

I - Charges électriques

1- Définition

La charge électrique d'une particule est une grandeur scalaire (algébrique) qui caractérise les actions électromagnétiques subies ou exercée par la particule.

La charge électrique joue dans l'interaction électrostatique le même rôle que joue la masse (scalaire positive) dans l'interaction gravitationnelle.

2- Structure de la matière

La vision moderne de la matière décrit celle-ci comme étant constituée d'atomes. Ceux-ci sont eux-mêmes constitués d'un noyau (découvert en 1911 par Rutherford) autour duquel « gravite » une sorte de nuage composé d'électrons et portant l'essentiel de la masse. Ces électrons se repoussent les uns des autres mais restent confinés autour du noyau car cette dernière possède une charge électrique positive qui les attirent. On attribue cette charge positive à des particules appelées **protons**. Cependant, le noyau atomique ne pourrait rester stable s'il n'était composé que de protons : ceux-ci ont en effet tendance à se repousser mutuellement. Il existe donc une autre sorte de particules, les **neutrons** (découverts en 1932 par Chadwick) portant une charge électrique nulle. Les particules constituant le noyau atomique sont appelées les **nucléons**.

Dans le tableau de Mendeleev tout élément chimique X est représenté par la notation A_ZX . Le nombre A est appelé le nombre de masse : c'est le nombre total de nucléons (protons et neutrons). Le nombre Z est appelé le nombre atomique et est le nombre total de protons constituant le noyau. La charge électrique nucléaire totale est donc $Q = +Ze$, le cortège électronique possédant alors une charge totale $Q = -Ze$, assurant ainsi la neutralité électrique d'un atome.

Il apparaît clair que, les particules élémentaires, constituants de la matière, se caractérisent par : Masse, charges (électrons, proton), spin ...

Les valeurs des charges électriques et des masses des constituants atomiques, dans le Système International, sont représenté dans le tableau ci-dessous:

	Charge	Masse
Electrons	$-e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Protons	$+e = +1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$1.672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Neutrons	0	$1.675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Comme on peut le remarquer, même une charge de l'ordre du Coulomb (ce qui est énorme), correspondant à environ 10^{18} électrons, ne produit qu'un accroissement de poids de l'ordre de 10^{-12} kg : c'est effectivement imperceptible.

Si les électrons sont bien des particules quasi-ponctuelles, les neutrons et les protons en revanche ont une taille non nulle (inférieure à 10^{-15} m). Il s'avère qu'ils sont eux-mêmes constitués de **quarks**, qui sont aujourd'hui, avec les électrons, les vraies briques

élémentaires de la matière. Les protons ainsi que les neutrons forment ainsi une classe de particules appelée les **baryons**.

Tout corps contient à la fois des charges positives et des charges négatives.

Dans un corps neutre les charges positives et les charges négatives se compensent, c'est-à-dire que la charge totale est nulle.

a- Si un électron est arraché (ou rajouté) à un atome, on a un **ion**. On note bien que l'atome est neutre.

b- à l'échelle macroscopique, la "charge électrique" portée par un corps correspond à un **défaut** ou un **excès** d'électrons.

c- Les charges mobiles sont, le plus souvent, des électrons.

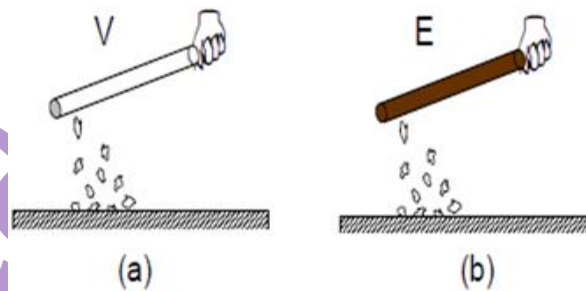
3- Phénomènes d'électrisation de la matière

3-1- Electrification par frottement ou par friction (triboélectricité)

a- Observation et expérience : Mise en évidence du phénomène

- Une tige en verre bien sèche, frottée à l'aide d'un morceau de drap en soie ou en laine, tenue à la main, attire de petits morceaux de papier¹ (**figure .1. a**). On dit que le verre a été *électrisé*, ce phénomène est appelé *électrisation* et la discipline de la physique qui traite de tels phénomènes est *l'électricité statique*.

- On obtient le même résultat si on remplace la tige en verre par un bâton d'ébonite² et si on répète la même opération (**figure .1. b**).



Figures. 1

¹ Les morceaux de papier peuvent être remplacés par de la cendre ou une substance très légère.

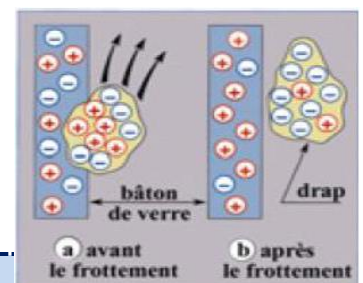
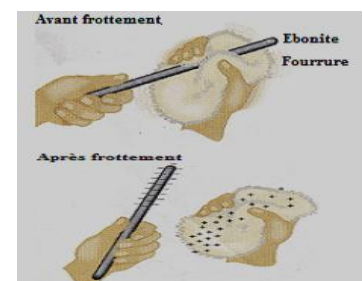
² Ebonite : caoutchouc durci par mélange avec du soufre.

b- Conclusion & Interprétation

Un corps peut être électrisé par frottement

Un corps électrisé par frottement peut acquies la propriété d'attirer des corps légers.

Par frottement d'un corps par un morceau de drap par exemple, il y a transfert d'électrons de l'un vers l'autre : le bâton de verre perd des électrons de drap, ce qui le charge



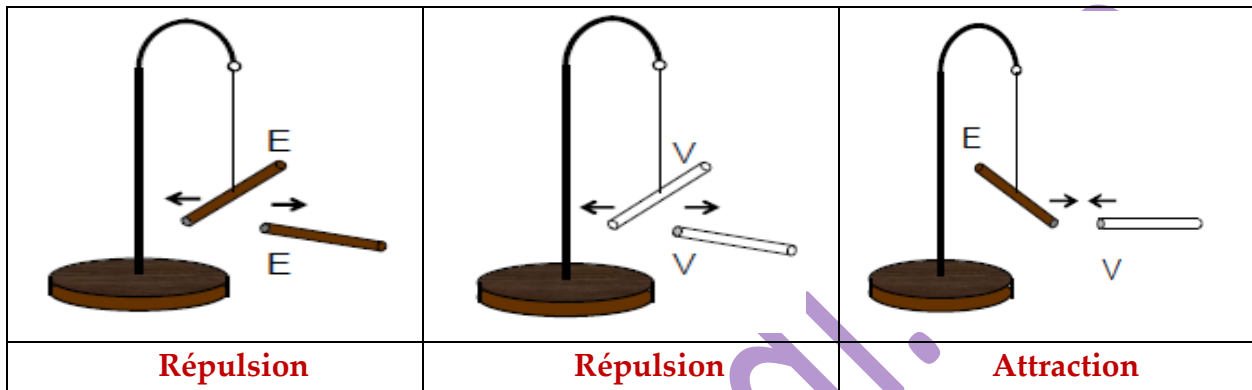
positivement par défaut d'électrons, alors que le drap se charge négativement par excès d'électrons.

Au contraire pour un morceau d'ébonite qui se charge positivement.

Lorsqu'on frotte deux corps l'un contre l'autre, l'un arrache des électrons à l'autre. Le corps qui possède un excès d'électrons est chargé négativement. Le corps qui a perdu des électrons est chargé positivement.

c- Les deux types de charges électriques

a- Expérience



Figures .2 Répulsion et attraction entre corps électrisés

E : Ebonite

V : Verre

Si on électrise une baguette en ébonite par frottement contre un peau de chat et que l'on approche successivement d'autres baguettes électrisés, on s'aperçoit que la baguette repousse les baguettes en ébonite et attire les baguettes en verre.

De même, si on électrise une baguette en verre par frottement contre un morceau de soie et que l'on approche successivement d'autres baguettes électrisés, on s'aperçoit que la baguette attire les baguettes en ébonite et repousse les baguettes en verre.

b- Conclusion : On peut donc en déduire qu'il existe deux sortes d'électricité :

La première apparaît dans le verre : c'est *l'électricité vitreuse* à laquelle on a attribué arbitrairement un *signe positif*.

La seconde se manifeste dans l'ébonite et d'autres résines : c'est *l'électricité résineuse* ; on lui a attribué un *signe négatif*.

c- Convention : Par convention, l'électricité qui apparaît sur le bâton de verre est notée positivement (+) et celle qui apparaît sur le bâton d'ébonite est notée négativement (-).

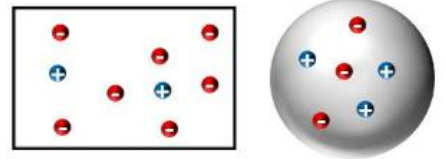
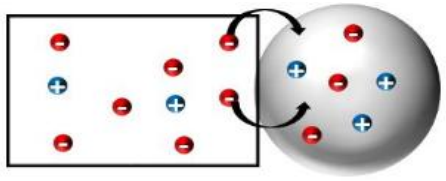
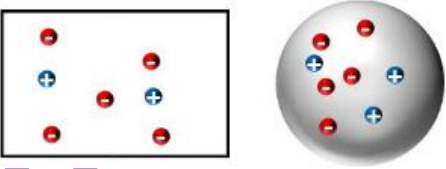
☀ Deux corps chargés d'électricité de même signe se repoussent ;

☀ Deux corps chargés d'électricité de signe contraires s'attirent.

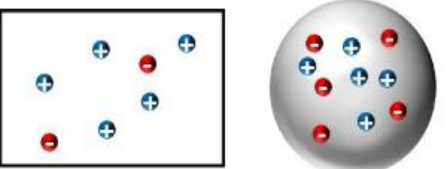
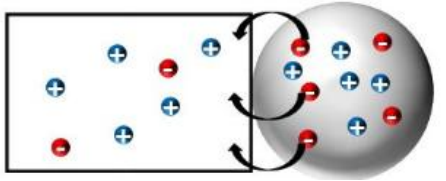
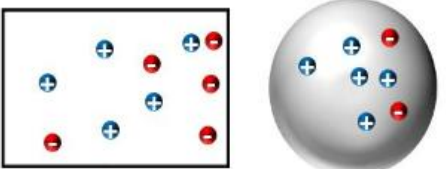
3- 2- Electrification par contact (par conduction)

L'**électrification par conduction** est le phénomène électrostatique par lequel des charges électriques se déplacent d'une substance vers une autre lorsqu'elles sont mises en contact l'une avec l'autre.

Une deuxième façon d'électriser un objet est de lui transférer par conduction un surplus de charges appartenant à un autre matériau ou encore d'attirer certaines charges à partir d'une autre substance déjà chargée.

<p>Première étape : On approche un objet chargé électriquement de la sphère métallique qui doit être chargée.</p>	
<p>Deuxième étape : Dans un matériel contenant un surplus de charges négatives, une répulsion existe entre les charges en excès. Donc, quand le matériel chargé touche à la sphère, cette répulsion fait en sorte que ce surplus de charges négatives sera réparti dans le matériel chargé ainsi que dans la sphère.</p>	
<p>Troisième étape : lorsqu'on cesse de faire un contact entre les deux objets, la sphère métallique gardera le surplus de charges. Elle aura donc, dans cette situation, une charge négative.</p>	

Si l'objet que l'on approche est chargé positivement, il y a tout de même un déplacement des charges négatives afin de rétablir un équilibre électrique.

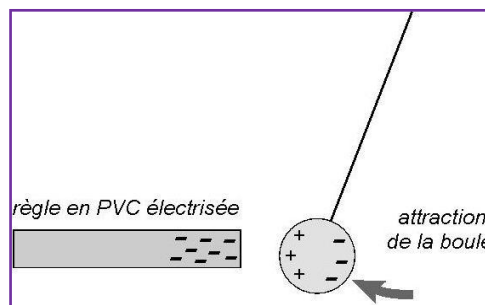
<p>Première étape : On approche un objet chargé électriquement de la sphère métallique qui doit être chargée.</p>	
<p>Deuxième étape : L'objet chargé positivement attire les charges négatives présentes dans la sphère. Les électrons seront transférés de la sphère vers l'objet rectangulaire.</p>	
<p>Troisième étape : lorsqu'on cesse de faire un contact entre les deux objets, la sphère métallique gardera le surplus de charges. Elle aura donc, dans cette situation, une charge positive à la fin du processus.</p>	

Ce n'est que lorsqu'un objet a été chargé positivement ou négativement que l'on observera de l'attraction ou de la répulsion entre les objets, ce qui est en fait la conséquence du phénomène d'électrostatique.

3-3- Electrification par influence (à distance ou par induction)

a- Expérience : On frotte une règle en PVC (matière plastique) avec une fourrure de chat. La règle est ensuite approchée d'un pendule électrostatique. Celui-ci est constitué d'une boule en métal suspendue par un fil non conducteur électriquement. La boule, initialement à la verticale, se déplace alors vers la règle. Car il se crée une dissymétrie dans

la répartition, permettant une attraction, alors que globalement la boule est restée électriquement neutre.



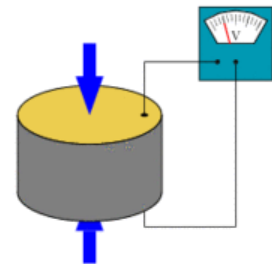
b- Interprétation : En frottant la règle avec la fourrure de chat, elle est électrisée négativement. Quand on approche la règle de la boule. On parle **d'électrisation par influence**.

L'électrisation par influence correspond à une dissymétrie de la répartition des électrons dans un corps sous l'influence d'un autre corps chargé.

3- 4- Electrification par compression (piézoélectricité)

La **piézoélectricité** (du grec *πιέζειν*, *piezein* : presser, appuyer) est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique.

Les deux effets sont indissociables. Le premier est appelé effet piézoélectrique *direct*; le second effet piézoélectrique *inverse*. Cette propriété trouve un très grand nombre d'applications dans l'industrie et la vie quotidienne. Une application parmi les plus familières est l'allume-gaz. Dans un allume-gaz, la pression exercée produit une tension électrique qui se décharge brutalement sous forme d'étincelles: c'est une application de l'effet direct. De manière plus générale, l'effet direct peut être mis à profit dans la réalisation de capteurs (capteur de pression...) tandis que l'effet inverse permet de réaliser des actionneurs de précision (injecteurs à commande piézoélectrique en automobile, nanomanipulateur...).



Les matériaux piézoélectriques sont très nombreux. Le plus connu est sans doute le quartz, toujours utilisé aujourd'hui dans les montres pour créer des impulsions d'horloge. Mais ce sont des céramiques synthétiques, les PZT (**Titano - Zirconate de Plomb**) qui sont le plus largement utilisées aujourd'hui dans l'industrie.

3- 5- Electrification par chauffage (pyroélectricité)

La **pyroélectricité** est la propriété d'un matériau dans lequel un changement de température entraîne une variation de polarisation électrique. Cette variation de polarisation crée une différence de potentiel temporaire, celle-ci disparaissant après le temps de relaxation diélectrique. Cette variation peut générer un courant électrique, ce qui rend ces matériaux utiles pour la détection de radiations ou la production d'électricité. Ils sont tout particulièrement utilisés dans certains détecteurs infrarouges. L'effet

pyroélectrique ne doit pas être confondu avec l'effet thermoélectrique, où un gradient de température fixé donne naissance à une tension permanente. Les cristaux pyroélectriques forment un sous ensemble des cristaux piézoélectriques: 10 des 20 classes cristallines piézoélectriques sont aussi pyroélectriques.

4 – La conservation et l'invariance de la charge électrique

Le principe de conservation de la charge est l'un des principes fondamentaux de conservation qui sont la base de la physique, tels que la conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement, du moment cinétique, ...

La charge totale d'un système n'est pas modifiée par suite du mouvement des charges.

La loi de conservation de la charge est valable en relativité, c'est-à-dire même si la charge se déplace à une vitesse proche de celle de la lumière. On dit que la charge électrique est une grandeur qui est conservée : c'est **un invariant relativiste**.

Des expériences ont permis de montrer que la valeur de la charge d'un électron ne dépend pas de sa vitesse : la valeur est donc la même pour un observateur en mouvement par rapport à la charge. Ce n'est pas le cas de toutes les grandeurs physiques : Par exemple: l'énergie est conservée mais n'est pas un invariant relativiste.

5 - Quantification de la charge

A l'échelle microscopique, l'expérience (Millikan, 1913) montre que la charge électrique varie de façon discontinue et se présente par unité sous forme de quantité bien déterminée. On dit qu'elle est quantifiée. Sa valeur est un multiple entier d'une charge qu'on peut prendre comme charge élémentaire, notée **e**. C'est la valeur absolue de la charge de l'électron $e = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ($1 \text{ C} = 6,25 \cdot 10^{18} e$)

Toute charge **Q** est un multiple entier de la charge de l'électron : $Q = \pm n \cdot e$

L'unité de la charge est le coulomb C dans le SI (MKSA) : c'est la quantité de charge transportée par un courant de 1 Ampère pendant 1 seconde ($Q = I t$).

Il faut $6,25 \cdot 10^{18}$ électrons pour obtenir une charge de -1 C et $6,25 \cdot 10^{18}$ protons pour obtenir une charge de 1 C .

C'est un nombre élevé de particules. Dans la pratique, on utilise le mC et le μC . Notons, qu'à l'échelle macroscopique (grand nombre de charge élémentaires) la nature discontinue de la charge n'a plus de sens : la charge électrique paraît être une grandeur susceptible de variation continue.

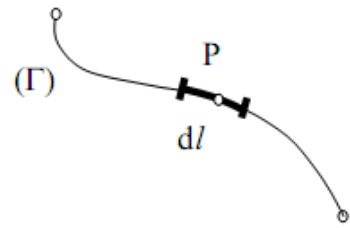
6- Répartition des charges : différentes distributions de charges

6. 1- charges ponctuelles : dimensions négligeables par rapport aux distances entre les charges.

6. 2- Distributions continues de charges – Densité de charges : A l'échelle macroscopique, le nombre de charges élémentaires est si important que la nature discontinue de la charge n'a plus de sens; il en est de même pour la masse puisqu'il ne

nous est pas possible de déceler les protons et les électrons à l'échelle macroscopique. Ceci nous permet de considérer que la répartition de charges dans la matière est continue.

a- distribution linéique : Si la charge Q est répartie sur un fil de longueur L , on définit une densité linéique de charges $\lambda(P)$, à partir de la charge dq portée par un élément dl du fil, entourant le point P :



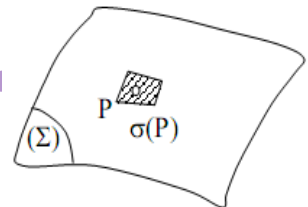
$$dq = \lambda dl \quad \text{avec} \quad \lambda \text{ en C/m}$$

La charge totale du fil est donnée par l'intégrale curviligne :

$$Q = \int_{(\Gamma)} dq = \int_{(\Gamma)} \lambda dl, \quad \text{si } \lambda = \text{cste}, \text{ alors } Q = \lambda L$$

λ : Densité de charges linéique (C.m⁻¹)

b- distribution surfacique : Lorsque la charge Q est répartie sur une surface S , on définit une densité surfacique de charges $\sigma(P)$ à partir de la charge dq portée par un élément de surface dS , entourant le point P :



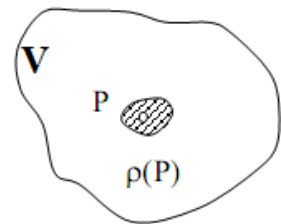
$$dq = \sigma ds \quad \text{avec} \quad \sigma \text{ en C/m}^2.$$

Dans ce cas, la charge totale d'une surface (S) est donnée par l'intégrale sur la surface :

$$Q = \iint_{(\Sigma)} dq = \iint_{(\Sigma)} \sigma ds, \quad \text{si } \sigma = \text{cste}, \text{ alors } Q = \sigma S$$

σ : Densité de charges surfaciques (C.m⁻²)

iii- distribution volumique : Lorsque la charge Q est répartie sur un volume V , on définit une densité volumique de charges $\rho(P)$ à partir de la charge dq contenue dans un élément de volume $d\tau$ entourant le point P :



$$dq = \rho d\tau \quad \text{avec} \quad \rho \text{ en C/m}^3$$

La charge totale Q dans le volume V s'obtient à partir de l'intégrale de volume :

$$Q = \iiint_{(V)} dq = \iiint_{(V)} \rho d\tau, \quad \text{si } \rho = \text{cste}, \text{ alors } Q = \rho V$$

ρ : densité de charges surfaciques (C.m⁻³)

La densité de charges $\rho(P)$ est une fonction de point scalaire qui peut subir de grandes variations d'un point à l'autre de la distribution. En effet, la charge est nulle dans l'espace vide entre un noyau et un électron et prend une valeur différente de zéro en un point situé sur le noyau ou l'électron. En conséquence $\rho(P)$ pourrait avoir des valeurs très différentes suivant le choix du volume élémentaire $d\tau$. Pour que la définition de $\rho(P)$ ait un sens, c'est à dire qu'elle soit indépendante de la forme exacte de $d\tau$, il faut considérer un élément de volume $d\tau$ qui soit grand par rapport aux dimensions atomiques, mais très petit par

rapport aux dimensions de la distribution de charges. Celle-ci correspond alors à un système macroscopique et $\rho(P)$ pourra être considéré comme une densité volumique de charges, moyennée sur le volume $d\tau$. Cette description est valable tant que l'on s'intéresse à une description macroscopique (en opposition à microscopique) du système de charges.

7- Les divers états de la matière

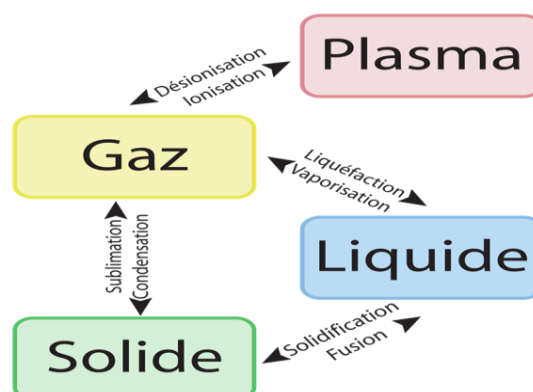
La cohésion de la matière est due à l'interaction entre ses constituants, interaction mettant en jeu une énergie de liaison. Or, chaque constituant (atome ou molécule) possède lui-même de l'énergie cinétique liée à sa température (énergie d'agitation thermique). La rigidité d'un état particulier de la matière dépend donc de l'importance relative de ces deux énergies (cinétique et liaison).

Si l'on prend un **gaz** constitué d'atomes (ou de molécules) neutres, alors l'interaction entre deux constituants est assez faible : elle ne se produit que lorsqu'ils sont assez proches pour qu'il y ait répulsion entre les électrons périphériques. Ainsi, chaque atome est relativement libre de se déplacer dans l'espace, au gré des « collisions » avec d'autres atomes.

Si l'on refroidit ce gaz, certaines liaisons électrostatiques qui étaient négligeables auparavant peuvent devenir opérantes et l'on obtient alors un **liquide**. Si l'on chauffe ce gaz, de l'énergie est fournie à ses constituants, les molécules se brisent et, si l'on continue à chauffer, on peut même libérer un ou plusieurs électrons périphériques des atomes, produisant ainsi un gaz d'ions ou **plasma**.

Dans un **solide** au contraire, les liaisons entre chaque atome sont beaucoup plus fortes et les atomes ne bougent quasiment pas, formant un cristal. La force de cette cohésion dépend beaucoup d'un solide à l'autre. Ainsi, elle est très puissante si les atomes mettent en commun leur cortège électronique (liaison covalente comme pour le diamant et liaison métallique, comme pour le Cuivre) et beaucoup plus faible si les cortèges électroniques de chaque atome restent intouchés (liaison ionique, comme pour le sel).

Enfin, **la matière molle** (caoutchouc, plastiques, textiles, mousses) possède une hiérarchie du point de vue de sa cohésion : elle est constituée d'éléments « solides » (macromolécules liées par des liaisons covalentes) interagissant entre eux par des liaisons ioniques (électrostatiques).



8- Matériaux isolants et matériaux conducteurs

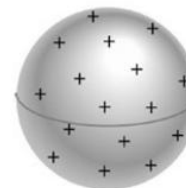
Dans la matière, les charges électriques peuvent être « libres » (ou quasiment), ou alors « liées » (électron lié à un ion, particule chargée adsorbée, etc.). On distingue au point de vue du comportement électrique trois états de la matière: conducteur (ou métallique), semi-conducteur et isolant (ou diélectrique), dont la présentation relève du cadre d'un cours de physique du solide.

✦ **Isolant** ou diélectrique : les électrons sont fortement liés aux atomes, il n'y a pas des électrons libres. Lorsque une charge électrique est créée, elle ne peut pas se déplacer (bois, verre, papier ...).



Isolant: - charges à mobilité réduite;
- localisées en zone de production
- Ex.: bois, plastiques, air,

✦ **Conducteur** (liaison métallique) : toute charge créée sur un matériau se répartit sur la surface. Les électrons libres permettent le déplacement de cette charge.



Conducteur: - charges mobiles
- se répartissent uniformément (répulsion mutuelle)
- ex.: métaux

Remarque : Les gaz sont formés de molécules neutres, ce sont des isolants. Les gaz ionisés sont conducteurs.

✦ **Semi -conducteur**

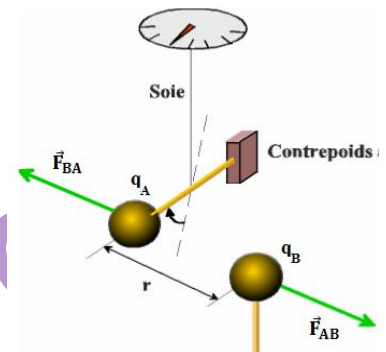
II- interactions électrostatiques: Loi de coulomb (Principe fondamentale de l'électrostatique)

Nous commencerons par l'analyse d'interaction électrostatique dans le cas de charges ponctuelles; ce n'est donc qu'une idéalisation mathématique d'un système physique. La généralisation de ces notions au cas d'une distribution continue de charges sera faite par la suite.

1- Mise en évidence : Expérience de Coulomb (1736 – 1806)

C'est en 1785, que le physicien français Charles Augustin Coulomb établit expérimentalement la loi donnant la force existant entre deux charges électriques.

Pour mesurer les forces, Coulomb se servit d'une balance de torsion dans laquelle un dispositif en forme de haltère constitué d'une petite sphère métallique de charge q_A et d'un contrepoids est suspendu à un fil de soie (voir figure).



Lorsqu'on approche de la sphère suspendue une autre sphère de charge q_B , la force de répulsion existant entre les deux sphères provoque la rotation de l'haltère et une torsion du fil de soie. A l'équilibre, la distance entre les deux sphères est r et la force exercée par le fil tordu compense exactement la force électrique F existant entre les deux sphères. La mesure de l'angle de torsion permet dès lors de déduire la valeur de la force électrique.

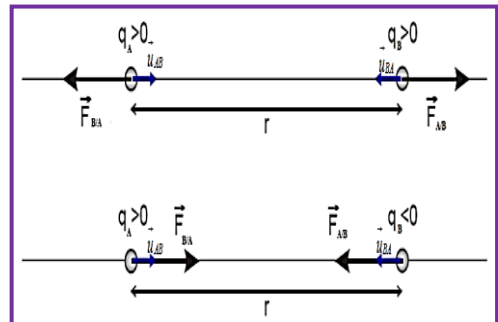
En faisant varier séparément la distance r et les charges q_A et q_B portées par les deux sphères, Coulomb a observé que la force électrique est proportionnelle à chacune des charges q_A et q_B et inversement proportionnelle au carré de la distance entre elles, ce qui se résume par :

$$F_{AB} \propto q_A$$

$$F_{BA} \propto q_B$$

$$F_{AB} F_{BA} \propto \frac{1}{r^2}$$

En d'autres termes : $\|\vec{F}_{AB}\| = F_{AB} = k \frac{|q_A \times q_B|}{r^2}$



Où k est une constante de proportionnalité qui dépend du choix d'unité. Dans le SI, k prend la valeur suivante :

$$\text{Avec } k \approx 9.10^9 \text{ (SI)}(\text{Nm}^2\text{C}^{-2})$$

Pour des raisons qui sortent du cadre de ce cours, cette constante est souvent écrite en fonction d'une autre constante ϵ_0 , qui est appelée permittivité du vide; elle est définie par la relation suivante : $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$

Ce qui permet de calculer sa valeur en fonction de celle de k . La permittivité du vide vaut :

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \times 10^9} = \frac{1}{4\pi k} \approx 8.85 \times 10^{-12} \text{ (SI)}(\text{C}^2/\text{Nm}^2)$$

ϵ_0 : Constante universelle appelée constante diélectrique ou permittivité électrique du vide.

Dans ses expériences Charles Auguste de Coulomb en 1785 a mise en évidence :

- a- La force est radiale, c'est à dire dirigée selon la droite qui joint les deux charges ;
- b- Elle est proportionnelle au produit des charges : attractive si elles sont de signe opposé, répulsive sinon;
- c- Enfin, cette force varie comme l'inverse du carré de la distance entre les deux charges.

On remarquera l'analogie qui existe entre la loi de Coulomb et la loi de la gravitation universelle. Les charges électriques jouent ici le rôle des masses.

L'expression de la force de coulomb donne le module de la force qui existe entre deux charges électriques. Le vecteur force électrique est dirigé suivant la droite qui relie les charges q_A et q_B , vers l'autre charge si les charges sont de signes opposés, dans le sens contraire si les charges sont de même signe (voir figure).

a- Charges de signes opposés : $q_A \times q_B < 0 \rightarrow$ attraction

b- Charges de même signe : $q_A \times q_B > 0 \rightarrow$ répulsion

En accord avec la troisième loi de Newton, on a : $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$

où \vec{F}_{AB} est la force exercée par q_B sur q_A et \vec{F}_{BA} , la force exercée par q_A sur q_B .

La loi de Coulomb peut s'exprimer sous forme vectorielle de la manière suivante :

$$\vec{F}_{AB} = K \frac{q_A \times q_B}{r^2} \vec{u}_{AB} \quad \text{avec } r = \|\overline{AB}\| \quad \text{et } \vec{u}_{AB} \text{ est le vecteur unitaire } \overline{AB}.$$

2- Enoncé de la loi de Coulomb

Comme on vient de le voir, deux particules (ou corps) chargées sont en interaction. On appelle force de Coulomb la force qui s'exerce entre deux charges fixes q_A et q_B séparées par une distance r , on modélise l'effet de q_A et q_B comme suit:

$$\vec{F}_{AB} = k \frac{q_A \times q_B}{r^2} \vec{u}_{AB} \quad \text{avec } r = \|\overline{AB}\| \quad \text{et } \vec{u}_{AB} \text{ est le vecteur unitaire } \overline{AB}.$$

L'intensité de la force :

$$\|\vec{F}_{AB}\| = F_{AB} = k \frac{|q_A \times q_B|}{r^2}, \quad \text{Avec } k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9.10^9 \text{ (SI)(Nm}^2\text{C}^{-2}\text{)}$$

$$\text{Ou } \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \times 10^9} \approx 8.85 \times 10^{-12} \text{ (SI)}$$

D'après le principe de l'action et de la réaction, on modélise l'effet de q_B et q_A comme suit:

$$\vec{F}_{BA} = k \frac{q_A \times q_B}{r^2} \vec{u}_{BA} = -\vec{F}_{AB}$$

On note que : $\vec{u}_{BA} = -\vec{u}_{AB}$

3- Validité de la loi de Coulomb

La loi de Coulomb est valable pour des charges au repos ou à la limite en mouvement relatif lent, sinon apparition des forces électromagnétiques. Elle est aussi valable dans le vide et approximativement dans l'air.

La loi de Coulomb reste valable pour les très grandes distances dans le domaine microscopique ; jusqu'à 10^{-15} m, ordre de grandeur des dimensions du noyau atomique.

Cette loi n'est pas valable pour des distances inférieures à 10^{-15} m (dimension du noyau atomique). Dans ce dernier cas ($r < 10^{-15}$ m), il sera nécessaire de faire appel à la mécanique quantique pour l'étude du comportement des particules sous l'effet des forces coulombiennes.

Dans d'autres milieux linéaires homogènes et isotropes (l.h.i.), l'interaction électrostatique est bien décrite par la loi de Coulomb à condition de remplacer ϵ_0 par une constante ϵ différente qui tient compte de l'influence du milieu (ses caractéristiques électriques). ϵ s'appelle la permittivité diélectrique du milieu et l'on pose dans ce cas $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ où ϵ_r est la permittivité diélectrique relative du milieu (quantité sans dimension).

4- Analogie avec l'interaction de gravitation

Deux points matériels de masse m_A et m_B , placés respectivement en M_A et M_B exercent l'un sur l'autre une force de gravitation ; la force $\vec{F}_{AB}(g)$ exercée par m_A sur m_B est :

$$\vec{F}_{AB}(g) = -G \frac{m_A \times m_B}{r^2} \vec{u}_{AB}$$

Où G est la constante de gravitation universelle.

La force de gravitation à la même formulation mathématique que la force électrostatique : elle est portée par la droite qui joint les masses m_A et m_B et inversement proportionnelle au carré de la distance qui sépare les deux masses, mais elle est toujours attractive.

D'après le cours de mécanique du point, la force de gravitation joue un rôle fondamental dans la mécanique des objets macroscopiques et dans la dynamique céleste. Cependant, à l'échelle atomique et subatomique, la force de gravitation est négligeable.

Comparaison de la force électrostatique à la force d'attraction universelle

A titre d'exemple, comparons la force de gravitation qui s'exerce entre l'électron et le proton d'un atome d'hydrogène à la force électrostatique s'exerçant entre eux. La distance r qui sépare l'électron de masse $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg du proton de masse $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27}$ kg est environ $5 \cdot 10^{-11}$ m.

$$\|\vec{F}_e\| = F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(5 \times 10^{-11})^2} = 9 \times 10^{-8} \text{ N}$$

$$\|\vec{F}_g\| = F_g = G \frac{m_e \times m_p}{r^2} = 6.7 \times 10^{-11} \frac{(9.11 \times 10^{-31}) \times (1.7 \times 10^{-27})}{(5 \times 10^{-11})^2} = 4 \times 10^{-47} \text{ N}$$

Avec $G = 6.67 \times 10^{-11}$ (SI)

$$\frac{F_e}{F_g} = 2.25 \times 10^{39} \quad \Leftrightarrow \quad F_e = 2.25 \times 10^{39} F_g$$

La force électrostatique est 10^{39} fois supérieure à la force de gravitation. On peut alors s'étonner du fait que dans notre vie quotidienne, nous ne ressentons pas de manifestations de ces forces énormes d'origine électrique.

5- Principe de superposition (Force électrostatique exercée par un ensemble de charges sur une charge q)

Considérons trois charges ponctuelles q_1 , q_2 et q fixées respectivement en P_1 , P_2 et M (Figure 2).

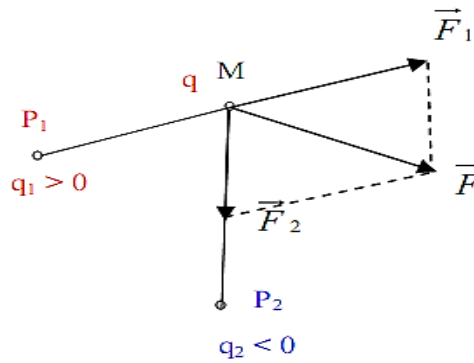


Figure 2

Quelle est la force \vec{F} que subit la charge q placée en présence des charges q_1 et q_2 ?

La loi de Coulomb permet de calculer la force \vec{F}_1 subie par la charge q lorsqu'elle est uniquement en présence de q_1 . On peut de la même manière calculer \vec{F}_2 , force subie par q lorsque seule q_2 est en présence de la charge q .

L'expérience montre que la force \vec{F} subit par q lorsqu'elle est en présence des deux charges q_1 et q_2 est la somme vectorielle des forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 :

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \frac{q q_1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{\|\overrightarrow{P_1M}\|^2} \vec{u}_1 + \frac{q q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{\|\overrightarrow{P_2M}\|^2} \vec{u}_2 = \frac{q q_1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\overrightarrow{P_1M}}{\|\overrightarrow{P_1M}\|^3} + \frac{q q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\overrightarrow{P_2M}}{\|\overrightarrow{P_2M}\|^3}$$

Avec $\vec{u}_1 = \frac{\overrightarrow{P_1M}}{\|\overrightarrow{P_1M}\|}$ et $\vec{u}_2 = \frac{\overrightarrow{P_2M}}{\|\overrightarrow{P_2M}\|}$

Ce résultat est vérifié quel que soit le nombre de charges en présence. La force \vec{F} subie une charge q placée en M , en présence de n charges $q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n$ fixes en $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$ est la somme vectorielle des forces dues à l'interaction de chacune des charges avec q , calculées séparément :

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^{i=n} \vec{F}_i = q \sum_{i=1}^{i=n} \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{u}_i}{\|\overrightarrow{P_iM}\|^2} = q \sum_{i=1}^{i=n} \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0} \frac{\overrightarrow{P_iM}}{\|\overrightarrow{P_iM}\|^3} \quad (***)$$

Cette expression exprime le principe de superposition. La force totale \vec{F} due à un ensemble de charges est la somme vectorielle de l'effet de chaque charge prise individuellement. Ce qui suppose que la force s'exerçant entre deux charges n'est pas modifiée par la présence d'une troisième charge. Il y a donc indépendance des effets : la solution est simplement la somme des solutions calculées pour chaque couple de charges. Il en résulte que les équations de l'électrostatique sont des équations linéaires.

Cependant, il ne faut pas en déduire que c'est un principe général en physique. En effet, le principe de superposition ne s'applique pas toujours; par exemple, dans le domaine atomique ou subatomique, des effets quantiques de nature électromagnétique, non linéaires peuvent apparaître.