $j=2\text{A/mm}^2$. Calculer la puissance dissipée dans le matériau. Résistivité du cuivre : $\rho_{cu}=1,7.10^{-8} \Omega.m$

Réponse :

la puissance volumique est $P_{vol}=\rho_{cu}.j^2$ donc $P=1,7.10^{-8} \cdot (2.10^6)^2 \cdot 0,5=34 \text{ kW}$

7.5 Vitesse de déplacement des électrons.

Un conducteur en cuivre de section $S=1\text{mm}^2$ est parcouru par un courant continu $I=1\text{A}$. Calculer la vitesse de circulation v des électrons.

On donne :

- $q_e=1,6.10^{-19} \text{ C}$: la charge élémentaire d'un électron.
- $N_e=9.10^{28}$: le nombre d'électrons libres dans le cuivre par unité de volume.

Réponse :

Au cours d'un instant dt , les électrons se sont déplacés d'une distance dx , ce qui occupe un volume élémentaire $S.dx$.

La charge électrique dq contenue dans ce volume est $dq=S.dx.q_e.N_e$

$$I = \frac{dq}{dt} = S \cdot \frac{dx}{dt} \cdot q_e \cdot N_e = S \cdot v \cdot q_e \cdot N_e \text{ donc } v = \frac{I}{S \cdot q_e \cdot N_e} = 7.10^{-5} \text{ m/s}$$

Pour une densité de courant de 1A/mm^2 , la vitesse de circulation des électrons est inférieure à $0,1\text{mm/s}$, ce qui est très faible !

Chapitre II

Sources d'énergie et composants passifs

Un système physique qui permet d'apporter une valeur ajoutée à un flux de matière, d'objets ou d'informations est constitué de sources d'énergie, et de composants passifs. On y trouve les composants dissipatifs, ceux qui transforment l'énergie en chaleur. Ce sont les résistances électrique, les frottements mécaniques, les pertes de charge dans les canalisations hydrauliques. Viennent ensuite les composants qui stockent de l'énergie sous forme cinétique ou potentielle. L'énergie cinétique est associée à des déplacements, des vitesses ou des circulations. On y trouve des bobines d'induction ou inductances en électricité, les masses et les inerties en mécanique, les inertances pour les circuits hydrauliques. Quant à l'énergie potentielle, elle est emmagasinée dans les condensateurs en électricité, dans des ressorts en mécanique ou dans des réservoirs ou accumulateurs en hydraulique. A chaque composant, est associé un modèle mathématique.

1. Sources d'énergie

Pour chaque domaine de la physique, la puissance mise en jeu dans un système est le produit d'une source de flux par une source de potentiel. On désignera par source de flux, une grandeur à laquelle on associe un déplacement ou une circulation. On y trouve l'intensité du courant en électricité, la vitesse de déplacement ou de rotation en mécanique, le débit de fluide en hydraulique... Une source de potentiel est associée à une grandeur statique. On y trouve la différence de potentiel ou la tension, ou en électricité, la force ou le couple en mécanique, la pression en hydraulique. Le produit d'une source de flux par une source de potentiel est homogène à une puissance exprimée en watt.

Domaines	flux	Potentiel	Puissance
Electricité	Intensité I (A)	U (V)	$P=U.I$
Mécanique	Vitesse v (m/s)	Force F (N)	$P=F.v$
Mécanique	Pulsation Ω (rad/s)	Couple C (N.m)	$P=C.\Omega$
Hydraulique	Débit massique D (kg/s)	Pression P_r (Pa)	$P=P_r.D$
Thermique	Puissance (W)	Température	

On étudiera le comportement des composants passifs en électricité pour ensuite décrire leurs équivalents dans les autres domaines de la physique.