

*Support de cours*  
*Electricité et magnétisme*  
*Mr. B. Bouhadef*  
*Année Universitaire 2021/2022*  
*Version 2*

*Conforme aux programmes du LMD, ce fascicule s'adresse aux étudiants de première année de l'université dans le domaine des Sciences de la Matière. Il est conçu de façon à guider au mieux les étudiants à avoir une idée sur les principales notions à comprendre et à connaître. Il est accompagné d'illustrations et d'applications directes (quelque fois) afin d'assimiler immédiatement les notions traitées. Chaque chapitre est divisé en des cours ; et chaque cours est suivi par des questions de compréhension. Ce support est indispensable mais il ne vous suffit pas pour assimiler toutes les notions traitées ici. Chaque cours présenté ici donne des idées qu'il faut les relier, les ordonner par ordre chronologique et quantifier par des exemples pratiques quelque fois. C'est le travail on va le faire ensemble (enseignant+ étudiants).*

### ***Les références***

- 1- R. A. SERWAY, J. W. JEWETT, JR., A. DUCHARME, M. PÉRIARD, Physique - Tome 2 Electricité et magnétisme.*
- 2- H. C. OHANIAN et J. T. MARKERT, Physics for Engineers and Scientists, Tome 2 Electricité et magnétisme.*
- 3- D. Giancoli, Tome 2 Electricité et magnétisme,*
- 4- Physique I, Halliday, Resnick et Walker, Tome 2 Electricité et magnétisme.*
- 5- Physique, Kane et Sternheim.*
- 6- Les Cours de MIT sur Youtube.*

*Sommaire*

Introduction.....	1
1- Electrostatique.....	2
1.1 Charges et forces électriques .....	2
1.2 Champ électrique et les conducteurs en équilibre électrostatique .....	4
1.3 Distribution des charges.....	5
1.4 Les dipôles électriques.....	7
1.5 Flux électrique, théorème de Gauss.....	8
1.6 Energie potentielle électrique et potentiel électrique .....	10
1.7 L'énergie potentielle d'un système de particule .....	13
1.8 Le potentiel d'un conducteur .....	14
2- Les conducteurs.....	16
2.1 Le champ électrique et les conducteurs .....	16
2.2 Pression électrostatique .....	17
2.3 Capacité d'un conducteur .....	17
2.4 Les condensateurs .....	18
2.5 Energie emmagasinée dans un condensateur .....	20
2.6 Les diélectriques .....	21
3- Electroncinétique.....	24
3.1 Conducteur électrique.....	24
3.2 Théorie microscopique de la conduction .....	27
3.3 La puissance électrique dissipée et la loi de Joule.....	29
3.4 Les batteries.....	30
3.5 Les résistances en série et en parallèle .....	31
3.6 Les instruments de mesure.....	32
3.7 Lois de Kirchhoff .....	33
3.8 Analyse d'un circuit électrique .....	34
3.9 Circuits de charge et de décharge d'un condensateur .....	37

## Sommaire

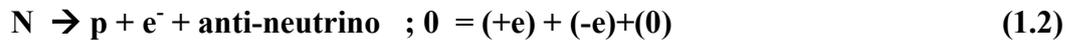
---

4.1 Introduction.....	39
4.2 Le champ magnétique .....	39
4.3 La force de Lorentz.....	40
4.4 Loi de Laplace.....	41
4.5 Loi de Biot et Savart .....	45
4.6 Induction magnétique.....	47
4.7 La loi de Lenz et la loi de Faraday.....	48

### I.1 Charges et forces électriques

La charge électrique est une propriété de la matière qui lui fait produire et subir des effets électriques et magnétiques.

Selon le **principe de conservation** de la charge, la charge totale dans un **système isolé** est constante.



La charge est **quantifiée**, c'est-à-dire qu'elle n'existe que par quantité discrète. Toute charge  $q$  est donnée par  $q = \pm ne$  ( $0, \pm e, \pm 2e, \dots$ ). Où  $n$  est un entier et  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{C}$  (*coulomb est l'unité de charge dans SI*), est la **charge élémentaire**.

Il existe trois types des matériaux : les **conducteurs**, les **isolants**, les **semi-conducteurs** et les **super-conducteurs**.

a) Un **conducteur** est un matériau dans lequel les charges peuvent circuler. Dans un métal, les charges en mouvement sont les électrons libres. Dans les gaz ionisés et les solutions électrolytiques, les ions positifs ou négatifs peuvent se déplacer.

b) Dans un **isolant**, les charges sont liées à des sites déterminés et ne peuvent pas se déplacer.

c) Un **semi-conducteur** se comporte comme un isolant lorsqu'il est très pur. On peut modifier son pouvoir conducteur en lui ajoutant certaines impuretés.

d) Un **supraconducteurs** : la résistance s'annule pour une température inférieure à une valeur critique  $T_c$ .

La mobilité des charges dans une substance peut être caractérisée par un **temps de relaxation**, ce temps nous donne le rythme auquel la charge va diminuer en un point (pour cuivre  $10^{-12} \text{s}$  et  $10^{10} \text{s}$  dans les polystyrènes).

La charge électrique peut être transmise par **frottement**, **contact** ou par **induction**. On peut utiliser un **électroscope** pour détecter les charges électriques ou même savoir le signe de la charge.

Par analogie avec la loi de gravitation le chimiste Joseph Priestley (1733-1804) tira une conclusion :

**Force électrique varie en  $1/r^2$ .**

Le module de la **force électrique** ou **force coulombienne** entre deux **charges ponctuelles**  $q_1$  et  $q_2$  séparées par une distance  $r$  est donnée par la **loi de Coulomb** (1736-1806) :  $|\vec{F}| = k |q_1| |q_2| / r^2$ .

Avec  $K = 1/(4\pi\epsilon_0) = 9,0 \cdot 10^9 \text{Nm}^2/\text{C}^2$  et  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{C}^2/\text{Nm}^2$  est constante de permittivité du vide.

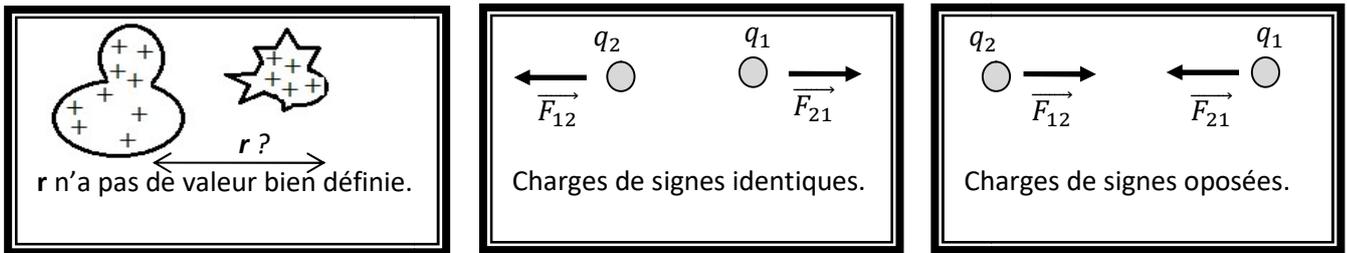


Figure 1.1 : la force coulombienne entre deux charges.

La **loi de coulomb** ne s'applique pas dans le cas où les charges ont des formes complexes sauf s'il y a une symétrie des charges (Fig.1.1).

La **force électrique** obéit au **principe de superposition**, qui veut que la force entre deux particules ne dépend pas des autres charges en présence. On utilise ce principe pour déterminer la **force résultante** exercée sur une **particule chargée** par d'autres particules chargées (Fig.1.2).

L'étude des **effets électriques** créés par des charges au repos est ce que l'on appelle l'**électrostatique**. Par contre le mouvement des charges fait apparaître des effets **électriques (chapitre 3)** et **magnétiques (chapitre 4)**.

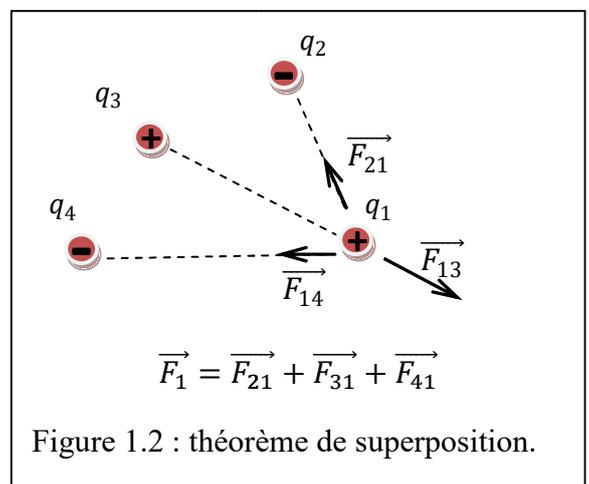
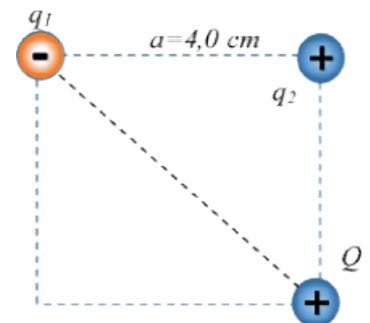


Figure 1.2 : théorème de superposition.

**Exemple :** Trouver la force électrique résultante exercée sur la charge  $Q$  par les charges  $q_1$  et  $q_2$ . On donne  $Q=5,0\mu\text{C}$ ,  $q_1=1,0 \cdot 10^{+1}\mu\text{C}$ ,  $q_2=-8,0\mu\text{C}$  et  $a=4,0\text{cm}$ .

**Solution :**



### Questions :

- 1- Combien des électrons dans une charge de  $-1\mu\text{C}$  ?
- 2- Quelle est la différence entre les conducteurs, isolants, semi-conducteurs et super-conducteurs ?
- 3- Pour quoi on ne peut pas utiliser la loi de coulomb pour calculer la force électrique entre deux charge quelque soit la forme de ces charges ?
- 4- Donner quelques techniques pour charger un conducteur.
- 5- Expliquez comment Coulomb a déterminé les valeurs des charges électriques portées sur les sphères qu'il utilisait sur sa balance à torsion.
- 6- Donnez des exemples de réactions qui mettent en évidence la conservation de la charge électrique.
- 7- Peut-on charger un objet métallique en le frottant ?

### 1.2 Champ électrique et les conducteurs en équilibre électrostatique

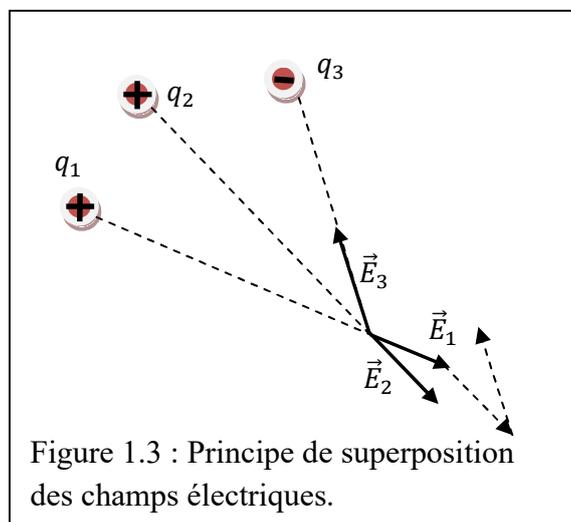
a) **Champ électrique** : Une charge électrique agit sur le milieu qui l'entoure en créant un **champ électrique**  $\vec{E}$ . Le champ électrique en un point est la force par unité de charge agissant sur un **charge d'essai**  $q_{\text{ess}}$  placée en ce point

$$\vec{E} = \vec{F}/q_{\text{ess}} \quad (1.3)$$

Le vecteur  $\vec{E}$  est orienté dans le même sens que la force agissant sur une charge positive. Lorsqu'on connaît le **vecteur champ**, on peut déterminer la force agissant sur une charge  $q$  quelconque au moyen de l'égalité :  $\vec{F} = q\vec{E}$ .

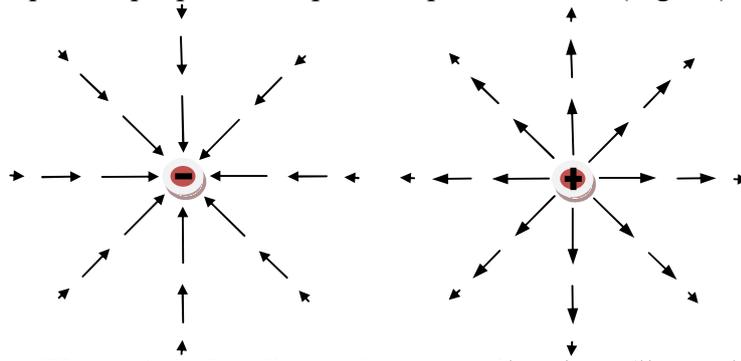
A partir de la **loi de Coulomb** on trouve le module du champ électrique crée par une charge ponctuelle  $Q$  :  $\|\vec{E}\| = \frac{k|Q|}{r^2}$ . L'unité est  $\text{N/C}$

Lorsqu'on est en présence de plusieurs charges ( $N$  charges), le champ total est la sommes des champs créés par ces charges (**principe de superposition**) :  $\vec{E}_T = \sum_i^N \vec{E}_i$

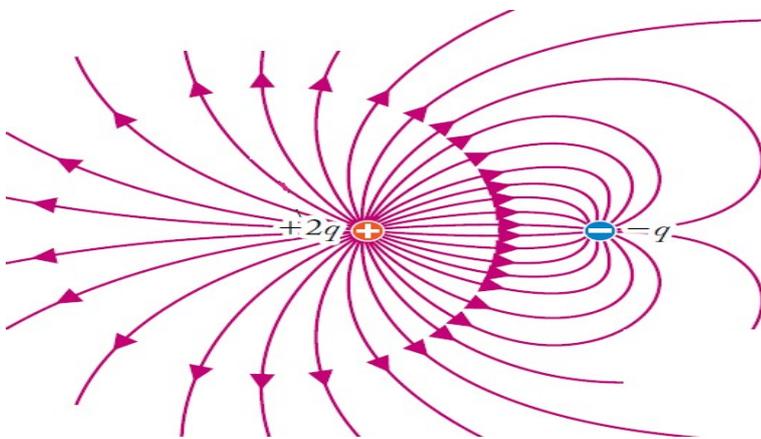


## Chapitre I : Electrostatique

b) Les **lignes de champ électrique** : le champ électrique créé par une charge ponctuelle positive  $Q$  en un point quelconque peut être présenté par une flèche (Fig.1.4).



**Figure 1.4 :** Les **lignes de champ** électrique (lignes de force) pour une charge positive. Ces lignes partent d'une charge positive et se dirigent vers une charge négative.



Les **lignes de champ** nous aident à :  
1) mieux visualiser le champ, 2)  
renseigner sur l'intensité du champ,  
parce que l'intensité du champ est  
proportionnelle à la l'intensité des  
lignes de champ.

Les **lignes de champ** ne se coupent  
jamais : si non, à l'endroit où elles se  
couperaient, le champ aurait deux  
directions différentes.

### Questions:

- 1- Quel rôle joue le champ électrique entre les particules chargées?
- 2- Sont-elles utiles les lignes du champ électrique?
- 3- Pour quoi les lignes du champ électrique ne se coupent-elles jamais?
- 4- Vrais ou faux? Si on double la valeur de la charge électrique, le champ électrique se double.

### 1.3 Distribution des charges

#### a) Champ électrique pour une charge de forme quelconque :

Si la **loi de coulomb** s'applique aux charges ponctuelles comment évaluer le champ électrique produit par une charge distribuée sur un objet qui n'est pas ponctuel et n'a pas une **symétrie sphérique** ? La réponse est de diviser la charge ( $q$ ) de l'objet en petit **éléments infinitésimaux**  $dq$  qui peuvent être considérées comme des charges ponctuelles.

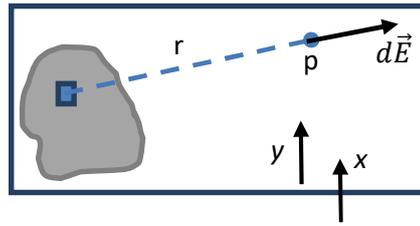


Figure 1.7 : champ électrique crée par une charge élémentaire  $dq$ .

Le module du **champ électrique infinitésimal** produit par chaque élément  $dq$  est :  $\|d\vec{E}\| = k |dq|/r^2$  (Eq.1). Pour trouver le champ électrique total en point p on fait la somme (l'intégrale) de tous les éléments :  $\vec{E} = \int d\vec{E}$  (Eq.2) avec  $d\vec{E} = dx \vec{i} + dy \vec{j} + dz \vec{k}$ ,  $\vec{E} = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k}$ ,  $E_x = \int dE_x, E_y = \int dE_y, E_z = \int dE_z$ .

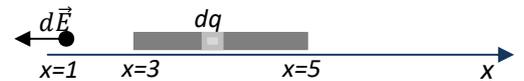
## b) Les distributions des charges particulières :

- **Densité de charge linéique  $\lambda$**  : si on a un objet sous forme un fil (ligne) de longueur L, et a une charge total Q distribuée sur ce fil, on définit une **densité de charge linéique**  $\lambda = \frac{Q}{L} [C/m]$ . Donc chaque élément infinitésimal  $d\ell$  de ce fil aura une charge  $dq = \lambda d\ell$ . Pour trouver le champ électrique dans n'importe quel point dans l'espace il faudra évaluer Eq.2. Si la charge Q n'est pas distribuée uniformément la densité de charge linéique  $\lambda$  n'est pas constante est devient en fonction

Evaluer le champ électrique en point p produit par un Barreaux avec  $L=2m$  et  $Q=40\mu C$ .

$$Q = \int \lambda dx = \lambda \int dx = \lambda L \Rightarrow \lambda = 20\mu C/m,$$

$$\vec{E} = E_x \vec{i}, E_x = \int dE_x = \int -k \frac{dq}{r^2} = \int -k \frac{\lambda dx}{(x-1)^2} = k \frac{\lambda}{x-1} \Big|_{x=3}^{x=5} = -4,5 \cdot 10^4 N/C$$



du la longueur (ex :  $\lambda = x^2 \frac{C}{m}, Q = \int \lambda dx = \int_0^L x^2 dx = \frac{1}{3} L^3 C$ ).

- **Densité surfacique de charge  $\sigma$**  : si la charge est distribuée (uniformément) sur une plaque (qui une surface S) on définit alors la densité surfacique de charge  $\sigma = \frac{Q}{S} [C/m^2]$ . Pour calculer le champ produit par cette plaque il faut d'abord définir la charge infinitésimale distribuée sur un élément de surface  $dS$ , on a  $dq = \sigma dS$ . Dans le cas où la charge n'est pas distribuée uniformément elle sera en fonction de x et y (ex :  $\sigma(x, y) = 2x + 3y^2 C/m^2$ ).

- **Densité volumique de charge  $\rho$**  : si la charge est distribuée (uniformément) sur un volume on définit alors la densité de charge volumique comme étant :  $\rho = \frac{Q}{V} [C/m^3]$ . Un élément infinitésimal de volume  $dV$  contient une charge élémentaire  $dq = \rho dV$  et la charge totale sera :  $Q = \int dq = \int \rho(x, y, z) dV$ , si la charge est distribuée uniformément la charge totale devient  $Q = \rho \int dV = \rho V$ .

### 1.4 Les dipôles électriques

Un **dipôle électrique** est un ensemble constitué par deux charges de même grandeur (Fig.1.8) et de signes opposés séparé par une certaine distance. Toute **molécule** dans laquelle les centres des **charges positives** et **négative** ne coïncident pas peut être considérée comme un dipôle électrique. HC, CO et H<sub>2</sub>O sont des **dipôles permanent**. Les molécules qui ne sont des **dipôles électriques** peuvent acquérir cette propriété sous l'effet d'un **champ électrique** extérieur, il s'agit donc d'un **dipôle électrique induit**.

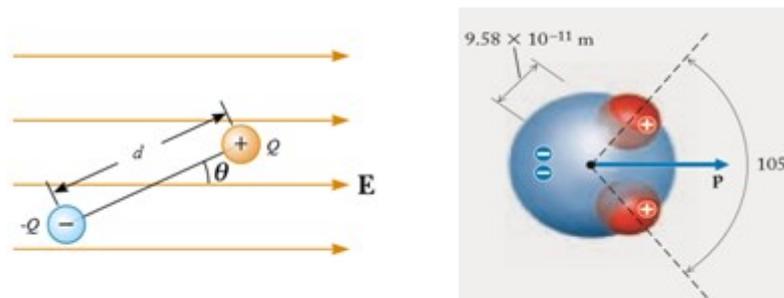


Figure 1.8 : Dipôle électrique (droite), dipôle électrique de molécule d'eau.

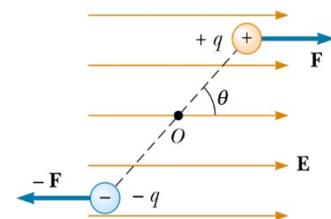
**a) Moment dipolaire électrique :** par définition, le moment dipolaire électrique est donné par  $\vec{p} = Q\vec{d}$  (ex :  $Q = 2\mu\text{C}$ ,  $\vec{d} = 0,1\vec{i} \text{ m}$  on trouve que  $\vec{p} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ C.m}$ ). Dans le cas où il y a plusieurs charges (comme la molécule d'eau), le moment résultant est égal à la somme vectorielle des deux moments dipolaires. **L'eau a un dipôle électrique de  $6,2 \cdot 10^{-32} \text{ C.m}$ .**

Que se passe-t-il quand un **dipôle électrique** se trouve dans un **champ électrique uniforme** ?

On aura un **moment de force**  $\vec{\tau}$  exercé sur le dipôle électrique. Donc, les **charges** seront soumises à des **forces électriques** de même module mais de sens opposés du au champ. La force totale agissant sur le **dipôle** est nulle, mais le **dipôle** est soumis à deux **moments de force**.

Le module du moment des forces résultant est :

$$\begin{aligned} \|\vec{\tau}\| &= 2(q\|\vec{E}\|) \left(\frac{d}{2} \sin(\theta)\right) = \|\vec{p}\|\|\vec{E}\| \sin(\theta) \Rightarrow \vec{\tau} \\ &= \vec{p} \times \vec{E} \end{aligned}$$

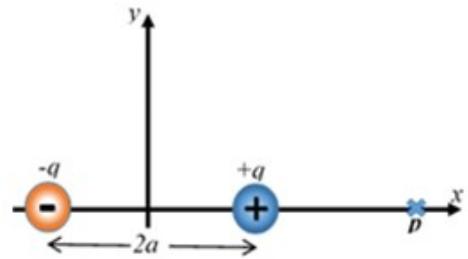


Nous avons, aussi, vu qu'un dipôle électrique placé dans un champ électrique a tendance à s'orienter (rotation) suivant ce champ. Cette rotation donne naissance à un travail  $W$ . Ce travail peut être évalué comme suit :  $W = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \|\vec{p}\|\|\vec{E}\| \sin(\theta) = -\|\vec{p}\|\|\vec{E}\|(\cos(\theta_2) - \cos(\theta_1)) = -\vec{p} \cdot \vec{E}$ .

**Le travail  $W$  est emmagasiné sous forme énergie potentielle.** Cette énergie potentielle est minimale pour  $\theta = 0$  et maximale pour  $\theta = \pi$ . Si le dipôle est libre de tourner, il oscille par rapport à la direction du champ. Cette oscillation des dipôles produisent une énergie thermique dans le milieu où se trouve (c'est le principe de fonctionnement pour un four à micro-onde).

**Questions :**

- 1- Citez les trois densités de charge données dans ce cours.
- 2- Définir un dipôle électrique, et donner quelque molécules de type dipôle permanent.
- 3- Que se passe-t-il quand un dipôle électrique se trouve dans un champ électrique uniforme ?
- 4- Montrez que le champ créé par le dipôle (en  $p \gg a$ ) présenté sur la figure est égal à  $E(p) = 4kqa/p^3$ ?
- 5- Expliquer pourquoi le moment dipolaire de la molécule d'eau en fait un solvant très puissant.



**1.5 Flux électrique, théorème de Gauss**

Le **champ électrique** peut être déterminé à partir de **loi de Coulomb**, mais cette approche peut devenir complexe. La solution est dans le **théorème de Gauss** (1777-1855), ce théorème reflète les propriétés générales des **champs électriques** et constitue un moyen rapide pour déterminer le champ électrique créé par une **distribution de charges** si celle-ci est suffisamment symétrique.

- a) **Flux électrique**  $\Phi_E$ : cette **grandeur physique** a été introduite par **Gauss** en faisant une analogie entre les **lignes de champ électrique** qui traversent une surface et les lignes de courant d'un fluide qui s'écoule à travers une surface. Par définition on a :

$$\Phi_E = \vec{E} \cdot \vec{S} = \|\vec{E}\| \|\vec{S}\| \cos(\theta) \quad [\text{N.m}^2/\text{C}] \quad (1.6)$$

$\theta$  étant l'angle entre le champ électrique et la surface  $S$ .

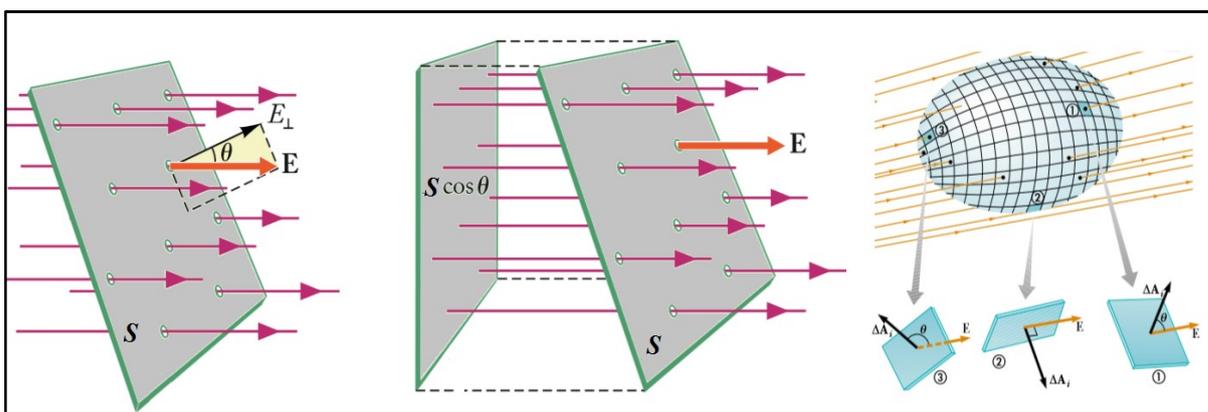


Figure 1.9 : Flux électrique

L'équation (1.6) peut être modifiée pour une surface qui n'est pas plane ou dans le cas où  $\vec{E}$  n'est pas uniforme.

## Chapitre I : Electrostatique

$$\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

C'est une **intégrale de surface**, par conséquent peut être difficile à calculer. Mais si nous avons une distribution suffisamment symétrique on peut évaluer le **flux électrique** utilisant l'équation (1.6).

### b) Théorème de Gauss:

Considérant une **charge ponctuelle**  $Q$  (Fig.1.10), et sachant le **champ électrique** est symétrique à une distance  $r$  de la charge. On peut calculer le flux électrique à cette distance en imaginant une surface fermée centrée sur la charge ponctuelle.

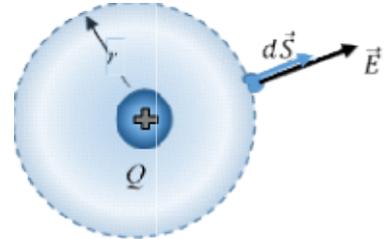


Figure 1.10 : charge ponctuelle dans une surface de Gauss.

On a :  $\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{S} = \|\vec{E}\| \int dS = \|\vec{E}\| \cdot 4\pi r^2$ , or d'après la loi de Coulomb on a :

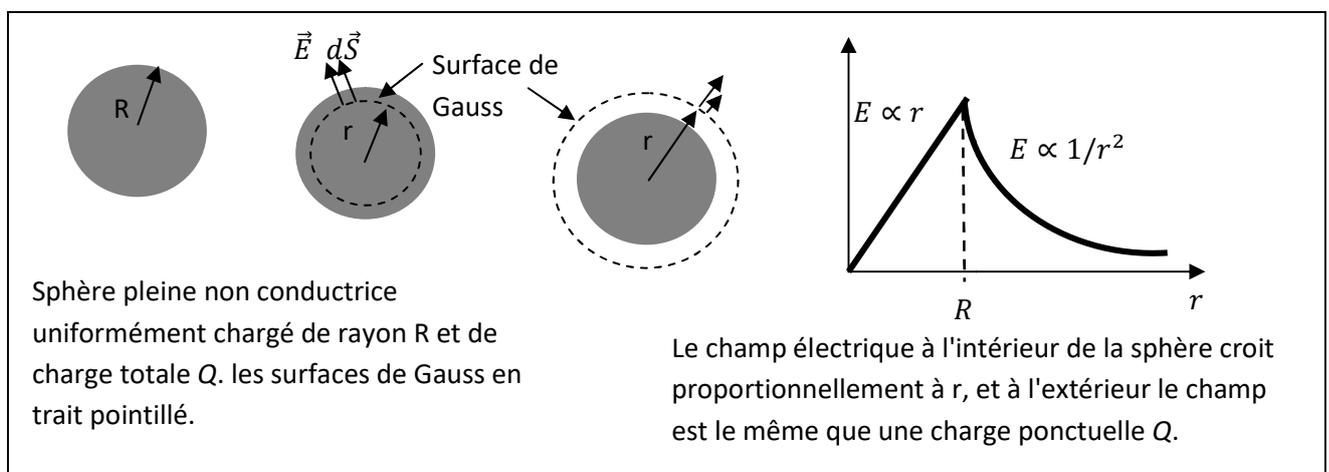
$$\|\vec{E}\| = k \frac{Q}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \Rightarrow \Phi_E = \frac{Q}{\epsilon_0} = \int \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (1.7)$$

Le sens physique de cette équation (1.7) est que: **le flux électrique à travers une surface fermée est égal au facteur  $1/\epsilon_0$  multiplié par la charge  $Q$  qui se trouve à l'intérieur de la surface. On peut dire aussi que le flux est égale au nombre de lignes sortant (ou entrant) d'une charge ponctuelle.**

On remarque que le rayon de la sphère choisi ne intervient pas dans le calcul de **flux électrique!**

**Application du théorème de Gauss:** si on veut utiliser le **théorème de Gauss** pour savoir le **champ électrique** produit par certaines **distributions de charges** symétriques en point  $p(x, y, z)$ , il faut choisir une **surface fermée** (imaginaire) de Gauss passant par ce point  $p(x, y, z)$ .

Les **trois étapes pour trouver le champ électrique** d'une distribution de charge sont: (a) choisir une surface de Gauss adéquate, (b) évaluer  $Q_{\text{int}}$ , (c) évaluer l'intégrale  $\int \vec{E} \cdot d\vec{S}$



## Chapitre I : Electrostatique

Dans notre programme (SM/L1), on utilise une des trois surfaces de Gauss à savoir : surface de Gauss sphérique, cylindrique ou bien cubique. Donc selon le problème qu'on a, on choisit la surface de Gauss la plus adéquate (qui rendre l'intégrale facile à le déminer).

### Questions:

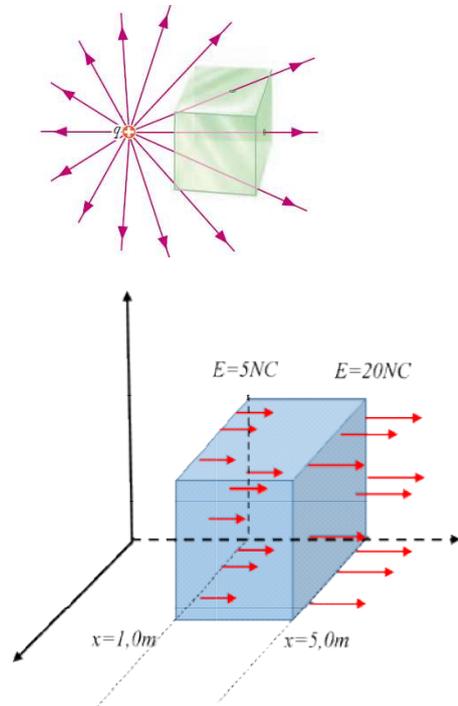
1-Définissez chacun des symboles qui apparaissent dans l'énoncé de Gauss:  $\int \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$ .

2-Pour quoi faut-il connaître l'orientation des lignes de champ électrique avant de commencer à appliquer le théorème de Gauss?

3- Vrai ou faux? Lorsqu'on utilise l'équation (2) pour calculer le champ électrique à l'intérieur d'une sphère uniformément chargée,  $Q$  correspond à la charge totale de la sphère.

4-En considère la charge ponctuelle (Fig.1), le flux total à travers la surface cubique est: (a) zéros, (b) positif ou bien, (c) négatif.

5-Quelle est la valeur de charge enfermée par la surface cubique (Fig.2) ?



## 1.6 Energie potentielle électrique et potentiel électrique

### 1.6.1 Potentiel électrique :

La **force électrique**, comme la **force gravitationnelle**, est une **force conservative**. Cela nous permet de définir une **énergie potentielle électrique** et d'appliquer la loi de **conservation d'énergie**.

Dans un champ gravitationnel l'énergie potentielle est donnée par:  $U_g = mgh$ . On définit le potentiel gravitationnel comme  $V_g = U_g/m$  (l'énergie potentielle par unité de masse, c.-à-d. indépendant de la masse).

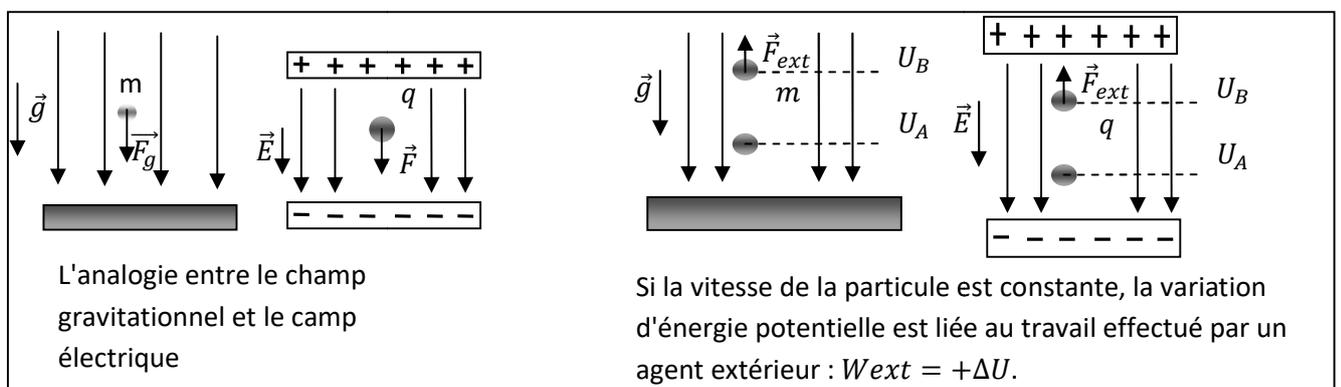


Figure 1.11 : comparaison entre le champ gravitationnel et électrique.

## Chapitre I : Electrostatique

De même, le **potentiel électrique**  $V$  est l'**énergie potentielle électrique**  $U$  par unité de charge  $q$ :  $V=U/q$ (donc il est indépendant de la charge).

Le potentiel électrique est un grandeur scalaire. L'unité SI du potentiel électrique est le **volt** (V), avec  $1V = 1J/ 1C$  et  $U=qEh$  par conséquent le potentiel électrique pour un **champ électrique uniforme** devient :  $V= Eh$ .

Le travail externe emmagasiné sous forme d'énergie potentielle est :

$$W_{ext} = +\Delta U = U_B - U_A = qV_B - qV_A = q(V_B - V_A) \quad (1.8)$$

à condition que la vitesse est constante. Cette équation nous permet de constater que c'est : **la différence de potentiel qui a de l'importance et non les valeurs de  $V_B$  et  $V_A$ .**

**Le potentiel électrique en un point quelconque est le travail extérieur nécessaire pour déplacer une unité de charge positive, à vitesse constante, du point de potentiel nul jusqu'au point considéré.**

**2- Relation entre le potentiel électrique et le champ électrique** : on sait que le travail est donné par  $W = \vec{F} \cdot \vec{r} = \int dW = \int \vec{F} \cdot d\vec{r}$ , et que la force électrique une force conservative donc  $W = -\Delta U = q \int \vec{E} \cdot d\vec{r}$ .

Par conséquent on a :

$$V_B - V_A = - \int \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (1.10)$$

Cette équation est indépendante du trajet suivi, et dépend seulement de point de départ et d'arrivée.

**Si nous avons un champ électrique uniforme on aura:  $V_B - V_A = -E \cdot d$**

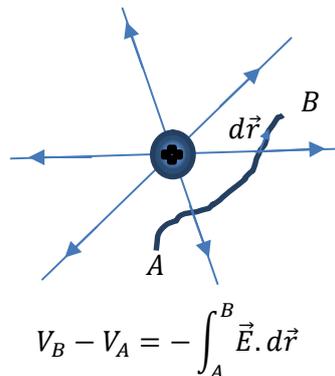


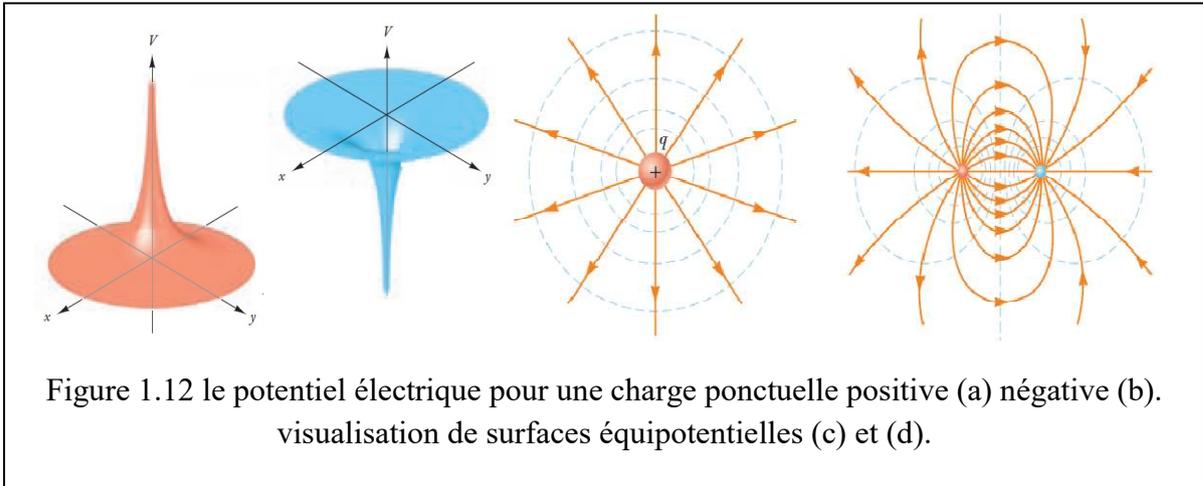
Figure 1.12 Movement d'une particule dans un champ électrique avec une vitesse constante.

1.6.2 Le potentiel et l'énergie potentielle de charges ponctuelles

On veut calculer le potentiel électrique pour une charge ponctuelle, en utilisant l'équation (1.10) on a:

$$V_B - V_A = - \int \vec{E} \cdot d\vec{r} = - \int E_r \cdot dr = - \int k \frac{Q}{r^2} \cdot dr = kQ \left( \frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right) = \frac{kQ}{r_B} - \frac{kQ}{r_A} = V_B - V_A.$$

Si nous choisissons le potentiel électrique  $V_A=0$  lorsque  $r \rightarrow \infty$  (le point se trouve à l'infini) on aura :  $V = \frac{kQ}{r}$ .



Le potentiel à une distance  $r$  d'une charge  $Q$  est  $V = k \frac{Q}{r}$ , et le potentiel d'un système de charges ponctuelles  $V_T = \sum k \frac{Q_i}{r_i}$  c'est une somme algébrique (les signes des charges sont tenues en compte).

**L'énergie potentielle d charges ponctuelles:** si une charge ponctuelle  $q$  se trouve en un point où le potentiel est constant. L'énergie potentielle électrique correspond à l'interaction de cette charge avec les charge qui ont créés cette potentiel  $V$ , c.-à-d.  $U = qV$ .

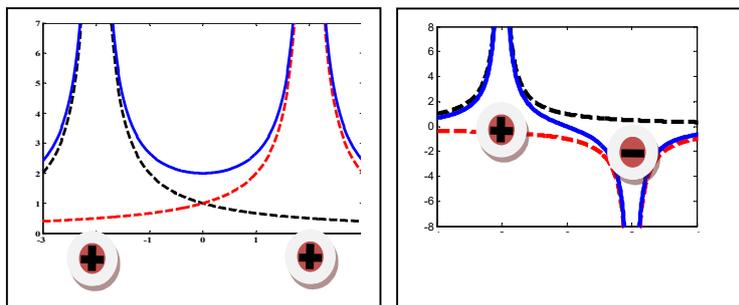


Figure 1.12 : le potentiel total de deux charges électriques  $V$ . on voit que  $V$  est nul entre deux charges de signes opposés.

**Questions:**

1-Si  $\vec{E} = 2x\vec{i} - 3y^2\vec{j}$ , déterminer la différence de potentiel entre  $\vec{r}_a = \vec{i} - 2\vec{j}$  et  $\vec{r}_b = 2\vec{i} + \vec{j} + 3\vec{k}$  (Reps. 6,0V).

2-Sachant qu'un électron part du repos dans un champ électrique uniforme, quelle est la différence de potentiel nécessaire pour lui faire acquérir les vitesses suivantes: 340m/c, 11,2km/h, 0,2c. (Reps .  $3,310^{-7}V$  ;  $3,5710^{-4}V$  ;  $1,2010^4V$  ).

3-Les point A et B sont distants de 10cm et  $\vec{E} = 600\vec{i} N/C$  ,  
déterminer  $V_B - V_A$ . Quelle la variation d'énergie potentielle si  
une charge de  $q = -6\mu C$  est déplacée de A à B (Fig.q.1)?



**1.7 L'énergie potentielle d'un système de particule**

Imaginons une charge  $q$  dans un **champ électrique (potentiel électrique)** produit par une autre charge  $Q$ , l'**énergie potentielle** est l'interaction entre la charge  $q$  et ce potentiel crée par la charge  $Q$ :

$$U = qV (V = kQ/r) \tag{1.11}$$

Par conséquent, l'**énergie potentielle du système** des charges  $q$  et  $Q$  séparées par une distance  $r$  est :  $U = kqQ/r$  ( $U = 0$  pour  $r = \infty$ ).

On peut dire que : l'**énergie potentielle du système formé par deux charges** est le **travail extérieur** qu'il faut faire pour amener ces charges de l'infini jusqu'à la distance  $r$  sans variation d'énergie cinétique.

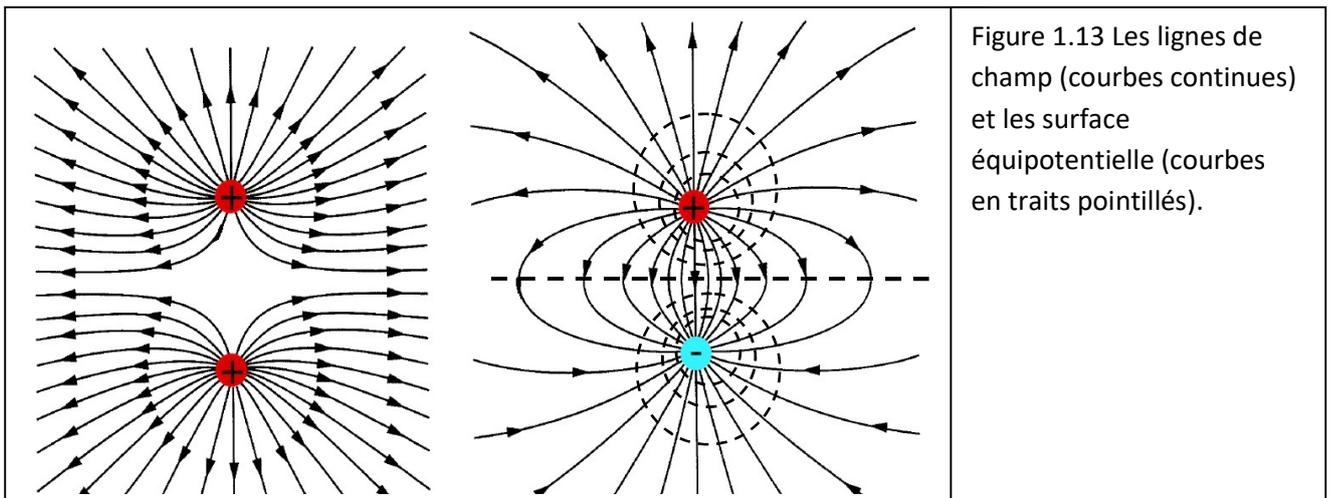


Figure 1.13 Les lignes de champ (courbes continues) et les surface équipotentielle (courbes en traits pointillés).

Pour N particules chargées, l'**énergie potentielle** totale est donnée par :  $U_T = \sum_{i < j} U_{ij} = \sum_{i < j} \frac{kq_i q_j}{r_{ij}}$  ;  $r_{ij}$  est la distance entre la charge  $q_i$  et la charge  $q_j$ . exemple pour 4 particules chargées

## Chapitre I : Electrostatique

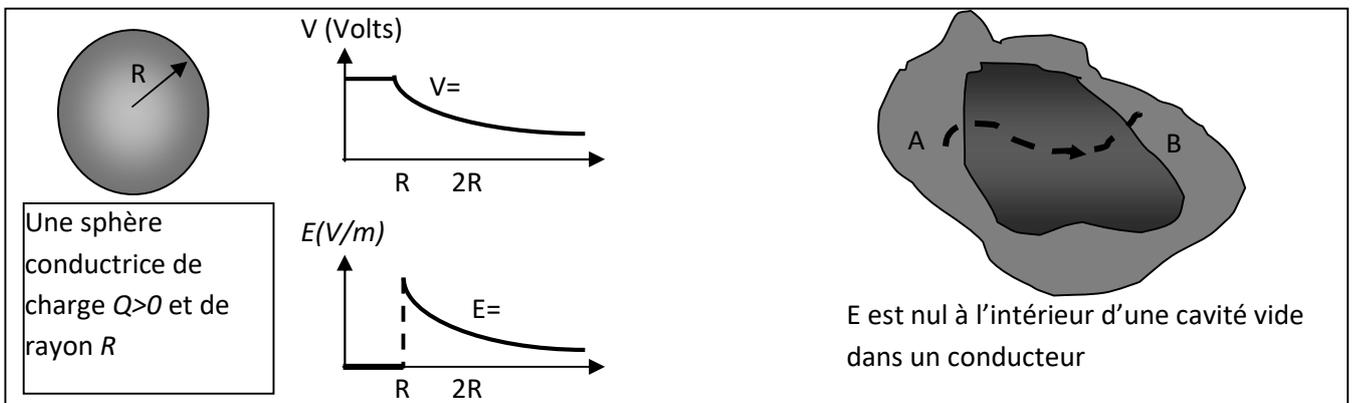
l'énergie potentielle est :  $U_T = U_{12} + U_{13} + U_{14} + U_{23} + U_{24} + U_{34} = \frac{kq_1q_2}{r_{12}} + \frac{kq_1q_3}{r_{13}} + \frac{kq_1q_4}{r_{14}} + \frac{kq_2q_3}{r_{23}} + \frac{kq_2q_4}{r_{24}} + \frac{kq_3q_4}{r_{34}}$ . (AN :  $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = 2\mu\text{C}$ ,  $r_{12} = r_{23} = r_{34} = r_{14} = 1\text{m}$ ,  $r_{13} = r_{24} = \sqrt{2}\text{m}$ ,  $U_T = 0,19\text{J}$ ).

### 1.8 Le potentiel d'un conducteur

On sait qu'à l'intérieur d'un conducteur en **équilibre électrostatique** le champ électrique est nul ( $\vec{E} = 0$ ). La différence de potentiel entre deux points A et B dans un conducteur est :

$$V_B - V_A = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

est nulle (car  $\vec{E} = 0$ ), y compris à la surface. Cela nous ramène à dire que : **Tous les points à l'intérieur et sur la surface d'un conducteur en équilibre électrostatique sont au même potentiel.**



**Nous avons vu que se passe-t-il si on plonge une sphère conductrice dans un champ électrique uniforme. Mais quelle est la nouvelle configuration des surfaces équipotentielle ?**

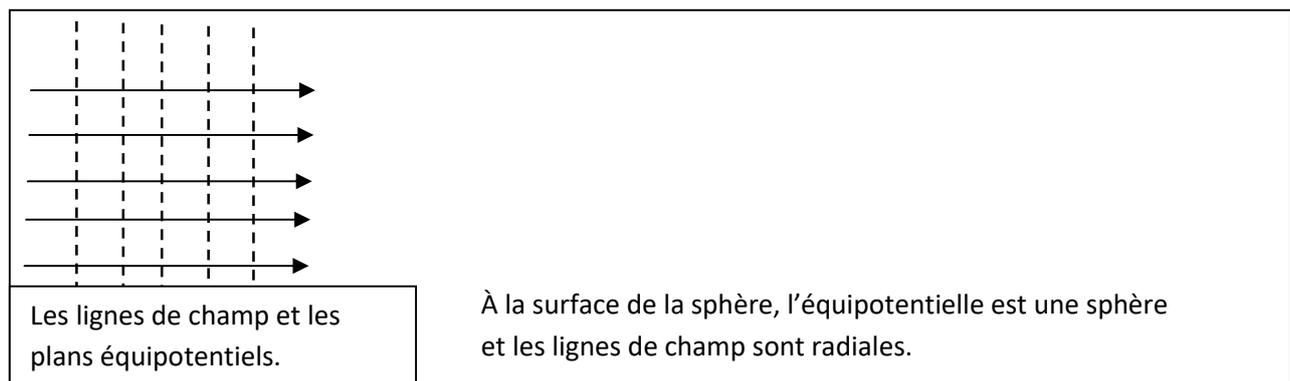
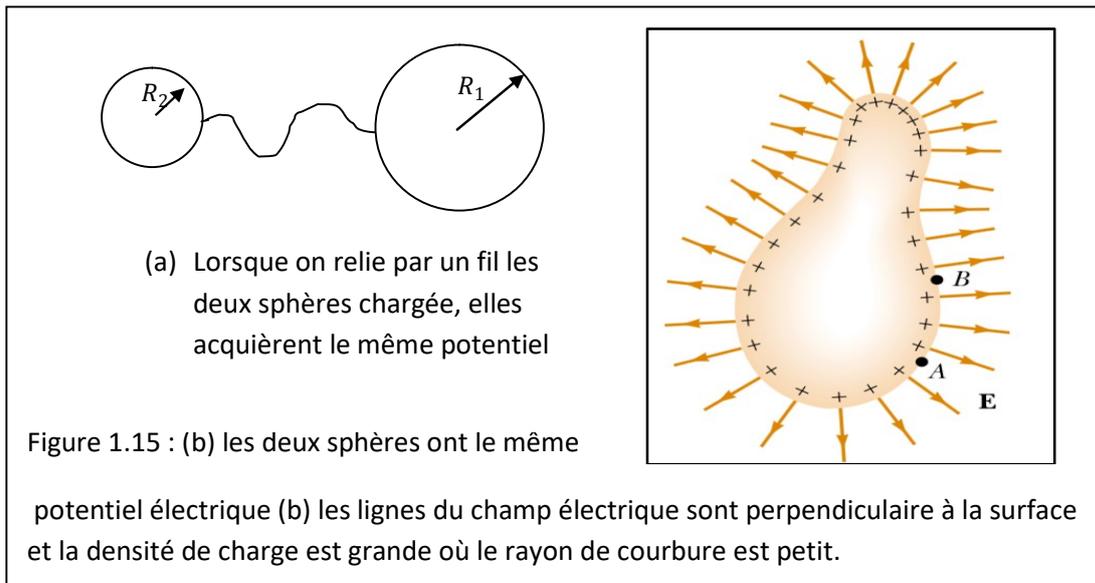


Figure 1.14 : à remplir dans le cours.

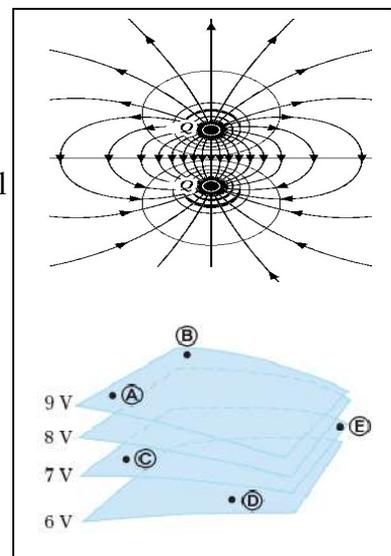
Si nous avons 2 sphères chargées de rayons  $R_1$  et  $R_2$  (Fig.1.15) sont reliées par un fil conducteur. Puisque elles forment un conducteur unique, la charge va se déplacer d'une sphère à l'autre jusqu'à ce que leurs potentiels soient égaux ( $V_1 = V_2 \Rightarrow \frac{kQ_1}{R_1} = \frac{kQ_2}{R_2}$ ). Le fait que la charge se répartit sur la surface on a :  $Q = 2\pi R^2\sigma$  et par conséquent  $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{R_2}{R_1}$ .



Cette équation nous montre que la densité de charge surfacique  $\sigma \propto 1/R$  c-a-d que : **sur un conducteur de forme quelconque, la densité surfacique est grande aux endroits où le rayon de courbure est petit, par conséquent le champ électrique.**

**Questions :**

- 1- Les lignes de champ sont partout perpendiculaires aux surfaces équipotentiellles. Vrais ou faux ?
- 2- Le potentiel électrique à mi-chemin de deux charges de signes opposées est nul. Vrais ou faux ?
- 3- Démontrez que dans un conducteur chargé de forme quelconque le champ électrique est inversement proportionnel au rayon de courbure.
- 4- Pour quoi le potentiel électrique dans un conducteur électrique est constant ?
- 5- Selon la figure ci-contre, les charges sont de même signes ou de signes opposés ?
- 6- Une charge se déplace sur une surface équipotentielle, quel est le travail effectue par la force électrique?
- 7- Les surfaces équipotentiellles de 6, 7, 8 et 9Vots. Mettre en ordre croissant les points A, B, C, D, et E.



### 2.1 Le champ électrique et les conducteurs

Lorsque on place un **conducteur** dans un **champ électrique**  $\vec{E}$ , les électrons libres dans ce conducteur subissent une force dans le sens contraire de  $\vec{E}$ . Les électrons libres se déplacent vers le côté où pénètrent les **lignes de champ**, par conséquent ce côté acquiert une charge négative tandis que l'autre acquiert une charge positive. Cette séparation de charge à l'intérieur du conducteur produit un champ électrique intérieur  $\vec{E}_{int}$  de sens opposé à  $\vec{E}$ . On dit que le conducteur est en **Équilibre électrostatique**.

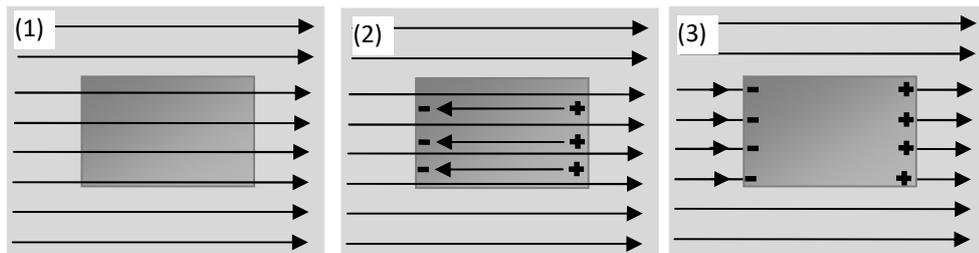


Figure 1.5 : comportement d'un conducteur dans un champ électrique.

**Équilibre électrostatique** implique que:

- (1) le champ électrique à l'intérieur d'un conducteur est nul. Ce qui signifie que sa distribution de charge ne change plus. La vitesse d'**équilibre électrostatique** est mesurée par le **temps de relaxation**.
- (2) À l'équilibre électrostatique, le champ électrique extérieur à proximité du conducteur est partout perpendiculaire ( $\perp$ ) à la surface du conducteur.

Les propriétés (1) et (2) s'appliquent toujours, et par conséquent, il ne peut y avoir une charge non nulle à l'intérieur du conducteur. Donc ce la nous conduit à la 3eme:

- (3) A l'**équilibre électrostatique**, la **charge excédentaire** d'un conducteur homogène se répartit sur sa surface.



Figure 2.1 : à remplir en cours.

## Chapitre II : Les conducteurs

Que se passe-t-il si on met une charge à l'intérieur d'un conducteur creux (Fig.2.1)? Le champ demeurera nul dans la cavité à moins que l'on place une charge non nulle  $Q$  dans la cavité. Si on place une charge  $Q$  à l'intérieur d'une cavité d'un conducteur, une charge  $-Q$  sera induite sur la surface de la cavité, et il aura une charge  $+Q$  sur la surface extérieure qui produira un champ électrique vers l'extérieur.

**Application : Cage de Faraday**, il s'agit d'une boîte métallique conductrice fermée et elle est utilisée pour protéger un appareil ou une expérience de l'effet des champs électriques qui excisent dans l'environnement.

### Questions

- 1- Quelles sont les trois propriétés d'un conducteur à l'équilibre électrostatique?
- 2- Expliquer comment fonctionne une cage de Faraday?

### 2.2 Pression électrostatique

La **charge électrique** portée par un élément de surface d'un conducteur chargé à l'**équilibre électrostatique** étant soumise à un champ électrique, elle (charge) subit une force électrostatique. Un **élément de surface** a une charge  $\sigma dS$  et le champ électrique produit par cette charge est égale à:  $\vec{E} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \vec{n}$  ( $\vec{n}$  vecteur normale sur la surface  $dS$ ). Par conséquent la force appliquée sur l'élément de surface  $dS$  est donnée par :

$$d\vec{F} = \sigma dS \vec{E} = \frac{\sigma^2}{2\epsilon_0} dS \vec{n} \quad (2.1)$$

Cette force est toujours orientée vers l'extérieur.

La **pression électrostatique** est donnée par :

$$p = \frac{dF}{dS} = \frac{\sigma^2}{2\epsilon_0} \quad (2.2)$$

### 2.3 Capacité d'un conducteur

On sait que la différence de potentiel produit par une sphère chargée est égal à :  $\Delta V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 R} Q$ .

C.-à-d. la quantité de  $Q$  emmagasinée dans la sphère est proportionnelle à  $\Delta V$ . la constante de proportionnalité  $C = 4\pi\epsilon_0 R$  est appelée la **capacité** du conducteur et il dépend seulement de la **géométrie du conducteur** ( $R$  dans ce



Figure 2.2 : un conducteur sphérique

## Chapitre II : Les conducteurs

cas). L'unité de capacité est  $[C]=\text{Coulomb/Volts}$  ou bien le Farad ( $1\text{Farad}= 1\text{Coulomb}/1\text{volt}$ ).

Donc la capacité d'un conducteur est une mesure de la charge et de l'énergie électrique qu'un conducteur est capable d'emmagasiner.

Exemple : la terre c'est un conducteur sphérique avec  $R=6,4 \cdot 10^6\text{m}$ , a une capacité de  $C=4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \left(\frac{\text{F}}{\text{m}}\right) 6,4 \cdot 10^6\text{m} = 7,1 \cdot 10^{-4}\text{F}$ .

### 2.4 Les condensateurs

#### a) Le condensateur plan :

Pour deux conducteurs plans (armatures) en parallèles, séparées par une distance  $d$  (remplie d'air) nous savons que le champ électrique entre ces deux plans est donnée par :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 S},$$

avec  $\sigma$  est la densité surfacique et  $S$  la surface des armatures.

Sachant que  $\Delta V = -Ed = \frac{Q}{\epsilon_0 S} d \Rightarrow C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ . Encore une fois la **capacité** dépend seulement de la géométrie des conducteurs  $S$  et  $d$ .

On peut supposer que le **champ électrique** est uniforme entre les **armatures** d'un **condensateur** si la distance  $d$  est petite par rapport aux dimensions des armatures.

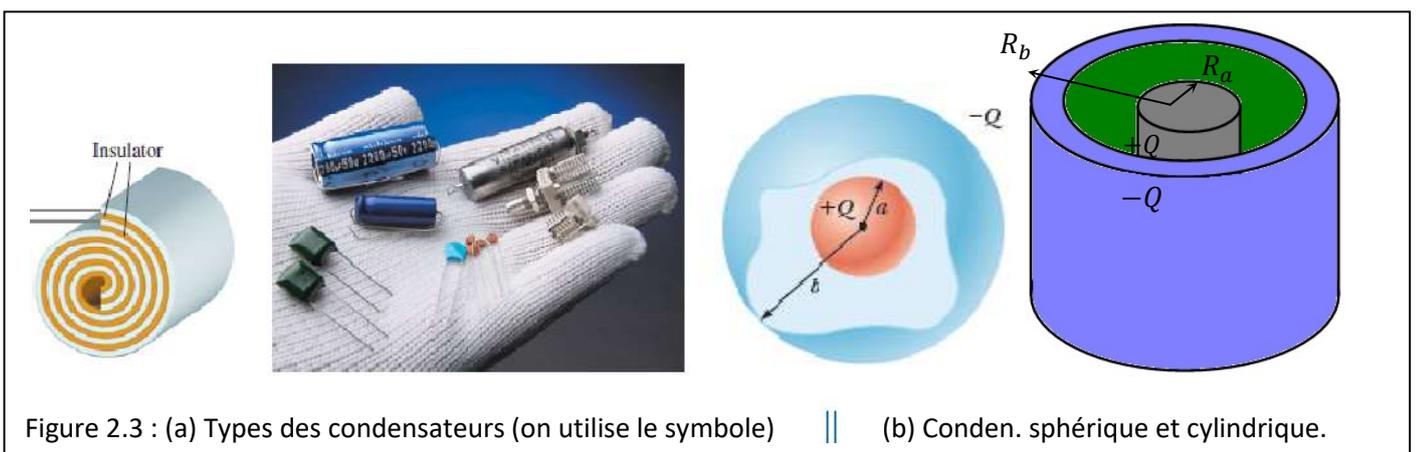
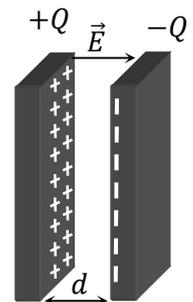
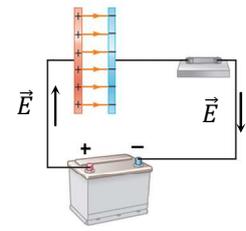


Figure 2.3 : (a) Types des condensateurs (on utilise le symbole) || (b) Conden. sphérique et cylindrique.

## Chapitre II : Les conducteurs

Que ce passe-t-il si on relie un condensateur à une pile (batterie) ? Ces deux armatures seront chargées et un champ électrique uniforme  $\vec{E}$  se produit entre ces armatures. L'armature négative prend des électrons de fil, et l'armature positive donne des électrons au fil. Le champ entre les armatures est uniforme et la différence de potentielle entre ces armatures devient :  $\Delta V = E \cdot d$



### b) Les associations des condensateurs en série et en parallèle

Les figures Fig.2.4 et Fig.2.5 montrent une pile reliée à deux condensateurs en série et en parallèle respectivement.

Pour les deux condensateurs en série on a :

$$\begin{aligned} \Delta V &= \Delta V_1 + \Delta V_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} \\ &= Q \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) = \frac{Q}{C_{\text{eq}}} \\ \Leftrightarrow \frac{1}{C_{\text{eq}}} &= \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \end{aligned}$$

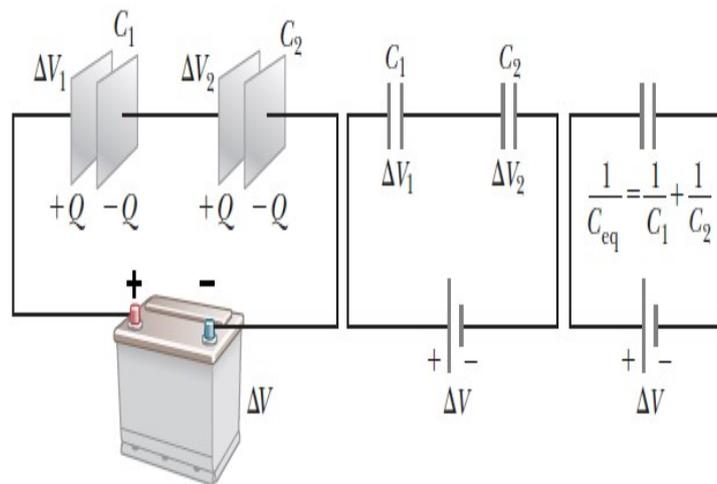


Figure 2.4 : une batterie reliée à deux condensateurs en série.

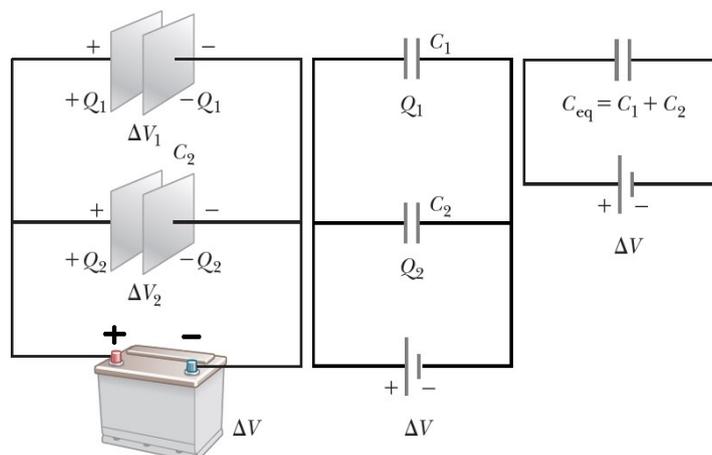


Figure 2.5 : une batterie reliée à deux condensateurs en parallèle.

## Chapitre II : Les conducteurs

Et pour deux condensateurs en parallèle on a :

$$\Delta V = \Delta V_1 = \Delta V_2 = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{Q_T}{C_{\acute{e}q}} \quad (\text{vue que les deux condensateurs sont en parallèles})$$

$$\text{Et } Q_T = Q_1 + Q_2 = C_1 \Delta V_1 + C_2 \Delta V_2 = C_{\acute{e}q} \Delta V$$

$$\Rightarrow C_{\acute{e}q} = C_1 + C_2$$

### Questions :

- 1) D'où vient la pression électrostatique dans un conducteur chargé? démontrer que elle est égale à :  $p = \frac{dF}{dS} = \frac{\sigma^2}{2\epsilon_0}$ .
- 2) Si on veut augmenter l'énergie emmagasinée, on utilise les condensateurs en série ou bien en parallèle ?
- 3) Pour quelles raisons on ne peut pas avoir un condensateur avec une capacité très grande ?
- 4) Démontrer que la capacité d'un condensateur plan est donnée par  $C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$ , expliquer physiquement cette relation.
- 5) Pour quoi dans le cas de deux condensateurs en série on a :  $Q_T = Q_1 = Q_2$ , et en parallèle on a :  $Q_T = Q_1 + Q_2$  ?
- 6) Que ce passe-t-il si on relie un condensateur à une pile ?

### 2.5 Energie emmagasinée dans un condensateur

L'énergie emmagasinée dans un condensateur est égale au travail fourni (par une pile ou une batterie) pour charger ce condensateur. Si on suppose que à l'instant  $t_1$  la différence de potentiel entre les armatures soit  $\frac{\Delta V}{q}$ . Le travail nécessaire pour faire passer une charge infinitésimale  $dq$  de l'armature négative à l'armature positive est  $dW = \left(\frac{q}{C}\right) dq$ . Par conséquent le **travail total fourni** est :

$$W = \int_0^Q \left(\frac{q}{C}\right) dq = Q^2/2C$$

Ce **travail est emmagasiné** sous forme **énergie potentielle électrique**  $U = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} Q \Delta V = \frac{1}{2} C \Delta V^2$ .

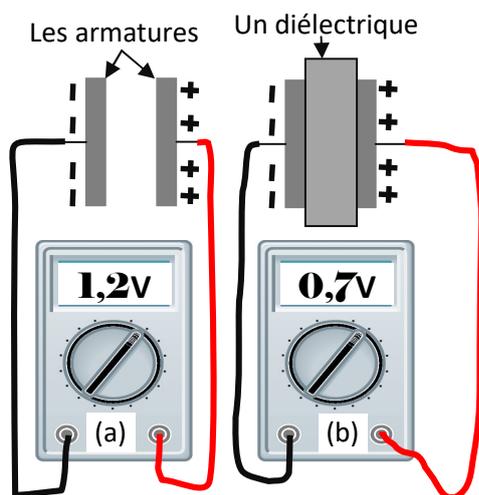


Figure 2.6 : Pour une **crise cardiaque** on utilise un **défibrillateur** de cœur pour **réanimer** le cœur. Le **condensateur du défibrillateur** se **décharge** dans un temps assez bref dans le corps.

Dans le cas où nous avons deux armatures planes (condensateur plan), séparées par une distance  $d$ , on trouve que l'énergie potentielle du condensateur plan est  $U = \frac{1}{2} \left( \frac{\epsilon_0 A}{d} \right) (Ed)^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 (Ad) [J]$ . Ce qu'implique que la densité d'énergie potentielle est  $u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \left[ \frac{J}{m^3} \right]$ .

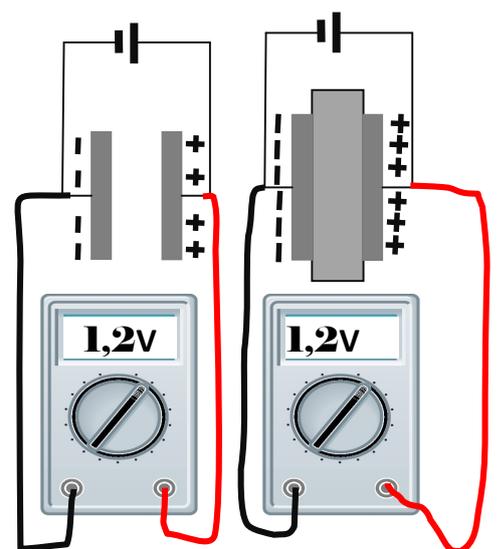
### 2.6 Les diélectriques

Que ce passe-t-il si on introduit entre les armatures d'un condensateur un **matériau non conducteur** tel que du verre, du papier, ou du plastique? **Faraday** fut le premier à observer que la capacité augmente et donna le nom **diélectrique** à ces matériaux. Les figures Fig.2.7 et Fig.2.8 résument deux expériences afin de montrer l'utilité des matériaux diélectriques dans la fabrication des condensateurs.



(a) Un condensateur avec une charge  $Q_0$  et un champ électrique  $E_0 (\Delta V_0, C_0 = Q_0 / \Delta V_0)$ . (b) on insert un diélectrique, on constate que:  $C_D = \frac{Q_0}{\Delta V_D} = \kappa C_0$  (augmente), la charge  $Q_0$  ne change pas (constante), la différence de potentiel devient  $\Delta V_D = \Delta V_0 / \kappa$ , par conséquent  $\Delta V_D < \Delta V_0$  (diminue) et le champ électrique à l'intérieur dans ce diélectrique  $E_D = \frac{\Delta V_D}{d} = \frac{\Delta V_0}{\kappa d} = E_0 / \kappa$  (diminue).  
Figure 2.7 : expérience 1.

(a) Un condensateur avec une charge  $Q_0$  et un champ électrique  $E_0 (\Delta V_0, C_0 = Q_0 / \Delta V_0)$ . (b) on insert un diélectrique, et on garde la différence de potentiel  $\Delta V_0$  constante. On constate que: la charge sur les armatures augmente  $Q_D = \kappa Q_0$  et par conséquent (le fait que  $\Delta V_0 = \text{constante}$ )  $C_D = \kappa \frac{Q_0}{\Delta V_0} = \kappa C_0$  (augmente).  
Figure 2.8 : expérience 2.



Matériau	Constance diélectrique ( $\kappa$ )	Rigidité diélectrique $10^6 \text{V/m}$
Air	1,00	3
Papier	3,7	16
Verre	4-6	9
Paraffine	2,3	11
caoutchouc	2 - 3,5	30

Tableau 2.1 : Propriétés des diélectriques : constante diélectrique  $\kappa$  et rigidité diélectrique.

L'insertion d'un **diélectrique** entre les armatures d'un condensateur va augmenter sa capacité par un facteur  $\kappa$  ce qu'on appelle **la constante diélectrique**. Chaque **matériau diélectrique** a sa propre valeur (voir **tableau 2.1**). Une autre caractéristique d'un diélectrique c'est la **rigidité électrique** qui correspond au module maximal du champ électrique pouvant être appliqué sur ce matériau. Si on applique un champ dont le module est supérieur à sa rigidité électrique on aura un claquage (décharge entre les armatures), et par conséquent une détérioration du matériau.

**Description atomique des diélectriques :**

Les dipôles dans un diélectrique (Fig.2.9) subissent un moment de forces qui a tendance à les aligner parallèlement aux lignes de champ. **Ce qui produit un champ électrique à l'intérieur de diélectrique (champ induit  $\vec{E}_{ind}$ ).** Le champ électrique devient  $\vec{E}_D = \vec{E}_0 - \vec{E}_{ind} = \vec{E}_0/\kappa$

Dans ce cas on aura une séparation nette des charges sur les deux surfaces du diélectrique (Fig.2.9).

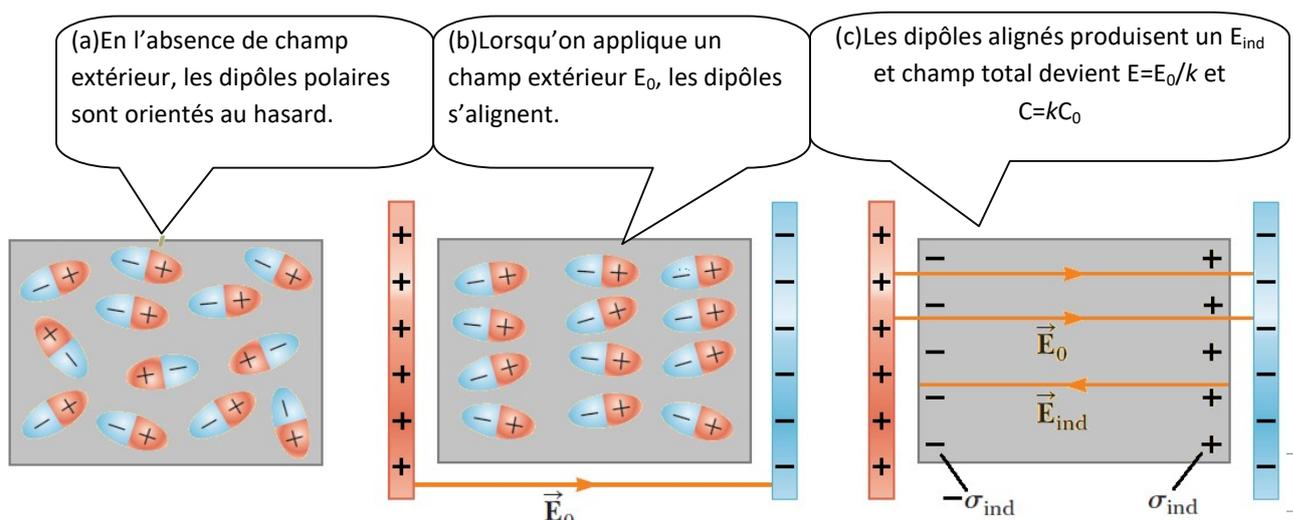


Figure 2.9 : description atomique d'un diélectrique sous un champ électrique.

### Questions:

1-Insérer un diélectrique entre deux plaques chargées et sans pile, va ..... le champ, ..... la différence de potentiel et ..... la capacité. (diminuer, augmenter, accroît, décroît, maintenir, changer).

2-Insérer un diélectrique entre deux plaques chargées et reliées à une pile, va ..... le champ, ..... la différence de potentiel et ..... la capacité. (diminuer, augmenter, accroît, décroît, maintenir, changer).

3-Démontrer que l'énergie potentielle emmagasinée dans un condensateur est donnée par :  $U = \frac{Q^2}{2C}$ .

4-Quelles sont les caractéristiques d'un diélectrique selon ce cours ? En déduire les caractéristiques d'un condensateur.

5- Que se passe-t-il à l'échelle atomique lorsque on insère un diélectrique entre les armatures d'un condensateur?

6-Peut-on construire un condensateur avec une capacité très grande pour emmagasiner une grande énergie ?

### 3.1 Conducteur électrique

Jusqu'à maintenant nous avons traité les problèmes liés aux charges en repos, dans ce qui suit nous traitons les effets liés aux charges en mouvement. Comment le **courant électrique** (les électrons) circule dans un fil ou des ions dans un liquide ?

Jusqu'à 1800 nous ne disposait pas de **source à courant continue**. C'est après les travaux de **Luigi Galvani** (1737-1798, pour l'électricité d'animale) et **Alessandro Volta** (1745-1827, pour la pile voltaïque) qu'on a commencé à étudier les **propriétés électriques** des matériaux et le **courant électrique  $I$** .

#### 3.1.1 L'intensité moyenne du courant électrique :

On peut définir l'intensité moyenne du courant comme une quantité de charge  $\Delta Q$  qui traverse une surface pendant l'intervalle de temps  $\Delta t$ :

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Si dans un **fil conducteur** le **flux de charge** n'est pas constant, l'intensité instantanée du courant électrique est donnée par :  $I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt}$ .

L'unité **SI** de courant c'est l'**ampère (A)**,  $1A = 1C/s$ . Le **sens conventionnel du courant** est celui des **charges positives**.

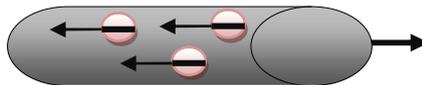


Figure 3.1 Le courant est défini comme le débit avec lequel la charge traverse une surface.

#### 3.1.2 La nature du courant électrique :

Les métaux sont caractérisés par la présence d'**électrons libres** (au moins un électron par atome), qui assurent la **conduction électrique**. Dans l'absence d'une différence de potentiel ( $\Delta V = 0 \Rightarrow E = 0$ ) entre un métal les **électrons libres** ont des **déplacements aléatoires** dans toutes les directions, et par conséquent le déplacement moyen est nul.

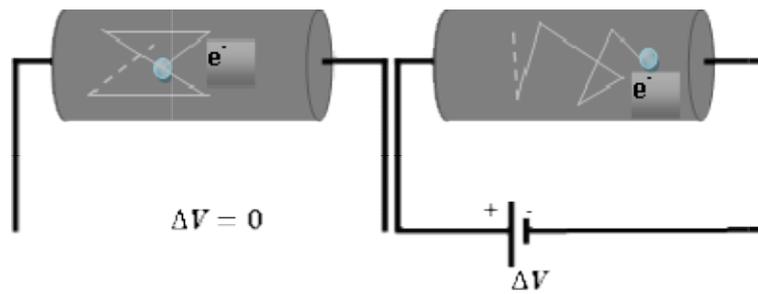


Figure 3.3 : l'effet de différence de potentiel sur la trajectoire des électrons.

Dans la présence d'une différence de potentiel non nulle ( $\Delta V \neq 0 \Rightarrow E \neq 0$ ), les électrons ont un déplacement moyen non nul sur le métal et ils acquièrent une **vitesse de dérive**  $v_d$  très faible ( $v_d \approx 10^{-4} m/s$ ). Cette **vitesse de dérive** se superpose à la **vitesse thermique aléatoire des électrons** ( $\approx 330 m/s$ ).

### 3.1.3 Relation entre le courant électrique et la vitesse de dérive :

Sachant que les électrons de charges  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} C$  se déplacent avec une **vitesse de dérive**  $\vec{v}_d$  le long d'un fil. On suppose que on a  $N$  électrons libres par unité de volume, la charge totale dans un cylindre de longueur  $L$  et section  $A$ , est :  $\Delta Q = N \cdot (L \cdot A) \cdot e$ . Cette charge traverse la longueur  $L$  dans un intervalle du temps  $\Delta t = L/v_d$ .

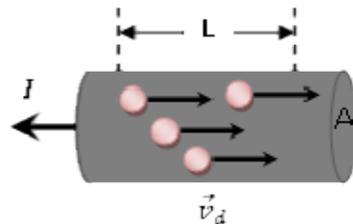


Figure 3.3 courant de dérive dans un conducteur

L'intensité du courant est  $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = N A e v_d$ .

**Exemple :** un fil de cuivre ( $N=8,43 \cdot 10^{28}$  atomes/ $m^3$ , on suppose un électron libre par atome) transporte un courant de 10A avec  $A=0,05 cm^2$ , on peut estimer la vitesse de dérive

$$v_d = \frac{I}{N A e} = 1,48 \cdot 10^{-4} m/s \approx 0,15 mm/s !$$

On peut aussi définir la **densité de courant** :  $J = \frac{I}{A}$ ,  $\vec{J} = -n e \vec{v}_d$  (la densité du courant est une grandeur vectorielle).

Si la densité de courant n'est pas uniforme on utilisera l'équation suivante :

$$I = \int \vec{J} \cdot d\vec{A}$$

**3.1.4 La résistance d'un conducteur** : en 1729, **Stephen Gray** fit la distinction entre les **isolants** et les **conducteurs** mais sans avoir une méthode pour faire une distinction entre les différents conducteurs. Les premières classifications des conducteurs faites par **Henry Cavendish** (1772).

Si un courant  $I$  circule dans un conducteur après l'application d'une **différence de potentiel**  $\Delta V$  entre ces deux bornes ; la **résistance électrique** de ce conducteur est donnée par  $R = \Delta V / I$ . L'unité SI de la résistance est l'ohm ( $\Omega$ ). Cette équation ne représente pas la **loi d'Ohm** sauf si  $R$  est constante (une **relation linéaire** entre la **différence de potentiel** et l'intensité du courant qui circule dans la résistance).

Matériau	Résistivité $\rho$ ( $\Omega.m$ )	Coefficient thermique de résistivité $\alpha$ ( $^{\circ}C^{-1}$ )
Verre	$10^{12} - 10^{13}$	$-70 \cdot 10^{-3}$
Silicium	2200	-0,7
Acier	$40 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-4}$
Platine	$11 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
Aluminium	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
Cuivre	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$

Tableau 3.1

La **résistance** est une caractéristique qui dépend du **matériau** et de ces propriétés géométriques  $R = \rho L / A$ .  $L$  c'est la longueur de matériau,  $A$  la section et  $\rho$  [ $\Omega.m$ ] est une constante de proportionnalité qu'on appelle **résistivité** et dépend du matériau. Chaque matériau a sa propre résistivité (voir le tableau 3.1). On définit aussi la **conductivité**  $\sigma = 1/\rho$ . Un bon conducteur a une **conductivité** élevée et une résistivité faible.

### Questions :

1-Dessinez un circuit simple comprenant une pile et un fil reliant la borne positive à la borne négative en présentant le sens du courant le sens du déplacement des électrons.

2-Vrai ou faux ? Dans un fil conducteur, les électrons circulent du potentiel le plus élevé vers le potentiel le moins élevé.

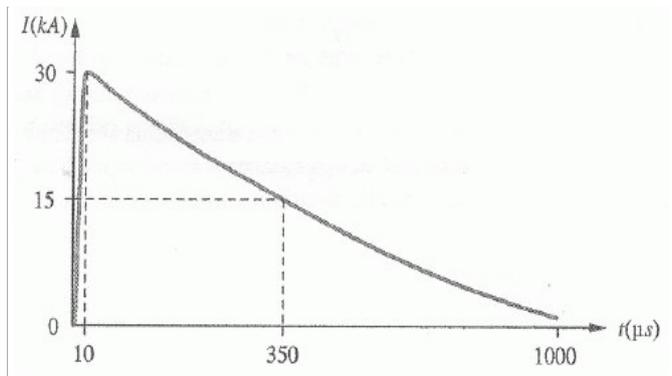
3-Expliquez comment on déduit que la résistance d'un conducteur donné est directement proportionnelle à sa longueur ?

4-Vrai ou faux ? Les électrons d'un fil sous une différence de potentiel voyage avec la vitesse de la lumière de la borne négative à la borne positive.

5-Combien des électrons passent par un point donné d'un fil parcouru par un courant de  $1A$  pendant 1min, 1h, 24h ?

6-Dans quelle condition un matériau conducteur obéit-il à la loi d'Ohm ?

7- On a réalisé l'enregistrement de  $I(t)$  d'une décharge d'un coup de foudre, à l'aide de la courbe du courant estimer la charge totale transportée par l'éclair. Quelle est l'intensité du courant moyenne ? (Rép :  $Q=15C, I_{moy}=15kA$ )



### 3.2 Théorie microscopique de la conduction

La relation entre le **champ électrique** appliqué et la **densité du courant** est donnée par :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.1)$$

Cette relation (Eq.3.1) est appelée forme microscopique de **loi d'Ohm** (à condition que  $\rho$  soit constante, indépendante de  $J$  ou  $E$ ) et est valable pour tous les **conducteurs** y compris pour les **électrolytes** et les gaz ionisés.

#### 3.2.1 La variation de la résistivité en fonction de la température :

La **résistivité**  $\rho$  d'un **métal** en fonction de la **température** est donnée par :

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

avec  $\alpha$  est le **coefficient thermique de résistivité**, mesuré en  $^{\circ}C^{-1}$ . Par conséquent la **résistance** d'un **métal** devient :

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

Dans un **métal** pur et parfait (sans défauts et sans impuretés) sa **résistance** électrique est le résultat des **collisions** entre les électrons libres qui circulent et les ions de réseaux cristallin de

## Chapitre III : Electrocinétique

ce métal. Si la **température augmente**, les ions commencent à vibrer autour de leurs positions d'équilibre ce que trouble encore les électrons libres, et par conséquent augmente la résistance du métal. La **résistance due aux défauts et impuretés est indépendante de la température**.

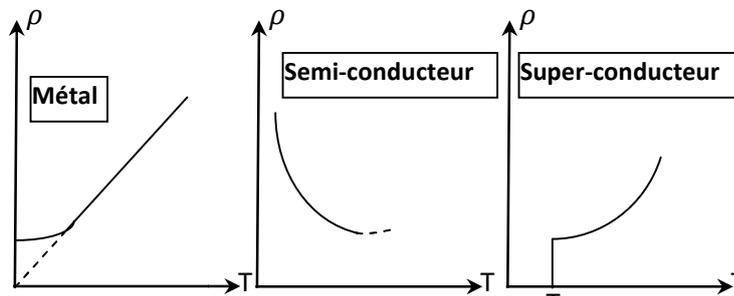


Figure 3.4 : L'effet de température sur la résistivité électrique.

**NB : Il reste à vous de savoir le cas de semi-conducteur et super-conducteur.**

### 3.2.2 La théorie microscopique de la conduction :

Cette **théorie** fut proposée en 1900 après la découverte de l'électron. Dans l'absence de champ électrique extérieur, les vitesses thermiques des électrons sont orientées dans toutes les directions, de sorte que, vectoriellement, leurs vitesses moyennes soient nulles. En présence d'une différence de potentiel  $\Delta V$  ( $\vec{E} \neq 0$ ), les électrons auront une accélération  $\vec{a} = -e\vec{E}/m_e$  et la vitesse des électrons devient :  $\vec{v}_d = \vec{a} \cdot \Delta t = -\frac{e\vec{E}}{m_e} \Delta t$ .

Les **trajectoires des électrons** dans l'absence de **champ électrique** entre les **collisions** sont des lignes droites, par contre dans la présence d'un champ électrique leurs **trajectoires** sont **paraboliques**.

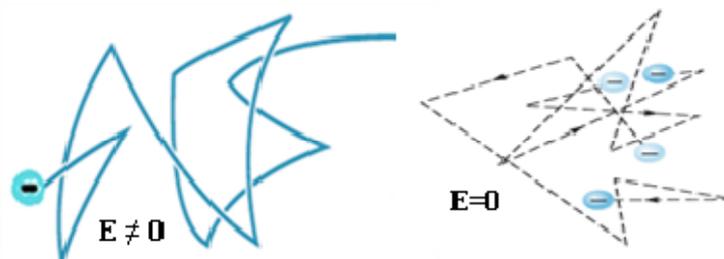


Figure 3.5 : la trajectoire des électrons parabolique (rectiligne) pour  $E \neq 0$  ( $E = 0$ )

Les temps écoulés entre des collisions sont variables au cours de temps, on peut, donc, définir une valeur moyenne  $\tau$ , on l'appelé **temps moyen entre collisions**. La vitesse de dérive

## Chapitre III : Electrocinétique

devient  $\vec{v}_d = -\frac{e\vec{E}}{m_e}\tau$ . La constante  $\tau$  est une propriété du matériau. On peut aussi trouver la relation entre cette constante  $\tau$  et  $\rho$  (résistivité) qui sont deux constantes du matériau :  $\rho = \frac{m}{ne^2\tau}$ .

**Exemple :** pour le cuivre on a :  $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ ,  $N = 8,5 \cdot 10^{28} m^{-3}$ , on trouve  $\tau = 2,46 \cdot 10^{-14} s$ , si la vitesse thermique c'est d'ordre  $10^5 m/s$ , le parcours moyen entre deux collisions (libre parcours moyen)  $\lambda = (10^5 \frac{m}{s})(2,46 \cdot 10^{-14}) = 25 \cdot 10^{-10} m$ .

### 3.3 La puissance électrique dissipée et la loi de Joule

Lorsque une quantité de charges  $\Delta q$  franchit une différence de potentiel fixe  $\Delta V$ , son énergie potentiel varie de  $\Delta U = q\Delta V$ . Le taux d'énergie électrique transmise (cédée, donnée) par le champ électrique à la charge est la puissance fournie :

$$P = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta q}{\Delta t}\right) \Delta V = I \Delta V.$$

Les électrons, dans un milieu résistif, convertissent leur énergie électrique en énergie thermique. D'après la relation  $\Delta V = RI$ , la puissance électrique dissipée peut être également s'écrire :  $P = RI^2 = \frac{\Delta V^2}{R}$ . **James Joule (1818-1889)** à été le premier à démontrer que la puissance électrique dissipée dans une résistance est proportionnelle au carré du courant qui la traverse.

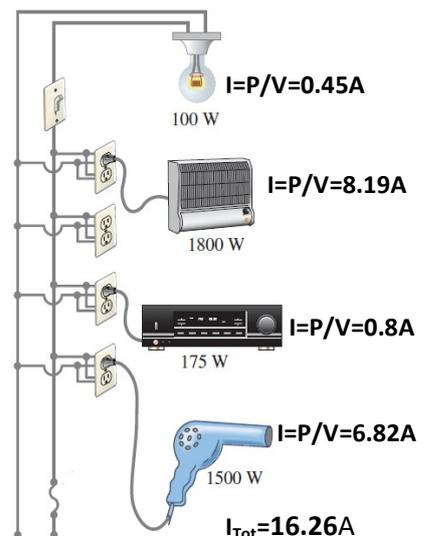
**NB :** La puissance s'exprime en J/s ou Watt(W), les appareils électronique et électrique ne consomment pas la même puissance (voir Figure). 1 W c'est une quantité trop petite, on utilise KW (1000 J/s) et Kilowattheure (KWh) c'est l'énergie consommée pendant une heure par un appareil de 1000W.

**Exemple :** Ampoule de 100 W (100 J/s), chauffage 1800 (1800 J/s), Radio 178W (178 J/s), et séchoir 1500 W (1500 J/s) pendant un mois (30jours) :

La puissance d'une jour :  $P_{\text{jour}} = (100+1800+175+1500) \cdot 3600 \cdot 24 = 3,09 \cdot 10^{+8} W$

La puissance Total:  $P_{\text{Tot}} = P_{\text{jour}} \cdot 30 \text{jours} = 3,09 \cdot 10^{+8} \cdot 30 = 9,27 \cdot 10^{+9} W = 9,27 \cdot 10^{+9} W$

La puissance Total:  $P_{\text{Tot}} \text{ (KWh)} = 9,27 \cdot 10^{+9} W / 1000 / 3600 = 2574 KWh$



### Chapitre III : Electrocinétique

Le fait que les appareils électriques et électroniques sont placés en parallèles, la résistance électrique totale pour ce cas est :  $\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_{ampule}} + \frac{1}{R_{chauffage}} + \frac{1}{R_{radio}} + \frac{1}{R_{séchoir}} = (0,45A + 8,19A + 0,8A + 6.82A)/220V$

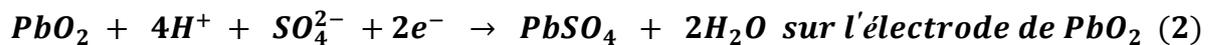
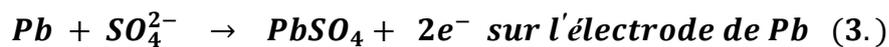
#### Questions :

- 1- Démontrer que  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$  sachant que  $I = NAev_d$  et  $\vec{a} = -\frac{e\vec{E}}{m_e}$ .
- 2- Chaque métal à une résistivité propre, qui donne naissance à une résistance électrique, d'où vient cette résistance ? quel est son origine ?
- 3- La trajectoire d'un électron dans un métal en présence d'un champ électrique (une différence de potentiel entre les bornes du métal) est parabolique pour quoi ?
- 4- Vrai ou Faux ? la vitesse de dérive d'un électron dans un métal soumis à une différence de potentiel est d'ordre  $10^5$  m/s.
- 5- Pour quoi les appareils électriques et électroniques ne consomment pas la même quantité de puissance ?

Quelles sont les propriétés des conducteurs électriques étudiés dans ce cours ? (Rép : temps moyen entre collisions et résistivité ( $\tau$  et  $\rho$ )).

#### 3.4 Les batteries

Dans une cellule **plomb-acide**, une **électrode** de plomb (Pb) et une **électrode** d'oxyde de plomb (PbO<sub>2</sub>) sont immergées, dans une solution aqueuse d'**acide sulfurique** (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) qui se dissocie en ions hydrogène positifs (H<sup>+</sup>) et en **ions sulfate négatifs** (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Lorsqu'on relie les bornes par un fil, les réactions suivantes ont lieu:



Les deux **électrons** libérés dans l'équation (1) quittent le plomb et pénètrent dans le fil et deux autres électrons quittent le fil pour pénétrer dans la borne positive pour assurer l'équation (2). Donc, il y a un transfert continu de l'**électrode Pb** à l'**électrode PbO<sub>2</sub>**. La différence de potentiel produite entre les deux bornes est 2,05V. Une **batterie de voiture** contient six cellules en série pour assurer une tension de 12V. La **différence de potentiel** entre les bornes d'une batterie diminue parce que sa **concentration en acide** diminue.

Un rechargement de batterie va remettre l'acide en solution (les réactions chimiques inverses qui éliminent le **PbSO<sub>4</sub>** et remettent les ions **SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>** et **H<sup>+</sup>** dans la solution).

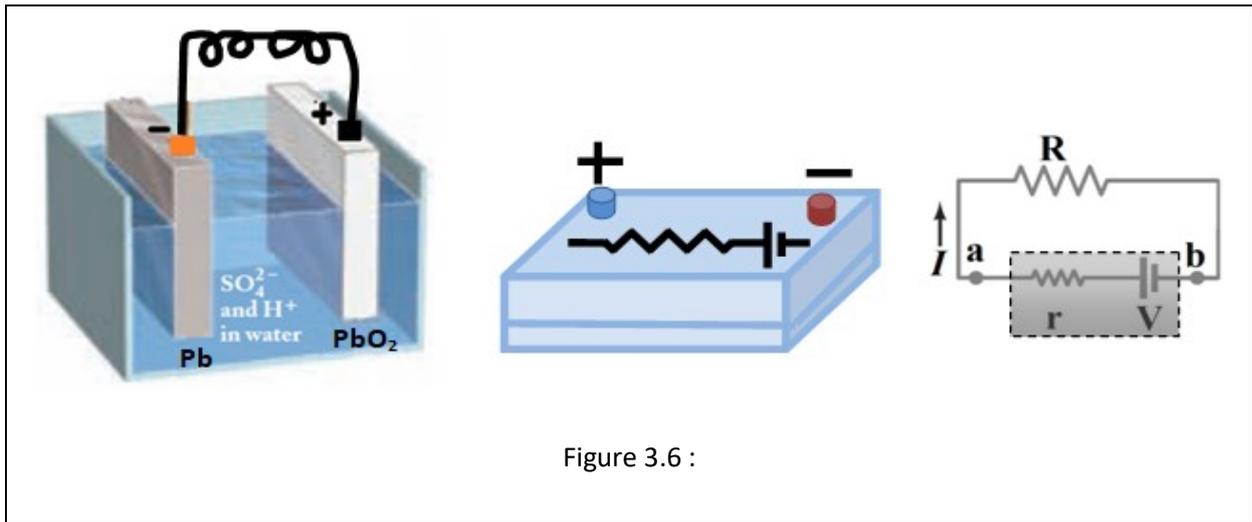


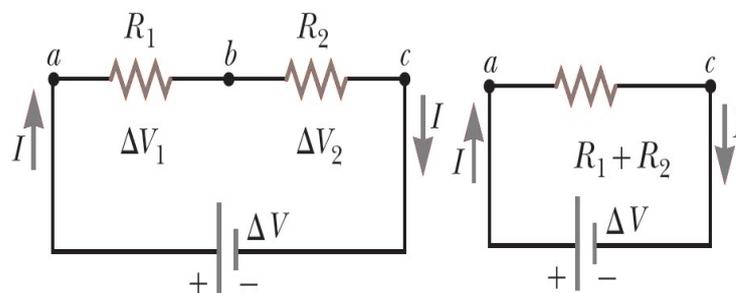
Figure 3.6 :

### 3.4.1 Modèle d'une pile :

La pile (ou une batterie) est modélisée par une **source idéale** de **f.é.m** (force électromotrice) de potentiel  $V$  et une résistance  $r$  en série de faible valeur (inferieur à  $1\Omega$ ). La différence de potentiel entre les bornes d'une pile ou batterie réelle dans la quelle circule un courant  $I$  est donnée par :  $\Delta V = V - rI$ . La valeur de **f.é.m** et la résistance  $r$  d'une pile peuvent être mesurées : On mesure la différence de potentiel entre les bornes de la pile pour deux résistances de valeurs différentes. Exemple : pour  $R=1\Omega$  et  $R=2\Omega$ , on trouve  $\Delta V=6V$  et  $8V$  respectivement. On a deux équations à deux inconnues et on trouve que  $V=12V$  et  $r=1$ .

### 3.5 Les résistances en série et en parallèle

La différence de potentiel aux bornes de l'ensemble ( $R_1$  et  $R_2$  en série) est la somme des différences de potentiel individuelles :  $\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 = (R_1 + R_2)I = R_{\text{éq}}I$  (**cette équation montre que la même quantité de charge traverse les deux résistances**). Pour N résistance en série la résistance équivalente est donnée par :  $R_{\text{éq}} = R_1 + R_1 + \dots + R_N$ . **La résistance équivalente pour N résistances associées en série est la somme des résistances.**



Pour deux rés : Figure 3.7 Une pile reliée à deux résistances en série. i point a en  $I_1$  et  $I_2$  tel que  $I = I_1 + I_2$  (la quantité de charge se divise en deux  $Q = Q_1 + Q_2$ ). Pour calculer la

### Chapitre III : Electrocinétique

résistance équivalente on utilise la loi d'Ohm  $\Delta V = RI$ . On a :  $I = \frac{\Delta V_1}{R_1} + \frac{\Delta V_2}{R_2}$  et  $R_{\text{éq}} = \frac{\Delta V}{I} \Rightarrow \frac{1}{R_{\text{éq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ . Si on généralise ce raisonnement à N résistance en parallèle, on obtient :

$$\frac{1}{R_{\text{éq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

Cette relation nous montre que la valeur de la résistance équivalente est toujours inférieure à la plus petite des résistances.

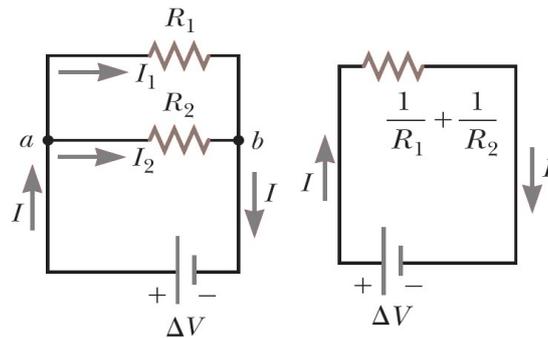


Figure 3.8 : une pile reliée avec deux résistances en parallèle.

#### 3.6 Les instruments de mesure

Pour les circuits à courant continu on s'intéresse à trois instruments de mesure :

**(a) L'ampèremètre** : pour mesurer le courant en un point du circuit, le courant qu'on veut mesurer doit traverser l'ampèremètre, donc doit être branché en série. L'ampèremètre doit avoir **une résistance interne très faible**. Le signe positif correspond à la borne de l'appareil où se trouve le potentiel le plus élevé.

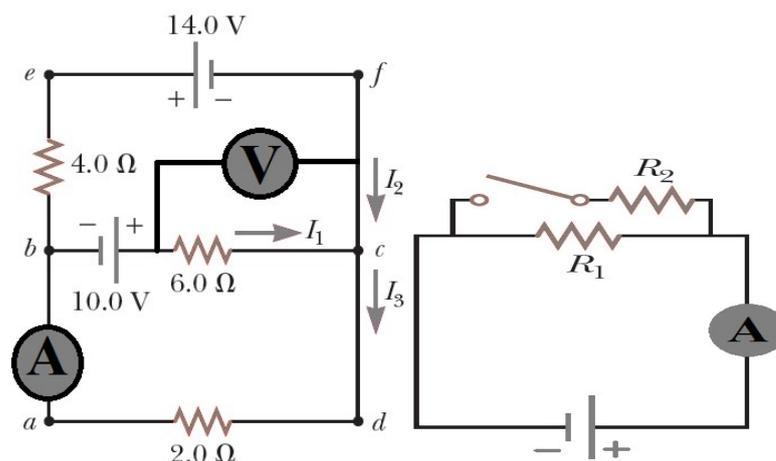


Figure 3.9 : Un ampèremètre en série et un voltmètre en parallèle.

## Chapitre III : Electrocinétique

(b) Le **voltmètre** : sert à mesurer la différence de potentiel entre deux points dans un circuit en parallèle, et sa **résistance interne** doit être très grande (pour limiter les effets de sa présence). Le signe positif correspond à la borne de l'appareil où se trouve le potentiel le plus élevé.

(c) L'**ohmmètre** : c'est un appareil actif, il contient une pile interne. Il envoie du courant dans le circuit pour mesurer une résistance entre deux points. Si on veut mesurer la valeur d'une résistance dans un circuit il faut la débrancher de circuit.

### Questions :

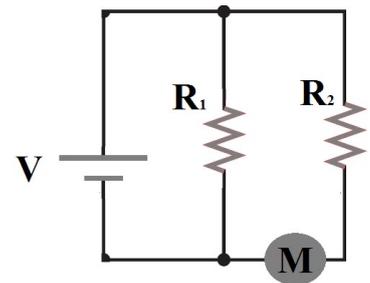
1-Vrai ou faux ? Dans un circuit simple constitué d'une pile et une résistance, le courant est plus élevé avant le passage dans la résistance et faible après le passage de la résistance.

2-Décrivez le fonctionnement d'une cellule plomb-acide munie d'une électrode de plomb et d'une autre de dioxyde de plomb( $PbO_2$ ) plongées dans une solution aqueuse d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ).

3-Soit deux résistances en série. Vrai ou faux ? (a) le courant dans chacune des résistances est toujours le même, (b) la différence de potentiel aux bornes de chacune des résistances est toujours la même.

4- Soit deux résistances en parallèle. Vrai ou faux ?(a) le courant dans chacune des résistances est toujours le même, (b) la différence de potentiel aux bornes de chacune des résistances est toujours la même.

5- D'après l'endroit où le multimètre M est placé, (a) est-il en mode ampèremètre, voltmètre ou ohmmètre ?(b) quelle est la valeur indiquée dans ce cas par ce multimètre si  $V=12V$ ,  $R_1=1k\Omega$ ,  $R_2=2k\Omega$ ?



### 3.7 Lois de Kirchhoff

Un circuit électrique contient au moins une pile et des composants électriques comme par exemple : des résistances et condensateurs. Un courant généré par la pile va traverser les composants électriques constituant ce circuit électrique. Pour savoir les courants qui traversent chaque composant électrique on utilise les **lois de Kirchhoff**: les **lois des nœuds** et **lois des mailles**.

a) **Loi des nœuds** : la somme algébrique des courants qui entrent dans un nœud et des courants qui en sortent est nulle, donc :  $\sum I_{entrée} = \sum I_{sortie}$  ou bien  $\sum I = 0$ . La loi des nœuds traduit la **conservation de la charge** (la charge n'est ni créée ni détruite, et elle ne s'accumule pas en ce point).

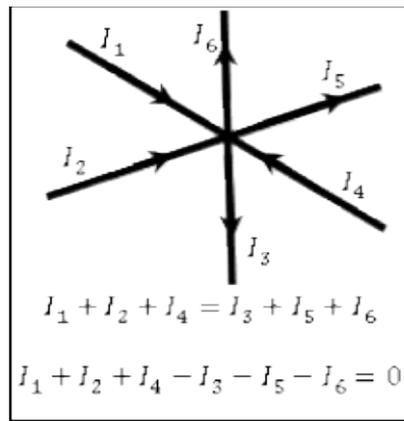


Figure 3.10 : loi des nœuds.

**b) Lois des mailles :** une maille est un parcours fermé dans un circuit. Un circuit peut contenir plusieurs mailles. Dans une maille quelconque **la somme des variations de potentiel le long d'une maille fermée est nulle. Cette loi découle de la conservation d'énergie électrique.**

**3.8 Analyse d'un circuit électrique**

(a) on suppose le potentiel à borne négative de la pile est nulle, (b) on suppose aussi que les fils n'ont pas de résistance. (1) On commence par le point **d** où la charge n'a pas d'énergie potentielle ( $V_d=0$ ) après le passage dans la pile la charge augmente l'énergie potentiel de la charge et le potentiel devient au point **e** :  $V_e=12V$ .

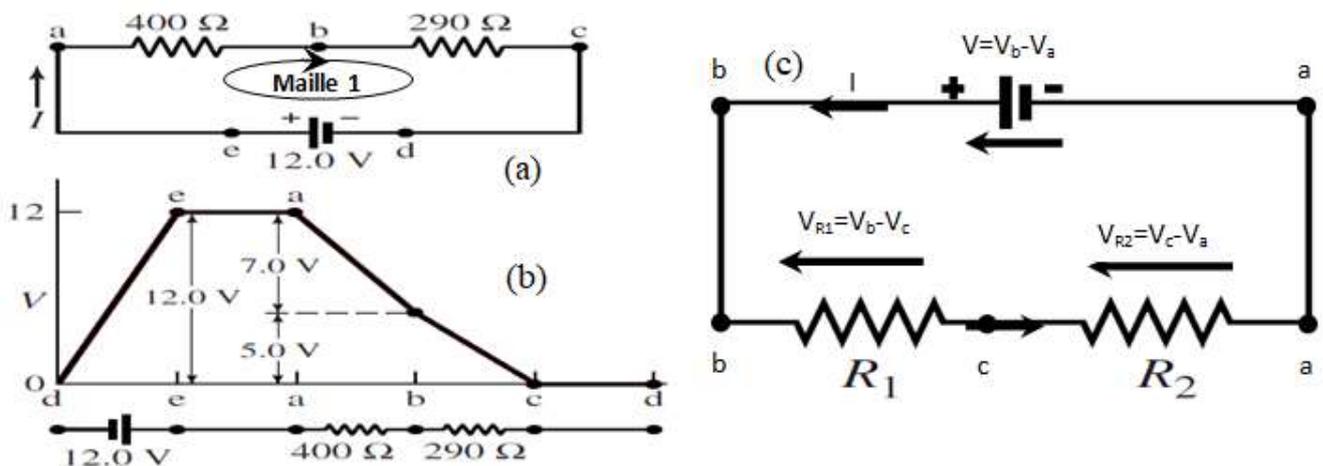


Figure 3.11 circuit électriques

(2) entre les points **e** et **a** on n'a pas de pertes d'énergie potentielle et la charge se déplace librement donc  $V_e=V_a$ . (3) au point **a** la charge rencontre une résistance  $R=400\Omega$  et perd progressivement du potentiel (ainsi que l'énergie potentielle) jusqu'au point **b** où elle rencontre de nouveau une résistance de  $290\Omega$  et continue à perd le reste de son énergie potentielle progressivement jusqu'au

### Chapitre III : Electrocinétique

point c. (4) entre le point c et d on n'a pas de résistance et la charge se déplace librement pour recommencer le tour ( $V_c=V_d=0$ ). L'énergie potentielle perdue est convertie en énergie thermique par **effet Joule** ( $P=(400\Omega+290\Omega)I^2$  Joule).

**Pour l'analyse de circuit on va adopter une méthode dans ce cours comme suit:** Dans ce circuit simple on a une maille avec deux résistances. La différence de potentielle V de la pile augmente de la **borne positive** à la **borne négative** (voir la direction de la flèche). Mais pour les résistances le potentiel augmente dans le sens contraire au courant électrique.

La loi des mailles :  $V_b-V_a=V_b-V_a+V_c-V_c=(V_b-V_c)+(V_c-V_a)=V_{R1}+V_{R2}=IR_1+IR_2$

**AN :**  $R_1=200\Omega$ ,  $R_2=100\Omega$ ,  $V=12V$ , on trouve le courant  $I=V/(R_1+R_2)=12V/300\Omega=60mA$ . On peut estimer la puissance consommée par les deux résistances  $P=(200\Omega+100\Omega)(0,06)^2=18W$ .

#### Exemple 1:

Dans cet exemple, on veut savoir les intensités du courant  $I_1, I_2, I_3$  qui circulent dans les deux mailles. On applique la **loi des nœuds** au a on trouve que  $I_3 = I_1 + I_2$ , en effet l'intensité du courant  $I_3$  se divise en deux courants  $I_2$  et  $I_3$ .

On suppose que  $R_1=30\Omega$ ,  $R_2=20\Omega$ ,  $R_3=40\Omega$ .

On a dans ce circuit deux mailles :

**Maille (I) :**  $+V_1 - r I_3 - R_3 I_3 - R_1 I_1 = 0$ . (Eq.1)

**Maille (II) :**  $+V_2 - r I_2 - R_2 I_2 + V_1 - r I_3 - R_3 I_3 = 0$  (Eq.2)

Nous avons deux équations à deux inconnues  $I_1$  et  $I_2$ .

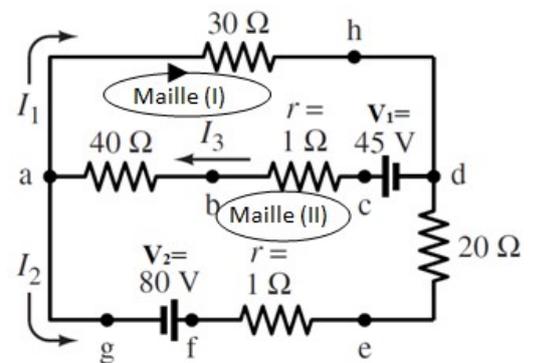


Figure 1.12

De l'Eq.1 on a :  $V_1 - (r + R_3)I_2 - (r + R_3 + R_1) I_1 = 0 \Leftrightarrow +41 I_2 + 71I_1 = 45$

De l'Eq.2 on a :  $+V_2 + V_1 - (2r + R_2 + R_3)I_2 - (r + R_3)I_1 = 0 \Leftrightarrow +62I_2 + 41I_1 = 125$

On trouve  $I_1 = -0,86A$  et  $I_2 = 2,6A$

Le signe négatif pour  $I_1$  signifie que notre choix de sens pour  $I_1$  était mauvais, le courant dans  $R_1$  est vers la gauche. La puissance totale dissipée dans les résistances est  $P_{Résistances} = 30*(0,86)^2 + 41*(2,6-0,86)^2 + 21*(2,6)^2 = 287W$ . Le courant  $I_3 = 2,6 - 0,86 = 1,74A$  qui traverse la pile  $V_1 = 45$ , pour une puissance  $P = I_3 V_1 = 78,3$ . Le courant  $I_2 = 2,6A$  qui traverse la pile  $V_2 = 80$ , pour une puissance  $P = 208W$ . On voit que la puissance totale fournie par les deux piles est  $208 + 78,3 = 286,3Watt$ . Mais elle doit être égale à la puissance consommée par les résistances.

## Chapitre III : Electrocinétique

**Exemple 2 (Pont de wheatstone) :** ce pont électrique sert à mesurer les résistances ( $R_x$ ) avec précision. Il contient trois résistances  $R_1, R_2, R_s$  et un galvanomètre  $G$  qui sert à mesurer le courant  $I_3$ . Donc,  $R_1$  et  $R_2$  sont fixes et on fait varier  $R_s$  jusqu'à ce que le galvanomètre enregistre un courant nul ( $I_3$ ). On dit que le pont est équilibré et les points A et B sont au même potentiel ( $V_A$  et  $V_B$ ). On a  $V_A = V_B \Rightarrow V_{R1} = V_{R_s}$  et  $V_{R_x} = V_{R2} \Rightarrow R_1 I_1 = R_s I_2$  et  $R_2 I_1 = R_x I_2 \Rightarrow R_x = \frac{R_2}{R_1} R_s$ .

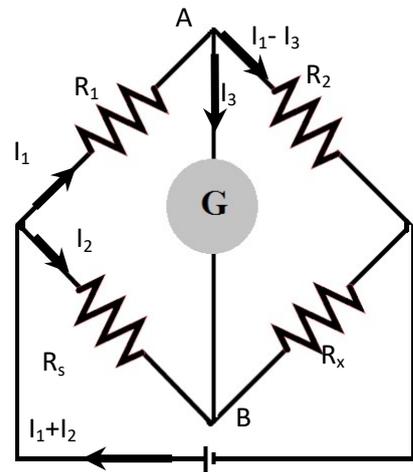
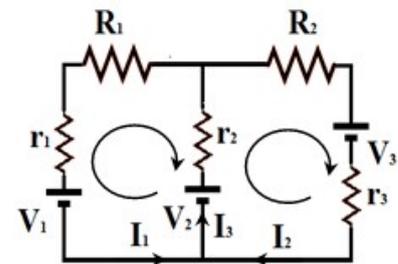
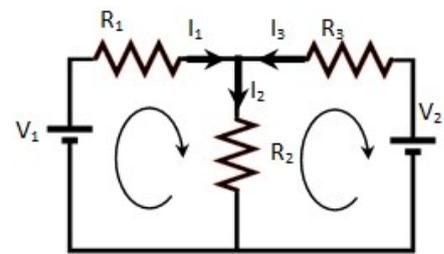


Figure 1.13 Pont de Wheatstone

### Questions :

- 1-A quoi sert un pont de Wheatstone ?
- 2-Vrai ou faux ? Pour savoir la puissance totale fournie par les piles dans un circuit électrique on doit toujours sommer les puissances chaque une des piles ?
- 3-Vrai ou faux ? Dans un circuit électrique la charge perde d'énergie cinétique ? L'énergie potentielle ?
- 4-Dans le circuit illustré ci-contre  $V_1=17V$ ,  $V_2=6V$ ,  $R_1=1\Omega$ ,  $R_2=4\Omega$ ,  $R_3=3\Omega$ . (a) Montrer que  $I_2=3A$ ,  $I_1=5A$  et  $I_3=-2A$ . (b) vérifier la puissance fournie par les piles est bien transformée en chaleur dans les résistances.
- 5-Dans le circuit illustré ci-contre  $r_1= r_2=2\Omega$ ,  $r_3=1\Omega$ ,  $R_1=4\Omega$ ,  $R_2=3\Omega$ ,  $V_1=15V$ ,  $V_2=6V$ ,  $V_3=4V$  (a) Montrer que  $I_1=1,85A$ ,  $I_3=0,12A$  et  $I_2=1,97A$ . (b) montrer que  $V_B-V_A=-3,88V$ .



**3.9 Circuits de charge et de décharge d'un condensateur**

a) **La charge d'un condensateur** : comment la charge électrique dans un condensateur varie lorsqu'une résistance est placée en série dans un circuit électrique ? A  $t = 0$  au moment où l'interrupteur est fermé ( $Q(t = 0) = 0 \Rightarrow \Delta V_C = 0$ ), le courant est maximal  $I(t = 0) = I_0 = V/R$ . Si on applique la loi des mailles au circuit (dans le sens horaire):

$$V - \frac{Q(t)}{C} - RI(t) = 0 \quad (3.10).$$

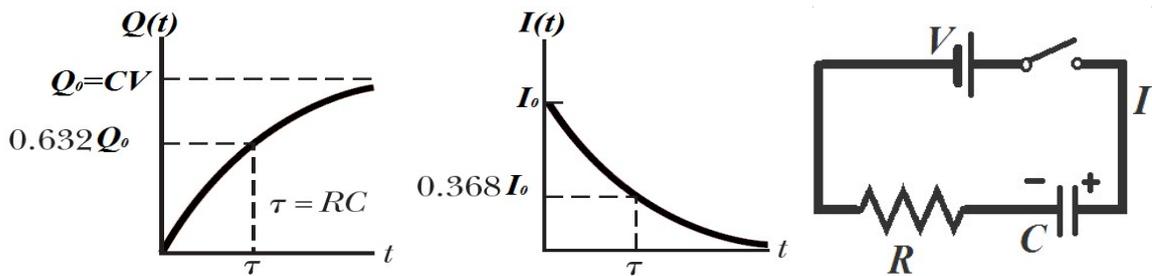


Figure 3.14 : la variation de charge électrique dans le condensateur.

La somme des différences de potentiel aux bornes du condensateur et de la résistance est toujours constante:  $\Delta V_C + \Delta V_R = V$ . Au fur et à mesure que la charge emmagasinée augmente dans le condensateur, la différence de potentiel entre ces bornes augmente ( $\Delta V_C \nearrow$ ), ce que veut dire que la différence de potentiel aux bornes de  $R$  ( $\Delta V_R \searrow$ ) doit diminuer. Lorsque la charge de condensateur atteint une valeur maximale  $Q_0 = CV$  ( $\Delta V_C = V$ ) le courant cesse de circuler et on trouve  $\Delta V_R = 0$ .

L'équation (3.10) peut être écrite sous la forme :

$$CV - Q - CR \frac{dQ}{dt} = 0 \Leftrightarrow Q_0 - Q = CR \frac{dQ}{dt}$$

$$\Leftrightarrow \int \frac{dQ}{Q_0 - Q} = \frac{1}{RC} \int dt \Leftrightarrow -\ln(Q_0 - Q) = \frac{t}{RC} + B$$

A l'instant  $t = 0, Q = 0$ , donc  $B = -\ln(CV)$  et l'équation  $\ln\left(\frac{CV - Q}{CV}\right) = -\frac{t}{RC}$

D'où :  $Q(t) = Q_0(1 - e^{-t/RC})$  et  $\Delta V_C(t) = V(1 - e^{-t/RC})$ .

Pour  $t = RC = \tau$  (constante de temps) la charge monte de zéro à  $Q(t = \tau) = Q_0(1 - e^{-1}) = 0.63Q_0$  c'est-à-dire à 63% de sa valeur maximale, dans cas on peut trouver **la demi-vie**  $T_{1/2}$  qui correspond au temps met par la charge pour atteindre la moitié de sa charge maximale dans la condensateur:  $Q(t) = \frac{Q_0}{2} \Leftrightarrow T_{1/2} = RC \ln(2) = \tau \ln(2)$ .

L'énergie emmagasinée dans un condensateur à chaque instant est  $U(t) = \frac{Q(t)^2}{2C} J$ , et la puissance dissipée dans la résistance est  $P(t) = RI(t)^2$  à  $t = \tau$  on a  $P(\tau) = R(0,368I_0)^2$ .

L'énergie totale fournie par la pile quand le condensateur est totalement chargé ( $t \rightarrow \infty$ ) est  $Q_0V = CV^2$ . La pile fait passer une quantité de charge  $Q_0$  d'une armature à l'autre et lui fait traverser une différence de potentiel  $V$ , l'énergie totale fournie par la pile est  $Q_0V = CV^2$ . On voit que l'énergie totale  $U = U_R + U_C$ .

#### 2- La décharge du condensateur :

Soit un circuit dont un condensateur en parallèle avec une résistance et une pile idéale (sans résistance interne) de f.é.m.  $V$ . Si l'interrupteur est fermé la différence de potentiel aux borne de C et de R est égale à  $C$ . Dans ce cas la charge du condensateur est  $Q_0 = CV$ . Si on ouvre l'interrupteur à  $t = 0$ , le condensateur commence à se décharger. Un courant circule d'une armature à l'autre à travers la résistance. On utilise la loi des mailles on trouve que:  $-V_R + V_C = 0 \Leftrightarrow \frac{Q}{C} - IR = 0 \Leftrightarrow \frac{Q}{RC} + \frac{dQ}{dt} = 0 \Leftrightarrow \int \frac{dQ}{Q} = -\frac{1}{RC} \int dt$ .

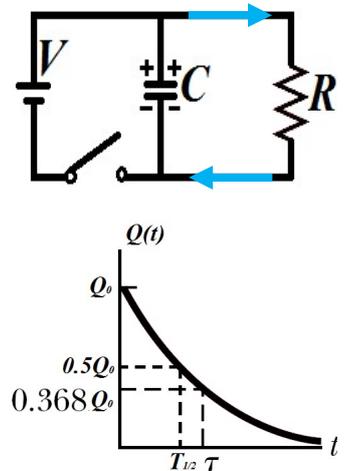


Figure 3.15

Après faire l'intégrale on trouve que la variation de la charge en fonction du temps dans le condensateur est :  $Q(t) = Q_0 e^{-t/RC}$ .

C'est une exponentielle décroissante, et de même manière on trouve que  $V_C(t) = \frac{Q(t)}{c} = \frac{Q_0}{c} e^{-t/\tau} = V_0 e^{-t/\tau}$ . La demi-vie  $T_{1/2} = RC \ln(2) = 0,693\tau$ .

Le courant électrique  $I(t) = -\frac{dQ(t)}{dt} = I_0 e^{-t/\tau}$ .

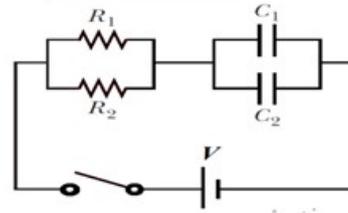
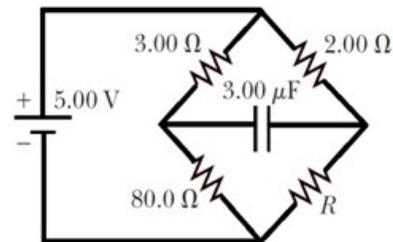
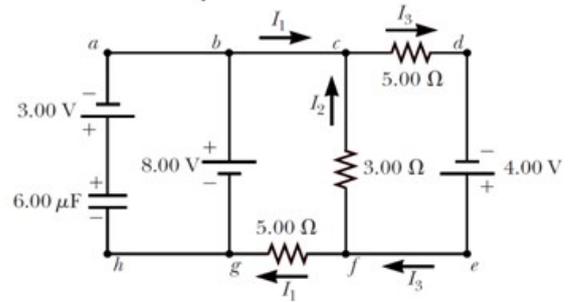
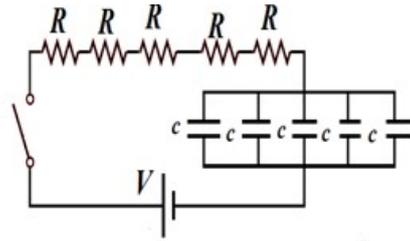
On constate que dans un circuit RC on a deux régimes : Un régime transitoire et régime stationnaire.

**a) Un régime transitoire : le courant qui traverse le condensateur est variable, la différence de potentiel entre les bornes d'un condensateur est variable.**

**b) Un régime stationnaire : le courant qui traverse le condensateur est nul.**

**Questions:**

- 1) La constante de temps du circuit est : a)  $RC$   
b)  $5RC$  c)  $10RC$ , d)  $25RC$  ?
- 2) Le circuit a été laissé pour long temps. Quelle est la valeur du courant  $I_3$ ?  $I_2$ ?  $I_1$ ?
- 3)  $R_1=2,00k\Omega$ ,  $R_2=3,00k\Omega$ ,  $C_1=2,00\mu F$ ,  $C_2=3,00\mu F$  et  $V=120V$ . Donner la charge en  $C_1$  et  $C_2$  en fonction du temps après que l'interrupteur est fermé on suppose que  $Q_{01}=Q_{02}=0$ . Quelle est la valeur de courant qui traverse  $R_1$  et  $R_2$  ?
- 4) (a) donner la valeur de charge en fonction de  $R$  lorsque  $t \rightarrow \infty$ ; (b) Évaluez la charge si  $R=10\Omega$ ; (c) la charge dans  $C$  peut être nulle ? Si oui quelle est la valeur de  $R$  ? (d) quelle la valeur maximale possible de la charge de condensateur ? (e) pour quelle valeur on peut obtenir le résultat de question (d) ?



### 4.1 Introduction

La première étude systématique des aimants fut réalisée en 1269 par Pierre Maricourt, qui se servit d'une aiguille magnétisée pour tracer les lignes de force autour d'une pierre sphérique. Sa conclusion était que les lignes convergeaient en deux régions de chaque côté de la sphérique et il appelait ces deux régions par pôles magnétique. William Gilbert (en 1600) proposait que la Terre soit un aimant gigantesque. De nos jours, les aimants sont utilisés dans les appareils de mesure, les moteurs, les haut-parleurs, les appareils d'enregistrements.....

### 4.2 Le champ magnétique

Au voisinage d'un barreau aimanté, la limaille de fer forme une forme qui montre l'influence de l'aimant sur le milieu environnant (Fig.4.1).

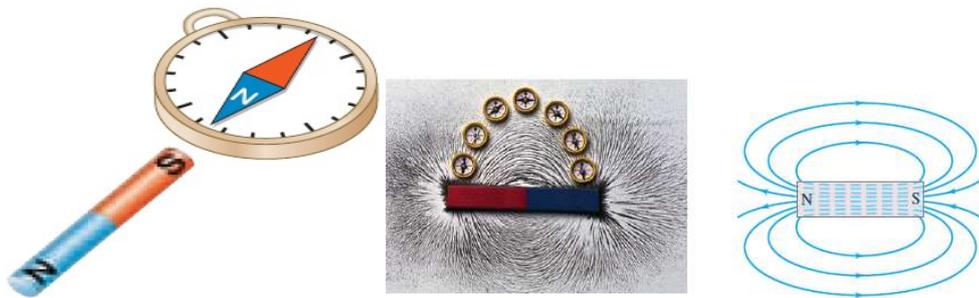


Figure 4.1 : (a) un barreau aimanté au voisinage d'une boussole (a) la limaille de fer (b). (c) les lignes du champ magnétique

À partir de cette caractéristique que Michael Faraday eut l'idée d'introduire la notion d'un champ magnétique et les lignes de champ correspondantes. (a) Le champ magnétique  $\vec{B}$  en un point est orienté selon la tangente à une ligne de champ. (b) Le pôle nord de l'aiguille d'une boussole placée sur une ligne de champ indique la direction de  $\vec{B}$ . (c) l'intensité du champ est proportionnelle au nombre de lignes traversant une surface unitaire normale au champ  $\vec{B}$ .

(d) on ne peut pas séparer un pôle nord d'un pôle sud même si on coupe un aimant en deux ou en dix fragments on trouve toujours dans chaque fragment un pôle nord et un pôle sud. Donc il n'existe pas un *monopole magnétique*.

**Définition d'un champ magnétique :** en examinant l'effet d'un champ magnétique sur une charge électrique, on constate ce qui suit :

- 1- La force agissant sur une particule chargée est directement proportionnelle à la charge  $|q|$  et au module de la vitesse  $\|\vec{v}\|$ , c'est-à-dire :  $F_B \propto |q| \|\vec{v}\|$ .
- 2- Si la vitesse fait un angle  $\theta$  avec les lignes de champ, on  $F_B \propto \|\vec{B}\| \sin(\theta)$

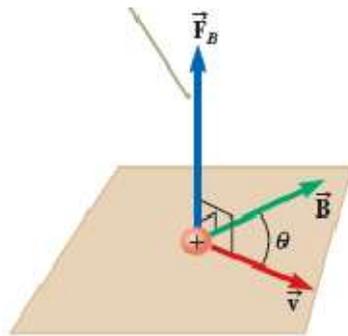


Figure 4.2 : une particule chargée en présence d'un champ magnétique

On trouve que :  $F_B \propto |q| |\vec{v}| |\vec{B}| \sin(\theta)$ , donc on peut se servir du produit vectoriel pour exprimer la force magnétique. **La force magnétique agissant sur une charge en mouvement est :**  

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

La force magnétique n'effectue aucun travail sur une particule. L'unité SI de  $\vec{B}$  est **Tesla (T)** avec  $1\text{T}=1(\text{N.s})/(\text{C.m})$ . On peut utiliser autre unité pour la valeur plus petit le **Gauss** avec  $1\text{G}=10^{-4}\text{T}$ . Le module de champ magnétique près du sol est  $0,5\text{G}=0,510^{-4}\text{T}=50\mu\text{T}$ .

**Exemple :**  $\vec{B} = 500\vec{k}G, \vec{v} = 10^7\vec{j}m/s; \vec{F} = -e\vec{v} \times \vec{B} = -8 \cdot 10^{-14}\vec{i}N$

### 4.3 La force de Lorentz

Si une charge est soumise à une force électrique  $\vec{F} = q\vec{E}$  et une force magnétique  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ , la force totale devient:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Cette force est appelée **la force de Lorentz**.

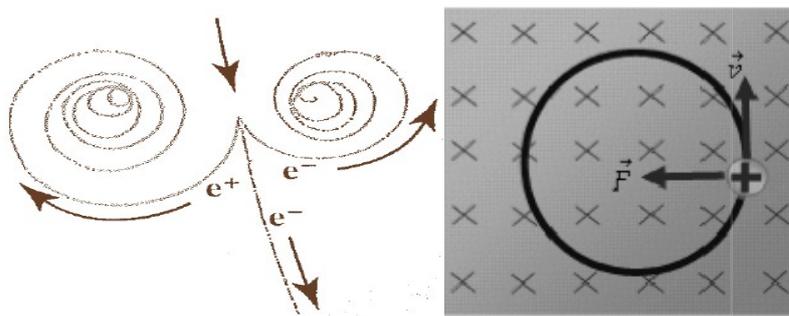


Figure 4.3 : les particules chargées (vitesse non nulle) font une trajectoire circulaire en présence d'un champ magnétique.

- a- Les particules élémentaires décrivent des trajectoires circulaires sous l'effet d'un champ magnétique (Fig.4.3) et à cause de la friction le module de leur vitesse diminue progressivement. Si on applique la loi de Newton :  $\sum F = ma_r = q|\vec{v}| |\vec{B}| = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow R =$

## Chapitre IV : Magnétostatique

$\frac{mv}{|q|B}$ . Le rayon de la trajectoire circulaire  $R$  est directement proportionnel à la **quantité du mouvement** ( $mv$ ) de la particule. On peut calculer aussi la période de ce **mouvement circulaire** :  $T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{|q|B} = 1/f_c$  ;  $f_c$  est appelée la **fréquence cyclotron**.

- b- Les **particules chargées** provenant de l'espace ( $e^-$ ,  $e^+$ ,  $p^-$ ,  $p^+$ ) décrivent des trajectoires en spirales le long des lignes de champ d'un pôle à l'autre. Ces particules captives sont confinées dans des régions que l'on appelle : **ceintures de Van Allen**.

**4.3.a Application : le spectromètre de masse** est un dispositif qui sépare les particules chargées selon leur rapport masse/charge. Si les charges sont identiques, on peut mesurer leurs masses. Il se compose en deux parts : un **sélecteur de vitesse** et une chambre où  $\vec{B}'$  **uniforme**. Un sélecteur de vitesse avec  $v = \frac{E}{B}$  donc seuls les ions avec la même vitesse vont traverser  $S_2$ . Dans la 2eme trajectoire on a  $a = \frac{mv}{|q|B}$ .

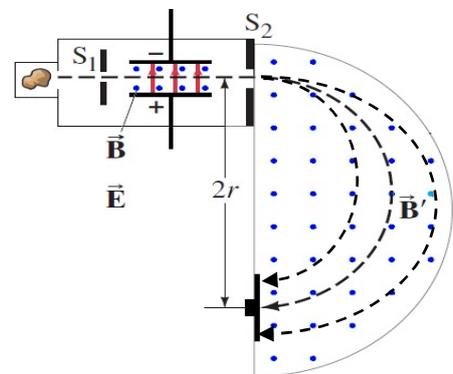
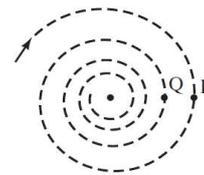


Figure 4.4 Spectromètre de masse

### Questions :

- 1) Quelle est la force de Lorentz sur un électron au voisinage de la Terre ? ( $\|\vec{B}\| = 0,4T$ ,  $\|\vec{E}\| = 100 \frac{V}{m}$ ,  $v = 10^7 m/s$ ).
- 2) Un proton fait une trajectoire spirale dans un champ magnétique  $\|\vec{B}\| = 0,4T$ . Dans deux tours consécutifs aux points P et Q de rayons 10,0mm et 8,50 mm respectivement. Calculez le changement en énergie cinétique de proton entre ces deux points.
- 3) Donnez le principe de fonctionnement d'un spectromètre de masse.



Quelle est l'effet du champ magnétique sur les ions en mouvements ( $v = 10cm/s$ ) dans notre corps.

### 4.4 Loi de Laplace

Considérons un fil rectiligne de longueur  $l$  et de section  $A$  parcouru par un courant  $I$  perpendiculaire à un champ magnétique uniforme. Si on a  $n$  électrons par unité de volume, le

## Chapitre IV : Magnétostatique

nombre d'électron dans le fil est  $nIA$  et chaque électron est soumis à une force de module  $evB$ . La force magnétique totale sur le fil est :  $F = (nIA)ev_dB = IlB$  ( $I = nAev_d$ ).

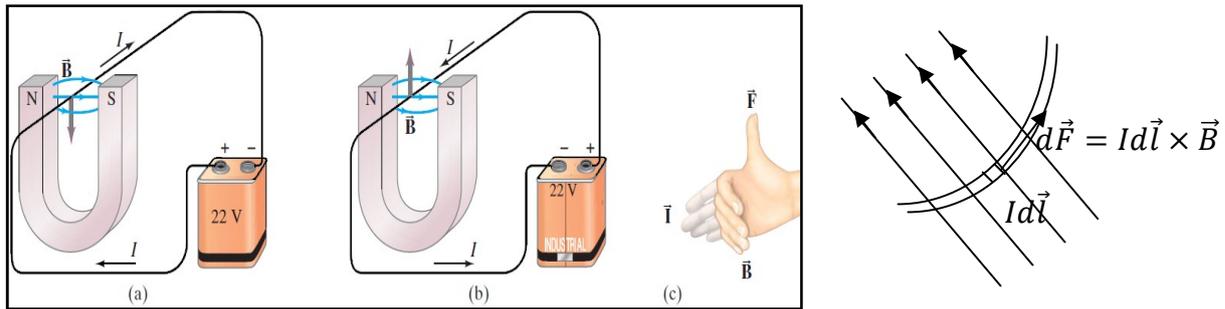


Figure 4.5 La force magnétique sur un fil de transport électrique.

Si le champ magnétique n'est pas perpendiculaire sur le fil on devrait utiliser l'intégrale pour trouver la somme des forces sur chaque élément infinitésimal :

$$d\vec{l} : \int d\vec{F} = \int Id\vec{l} \times \vec{B}$$

Le vecteur  $d\vec{l}$  a le même sens que le courant électrique  $I$ .

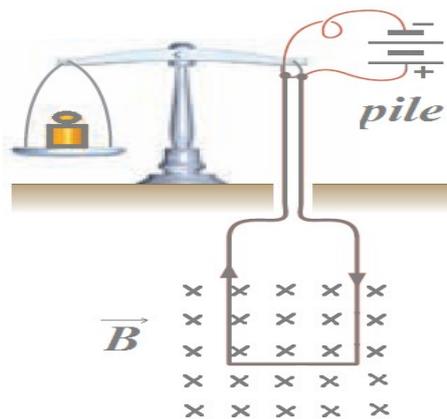
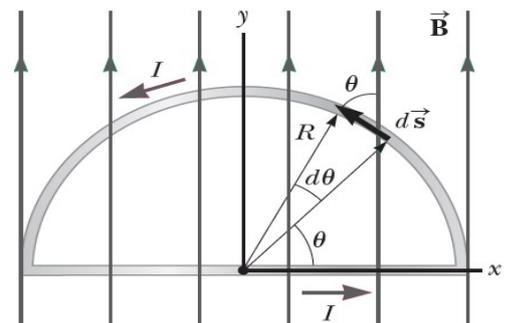


Figure 4.6 le passage du courant dans la boucle dans un champ magnétique produit la force de Laplace qui fait lever un block de masse  $m$ .

**Exemple :** La force magnétique sur le segment droit :  $\vec{F}_1 = I \int_a^b d\vec{s} \times \vec{B} = I \int_{-R}^R B\vec{j} \times dx\vec{d}l = IB(2R)\vec{k}$ . La force magnétique sur la partie penchée est :  $\vec{F}_2 = \int d\vec{F}_2 = - \int IB\sin(\theta)ds\vec{k} = - \int_0^\pi IB\sin(\theta)Rd\theta\vec{k} = -IBR[-\cos(\theta)]_0^\pi\vec{k} = -2IBR\vec{k}$ . **On remarque que la force magnétique nette sur une boucle fermée est nulle.**



## Chapitre IV : Magnétostatique

**4.4.a Deux expériences célèbres :** l'expérience d'Oersted (Fig.4.7a) et celle d'Ampère ((Fig.2.7b)). En étudiant les effets du courant électrique dans un fil, Oersted (1777 – 1851) a remarqué que le passage du courant influençait l'orientation d'une boussole placée à proximité. Ampère par contre a remarqué que deux courants parallèles s'attirent, deux courants circulant en sens inverse se repoussent.

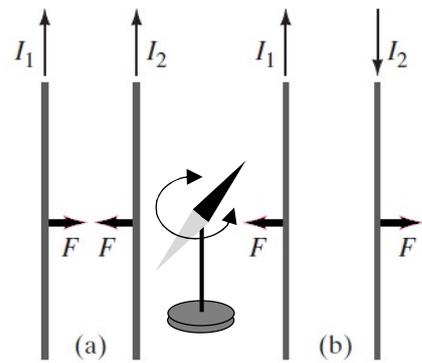


Figure 4.7 : Expérience d'Oersted et expérience d'Ampère.

### 4.4.b Le moment de force sur une boucle du courant :

considérant une boucle rectangulaire de cotes  $a$  et  $b$  dans un champ magnétique uniforme  $\vec{B} = B\vec{i}$ . On constate que chaque coté est soumis à une force de Laplace. Les cotés horizontaux sont soumis à des forces verticales de même module et d'orientations opposées, donc, n'exercent aucun moment de force.

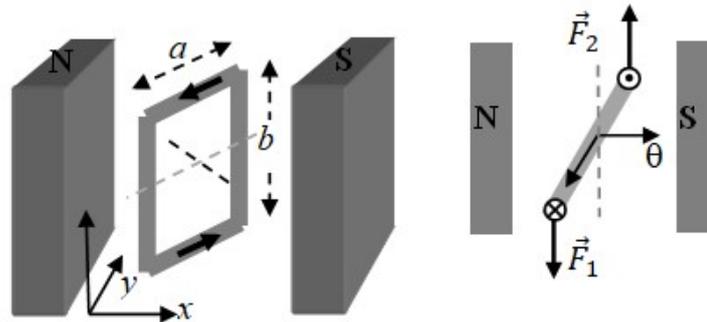


Figure 4.8 : Moment de force magnétique sur une boucle

Par contre les forces agissant sur les cotés verticaux donnent naissance d'un moment  $\vec{F}_1 = (-Ib\vec{k}) \times (B\vec{i}) = -IbB\vec{j}$  et  $\vec{F}_2 = (Ib\vec{k}) \times (B\vec{i}) = IbB\vec{j}$ .

Le module du moment de force total produit par  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$  par rapport à l'axe est donc :  $\tau = 2(IbB) \left(\frac{a}{2} \sin \theta\right) = IB(ab) \sin \theta = IBS \sin \theta$ , avec  $S = ab$  est l'aire du cadre.

On peut généraliser cette loi si nous avons N boucles ou spires : le moment de force s'exerçant sur une boucle de N spires est :  $\tau = NIBS \sin \theta$ .

4) Les barreaux aimantés et les cadres parcourus d'un courant sont des **dipôles magnétiques**.

**Le moment dipolaire** d'un cadre plan de forme quelconque est défini par :

$$\vec{\mu} = NIS\vec{u}_n.$$

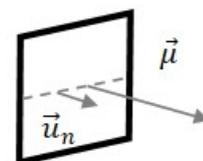


Figure 4.9 : moment dipolaire

Le sens du **moment dipolaire magnétique** est donné par la **règle de la main droite**. On peut déduire la relation entre le moment de force et le moment dipolaire magnétique :  $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$ , on constate que le moment de force a tendance à aligner le moment dipolaire magnétique sur le champ  $\vec{B}$ .

**Exemple :** Un carré de cinq spires et parcouru par un courant  $I=2A$ . La normale au cadre fait un angle  $37^\circ$  avec un champ magnétique uniforme  $\vec{B} = 0,5\vec{j}$ . Trouver le moment le module du moment de force sur le cadre. 1) ( $\tau = NIBS \sin \theta = 5 \times 2 \times (0,2)^2 \times 0,5 \times \sin(37^\circ) = 0,12N \cdot m$ ),  $\vec{u}_n = -0,6\vec{i} + 0,8\vec{j}$ . 2) le moment magnétique :  $\vec{\mu} = NIS\vec{u}_n = -0,24\vec{i} + 0,32\vec{j}$ . Donc  $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B} = -0,12\vec{k} N \cdot m$

**4.4.c Le Galvanomètre :** lorsqu' un courant  $I$  traverse la boucle ; elle est soumise à un moment de force. La déviation de l'aiguille  $\varnothing$  est proportionnelle au courant.  $\varnothing = \frac{NAB}{\kappa} I$ ,  $\kappa$  la constante de torsion.

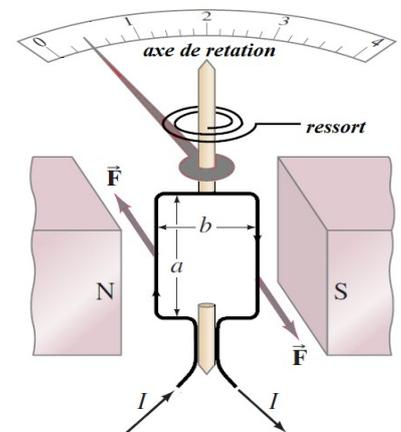


Figure 4.10 : galvanomètre

### Questions :

- 1) Vrai ou faux ? la force magnétique nette sur une boucle fermée est nulle.
- 2) Expliquer l'expérience d'Oersted et celle d'Ampère. Comment Oersted a fait le lien entre l'électricité et magnétique.
- 3) Pour quoi, si deux fils traversés par deux courant opposés se repoussent et deux fils traversé par du courant de même sens s'attirent ?
- 4) Expliquer le principe de fonctionnement d'un moteur électrique.

4.5 Loi de Biot et Savart

En 1820, les travaux d'Oersted montrant qu'on pouvait produire un champ magnétique à partir d'un courant électrique et juste quelque semaine plus tard, Jean Baptiste Biot (1774) et Félix Savart (1791-1841) réussirent à obtenir une expression du champ magnétique produit par un élément de courant infinitésimal.

4.5.1 Le champ magnétique créé par un long fil conducteur rectiligne :

Les travaux expérimentales ont montrés que :  $\|\vec{B}\| \propto 1/R$  et  $\|\vec{B}\| \propto I$  ce la implique que  $\|\vec{B}\| = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$  avec  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = T.m/A$  appelée constante de perméabilité du vide.

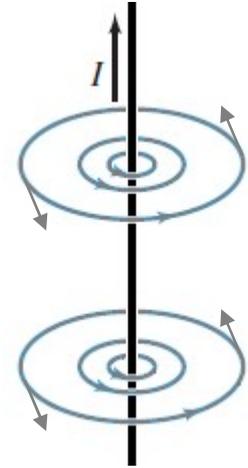
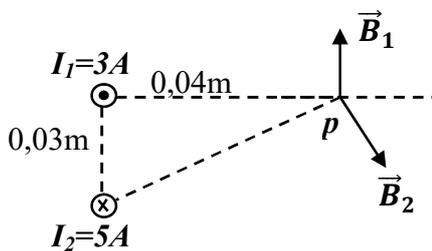


Figure 4.11 : un champ magnétique crée par le passage d'un courant

Exemple 1 : Si  $R=0.1m$  et  $I=100A$  on trouve :  $B=210^{-4}T$ .



Exemple 2: déterminer le champ magnétique résultant au point p. en quel point le champ magnétique est-il nul (autre que l'infinie) ? Rep :  $\vec{B} = (12\vec{i} - \vec{j}) \times 10^{-6}T, d=0,045cm$

4.5.2 La force magnétique entre des fils conducteurs parallèles :

En Octobre 1820, Ampère démontra que deux fils parcourus par des courants exercent bien une force magnétique l'un sur l'autre (Fig4.7). Considérons deux fils parcourus par les courants  $I_1$  et  $I_2$  et séparé par une distance  $d$ (Fig4.12). La force de Laplace nous dise que le champ magnétique  $\vec{B}_1$  créé par le courant  $I_1$  exerce une force sur la longueur  $\vec{\ell}_2$  du fil 2 est :  $\vec{F}_{21} = I_2 \vec{\ell}_2 \times \vec{B}_1$  et sachant que  $\|\vec{B}_1\| = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d}$  donc  $F_{21} = I_2 \ell_2 \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d}$  N. On trouve une expression similaire pour  $F_{12}$ .

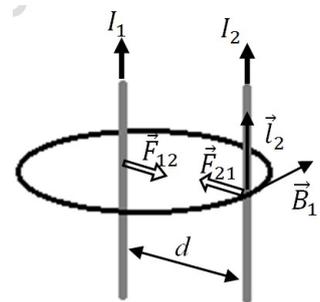


Figure 4.12

En appliquant la règle de la main droite : on constate que des courants de même sens s'attirent mutuellement. Par contre, des courants de sens opposés se repoussent.

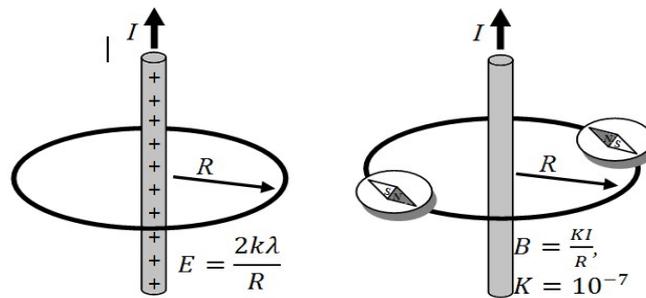


Figure 4.13 : L'analogie entre champ électrique et champ magnétique

Après déterminer le champ magnétique créé par un long fil rectiligne, Biot et Savart essayèrent calculer le champ magnétique créé par une longueur infinitésimale pour construire une relation plus générale. Leur raisonnement est le suivant : sachant que  $\|\vec{B}\| \propto I/R$  cela implique que  $d\|\vec{B}\| \propto I/R^2$  (voir figure suivante).

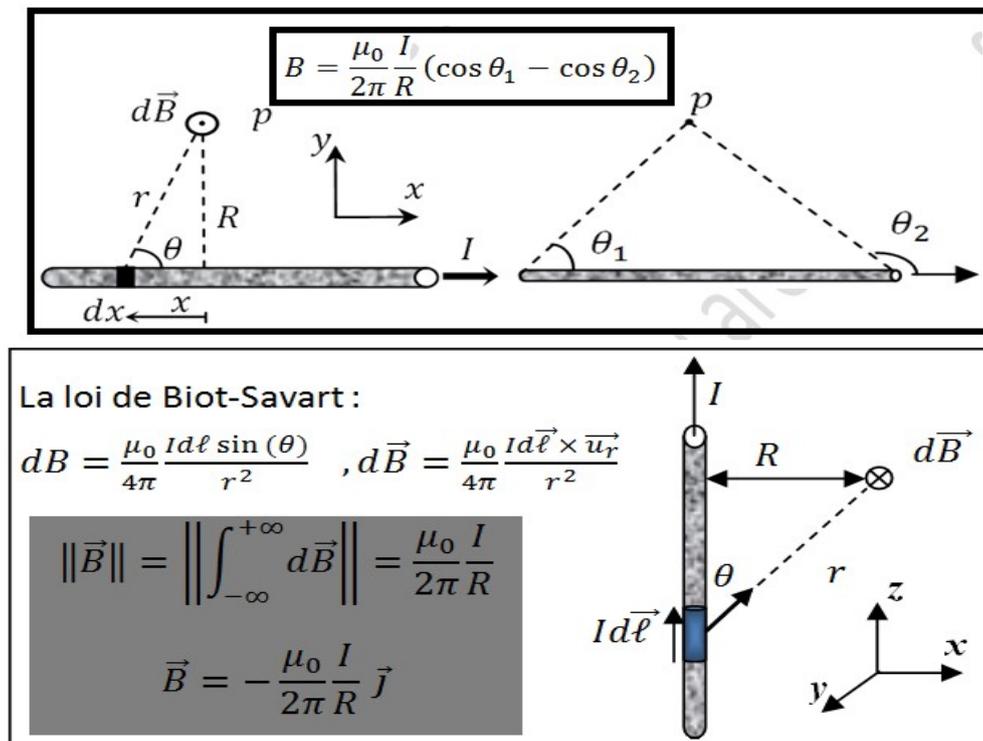


Figure 4.14 : (haut) Le champ magnétique créé par un segment du fil rectiligne, (bas) la loi de biot-Savart.

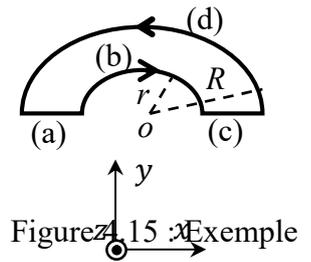
On peut aussi déduire Le champ magnétique au centre d'une boucle ou d'une portion de boucle :

$$B = \mu_0 NI / 2a,$$

avec: a rayon de la boucle, et N nombre de spires.

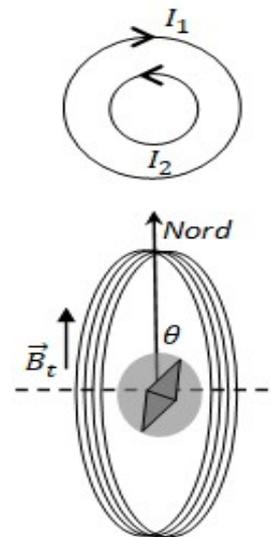
**Exemple : Quel est le champ magnétique au centre des demi-cercles O?**

On remarque que les segments (a) et (c) passent par le point O le champ magnétique produit par ces deux segments est nul. Il nous reste à calculer le champ magnétique produit par les deux demi-boucles (b) et (d). On sait que le champ magnétique au centre d'une boucle créé par la circulation d'un courant  $I$  est :  $B = \mu_0 I / 2a$  ( $N=1$ ), donc pour une demi-boucle on a :  $B = \mu_0 I / 4a$ . Pour la demi-boucle (b)  $\vec{B} = -\mu_0 I / 4r \vec{k}$  et la demi-boucle  $\vec{B} = \mu_0 I / 4R \vec{k}$  et le champ total est  $\vec{B} = -\mu_0 I / 4r \vec{k} + \mu_0 I / 4R \vec{k}$ .



**Question :**

- a) Expliquer chaque terme dans l'équation de Biot-Savart :  $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{\ell} \times \vec{u}_r}{r^2}$ .
- b) Deux boucles de rayons  $a$  et  $2a$  ont un centre commun. Donner le courant  $I_1$  en fonction de  $I_2$  sachant que le champ magnétique au centre est nul.
- c) Un galvanomètre est constitué d'une boucle circulaire de  $N$  spires de rayon  $R$ . son plan est parallèle à la composante horizontale du champ magnétique terrestre  $\vec{B}_t$ . Le passage d'un courant électrique dans la bobine va dévier l'aiguille aimantée d'un angle  $\theta$  par rapport à la direction du champ magnétique terrestre. Trouver l'expression du courant circulant dans la bobine en fonction de  $\theta$ .



**4.6 Induction magnétique**

Dés 1821, Michael Faraday (1791-1856) écrivit dans ses notes qu'il devrait essayer de convertir le magnétisme en électricité. En 1831 fit cette découverte bien que en 1830 la même expérience a été faite par Joseph Henry !. Afin de produire de l'électricité d'un champ magnétique Faraday et Henry (séparément) utilisaient une expérience similaire à celle montrée dans la figure (Fig.4.16).

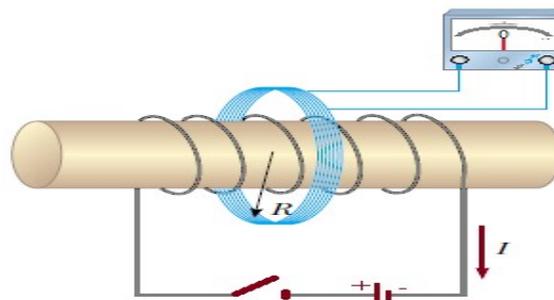


Figure 4.16 : L'expérience de Faraday et Henry.

## Chapitre IV : Magnétostatique

Ils ont constatés qu'un courant électrique statique ne peut pas induire un champ magnétique dans le deuxième solénoïde. Mais au cours de la fermeture (ou l'ouverture) de l'interrupteur il y a la circulation du courant électrique dans le 2ème solénoïde !.

**La conclusion : la variation du champ magnétique qui induit le courant électrique.**

### 4.7 La loi de Lenz et la loi de Faraday

La loi de Lenz (un physicien russe) nous permet de savoir la direction du courant électrique (horaire ou antihoraire).

Au fur et à mesure que le pôle nord de l'aimant s'approche de la boucle (Fig.4.17.a), la face la plus proche de la boucle se comporte comme un pôle nord et repousse l'aimant et le courant circule dans le sens antihoraire. Lorsque le pôle nord s'éloigne (Fig.4.17), le courant change son sens (circule dans le sens horaire) et l'aimant est attiré. On peut dire que

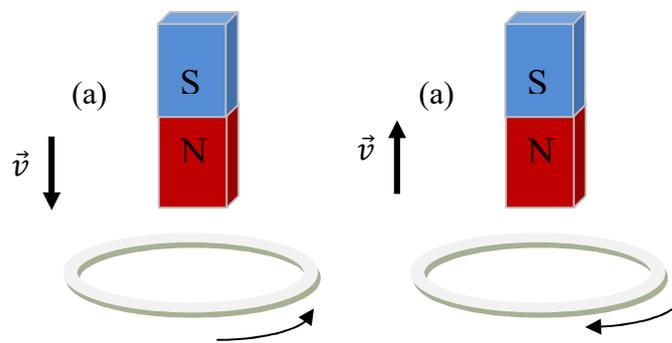


Figure 4.17 : Le courant induit circule dans sens (a) antihoraire (b) horaire dans une boucle de surface  $S$ .

Le courant induit peut être relié à une source **f.é.m.** induite. Quelques expériences simples permettent de mettre en évidence les caractéristiques essentielles de cette induction magnétique.

- La variation du champ magnétique va induire un courant électrique dans la boucle.
- La variation de l'aire de la boucle peut aussi induire un courant électrique même si le champ magnétique est constant.
- La variation de l'angle de la boucle (d'une aire constante) par rapport un champ magnétique uniforme peut aussi induire un courant dans la boucle.

Ces trois expériences nous dirigent vers une relation entre la **f.é.m.** induite et le champ magnétique  $\vec{B}$  et la surface de la boucle  $S$  :

$$\mathcal{E}_{\text{ind}} = - \frac{d}{dt} ( \|\vec{B}\| \cdot \|\vec{S}\| \cdot \cos\theta ) = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad (4.1)$$

Avec  $\phi_m = \vec{B} \cdot \vec{S}$  c'est le flux magnétique en analogie (définie de la même manière) avec le flux électrique  $\phi_E$ . L'unité de flux magnétique est **weber** (Wb) avec :

$$1T = 1Wb/m^2$$

$$\frac{d\phi_B}{dt} = \frac{d\|\vec{B}\|}{dt} \|\vec{S}\| \cdot \cos\theta + \|\vec{B}\| \frac{d\|\vec{S}\|}{dt} \cos\theta + \|\vec{B}\| \|\vec{S}\| \frac{d\cos\theta}{dt} \quad (4.2)$$

L'équation (4.2) montre que chaque changement de champ magnétique, surface de la boucle ou l'angle entre les deux induits un changement de flux magnétique et par conséquent la **f.é.m.** induite.

Si le champ magnétique n'est pas uniforme ou la surface n'est pas plane on utilise :

$$\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (4.2)$$

Si la boucle a N spires la **f.é.m.** induite :

$$\mathcal{E}_{\text{ind}} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

### Exemple 1 :

Une tige métallique (de longueur  $\ell$ ) se déplace vers la gauche à la vitesse  $\vec{v} = -2 \vec{i}$  cm/s au dessus d'un rail en forme U (Fig.4.18). À  $t = 0$  ce système mécanique de rail plus la lige, est soumis sous un champ magnétique  $\vec{B}$ , de module 0,2 T, et sortant de la page, augmente à raison de 0,1 T/s. Trouvez la f.é.m induite à l'instant initial.

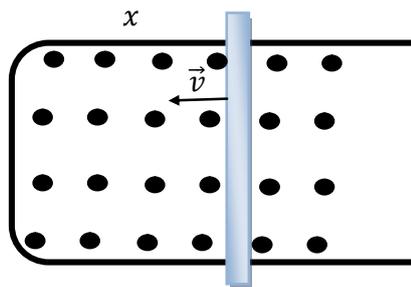


Figure 1.18 : Le courant induit est produit à la fois par le mouvement du barreau et par la variation du module du champ magnétique extérieur. Comme le flux électrique à travers le circuit augmente, le champ magnétique induit est de sens opposé au  $\vec{B}$ .