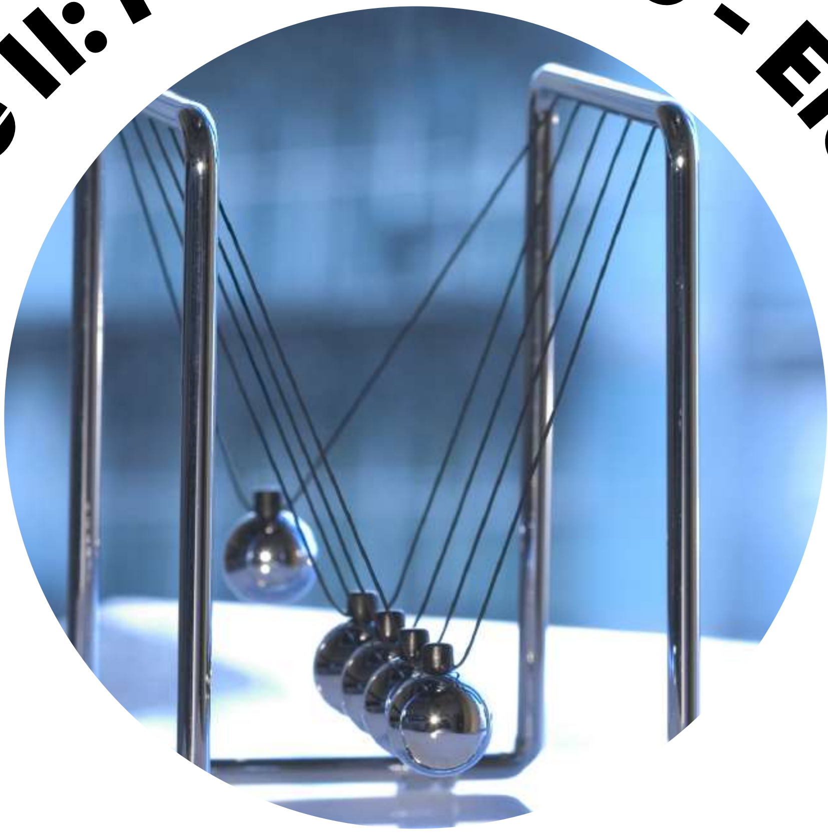
@Mohamed_Nahli

BIOLOGIE MAROC

www.biologie-maroc.com

Physique II: Mécanique - Electricité



SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

UNIVERSITE ABDELMALEK ESSAADI
FACULTE DES SCIENCES, TETOUAN
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

ELECTRICITE

SVT & STU S2

2019-2020

Prof. S.AHYOUD

TABLE DE MATIERES

Rappelles Mathématiques

I Représentation d'un point dans l'espace

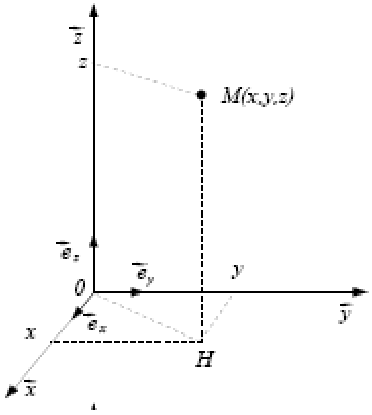
On se placera toujours dans un repère orthonormé Oxyz de vecteurs unitaires e_x, e_y, e_z.

Selon la symétrie du problème, on choisira :

- les coordonnées cartésiennes (x,y,z)

$$\vec{r} = \vec{OM} = x\,\vec{e}_x + y\,\vec{e}_y + z\,\vec{e}_z$$

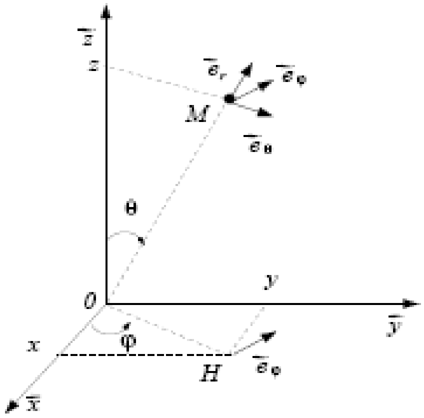
$$d\,\vec{OM} = dx\,\vec{e}_x + dy\,\vec{e}_y + dz\,\vec{e}_z$$



- les coordonnées cylindriques (ρ,θ,z)

$$\vec{r} = \vec{OM} = \rho\,\vec{e}_\rho + z\,\vec{e}_z$$

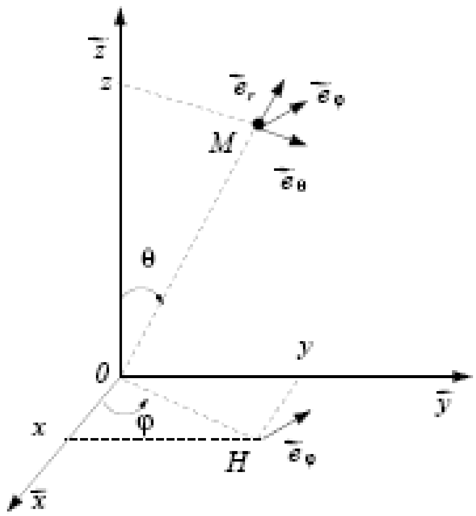
$$d\,\vec{OM} = d\rho\,\vec{e}_\rho + \rho d\theta\,\vec{e}_\theta + dz\,\vec{e}_z$$



- les coordonnées sphériques :(r,θ,ϕ)

$$\vec{r} = \vec{OM} = r\,\vec{e}_r$$

$$d\,\vec{OM} = dr\,\vec{e}_x + rd\theta\,\vec{e}_\theta + r\sin\theta d\varphi\,\vec{e}_\varphi$$



II Circulation d'un vecteur

On appelle circulation élémentaire : $dC = \vec{v}\,d\,\vec{l}$

En coordonnées cartésiennes $dC = v_x dx + v_y dy + v_z dz$

$$dC = v_\rho d\rho + v_\theta d\theta + v_z dz$$

En coordonnées cylindriques

En coordonnées sphériques $dC = v_r dr + v_\theta r d\theta + v_\varphi r \sin\theta d\varphi$

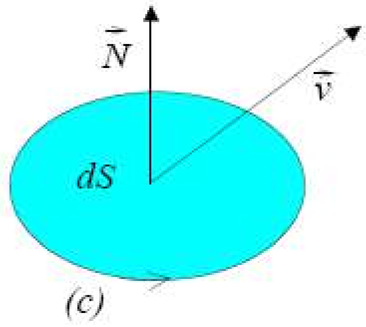
Circulation sur un chemin $C = \int_{AB} \vec{v}\, d\vec{l}$

Circulation sur un chemin fermé $C = \oint \vec{v}.\vec{dl}$

III Flux d'un vecteur

On défini le flux élémentaire $d\Phi$ d'un vecteur v à travers une surface élémentaire dS :

$$d\Phi = \vec{v}.\vec{dS} = \vec{v}.\vec{N}\, dS$$

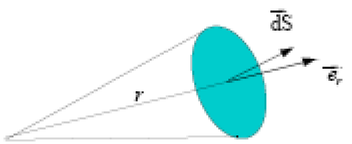


Si la surface est fermée, ~N est orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

Si la surface est ouverte (comme en figure), une fois orientée le contour (c) de la surface, N est défini par la règle du tire-bouchon.

IV Angle solide

L'angle solide élémentaire $d\Omega$ délimité par un cône coupant un élément de surface élémentaire dS situé à une distance $r$de son sommet O vaut



$$d\Omega = \frac{\vec{dS}.\vec{e_r}}{r^2}$$

Où $\vec{dS}$ est le vecteur de norme dS, normal à la surface dS. Il est sans dimension, sa valeur maximale est 4π.

V Opérateurs vectoriels

Le gradient est un vecteur qui pointe vers les valeurs croissantes de f.

$$\overrightarrow{grad}\, f = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\quad \frac{\partial f}{\partial y}\quad \frac{\partial f}{\partial z}\right) = \vec{\nabla}\,(f)$$

C'est un champ vectoriel.

Avec l'opérateur Nabla $\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}\quad \frac{\partial}{\partial y}\quad \frac{\partial}{\partial z}\right)$

Chapitre I

LE CHAMP ET LE POTENTIEL ELECTROSTATIQUE

Introduction

La notion de champ a été introduite par les physiciens pour tenter d'expliquer comment deux objets peuvent interagir à distance, sans que rien ne les relie.

La loi de la gravitation universelle de Newton et la loi de Coulomb en électrostatique, impliquent une telle interaction à distance. De même, deux charges électriques s'attirent ou se repoussent dans le vide sans que rien ne les relie, sans aucun support matériel.

Michael Faraday a introduit la notion de champ électrique. Si une charge Q_1 a un effet à distance sur une charge Q_2.On peut en déduire que Q1 met tout l'espace qui l'entoure dans un état particulier, sa présence, produit en tout point de l'espace qui l'entoure, un champ électrique et l'interaction de ce champ électrique avec la charge Q2 qui produit la force que cette dernière ressent.

I. Phénomène d'électrisation

La charge électrique est une grandeur mesurable .Elle peut être positive ou négative on la note Q elle est exprimé en **coulomb** de symbole (**C**).

La plus petite particule chargé qui porte la charge élémentaire est appelée : électron. Elle a pour charge : $\mathbf{q_e = -1{,}6022.10^{-19}\ C}$. C'est une particule **élémentaire**, ponctuelle (taille inférieure à 10^{-18} m) chargée négativement, se déplaçant autour du noyau atomique

La matière est neutre, elle contient autant de charges positives que de charges négatives. Lorsque le corps est électrisé il porte une charge :

- Si la charge de ce corps est positive : ce corps à perdu des électrons

- Si la charge de ce corps est négative : ce corps à gagner des électrons

On distingue plusieurs types de phénomène d'électrisation.

Electrisation par frottement : une règle non frotté n'attire pas les bouts des papiers il est neutre. Par conte, une règle frottée attire des bouts de papier. Elle arrache les e^- au tissu, elle devienne localement négative par excès d'e^-.Lorsqu'on frotte deux corps l'un contre l'autre, l'un arrache des électrons à l'autre Le corps qui possède un **excès d'électrons** est chargé **négativement.** Le corps qui a **perdu des électrons** est chargé **positivement.** C'est **l'électrisation par frottement**

Electrisation par contact : un bâton frotté (porte une charge électrique) touche une boule léger d'un pendule initialement neutre, après contact il ya répulsion. La répulsion entre les deux corps montre que la charge électrique à passer du corps électrisé vers le corps neutre suite au contact. C'est **l'électrisation par contact.** Le corps électrisé par contact porte le même signe de charge que le corps électrisant.

Electrisation par influence *:* Approchons une baguette de verre électrisée positivement d'un morceau de feuille d'aluminium neutre accrochée par un fil fig.1. Les électrons libres de la feuille d'aluminium sont attirés par les charges positives de la baguette de verre et se déplacent vers l'extrémité de la feuille qui est la plus proche du verre. L'autre extrémité, ayant alors un manque en électrons, sera chargée positivement. C'est **l'électrisation par influence.**

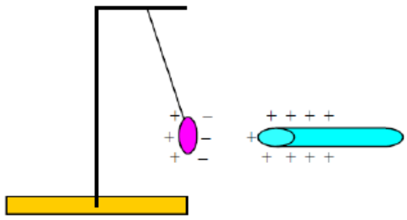


Fig.1 La baguette de verre chargée (+) va électriser par influence la Feuille d'aluminium, qui était neutre.

Conclusion :

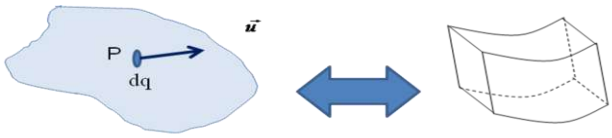
Deux corps portant des charges de même signe se repoussent. Et deux corps portant des charges de signes contraires s'attirent.

II. Distribution continues de charges électriques

Les charges sont en très grand nombre et se distribuent d'une manière continue. Soit P un point quelconque d'un conducteur et dq(P) la charge élémentaire contenue en ce point. On distingue trois types de distribution de charges électriques

Distribution volumique de charges :

Si les charges soient en très grand nombre et se distribuent d'une manière continue dans un volume V autour d'un point P de la distribution, dans un élément de volume d*V*, se trouve la charge **dq = ρ d*V***, ρ densité volumique de charge au point P.



Distribution surfacique de charges :

Supposons que les charges soient en très grand nombre et se distribuent d'une Manière continue dans une surface S. autour d'un point P de la distribution, dans un élément de surface dS, se trouve la charge **dq = σ dS**, σ densité surfacique de charge au point P.

Distribution linéique de charges : Supposons que les charges soient en très grand nombre et se distribuent d'une manière continue sur une courbe C. Autour d'un point P de la distribution, dans un élément de longueur dl, se trouve la charge dq = λ dl,   λ densité linéique de charge au point P.

II Conducteur et isolant

Définition

Un **conducteur** métallique possède des *électrons libres, (les métaux, les alliages, les graphites….*Un corps est dit **conducteur** électrique s'il laisse circuler les charges.

Un **isolant** ne possède pas d'électron libre, (Le caoutchouc, le verre, les matières plastiques, le bois.. …). Un corps est dit **isolant** électrique s'il ne laisse pas circuler les charges.

II. Force Electrostatique

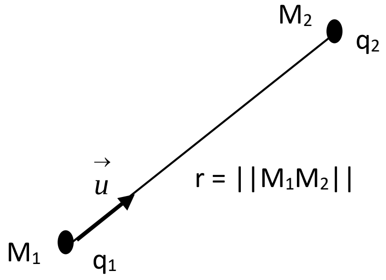
La force électrostatique est celle qui explique l'attraction ou la répulsion entre 2 charges électriques.

Soient deux corps ponctuels de charges q_1 et q_2

La force est répulsive si les charges sont de même signe la figure 2.

La force est attractive si les charges sont de signes opposés.

Les caractères de la force sont donnés par la loi de Coulomb.



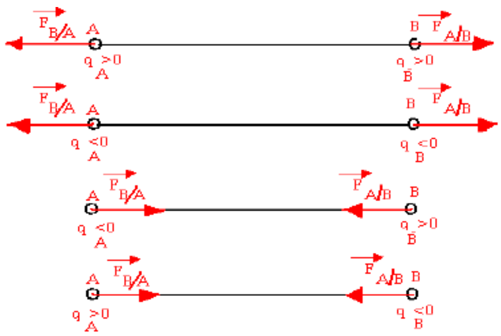
II.1 La force de Coulomb

Charles Auguste de Coulomb (1736-1806) a effectué une série de mesures (à l'aide d'une balance de torsion) qui lui ont permis de déterminer avec un certain degré de précision les propriétés de la force électrostatique exercée par une charge ponctuelle q_1 sur une autre charge ponctuelle q_2.

1) La force est radiale, c'est à dire dirigée selon la droite qui joint les deux charges ;

2) Elle est proportionnelle au produit des charges : attractive si elles sont de signe opposé, répulsive sinon ;

3) Enfin, elle varie comme l'inverse du carré de la distance entre les deux charges.



$$\vec{F} = K.\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}\,\vec{u} \qquad K = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

AVEC $K = 8{,}988\times10^9\ Nm^2/C^2 \approx 9\times10^9\ Nm^2/C^2$

r : distance entre les deux charges, $\vec{u}$: vecteur unitaire dirigé de M_1 vers M_2

Cette expression n'est valable que pour les charges situes dans le vide et qui sont immobiles. Cette loi est la base de l'électrostatique. En effet, L'électrostatique est l'étude des phénomènes dus aux charges électriques au repos.

Principe de superposition : Soit une charge ponctuelle M'(q') soumise a l'action de N charge ponctuelle q_i. La force exercée sur le point M'(q') est : $$\vec{F}_{res} = \sum_{i=1}^{N} \frac{q_i \cdot q'}{4\pi\varepsilon_0 r_i^2} \cdot \vec{u}_i$$

$$\vec{u}_i = \frac{\overrightarrow{M_i M'}}{\left\| \overrightarrow{M_i M'} \right\|}$$

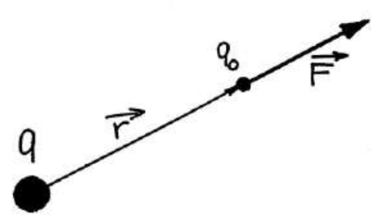
$\vec{u}_i$ est le vecteur unitaire porté par le support de M_iM', orienté de M' vers M_i.

III ; Le champ électrostatique

Le fait que deux charges électriques voisines soient soumises à des forces d'attraction ou de répulsion nous amène à considérer que toute charge électrique modifie les caractéristiques physiques de l'espace environnant. Pour qualifier cette modification, on dit que toute charge crée dans l'espace environnant un champ électrique.

III.1 Champ créé par une particule chargée :

On considère une particule de charge q et une particule test q_0 située à une distance r de la première



$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \cdot \vec{r}$$

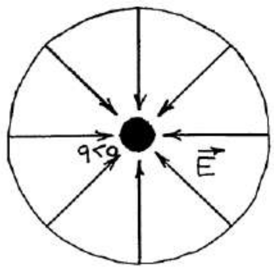
La force est située sur la droite reliant q à q_0. En divisant la force par q_0, on trouve le champ $\vec{E}$

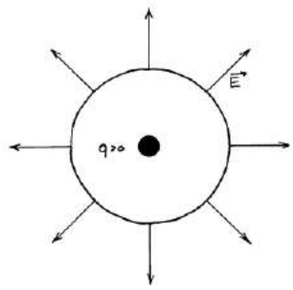
Définition :

Une particule de charge q située en O crée en tout point M de l'espace distinct de O un champ vectoriel appelé champ électrostatique. L'unité est le Volt/mètre (V/m).

Le champ électrique est orienté de O vers M quand q>0 et de M vers O quand q<0. Il est radial.

Charge négative   Charge positive





Les caractéristiques du champ électrostatique :

- Son module dépend des coordonnées du point M auquel on le définit.
- Sa direction est radiale, elle passe toujours par la charge source q.
- Son sens est tel que : le champ $\vec{E}$ s'éloigne des sources q positives ($\vec{E}$ colinéaire à r).

Le champ $\vec{E}$ est dirigé vers les sources q négatives ($\vec{E}$ opposé de r).

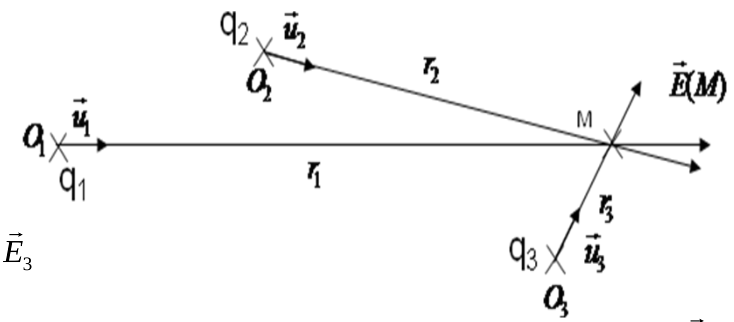
Unité : On exprime la norme du vecteur champ électrostatique par l'unité :

Volt par mètre ($V.m^{-1}$)

III.2 Champ électrique créé par un ensemble de particules chargées :

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i(M)$$

$$\vec{E}(M) = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$$

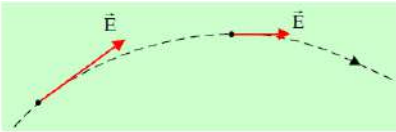


$$\vec{E}_1(M) = K.\frac{q_1}{(O_1M)^2}\vec{u}_1 \qquad \vec{E}_2(M) = K.\frac{q_2}{(O_2M)^2}\vec{u}_2 \qquad \vec{E}_3(M) = K.\frac{q_3}{(O_3M)^2}\vec{u}_3$$

D'où le champ résultant est $\vec{E}(M) = \sum_{i=1}^{3} K.\frac{q_i}{(O_iM)^2}\vec{u}_i$

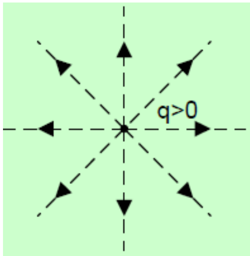
Lignes de champ :

Une ligne de champ d'un champ de vecteur quelconque est une courbe C (droite) tangente en chacun de ses points au vecteur champ électrique $\vec{E}$. Elle est orientée dans le sens de $\vec{E}$.

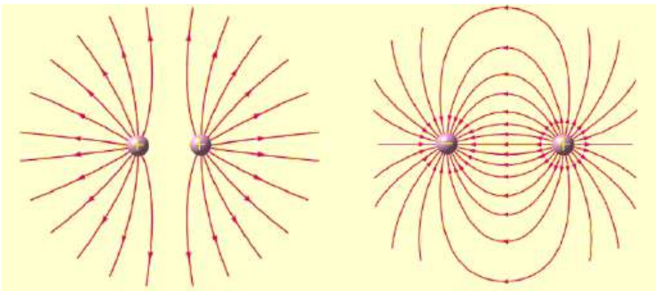


Ligne de champ

- Les lignes de champ pour une charge ponctuelle



- Les lignes de champ pour un dipôle (deux charges)



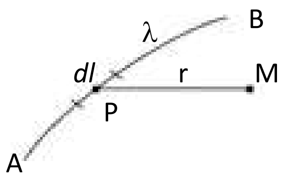
Même signe Signe différent

III.3 Champ crée par une distribution continue de charges

Dans le cas d'une distrubtion continue, on eut écrire le principe de superposition. On remplace le signe $\sum$ par le signe $\int$ et on obtient : $\vec{E}(M) = \int_{distribution} d\vec{E}(M)$

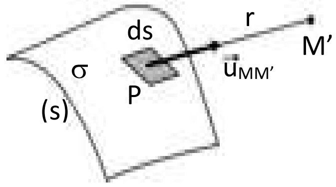
Avec $d\vec{E} = K.\frac{dq}{r^2}\vec{u}$ est le champ élémentaire créé par la charge élementaire dq se trouvant dans le domaine entourant le point.

- pour un fil chargé uniformément



$$\vec{E}(M) = \int_{AB} \frac{\lambda dl}{r^2}\vec{u}_{PM}$$

- pour une surface chargée uniformément

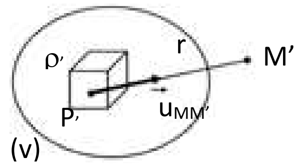


$$\vec{E}(M) = \iint_S \frac{\sigma ds}{r^2} \vec{u}_{MM'}$$

On intègre sur une surface (plan, sphère creuse…).

- pour un volume chargé uniformément

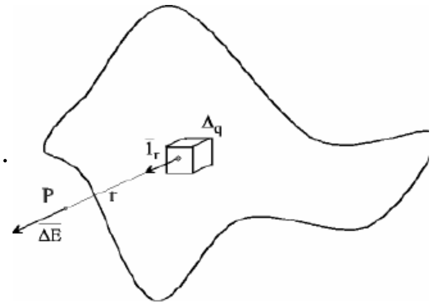
$$\vec{E}(M) = \iiint_v \frac{\rho dv}{r^2} \vec{u}_{MM'}$$



Méthodologie de calcul du champ:

- Décomposer la distribution en éléments de distribution « ponctuels ».

c.à.d On divise l'espace en petits morceaux contenant chacun une charge Δq ponctuelle



- Calculer Le champ électrique en P dû à Δq, ΔE

$\Delta \vec{E} = \frac{\Delta q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} . \vec{I}_r$ Où $\vec{I}_r$ est un vecteur unité dirigé de Δq vers P.

- Faire la somme (le principe de superposition)

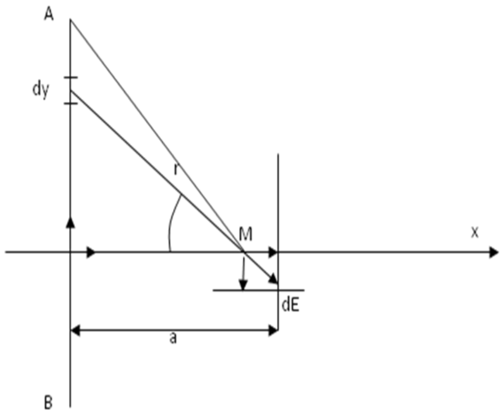
$$\vec{E}_T = \sum \Delta \vec{E}$$

Notation différentielle, pour une charge infinitésimale dq

$d\vec{E} = \frac{dq}{4\pi\varepsilon_0 r^2} . \vec{I}_r$ le champ total $\vec{E}_T = \int \frac{dq}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \vec{I}_r$

Exemple : Champ crée par un ségment uniformément chargé AB.

Soit $dq = \lambda . dy$ élement de charge électrique de l'élement dy.



$$d\vec{E} = dE_x.\vec{i} + dE_y.\vec{j}$$

$E = \int dE = \int dE_x + \int dE_y$ et par raison de symétrie $\int dE_y = 0$

$$dE_x = K.\frac{dq}{r^2}.\cos\alpha = dE_x = K.\frac{\lambda . dy}{r^2}.\cos\alpha$$

sachant que $tg\ \alpha = \frac{y}{a}$ et $\cos\alpha = \frac{a}{r}$.

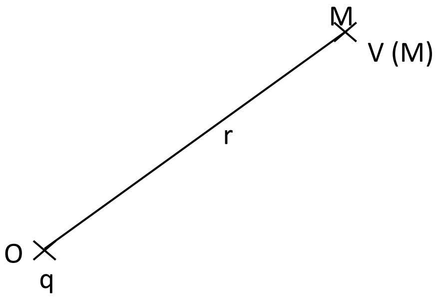
On en déduit: $dy = a.\frac{d\alpha}{\cos^2(\alpha)}$ et le rapport $\frac{1}{r^2} = \frac{\cos^2(\alpha)}{a^2}$.

$dE_x = K.\lambda.\ a.\frac{d\alpha}{\cos^2(\alpha)}.\ \frac{\cos^2(\alpha)}{a^2}.\cos\alpha$. D'où $E = \int dE_x = \frac{K.\lambda}{a}\int_{\alpha=-\theta}^{\alpha=+\theta}\cos\alpha.\,d\alpha = \frac{2K.\lambda}{a}\sin\theta$

$E = \frac{2K\lambda}{a}\sin\theta$ est l'expression du champ électrique crée par le ségment AB chargé d'une densité linéaique λ au point M.

III.2 Le potentiel électrique

la présence d'une charge q au point O permet de définir au point M une propriété une propriété scalaire appellée le potentiel électrostatique $V = K\frac{q}{r} + cte$.



$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_i q_i/r_i$$

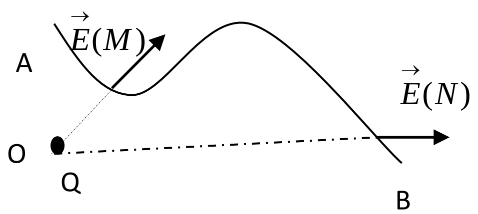
Le potentiel électrostatique crée par plusieurs charges q_i est

Distributions continue : L'expression du potentiel d'une distribution continue d charges électrique s'écrit : $V(M) = \int k.\frac{dq}{r}$.

Travail d'une force électrique

On exprime le travail d'une force électrostatique appliquée sur une charge électrique Q, lors d'un déplacement de$\vec{E}$la position A à la position B dans un champ uniforme par la relation :

$$\underset{A\to B}{W}(\vec{F}) = \vec{F}.\overrightarrow{AB} = Q.\vec{E}.\overrightarrow{AB}$$



Le travail élémentaire de Q sous l'action de $\vec{E}$ pour un déplacement élémentaire $\overrightarrow{dr}$ est

$$dW = Q\,.\,(\vec{E}\,.\,d\,\vec{r}) = \vec{F}\,.d\,\vec{r}$$

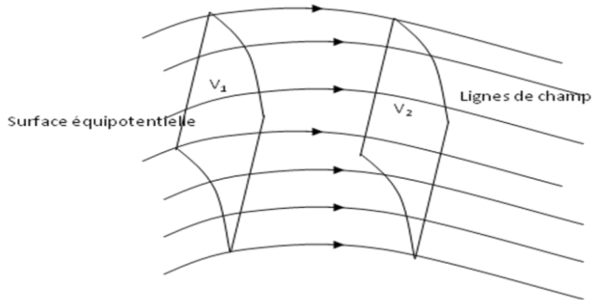
Le travail entre A et B s'écrit $W_A^B = Q.\int_A^B \vec{E}.d\,\vec{r} = Q.\,C_A^B$ avec $C_A^B = \int_A^B \vec{E}.d\,\vec{r}$ la circulation entre le point A et B.

Soit $\vec{E} = K.\dfrac{q}{r^3}\,\vec{r}$ et $\vec{r}\,.d\,\vec{r} = r.dr$ car $.\overrightarrow{dr}^{\,2} = .d(r^2);$ $\quad 2\,\vec{r}\,d(\vec{r}) = 2r.d(r);$

$$C_A^B = \int_A^B \vec{E}.d\,\vec{r} = KQ\int_A^B \frac{dr}{r^2} = KQ\left[\frac{-1}{r}\right]_{r_A}^{r_B} = KQ\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right) = V_A - V_B$$

On remarque que la circulation ne dépend pas du chemin suivie, elle dépend que de la position initiale et de la position finale.

Si A et B appartiennent au même plan équipotentiel alors $C_A^B = V_A - V_B = 0$ car $V_A = V_B$.



Relation entre $\vec{E}$ et V

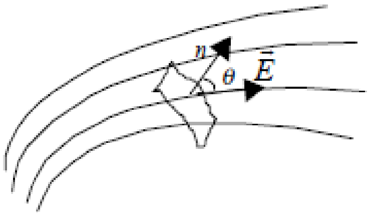
Soient $W_A^B = Q.\int_A^B \vec{E}.d\vec{l} = Q.\,C_A^B$ et $\vec{E}.d\vec{l} = dC = -dV$,

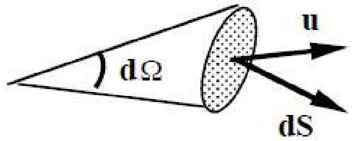
$E_x.dx + E_y.dy + E_z.dz = -dV = -(\dfrac{\partial V}{\partial x}dx + \dfrac{\partial V}{\partial y}dy + \dfrac{\partial V}{\partial z}dz)$ ce qui implique que $E_x = -\dfrac{\partial V}{\partial x}$, $E_y = -\dfrac{\partial V}{\partial y}$ et $E_z = -\dfrac{\partial V}{\partial z}$. Ce qui peut être écrit sous la forme $\vec{E} = -\overrightarrow{grad}V$

$$\vec{E} = E_x.\vec{e}_x + E_y.\vec{e}_y + E_z.\vec{e}_z = -(\frac{\partial V}{\partial x}.\vec{e}_x + \frac{\partial V}{\partial y}.\vec{e}_y + \frac{\partial V}{\partial z}.\vec{e}_z).$$

IV.2 Théorème de Gauss

Pour un élément de surface *dS* on défini le flux du champ par :





$$d\Phi = \vec{E}(M).d\vec{S} = K\frac{q}{(OM)^2}\vec{u}\,.\,dS.\vec{n} = K\frac{q}{OM^2}dS\,.\cos\theta = Kq\,.\,d\Omega$$

Avec $d\Omega = \dfrac{dS.\cos\theta}{OM^2}$, on enedéduit $\Omega = \int d\Omega = \int \vec{u}.\dfrac{d\vec{S}}{OM^2} = \int \dfrac{dS\,\vec{u}.\vec{n}}{OM^2} = \int \dfrac{dS\cos\theta}{OM^2}$

Soit $d\Phi = \vec{E}(M).d\vec{S} = \vec{E}\,.\,dS.\vec{n} = EdS\cos\theta$ avec $\vec{n}$ est le vecteur normale, θ l'angle entre $\vec{n}$ et $\vec{E}$.

Dans le cas où $\vec{E}$ a été créé par une charge ponctuelle *q*, le flux traversant la sphère de rayon *a* englobant la charge, avec comme origine la position de la charge, est donné par :

$$\Phi = \iint \vec{E}\,.\,\vec{n}\,\mathrm{d}S$$

$$\vec{E}(M). = K\frac{q}{(a)^2}\vec{u}\,.\text{ avec } \vec{n} = \vec{u}\,,\quad \Phi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 a^2}\iiint dS. = \frac{q4\pi a^2}{4\pi\varepsilon_0 a^2} = \frac{q}{\varepsilon_0}.$$

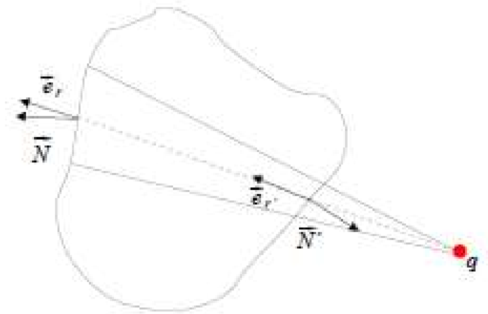
Cette relation est généralisable à une surface fermée quelconque avec une distribution de charge quelconque $\Phi = \dfrac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0}$ avec Q_{int} la totalité de charges à l'intérieur de la surface fermée. C'est le **Théorème de Gauss.**

Définition :

Le flux d'un vecteur champ électrique à travers une surface fermée n'est dû qu'aux charges à l'intérieur de cette surface

$$\phi = \iint_S \vec{E}.d\vec{S} = \sum_i \frac{q_i}{\varepsilon_0}$$

- [ ] Soit une charge q n'est pas englobée par une surface S



Le flux à travers dS est $d\phi = \vec{E}.d\vec{S} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\vec{e}_r.\vec{N}dS = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}d\Omega$

Le flux à travers dS' est $d\phi' = \vec{E}.d\vec{S}' = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r'^2}\vec{e}_r.\vec{N}dS' = -\frac{q}{4\pi\varepsilon_0}d\Omega$

D'où dϕ+dϕ'=0, on en déduit que le champ total est nul.

Le théorème de Gausse est vérifié puisque la charge ne se trouve pas à l'intérieur de la surface.

V.2 Equation de Poisson, Equation de Laplace

Le flux d'un champ de vecteur $\vec{A}$ à travers une surface fermée S est égale à l'intégrale de la divergence de $\vec{A}$ sur le volume délimité par S.

$$\int_S \vec{A}.d\vec{S} = \int_{VOLUME} div\vec{A}.d\tau \quad \text{avec} \quad div\,\vec{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

Pour le vecteur **Champ électrique on a :**

$$\int_S \vec{E}.d\vec{S} = \frac{q_{int}}{\varepsilon_0} = \frac{1}{\varepsilon_0}\int_{volume}\rho.d\tau = \int_{VOLUME} div\,\vec{E}.d\tau \quad \textbf{avec} \quad div\,\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

c'est **Equation de POISON**

D'où la forme locale (ou forme différentielle) du théorème de Gauss :

Si on utilise la relation $\vec{E} = -\vec{grad}V$ on aura

$$div\,\vec{E} = div(-\vec{grad}v) = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

soit $$div\ grad\ f = \Delta f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

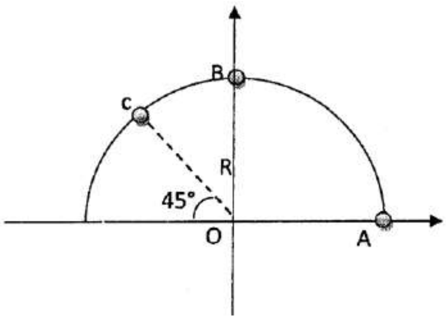
On obtient $\Delta V = \frac{-\rho}{\varepsilon_0}$ c'est **l'équation de LAPLACE**.

Exercice d'application

On considère trois charges ponctuelles q_A, q_B et q_C placées respectivement en A, B et C (q_A = -q, q_B = +2q et q_C = -2q) appartenant à un cercle de centre O et de rayon R (figure)

1. Déterminer le potentiel électrostatique au pont O.
2. Quel est le champ électrostatique au point O ?
3. On place au point O une charge q_0 = +2q. Déterminer la force électrostatique exercée sur la charge q_0. Est ce que le champ électrostatique dépend de la charge q_0 ? ,

$k = 9.10^9\ Nm^2/C^2$ $\quad K = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}$



Chapitre II:

CONDUCTEUR EN EQUILIBRE ELECTROSTATIQUE

Un **conducteur** est un matériau composé dont les électrons sont libres. Les charges peuvent se déplacer librement.

L'équilibre électrostatique dans un conducteur est atteint lorsque les **charges libres** sont **immobiles**.

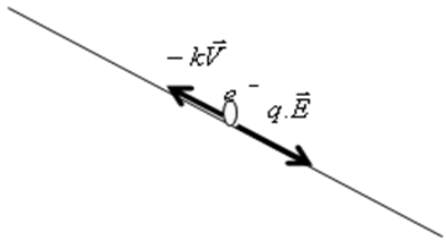
La vitesse moyenne d'un électron en régime permanent est $\vec{V} = \vec{0}$

I.1 Les propriétés d'un conducteur en équilibre :

I.1 Le champ électrostatique

En régime permanent, le champ électrostatique est nul en toute point intérieur du conducteur

En effet dans un conducteur, un électron sous l'action d'un champ électrique est soumis à deux forces $q.\vec{E}$ action de $\vec{E}$ sur l'électron et $-k.\vec{V}$ force de frottement de l'électron avec le milieu.



Par application de la relation fondamentale de la dynamique on a :

$\sum_{extérieur} \vec{f} = m.\vec{\gamma}$ avec m : la masse de e^- et $\vec{\gamma}$ l'accélération,

$q.\vec{E} - K.\vec{V} = m.\vec{\gamma}$ or $\vec{\gamma} = 0$, ce qui implique que $q.\vec{E} = K.\vec{V}$ de même en régime permanent $\vec{V} = \vec{0}$

On obtient, $\vec{E} = 0$.

I.2 Le potentiel et la charge du conducteur

Le **potentiel** est **constant** en tout point du conducteur.

le champ électrique nul dans le conducteur, $\vec{E} = \vec{0}$. Soit $\vec{E} = -\overrightarrow{grad}V$ puisque E=0 $\Rightarrow$ V,.

I.3 Distribution des charges :

la distribution des charges dans un conducteur en équilibre est surfacique.

Application du théorème de Gauss sur un conducteur en équilibre entraîne,

$$\Phi_{E/\text{int}} = \frac{\sum q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} = 0, \qquad \Phi_{E/\text{int}} = \frac{q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} = 0 \qquad \text{d'où } q_{int} = 0.$$

La charge intérieure d'un conducteur en équilibre est nulle.

D'après l'équation du poisson on a, $div\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} = 0$ à l'intérieur d'un conducteur en équilibre, d'où ρ = 0, la densité volumique de charge est nulle. Cela explique que s'il existe des charge sur un conducteur lorsqu'il est en équilibre, la distribution ne peut être que surfacique.

Exemple : Un métal en cuivre s'électrise par simple frottement. La charge de ce conducteur ne peut se trouver qu'en surface. (Le calcul du champ à la surface d'un conducteur voir TD)

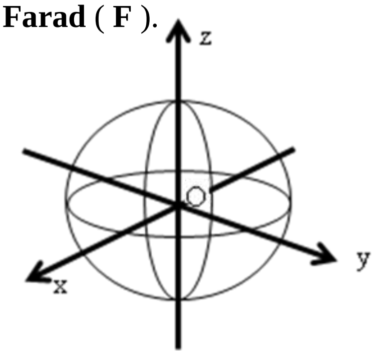
II La relation entre la charge et le potentiel d'un conducteur

Soient V le potentiel d'un conducteur et σ sa densité surfacique de charge, on a $V = \int dV = k.\int_{conducteur} \frac{\sigma}{r} dS$. Si on multiplie la densité surfacique par une constante α, la charge et le potentiel seront multipliés par la même constante (σ' = α.σ, V'= α.V et Q' = α.Q). Une nouvelle état d'équilibre électrostatique est établie avec Q' comme charge et V' comme potentiel, $\frac{Q'}{V'} = \frac{Q}{V} = \alpha = Cte$.

Définition :

la contante de proportionnalité $Cte = C = \frac{Q}{V}$ est appelée **la capacité** du conducteur en équilibre ayant la charge Q et le potentièle V. l'unité de la capacité est le **Farad** (**F**).

Eexemple : Capacité d'un conducteur sphérique



Soit une densité superficielle de la sphère $\sigma = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{4.\pi R^2}$

Q : charge portée par la sphère et $S=4.\pi R^2$: surface de la sphère derayon R.

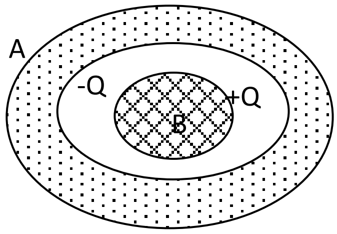
La charge Q crée un potentiel V au centre O. L'expression de V s'écrit:

$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{R}$ Or $Q = C.V$ ce qui donne que $C = \frac{Q}{V} = 4\pi\varepsilon_0.R$

III Influence totale

Il y a influence totale lorsqu'un conducteur A entoure compelétement un conducteur B.

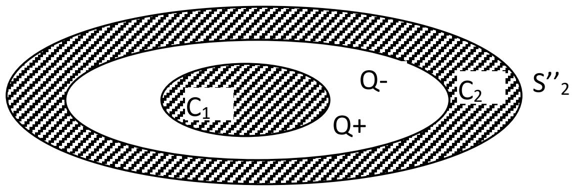
on utilise le théorème de Gauss, la surfasse de Gauss à l'intérieur de A, $\Phi_s = 0$ car $\vec{E} = \vec{0}$ à l'intérieur de A ce qui implique que $Q_{int} = 0$, $Q_A+Q_B = 0$ d'où $Q_A = -Q_B$



Si B porte une charge Q_B alors une charge $-Q_B$ apparait sur la surface interne de A.

I.Condensateurs

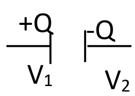
Un condensateur est un ensemble de deux conducteurs C_1 et C_2 en état d'influence totale, ce que veut dire l'un entoure complètement l'autre.



Conducteur C_1 : armature interne. Son potentiel est V_1, et Sa charge interne Q^+.

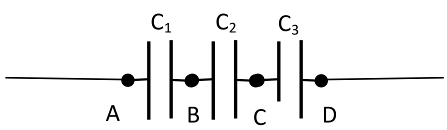
Conducteur C_2 : armature interne. Son potentiel est V_2, et Sa charge interne Q^-.

La charge du condensateur et celle de son armature interne Q. La capacité d'un condensateur est le rapport positif $C = \dfrac{Q}{V_1 - V_2}$, c'est le rapport de charge du condensateur à la différence de potentiel entre ces armature. L'unité de c est le Farad. Notation symbolique d'un condensateur est



Exemple : Condensateur cylindrique : deux plaques cylindriques de rayon R_1 et R_2 ($R_2>R_1$) et de hauteur h . $C = \dfrac{Q}{V_1 - V_2} = 2\pi\varepsilon_0 \dfrac{h}{\log \dfrac{R_2}{R_1}}$.

III.2 Association en série :



Soit l'ensemble à l'état initial neutre.

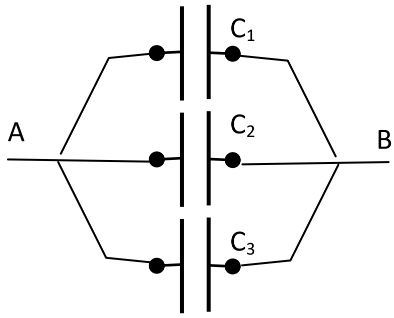
La charge de chaque conducteur entouré de point est nulle :

$-Q_1+Q_2 = 0$ et $-Q_2 + Q_3 = 0$ ce qui implique que $Q_1 = Q_2 = Q_3$

$(V_A-V_B+V_B-V_C+V_C-V_D) = (V_A-V_D) = \frac{Q_1}{C_1}+\frac{Q_2}{C_2}+\frac{Q_3}{C_3} = Q_1\left(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}\right) = \frac{Q_1}{C}$

$\left(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}\right) = \frac{1}{C}$, C est la capacité équivalente.

III.3 Association en parallèle :



Toutes les armatures sont soumises à la même différence de potentiel donc à la même tension $U=V_B - V_A$.

Pour chaque condensateur on a : $V_B - V_A = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{Q_3}{C_3}$

La charge total est la somme des charges : $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$

$Q = (V_B - V_A).(C_1 + C_2 + C_3) = (V_B - V_A).C$

d'où la capacité équivalente est : $C = C_1 + C_2 + C_3$

IV. Energie électrostatique

Définition :

L'énergie potentielle électrostatique d'une particule chargée placée dans un champ électrostatique est égale au travail qu'il faut fournir pour amener de façon quasi-statique cette particule de l'infini à sa position actuelle.

Soit une particule de charge q placée dans un champ E. Pour la déplacer de l'infini vers un point M, un opérateur doit fournir une force qui s'oppose à la force de Coulomb.

Si $\vec{F}_{ext}$ force exercée par l'opérateur, $\vec{F} = -q.\vec{E}$ la force électrostatique $\vec{F}_{ext} = -\vec{F} = -q.\vec{E}$. Le travail fourni par l'opérateur est :

$W_{\infty\to M}(\vec{F}_{ext}) = -W_{\infty\to M} = \int_{\infty}^{M}\vec{F}_{ext}.\vec{dr} = \int_{M}^{\infty} -q.\vec{E}.d\vec{r} = -q\big(V(\infty)-V(M)\big) = qV$ énergie potentiel d'une charge

IV.1 Énergie potentielle d'interaction d'un système de charges ponctuelles

Soient de deux charges ponctuelles q_1 et q_2 en interaction dans le vide, à la distance r_{12} l'un de l'autre. On peut considérer que la charge q_1 est plongée dans le potentiel électrostatique créé par q_2 $W = E_{p\,\text{int}} = \dfrac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_{12}}$,

On peut monter que $W = E_{p\,\text{int}} = \dfrac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_{12}} = q_1 V(2) = q_2(v(1) = \dfrac{1}{2}(q_1 V(2) + q_2 v(1))$

Le cas de N charges ponctuelles q_i en interaction dans le vide, à la distance $r_{i\,j}$ l'un de l'autre. Chaque charge est en interaction avec $N-1$ autres charges ce qui donne au total $(1/2)N(N-1)$ couples en interaction $W = E_{p\,\text{int}} = \sum_{\langle i,i \rangle i \neq j} \dfrac{q_i q_j}{4\pi\varepsilon_0 ri_j} = \dfrac{1}{2}\sum_i q_i \sum_{j \neq i} V_j(i) = \dfrac{1}{2}\sum_i q_i v(i)$.

$V(i)$ est le potentiel électrique dans lequel est plongée la charge qi. Le facteur ½ permet de ne pas compter deux fois les mêmes couples.

VI.2 Energie électrostatique d'un condensateur

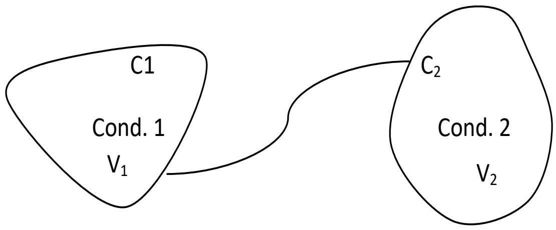
Un condensateur est un ensemble de deux conducteurs ayant chacun une charge et un potentiel : (Q,$V_{1)}$ et ($-Q$, $V_{2)}$. L'energie électrostatique est la somme des énergies pour chaque charge $W = \dfrac{1}{2}QV_1 - \dfrac{1}{2}QV_2 = \dfrac{1}{2}Q(V_1 - V_2)$ or $C = \dfrac{Q}{V_1 - V_2}$ d'où $W = \dfrac{1}{2}\dfrac{Q^2}{C}$

Chapitre III : L'ELECTROCINETIQUE

L'électrocinétique est l'étude du déplacement des charges électriques sous l'effet d'un champ électrique : c'est la physique qui étudie le courant électrique.

I. Courant électrique

Un conducteur est un matériau centenant des charges libres capanle de se déplacer. Les charges sont des électrons.



Soient deuc conducteurs C_1 ET C_2 de potenties respectives V_1 et V_2 . Les e- mobiles vont se déplacer du conducteur au potentiel le plus bas vers le condensateur au potentiel le plus haut. Le déplacement s'arrête lorsque toute différence de potentiel aura disparu. Le flux d'électrons est appelé courant électrique.

A l'instant t et pendant le temps dt à travers la section d'un fil électrique traverse la charge dq, l'intensité du courant est

$$I = \frac{dq}{t+dt-t} = \frac{dq}{dt}$$ unité MKSA est l'Ampère 1 Ampère = $\frac{1 Coulomb}{1 seconde}$

Le sens du courant est pris par convention celui du déplacement des charges positives. Il est donc opposé à la direction de déplacement des électrons.

II.1 Densité de courant

Le courant peut s'exprimer en fonction de la vitesse de charges. Considérons un conducteur cylindrique de section droite S, parcouru par un courant continu d'intensité I. Les porteurs ont une charge électrique q, que leur concentration est n, et qu'ils se déplacent avec une vitesse constante v le long du conducteur. En un intervalle de temps Δt, les charges parcourent une distance $\Delta l = v\Delta t$

le nombre ΔN charges franchissant une section droite S durant l'intervalle de temps Δt est égal au nombre de

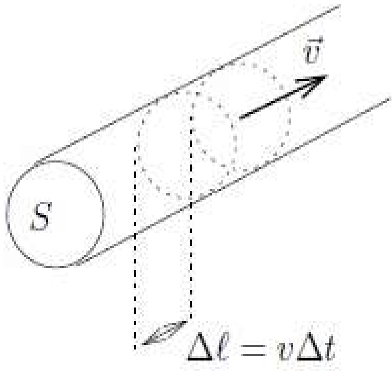
charges contenus dans un volume S Δℓ = S vΔt,

d'où ΔN = n S vΔt.

La charge totale s'écoulant au travers de la section S durant Δt vaut donc :

ΔQ = qΔ N = qnSvΔt,

L'intensité du courant correspondante est I = (ΔQ/Δt) = (



On définit le vecteur densité de courant par J est un vecteur : son intensité mesure la quantité de charges électriques traversant, par unité de temps, une section droite du conducteur ; $\vec{J}$ est parallèle au vecteur vitesse $\vec{v}$ Soit J = qnv

L'intensité du courant à travers un conducteur de section (S) durant Δt est I= J.S avec le module de J = I/S= qnv d'où on endéduit que le vecteur densité de courant est J = qnv.

Loi d'Ohm : Dans un conducteur homogène J = I/S= nev ne la densité volumique de charge mobile.

En régime permanet la loi fondamental de dynamique pour un conducteur homogène isolé est $\sum \vec{F} = 0$

Pour un électron de ce conducteur est soumis à deux forces : action du champs électrostatique sur l'électron $q.\vec{E}$ et la force de frottement de l'électron avec le milieu $\lambda.\vec{v}$.

$\sum \vec{F} = 0 \quad \Leftrightarrow e.\vec{E} - \lambda.\vec{v} = 0$ on en déduit que la vitesse est $\vec{v} = \frac{e}{\lambda}.\vec{E}$ avec λ : constante de frottement, e : charge de l'électron

De même on a $\vec{J} = en\vec{v} = en\frac{e}{\lambda}.\vec{E} = \gamma.\vec{E}$ avec $\gamma = \frac{ne^2}{\lambda}$ la conductivité électrique.

Soit $\vec{E} = \rho.\vec{J}$ avec $\rho = \frac{1}{\gamma}$ ρ étant la résistivité

Exemple de calcul d'une résistance d'un conducteur

On considère un fil de conducteur de lonqueur L dans laquelle on a établi une différence de potentiel $V_A - V_B$. La conduction d'un conducteur est du à l'existance du champs électrique.

On sait que d'après la relation potentiel et champs électrique on a :

$$V_A - V_B = El \Rightarrow E = \frac{V_A - V_B}{l}$$

On a E = ρ.J et I = S.J d'où $I = \frac{E}{\rho} S$, $I = \frac{V_A - V_B}{\rho . l} S$

on pose $R = \rho \frac{l}{S}$ on obtient $I = \frac{V_A - V_B}{R} = \frac{V}{R}$ **Loi d'Ohm** avec R la résistance du conducteur.

II Energie électrique

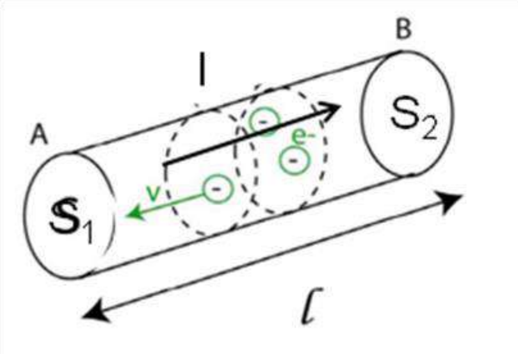
Soit une portion de circuit A,B parcourue par un courant d'intensité I.

V1 et V2 les potentiels respectifs en ces points.

dq traverse S_1 en un temps dt et la même que celle qui traverse S_2

L'énergie mise en jeu $dW = dq(V_1 - V_2), \quad dq = Idt$

$$dW = I(V_1 - V_2)dt = RI^2 dt$$



La puissance électrique mise en jeu $P = \frac{dW}{dt} = RI^2$

En courant continu:

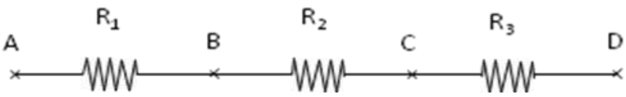
$$dW = RI^2 dt \Rightarrow w = RI^2 t$$

La dissipation d'énergie électrique sous forme calorifique : Loi de Joule

$$Q = \frac{W}{J} \Rightarrow Q = \frac{1}{J} RI^2 t \; avec \; J = 4,8 Joule / calorie$$

III. Association des résistances

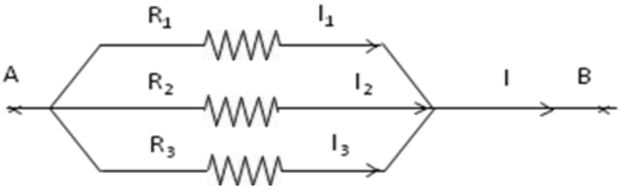
III.1 Résistances en série



$$\frac{V_A - V_D}{I} = \frac{V_A - V_B}{I} + \frac{V_B - V_C}{I} + \frac{V_C - V_D}{I} = R_{AB} + R_{BC} + R_{CD} = R_1 + R_2 + R_3$$

La résistance totale s'écrit $R_S = R_1 + R_2 + R_3$ c'est la somme des résistances.

III.2 Résistances en parallèles

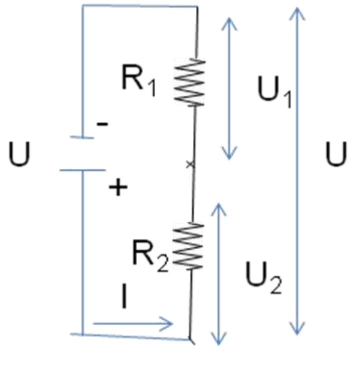


En noued A on a : $I = I_1 + I_2 + I_3$

$$I = \frac{V_{AB}}{R_1} + \frac{V_{AB}}{R_2} + \frac{V_{AB}}{R_3} = \frac{V_{AB}}{R_{eq}} = \frac{V_{AB}}{R_p}$$

La résistance totale Ry $$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

III.4 Diviseur de tension



Il permet d'obtenir une tension U_2 à partir de la tension U

d'un générateur. C'est le principe utilisé dans les potentiomètres

$$U_2 = U\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

IV. Réseau de conducteurs

Réseau : un groupement de générateur, résistance récepteur associées de façon quelconque et forment un ensemble de circuits fermé interconnectés. Le réseau éLa lectrique est constitué des branches des noueds et des mailles.

- ❑ La branche est une portion entre deux noueds
- ❑ Le noued le point de contacte de plusieurs brnches
- ❑ La maille ensemble de branches formant un circuit fermé

L'étude des réseaux consiste en la détermination des intensités des courants et des différences de potentiels dans les branches du réseau. Pour faire cette étude nous devons adopter des conventions de sens pour les courants et les mailles dans le réseau:

Conventions : Dans chaque branche d'un réseau nous choisissons un sens positif arbitraire pour l'intensité du courant. Si après calcul, on trouve une intensité négative, cela veut dire que le sens réel du courant est l'opposé de celui choisi.

Dans chaque maille d'un réseau nous choisissons aussi un sens de parcours arbitraire par rapport auquel nous calculons les d.d.p dans cette maille.

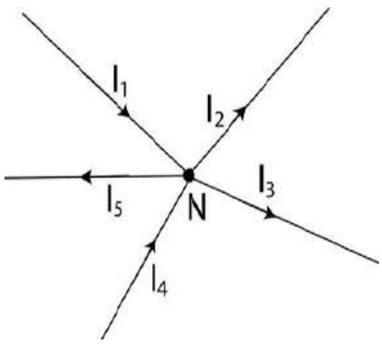
IV.1 Lois de Kirchhoff

Les **lois de Kirchhoff** expriment la conservation de l'énergie et de la charge dans un circuit électrique.

Dans un circuit électrique il est possible de calculer les différences de potentiel aux bornes de chaque conducteur et l'intensité du courant continu dans chaque branche de circuit en appliquant les deux lois de Kirchhoff : la **loi des nœuds** et la **loi des mailles**.

- **Loi des nœuds :** La somme des intensités des courants qui entrent par un **nœud** est égale à la somme des intensités des courants qui sortent du même nœud.

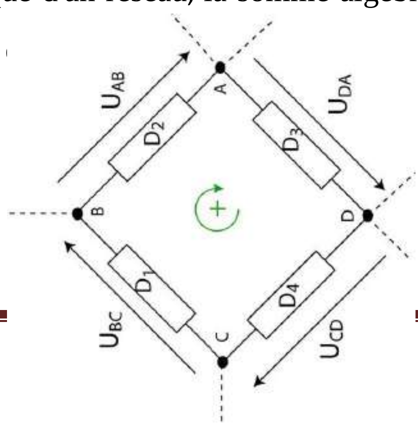
$$\sum_k \varepsilon_k I_k = 0; \varepsilon_k = \pm 1$$



Exemple : $I_1+I_4-I_2-I_3-I_5=0$ (figure)

- **Loi des mailles** *:* Dans une maille quelconque d'un réseau, la somme algébrique des différences de potentiel le long de la maille

$$\sum_k \varepsilon_k U_k = 0; \varepsilon_k = \pm 1$$



Exemple*:* $U_{AB}+U_{DA}+U_{CD}+U_{BC}=0$

Chapitre III :

LA MAGNETOSTATIQUE DANS LE VIDE.

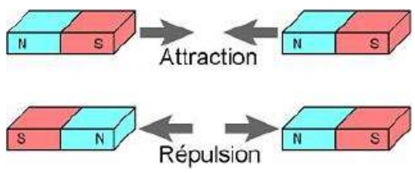
Dans ce chapitre nous allons aborder les phénomènes d'interactions magnétiques en régime statique (forces magnétiques et champs magnétiques créés par des courants continus) dans le vide

I. Le champ magnétique :

Le champ magnétique est comme le champ électrique, une astuce pour décrire comment les particules chargées interagissent.

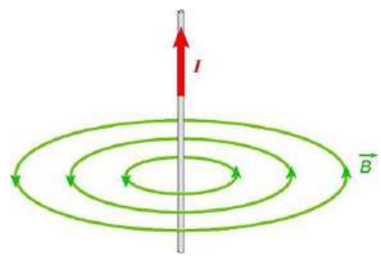
Les aimants permanents et le déplacement de charges électriques produisent un champ magnétique. Ce champ se mesure avec un teslamètre et s'exprime en **Tesla.**

En effet, Un aimant crée un champ magnétique. Expérimentalement, la limaille de fer permet de visualiser ses lignes de champ. Un aimant dispose de deux pôles, le pôle Nord et le pôle Sud. Chacun a la propriété d'attirer le fer. Des pôles identiques se repoussent, et des pôles différents s'attirent.



Déplacement de charges électriques

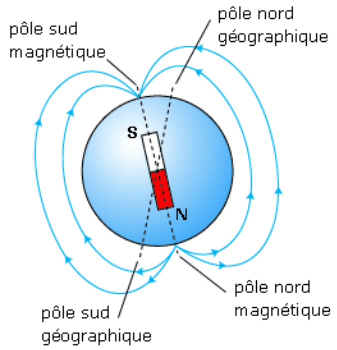
Des charges électriques en mouvement génèrent aussi des champs magnétiques. Pour un fil rectiligne dans lequel circule un courant électrique d'intensité I, le champ magnétique, noté traditionnellement $\vec{B}$, présente des lignes de champ circulaires



Le champ magnétique terrestre

Le noyau terrestre est composé de fer. Dans sa partie externe, ce fer est fluide. Les mouvements de celui-ci sont responsables de la génération du **champ magnétique terrestre**. La Terre se comporte comme un aimant géant, présentant deux pôles : **le pôle Nord et le pôle Sud magnétique**.

L'aiguille Nord d'une boussole, comme tout aimant, est attirée par un pôle Sud. En conséquence, l'aiguille Nord d'une boussole indique le pôle Sud magnétique.



Expérience d'Oersted :

En 1820 **Oersted** plaça un fil conducteur au-dessus d'une boussole et y fit passer un courant. En présence d'un courant l'aiguille de la boussole est effectivement déviée, prouvant sans ambiguïté un lien entre le courant électrique et le champ magnétique. Par ailleurs, il observa : • Si on inverse le sens du courant, la déviation change de sens. • La force qui dévie l'aiguille est non radiale.

Donc, la circulation du courant dans un fil conducteur modifiée les propriétés de l'espace proche du fil. Cette modification est traduite par les forces qui obligent la boussole à tourner. En effet cela est définit par l'existence du vecteur B appelé inductance magnétique.

II. Expressions du champ magnétique

II.1- Champ magnétique créé par une charge en mouvement

Le champ magnétique créé en un point M par une particule de charge q située en un point P et animée d'une vitesse v dans un référentiel galiléen est $\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} q \frac{\vec{v} \wedge \overrightarrow{PM}}{PM^3}$

L'unité du champ magnétique dans le système international est le Tesla (T). Une autre unité appartenant au système CGS, le Gauss (G), est également très souvent utilisée :

1 Gauss = 10^{-4} Tesla.

Le facteur μ_0 est la perméabilité du vide : il décrit la capacité du vide à « laisser passer » le champ magnétique. Sa valeur dans le système d'unités international MKSA est :
$\mu=4\pi10^{-7}$ Tm/A = $4\pi10^{-7}$ N/A^2 =$4\pi10^{-7}$ F/m (Farad par mètre)

Remarque : soit $\vec{w} = \vec{u} \wedge \vec{v}$ donc $w = u.v.\sin(\widehat{u,\vec{v}}$

II.2 Loi de Biot-Savart

Considérons un fil conducteur parcouru par un courant électrique continu d'intensité I. Chaque élément de longueur dl, de ce fil, crée en tout point M de l'espace un champ d'induction magnétique $\overrightarrow{dB}$ donné par :

$$\overrightarrow{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{\overrightarrow{dl} \wedge \overrightarrow{PM}}{PM^3} \quad \text{d'où} \quad \overrightarrow{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{\overrightarrow{dl} \wedge \vec{r}}{r^3}$$

où . $\vec{r} = \overrightarrow{PM}$ est le vecteur position de M par rapport au centre.

$\overrightarrow{dB}$ est perpendiculaire au plan formé par dl et r
Si dl // r alors $\overrightarrow{dB} = 0$
$\overrightarrow{dB}$ prend sa valeur maximale pour dl ⊥ r
Le champ d'induction magnétique: $\vec{B}$, créé par le fil conducteur parcouru par le courant I, est la somme des champs élémentaires $\overrightarrow{dB}$ créés par tous les éléments de longueur dl du fil.

$$\vec{B} = \int \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{\overrightarrow{dl} \wedge \vec{r}}{r^3}$$

III. Forces magnétiques :

III.1-Force magnétique agissant sur une charge ponctuelle en mouvement :

Une charge ponctuelle q qui se déplace à la vitesse $\vec{V}$ dans un champ d'induction magnétique $\vec{B}$, est soumise à une force magnétique $\vec{F}$ qui s'exprime par : $\vec{F} = q\vec{V} \wedge \vec{B}$ appelée force de Laplace.

F est proportionnelle à B et à V.

$\vec{F} = \vec{0}$ si $\vec{B} = \vec{0}$ $ou \vec{V} = \vec{0}$ $(charge\ au\ repos) ou\ \vec{B} // \vec{V}.$

$\vec{F}$ est perpendiculaire à la fois au champ $\vec{B}$, et à $\vec{V}$.

Bibliographie

Tahar NEFFATI «Electricité générale Analyse et synthèse des circuits : *Cours et exercices corrigés »* Sciences sup, Dunod

Emile AMZALLAG & al . « La physique en FAC : Electrostatique et électrocinétique, cours et exercices corrigés » Edit Sciences

Richard Feynman & al « Electromagnétisme 1 », Dunod

Bon courage

LIENS UTILES ☝

Visiter :

1. https://biologie-maroc.com
   - Télécharger des cours, TD, TP et examens résolus (PDF Gratuit)

2. https://biologie-maroc.com/shop/
   - Acheter des cahiers personnalisés + Lexiques et notions.
   - Trouver des cadeaux et accessoires pour biologistes et géologues.
   - Trouver des bourses et des écoles privées

3. https://biologie-maroc.com/emploi/
   - Télécharger des exemples des CV, lettres de motivation, demandes de ...
   - Trouver des offres d'emploi et de stage