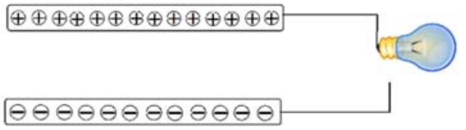
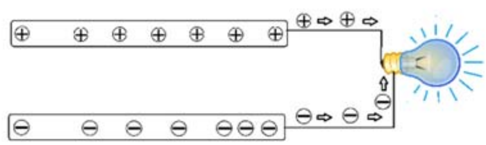
III Electrocinétique

Les charges étudiées en électrostatique sont des charges immobiles. Qu'elles soient liées à l'atome ou qu'elles soient « libres », l'équilibre électrostatique implique qu'elles restent fixes. Quand on veut étudier les charges mobiles, on doit introduire un autre champ, le champ magnétique $\vec{B}$ et aussi une densité de courant $\vec{j}$ rendant compte du déplacement des charges. Relier cette densité de courant $\vec{j}$ en un point d'un conducteur, au champ électrique $\vec{E}$ en ce point, constitue le but de l'électrocinétique.

III.1. Courant et résistance électriques

Pour étudier le courant électrique, on commence avec un condensateur chargé, comme montre la figure. On peut vérifier que des charges sont présentes sur chaque armature en approchant des isolants chargés comme dans les expériences du 1er chapitre (électrostatique). Si on relie les deux armatures à l'aide d'un fil conducteur, le conducteur se décharge rapidement. Les charges se déplacent d'une armature à l'autre : un *courant électrique* est produit.





III.1.1. Le courant électrique

Un courant électrique est la grandeur algébrique correspondant à la circulation de porteurs de charges mobiles (p.c.m.) électriques dans un conducteur.

Sens conventionnel du courant électrique

Par convention, le sens réel du courant est le sens de déplacement des charges + Dans un conducteur métallique le courant électrique correspond à un déplacement délectrons Le déplacement des charges (électrons) est donc de sens opposé à celui du courant.

III.1.2. Vecteur densité de courant

Sous l'action d'un champ électrique $\vec{E}$, chaque électron acquiert une vitesse. En désignant par $\vec{v}$, la *vitesse moyenne* de l'ensemble des électrons (on dit aussi *vitesse d'entraînement* ou *de dérive*), et par ρ la charge volumique du milieu, on définit le vecteur de courant en tout point du milieu par :

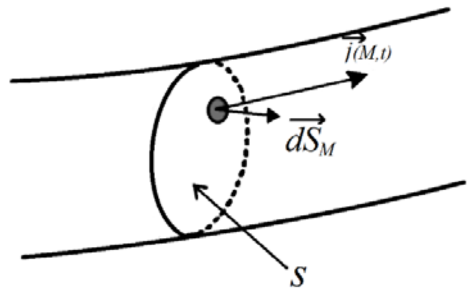
$\vec{j} = \rho\vec{v}$

Ou encore, puisque $\rho = -ne$ où *n* est le nombre d'électrons par unité de volume et *e* la valeur absolue de la charge de l'électron :

$$\vec{j} = -ne\vec{v}$$

III.1.3. L'intensité du courant électrique

Soit ϕ le flux de $\vec{j}$ à travers une surface (S) orientée



On a :

$$\phi = \int_S \vec{j}.\overrightarrow{dS}$$

Le flux élémentaire

$$d\phi = \vec{j}.\overrightarrow{dS} = \rho\vec{v}.\overrightarrow{dS}$$

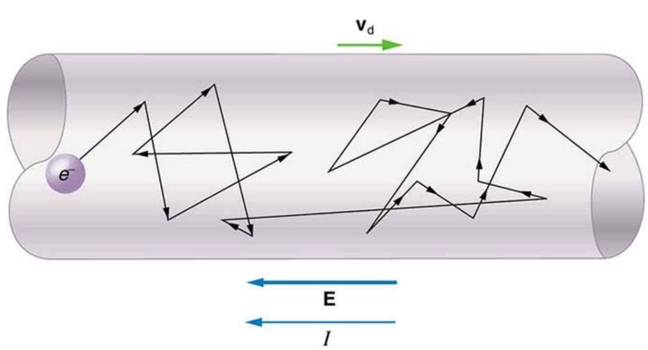
Représente la charge contenue dans le volume du cylindre de longueur v s'appuyant sur *dS* ; c'est aussi la charge qui traverse *dS* pendant l'unité de temps.
On peut donc écrire :

$$\int_S \vec{j}.\overrightarrow{dS} = \frac{dQ}{dt} = I$$

Définissant ainsi l'intensité du courant qui traverse (S), laquelle s'exprime en **Ampère** (A) : $1A = 1C.s^{-1}$

III.2. Loi d'Ohm microscopique (ou locale)

Dans les champs électriques $\vec{E}$, la charge q est soumise à la force $q\vec{E}$ et, de la part milieu cristallin, ionique ou électrolytique dans lequel elle évolue, à une force $-k\vec{v}$ qui s'oppose à la vitesse.



D'où l'équation différentielle de son mouvement :

$$m\vec{a} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F_i}$$

$$m\frac{\overrightarrow{dv}}{dt} = q\vec{E} - k\vec{v}$$

Qui a pour solution :

$$\vec{v}(t) = \left(1 - e^{-kt/m}\right).\frac{q\vec{E}}{k}$$

Soit, pour des dates grandes par rapport à m/k mais petites pour nos moyens d'investigation,

$$\vec{v}(t) \approx \vec{v} = \frac{q\vec{E}}{k} = \mu\vec{E}$$

Où μ est la mobilité de la charge électrique. Le vecteur densité de courant atteint, lui, la valeur limite :

$$\vec{j} = \rho\vec{v} = \frac{\rho q\vec{E}}{k} = \frac{nq^2}{k}\vec{E}$$

où n (n en m^{-3}) est la densité particulaire des porteurs de charge q.

$\vec{j}$ peut être mise sous la forme :

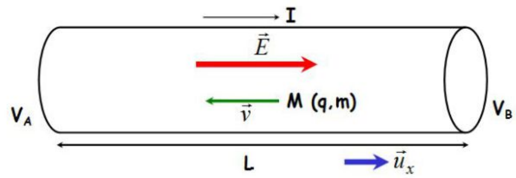
$$\vec{j} = \gamma\vec{E}$$

qui est la loi d'ohm microscopique.

γ est la conductivité électrique du milieu, inverse de sa résistivité (attention) elle-aussi notée souvent ρ ($\gamma = {}^{1}/_{\rho}$).

III.3. Loi d'Ohm macroscopique (Résistance d'un conducteur)

Considérons maintenant une portion AB d'un conducteur parcouru par un courant I. S'il existe un courant, cela signifie qu'il y a une chute de potentiel entre A et B,



$$U = V_A - V_B = \int_A^B \vec{E}.\overrightarrow{dl}$$

On définit alors la résistance de cette portion par

$$R = \frac{U}{I} = \frac{\int_A^B \vec{E}.\overrightarrow{dl}}{\iint_S \ \gamma\vec{E}.\overrightarrow{d^2S}}$$

où l'unité est l'Ohm (symbole Ω). Dans le cas simple d'un conducteur filiforme de section S où, sur une longueur L, le champ électrostatique est uniforme, on obtient le lien entre la résistance d'un conducteur (propriété macroscopique) et sa résistivité (propriété microscopique)

$$R = \frac{EL}{\gamma ES} = \eta\frac{L}{S}$$

qui montre que les unités de la résistivité sont le Ωm (Ohm mètre).

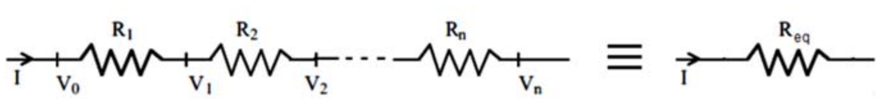
La d.d.p. appliquée aux bornes d'un générateur est égal au produit de la résistance présentée par ce récepteur et de la valeur de l'intensité du courant traversant ce même récepteur.

$$U = R.\mathrm{I}$$

III.4. Associations de résistances

Résistances en série

Soient n résistances *Ri* mises bout à bout dans un circuit et parcourues par un courant *I*. La tension aux bornes de la chaîne est simplement



$$U = (V_0 - V_1) + (V_1 - V_2) + \cdots + (V_{n-1} - V_n)$$

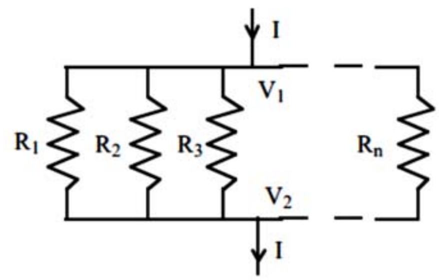
$$U = R_1I + R_2I + \cdots + R_nI$$

C'est à dire analogue à celle obtenue par une résistance unique dont la valeur est

$$\boldsymbol{R} = \sum_{\boldsymbol{i}=\boldsymbol{1}}^{\boldsymbol{n}} \boldsymbol{R}_{\boldsymbol{i}}$$

Résistances en parallèle

Soient n résistances *Ri* mises en parallèle sous une tension $U = V_1 - V_2$ et alimentées par un courant I.
Le courant se sépare alors en n courants



$$I_i = \frac{U}{R_i}$$

Dans chacune des *n* branches. En vertu de la conservation du courant (voir ci-dessous), on a

$$I = \sum_{i=1}^{n} I_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{U}{R_i} = \frac{U}{R}$$

C'est à dire que l'ensemble des n branches est analogue à une résistance équivalente en série

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}$$

La puissance.

La puissance absorbée ou fournie par un dispositif ou un système électrique peut se calculer en fonction de l'intensité du courant et de la tension.

$$P = U.\mathrm{I}$$

Sachant que :

$$U = R.\mathrm{I} \qquad\qquad \mathrm{P} = (\mathrm{R.I}).\mathrm{I}$$

On peut dire que :

$$\mathrm{P} = \mathrm{R.I}^2$$

P : Puissance électrique en watts ;

I : Courant électrique en ampère ;

R : résistance électrique.

Sachant aussi que :

$P = U.\mathrm{I}$ et que $I = \frac{U}{R}$

On peut dire que : $P = U.\frac{U}{R}$

Soit $P = \frac{U^2}{R}$

U : d. d. p. en volt

III.5. L'énergie.

Pour qu'une certaine puissance transforme de l'énergie, elle doit être utilisée pendant un certain temps. Ainsi un moteur d'une puissance suffisante pour entraîner une charge considérable ne produit une transformation d'énergie que s'il est mis en marche pendant une certaine période de temps. Plus longtemps fonctionne un moteur, plus grande est la quantité d'énergie dépensée.

L'énergie perdue ou gagnée par un dispositif se détermine au moyen de la relation :

$$W = P.t$$

W : l'énergie en watts-secondes (Ws) ou en joule (J) ;

P : la puissance en watts (W) ;

T : le temps en secondes (s).

Puisque la puissance se mesure en watts (ou en joules par seconde) et le temps en secondes, l'unité de mesure de l'énergie est le watt-seconde ou le joule comme indiqué ci-dessus. Le watt-seconde est toutefois une unité trop petite pour être commode ; aussi on utilise couramment le watt-heure (Wh) ou le kilowattheure (kWh).

$$Energie\ (watts - \text{secondes}) = puissance\ (watts) \times temps(\text{secondes})$$

$$Energie\ (kilowattheures) = puissance\ (watts) \times temps\ (heures)/1000$$

L'énergie électrique fournie par ce service commercial (Electrabel) se mesure au moyen d'un instrument appelé watt-heuremètre ou compteur d'électricité. Cet appareil se raccorde directement aux lignes du secteur immédiatement en amont du panneau de distribution des immeubles.

La consommation d'électricité se mesure en kilowattheures.

III.6. La loi de Joule

On appelle effet joule, le dégagement de chaleur qui accompagne toujours le passage du courant électrique dans un conducteur. D'après la loi de Joule, la quantité de chaleur dégagée dans un conducteur est fonction de l'intensité du courant, du temps de passage de ce courant et la valeur de la résistance du conducteur.

$$W = R.I^2.t$$

III.7. Circuit électrique

III.7.1. Le Circuit

En reliant les bornes d'un générateur entre elles par un ou plusieurs matériaux conducteurs, on réalise un circuit fermé, dans lequel le courant électrique peut circuler.

Le circuit électrique peut contenir un certain nombres d'appareils aux propriétés différentes :

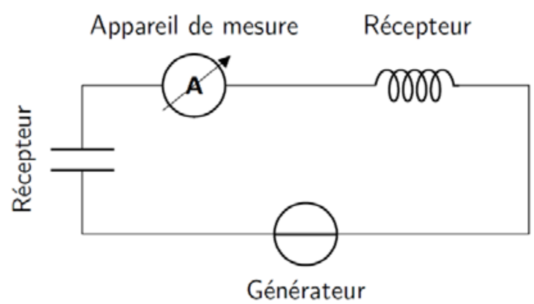
Générateurs : batteries, générateurs de tension, piles. . .

Récepteurs : résistances, bobines, condensateurs. . .

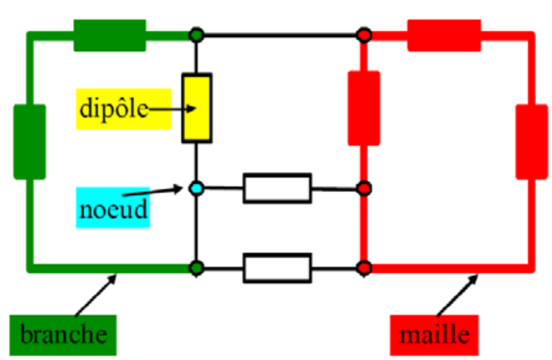
Appareils de mesure : voltmètres, ampèremètres, oscilloscopes. . .

Appareils de sécurité : disjoncteurs, fusibles. . .

Appareils de manœuvre : inverseurs. . .



Un réseau électrique est constitué d'un ensemble de dipôles linéaires ; ceux-ci sont reliés par des fils de résistance négligeable. Le réseau est formé de branches, reliées entre elles par des nœuds, et formant des mailles. L'ensemble est appelé graphe du réseau.



Dipôle : Tout ensemble d'éléments électriques situés entre deux **nœuds**.

Branche : Ensemble de dipôles placés en série entre deux nœuds.

Maille : Ensemble de branches constituent une boucle fermée.

III.7.2. Force électromotrice et générateur

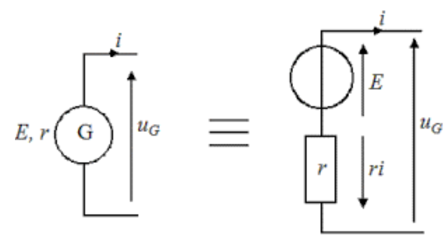
C'est un dispositif capable de délivrer un courant dans le circuit extérieur sous une tension généralement continue. In existe plusieurs types de générateur :

- Générateur électrostatique
- Générateur électrochimique (pile)

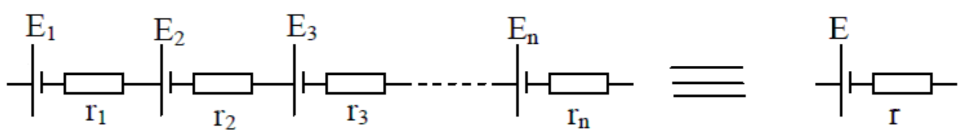
Quel que soit le type de générateur, il présente à ses bornes une fém. ou DDP qui s'exprime en volt.

Schéma équivalent

On peut représenter un générateur par un circuit équivalent constitué d'une fem en série avec une résistance r, appelée résistance interne du générateur.



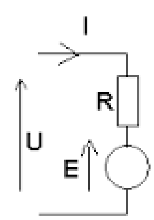
Association des générateurs



$$R = \sum R_i \quad et \quad r = \sum r_i$$

III.7.3. Force contre électromotrice d'un récepteur

Les récepteurs sont des appareils qui ont pour but de transformer l'énergie électrique en une autre forme d'énergie (moteur, accumulateur en charge….). On ne peut réaliser cette opération sans perte d'énergie par effet joule dans le récepteur de résistance r.



Récepteur

III.8. Lois De Kirchhoff

Les deux lois fondamentales de la théorie des circuits :

• sont indépendantes de la nature des éléments constituant le circuit ;

• expriment les contraintes imposées par la manière dont les éléments sont interconnectés ;

⇒Sont fixées par la topologie du circuit.

Deux hypothèses :

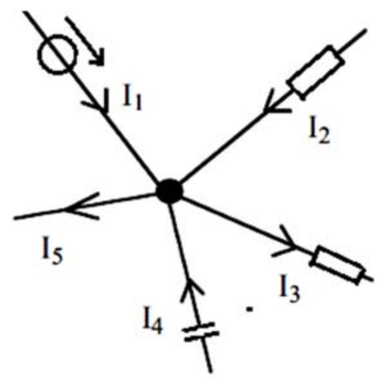
• pas d'accumulation de charges aux nœuds ni dans les éléments d'un circuit

• égalité entre tension et différence de potentiel.

III.8.1. Loi des nœuds (conservation du courant)

Soit un nœud quelconque du circuit sur lequel arrive un certain nombre de fils. Sur chacun de ces fils, circule un courant. En régime permanent, la conservation de la charge électrique se traduit par la conservation du courant : en aucun point du circuit il ne peut y avoir accumulation (ou perte) de charges. Cela signifie donc que l'ensemble des courants entrants compense exactement les courants sortants,

$$\sum I_{entrants} = \sum I_{sortants}$$



$I_1 + I_2 + I_4 = I_3 + I_5$

Ceci constitue la loi des nœuds ou l'équation aux nœuds.

III.8.2. Loi des mailles (conservation de l'énergie)

Soit une maille d'un circuit constituée de n branches. L'équation aux branches pour la k-ième branche s'écrit

$$U_k = R_k I_k - e_k$$

où R_k , I_k et e_k sont respectivement la résistance totale, le courant et la fém. contenues dans cette branche. La conservation de l'énergie pour cette maille s'exprime par le fait que, partant du nœud 1 et revenant à ce nœud, on retrouve le même potentiel, c'est-à-dire

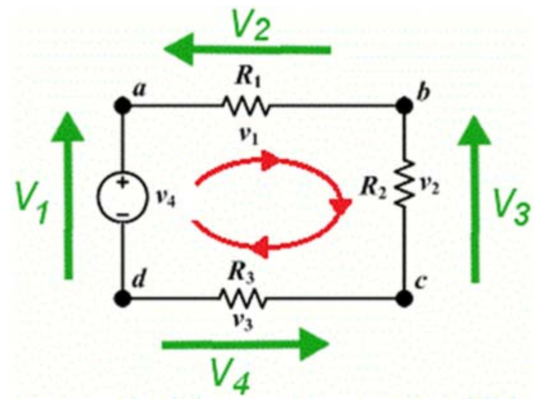
$$V_1 - V_1 = (V_1 - V_2) + (V_2 - V_3) + \cdots + (V_{n-1} - V_n) = U_1 + \cdots + U_n = 0$$

La loi des mailles (ou équation de maille) s'exprime tout simplement par

$$\sum_k (R_k I_k - e_k) = 0$$

Exemple

Le schéma ci-contre représente un circuit électrique fermé. Les différences de potentiel, aussi appelé tension, sont représentés en vert. La boucle rouge représente le sens dans lequel seront listées les tensions.



En suivant la boucle (rouge) et en faisant attention au sens, les tensions peuvent être listées comme ceci :

$$+\boldsymbol{V_1 - V_2 - V_3 - V_4 = 0}$$

L'équation ci-dessous utilise un signe positif lorsque la différence de potentiel est dans le même sens que la boucle (en rouge). De même, les tensions qui sont dans le sens opposés à la boucle (en rouge) sont ajoutées avec un signe négatif. De ce fait, la formule peut aussi être présentée comme ceci :

$$\boldsymbol{V_1 - V_2 - V_3 - V_4 = 0}$$