

Chapitre 1 : Charge et Force électriques

I.1 Phénomènes d'électrisation

I.1.1 Les débuts de l'électrostatique

Les phénomènes électrostatiques sont connus depuis l'antiquité grecque : Thalès de Milet au VI^e avant J.C. rapporte que l'ambre jaune frotté attire les corps légers, du duvet ou les brindilles de paille par exemple.

L'étude des phénomènes électriques s'est continuée jusqu'au XIX^e siècle, où s'est élaborée la théorie unifiée des phénomènes électriques et magnétiques, appelée électromagnétisme.

On ce qui ce suit nous donnons les grandes étapes d'évolution de la théorie d'électricité:

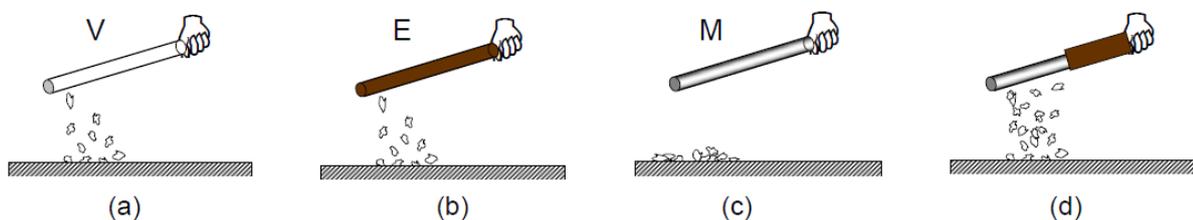
- en 1663, Otto von Guericke invente une machine constituée d'un globe de soufre en rotation autour d'un axe et frotté à la main, produisant ainsi des décharges électriques. Toutes sortes de machines de plus en plus élaborées sont inventées sur ce principe jusqu'au XIX^e siècle.
- en 1730, Stephen Gray, teinturier de son métier et physicien par curiosité intellectuelle, établit la distinction entre conducteur et isolant et établit des listes de corps ayant l'un ou l'autre de ces comportements.
- en 1733, Charles-François du Fay (ou Dufay) remarque que deux corps légers mis en contact avec de l'ambre frotté se repoussent, que deux corps légers mis en contact avec du verre frotté se repoussent mais que deux corps légers mis en contact avec l'un avec de l'ambre frotté et l'autre du verre frotté s'attirent. Il en déduit qu'il y a deux sortes d'électricité rapidement appelées positive et négative.
- en 1745, Pieter van Musschenbroek et quelques autres inventent la bouteille de Leyde 4, ancêtre du condensateur, utilisée d'abord dans les foires pour donner des décharges électriques au public !
- vers 1750 : découverte de l'influence électrique (voir chapitre C-II) et invention de nombreuses machines sur ce principe, de l'électrophore de Volta (1775) à la machine de Wimshurst (1878) puis celle de Van de Graaff (1930) pour ne citer que les plus connues.
- puis commence la mise en forme de la théorie grâce à Benjamin Franklin, Joseph Priestley (loi en $1/r^2$), Henry Cavendish (conservation de la charge, découverte de la localisation des charges en surface) et enfin Coulomb qui énonce la loi qui porte son nom et la vérifie expérimentalement en 1785.

I.1.2 Types d'électrisation

a. *Electrisation par frottement*

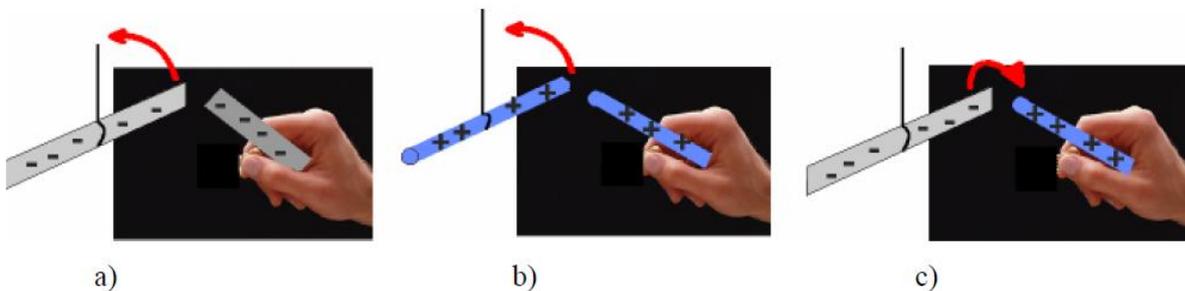
Une tige en verre, frottée par un morceau de drap en soie ou en laine, tenue à la main, peut attirer de petits morceaux de papier (figure I.1.a). On dit que le verre a été *électrisé*, ce phénomène est appelé *électrisation*. Le même phénomène est observé si on remplace la tige en verre par un bâton d'ébonite (figure I.1.b).

Si on répète l'expérience précédente en remplaçant la tige de verre par une tige métallique, en cuivre par exemple, on n'obtient aucun résultat (figure I.1.c), si la tige est tenue à la main. Par contre si on la tient, par l'intermédiaire d'un manche en bois, on constate que des forces d'attraction se produisent sur toute la surface du métal (figure I.1.d).



Figures I. 1

Les deux types d'électricité



Figures I.2

Suspendons, en son milieu, une règle d'ébonite dont une extrémité a été électrisée par frottement. Approchons de cette extrémité la partie électrisée, par la même méthode, d'un second bâton d'ébonite (figure I(a)). L'interaction de ces parties électrisées se traduit par une répulsion. Répétons la même expérience, en remplaçant les règles d'ébonite par des règles de verre électrisées comme précédemment (figure I(b)). Là encore l'interaction se traduit par une répulsion.

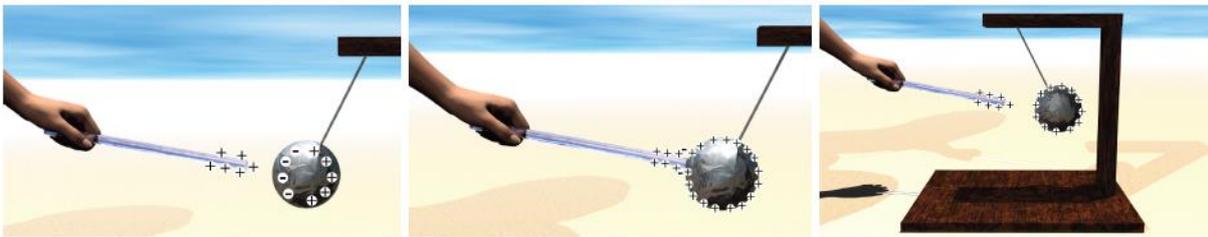
Dans une troisième expérience, on met en présence l'extrémité électrisée de la règle d'ébonite et celle du de verre électrisée (figure I(c)). Il en résulte, à présent, une attraction.

Clairement, il existe deux types d'électricité différentes, celle qui apparaît sur une règle en plastique frottée et celle qui apparaît sur une tige en verre frottée.

Tous les matériaux peuvent être rangés en deux catégories. Une fois frottés, soit ils attirent une tige en verre et repoussent une règle en plastique, soit l'inverse. Benjamin Franklin a proposé de distinguer ces deux types de charge électrique par leur signe positif et négatif. *Il a choisi arbitrairement de donner le signe + aux charges électriques portées par une tige en verre frottée et le signe -, aux charges portées par une règle en plastique.*

b. Electrification par Influence

Que se passe-t-il lorsqu'on approche deux corps électrisés l'un de l'autre ? Réalisons l'expérience suivante :



Figures I.3

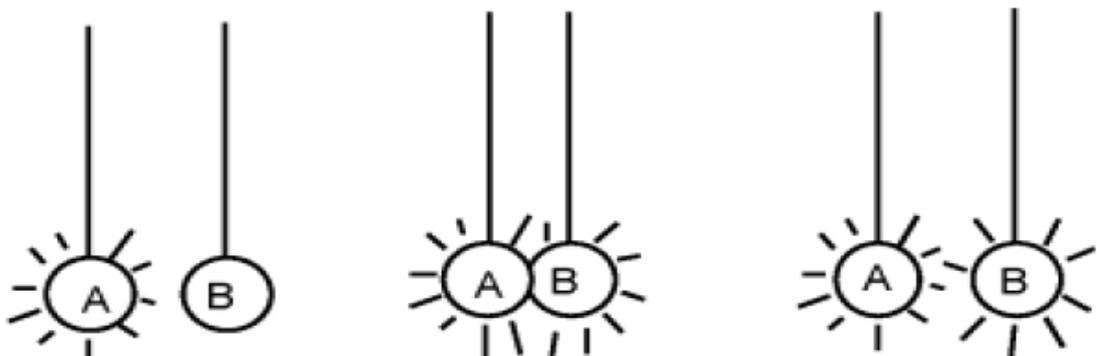
On approche un objet (bâton) isolant chargé positivement d'un objet isolé conducteur initialement neutre (non chargé), comme une sphère métallique suspendue à un fil isolant.

Les charges négatives (les électrons) vont être attirées vers le bâton et laissent derrière elles les atomes ionisés du cristal. Ces atomes ionisés sont chargés positivement puisque le matériau est neutre au départ. La boule va être attirée vers le bâton (Figure I. 3(a)).

Si le bâton touche la boule, cette dernière va se charger à la même charge du bâton et par conséquent ils vont se repousser Figure I. 3(b et c)).

c. Electrification par contact

L'électrification peut être transmise d'un corps à un autre par contact. Une expérience simple peut être effectuée à l'aide de deux boules métalliques suspendues par des fils de nylon. Si au départ, l'une est électrisée et pas l'autre, la mise en contact des deux boules les rend électrisées toutes deux.



Figures I.4

d. Electrification par une source (Electrocinétique)

Elle se fait au moyen d'un générateur électrique. Si on relie à l'aide d'un fil conducteur un corps électrisable à un générateur électrique, celui-ci s'électrise et portera une charge de même signe que celle de la borne du générateur auquel il est branché.

I.1.3 La charge électrique

a. Définition

La charge électrique est une propriété fondamentale de la matière qui permet d'expliquer certains phénomènes (électrostatique, électrocinétique, électromagnétisme,...).

La charge électrique, qui caractérise le phénomène d'électrification, ne peut être dissociée de la matière. Elle existe sous deux formes, qualifiées de *positive* et de *negative*. Les corps portant le même type de charge se repoussent par contre, les corps portant des charges de type différent s'attirent.

b. Quantification de la charge électrique

Le physicien américain Robert A. Millikan a montré en 1913, à partir d'une expérience mettant en jeu des gouttes d'huile électrisées, le fait que toute charge électrique q est quantifiée, c'est à dire qu'elle n'existe que sous forme de multiples entier n d'une charge élémentaire indivisible e :

$$q = \pm ne$$

Où : $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$ (C'est la charge électrique portée par l'électron et le proton).

C'est le "Coulomb", l'unité de charge électrique dans le système international.

c. Conservation de la charge électrique

C'est un principe dont le sens est que la charge ne s'annihile pas et ne se crée pas. Elle est donc constante dans un système isolé.

Principe de conservation de la charge électrique :

Dans un système isolé la somme algébrique des charges électriques reste constante.

I.1.4 Structure de la matière

La vision moderne de la matière décrit celle-ci comme étant constituée d'atomes. Un atome est constitué d'un noyau (découvert en 1911 par Rutherford) formé par de protons chargés positivement et des neutrons sans charge. Celui-ci est entouré par un nuage composé d'électrons de charge négative. Ces électrons se repoussent les uns les autres mais restent confinés autour du noyau car celui-ci possède une charge électrique positive qui les attire.

Dans le tableau de Mendeleïev tout élément chimique X est représenté par la notation. ${}^A_Z X$. 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.

I.1.5 Matériaux isolants et matériaux conducteurs

On peut classer les matériaux selon la capacité qu'ils ont de permettre le passage des charges.

– Matériau conducteur : C'est un matériau dans lequel les charges en excès peuvent se déplacer librement. Ceci parce que les atomes du matériau sont liés entre eux mais les électrons des couches atomiques périphériques sont faiblement liés alors avec une très faible énergie d'excitation (fournie par l'agitation thermique) les électrons des couches périphériques se libèrent.

– Matériau isolant : c'est un matériau dans lequel les charges en excès ne peuvent pas se déplacer et restent localisés à l'endroit où ils ont été déposés. Dans ce type de matériau, les électrons périphériques sont très liés aux noyaux et ne peuvent pas former de "gaz". Il leur est très difficile de bouger. La densité d'électrons libres est alors quasi nulle. Un diélectrique est un isolant.

–Un matériau quelconque se situe évidemment quelque part entre ces deux états extrêmes.

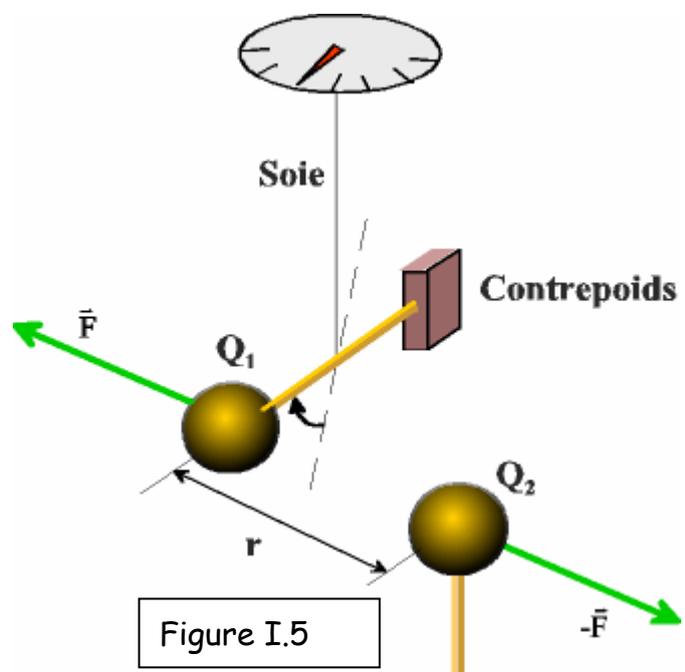
I.1.6 Loi de Coulomb

En 1785, 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_1 et d'un contrepois est suspendu à un fil de soie (voir figure I.5).

a- Enoncé de la loi de Coulomb

Considérons **dans le vide**, deux **charges ponctuelles** q_1 et q_2 , **fixées** en M_1 et M_2 . Les deux charges **stationnaires** q_1 et q_2 exercent l'une sur l'autre une force proportionnelle à chacune des charges et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. La force électrostatique est dirigée suivant la droite qui joint les charges (figure I-6). Elle attractive si les charges sont de signes contraires (figure I-6-a), répulsive lorsque les charges sont de même signe (figure I-6-b).



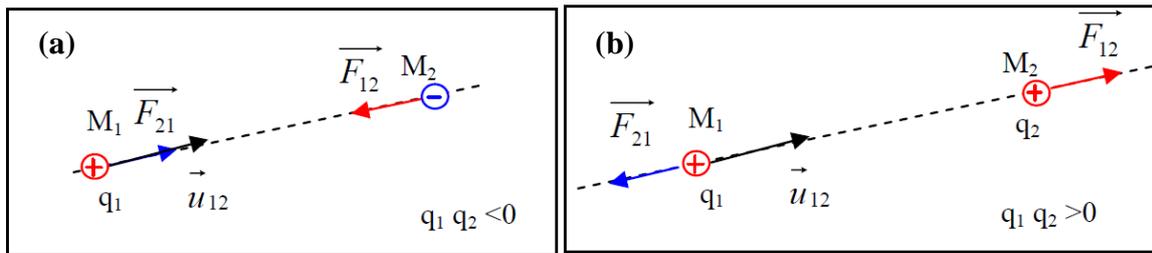


Figure I.6

La force F_{12} exercée par q_1 sur la charge q_2 s'écrit :

$$\vec{F}_{12} = \frac{kq_1q_2}{r^2} \vec{u}_{12}$$

où $r = \|\overrightarrow{M_1M_2}\|$ est la distance entre q_1 et q_2 et \vec{u}_{12} le vecteur unitaire dirigé de M_1 vers M_2 et défini par :

$$\vec{u}_{12} = \frac{\overrightarrow{M_1M_2}}{\|\overrightarrow{M_1M_2}\|} = \frac{\overrightarrow{M_1M_2}}{r}$$

Conformément au principe de l'action et de la réaction, la force \vec{F}_{21} exercée par q_2 sur la charge q_1 est égale et opposée à \vec{F}_{12} , donc, $\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$

La constante de proportionnalité est liée aux unités choisies pour exprimer la force, la longueur et la charge. Dans le système d'unités international (S.I.), sous sa forme rationalisée, K s'écrit :

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ volt.m/C}$$

Où ϵ_0 est la permittivité du vide et a pour valeur :

$$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$$

Remarque : La loi de Coulomb est :

- Proportionnelle au produit des charges
- Inversement proportionnelle au carré de la distance séparant les charges
- Dirigée parallèlement à M_1M_2
- Elle est attractive si les 2 charges sont de signe contraire et répulsive si les 2 charges sont de même signe.

Exemple :

Comparer 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 $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ du proton de masse $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ est environ $5 \cdot 10^{-11} \text{ m}$.

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

$$\|\vec{F}_{gr}\| = G \frac{m_e m_p}{r^2} = 6.71 \cdot 10^{-11} \frac{9.1 \cdot 10^{-31} * 1.7 \cdot 10^{-27}}{(5 \cdot 10^{-11})^2} = 41 \cdot 10^{-47} N$$

$$\frac{\|\vec{F}_{el}\|}{\|\vec{F}_{gr}\|} = 10^{39}$$

A l'échelle atomique les forces gravitationnelles sont négligeables devant les forces électrostatiques.

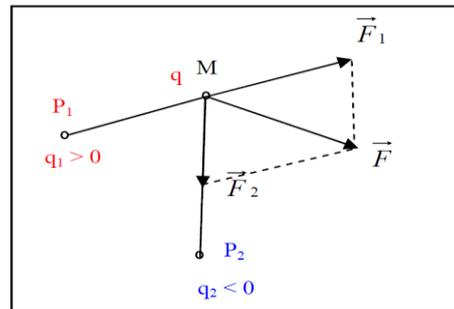
b- Principe De Superposition

Considérons trois charges ponctuelles q_1 , q_2 et q **fixées** respectivement en P_1 , P_2 et M (Figure I-7).

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 .

De la même manière on peut calculer \vec{F}_2 , force subie par la charge q lorsqu'elle est uniquement en présence de q_2 .



par la
On
q

Figure I.7

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

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \frac{kq_1q}{\|p_1M\|^2} \vec{u}_1 + \frac{kq_2q}{\|p_2M\|^2} \vec{u}_2$$

En général si on dispose de n charges ponctuelles q, q_1, q_2, \dots, q_n , la force électrostatique appliquée sur q par les autres charges est donnée par :

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \sum_{i=1}^n \frac{kq_iq}{\|p_iM\|^2} \vec{u}_i$$

Exercice :

Quatre charges ponctuelles identiques $-q$ ($q > 0$) sont fixées aux sommets A, B, C et D d'un carré de côté a . Une cinquième charge $q_0 > 0$ est maintenue fixe au centre O du carré.

Déterminer la valeur de q_0 en fonction de q pour que la force électrostatique totale qui s'exerce sur chacune des cinq charges soit nulle.