CHAPITRE 1
L'ÉLECTROSTATIQUE

1.1 Introduction

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

- l'électrostatique qui est l'étude des effets électriques créés par des charges au repos;
- l'électromagnétisme qui est l'étude des phénomènes électriques et magnétiques (les phénomènes magnétiques impliquent généralement des charges électriques en mouvement).

1.2 La charge électrique

On distingue deux types de charges électriques: les charges positives et les charges négatives. L'expérience montre clairement que :

- les charges de même signe se repoussent ;
- les charges de signes contraires s'attirent.

La matière est constituée d'atomes (de rayon $\approx 10^{-10}$ m), chaque atome étant formé d'un noyau compact (de rayon $\approx 10^{-15}$ m) contenant des protons de charge positive et des neutrons électriquement neutres dont le rôle est essentiel à la stabilité des noyaux. Autour du noyau, des électrons de charges négatives constituent des nuages de formes diverses. Un atome neutre possède un même nombre d'électrons et de protons. Par conséquent, la matière est électriquement neutre.

On peut charger un corps entre autres par frottement. La proportion des atomes de la surface d'un corps qui perdent ou gagnent un électron est de l'ordre de 1 sur 10^5.

L'unité de la charge électrique est le coulomb (C)

La charge électrique n'existe qu'en quantités discrètes : **elle est quantifiée**. Dans le cadre de ce cours, la grandeur de la charge élémentaire est celle de l'électron :

$$\mathbf{e = 1{,}6 \times 10^{-19}\ C}$$

Dire que la charge est quantifiée équivaut à affirmer que toute charge électrique Q s'exprime comme un multiple entier de e :

Q = n e   où n est un entier

L'un des principes fondamentaux qui concerne la charge électrique est celui de la conservation de la charge qui s'applique aux **systèmes isolés** :

La charge totale d'un système isolé reste constante

1.3 Conducteurs et isolants

Un **conducteur** est un matériau comportant une certaine concentration d'électrons libres susceptibles de se déplacer facilement sous l'effet d'un champ électrique (pour créer un courant, par exemple). Les métaux et les solutions ioniques sont des milieux conducteurs. Un gaz ionisé peut également être considéré comme un milieu conducteur.

Dans un **isolant**, il y a très peu d'électrons libres. Ils sont fortement liés à des sites moléculaires donnés (contrairement à un bon conducteur) et il faut leur donner beaucoup d'énergie pour les libérer et générer un courant électrique. Le caoutchouc, les plastiques, le verre, la soie et le bois sont des isolants.

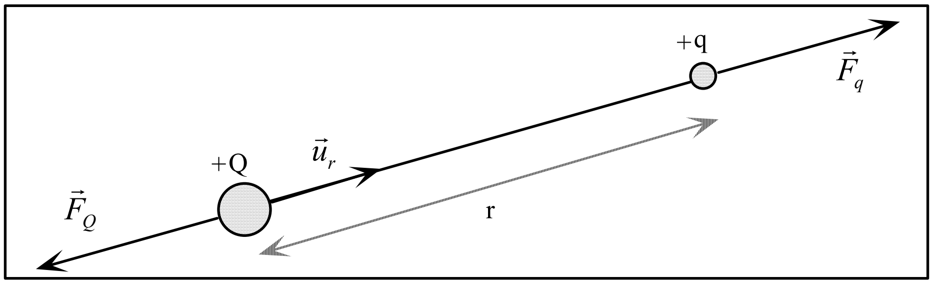
Remarque : La quantité d'électrons libres est précisément ce qui distingue les conducteurs des isolants

Un **semi-conducteur** se comporte comme un isolant lorsqu'il est très pur, mais on peut modifier son pouvoir conducteur en le dopant, c'est-à-dire en y ajoutant des impuretés dans des proportions bien déterminées. Le germanium, le coabone et le silicium sont des semi-conducteurs.

1.4 Loi de Coulomb

La loi de Coulomb exprime la force entre 2 charges <u>ponctuelles</u> ou que l'on peut considérer comme telles. Il a fait la démonstration expérimentale que cette force est inversement proportionnelle au carré de la distance entre elles. Sa connaissance de la loi d'attraction gravitationnelle entre deux masses l'a amené à déduire que cette force était proportionnelle au produit des charges en présence. De toute façon, il n'était pas possible de mesurer précisément une charge électrique à cette époque.

Dans la figure, on a illustré le cas de 2 charges ponctuelles, la charge source $+ Q$ et la charge témoin $+ q$. Tel qu'illustré, les forces sur les charges sont répulsives dans ce cas.



$$\begin{cases} \vec{F}_q = k\dfrac{qQ}{r^2}\vec{u}_r \\ \vec{F}_Q = -k\dfrac{qQ}{r^2}\vec{u}_r \end{cases} \qquad \text{et} \qquad \vec{F}_Q = -\vec{F}_q$$

Dans l'expression des forces, la valeur de la constante k est

$$k = 9 \times 10^9 \quad (\mathrm{N \cdot m^2 / C^2})$$

Elle s'exprime souvent sous la forme

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

où

$$\varepsilon_o = 8{,}85 \times 10^{-12} \quad \left(\frac{\mathrm{C^2}}{\mathrm{N \cdot m^2}}\right)$$

est la constante de permittivité du vide.

La comparaison entre les forces électrique et gravitationnelle entre un électron et un proton dans le cas de l'atome d'hydrogène révèle que la force électrique est très nettement dominante. C'est cette force qui explique la stabilité des atomes, du moins en ce qui concerne la liaison entre les électrons et le noyau. Dans les applications concernant les faisceaux de particules chargées (électron, proton, particule alpha), la force électrique sera également dominante, de sorte qu'on pourra négliger la force gravitationnelle

D'autre part, si on calcule la force électrique entre deux protons situés de part et d'autre du diamètre d'un noyau d'atome de fer, on trouve environ *10 N*, ce qui est considérable étant donné la masse des protons (1.67×10^{-27} kg). Le noyau devrait donc éclater sous l'effet des forces électriques de répulsion entre les protons. Pour expliquer la stabilité des noyaux, on est naturellement amené à postuler l'existence des forces nucléaires (c'est l'une des conséquences directes de l'interprétation de la loi de Coulomb dans le contexte des noyaux des atomes). L'ordre de grandeur de cette force est d'environ 100 fois celle de Coulomb, ce qui explique la stabilité des noyaux des atomes. Les neutrons jouent un rôle important dans cette force.

1.5 Le principe de superposition

On utilise le principe de superposition pour calculer la force résultante sur une charge témoin q due à un ensemble de charges sources $Q_1, Q_2, \ldots\ldots, Q_i, \ldots., Q_n$.

La force sur q due à Q_i est donnée par :

$$\vec{F}_{q,Q_i} = k\frac{qQ_i}{r_i^2}\vec{u}_{r_i}$$

Or, le principe de superposition s'applique aux forces, en particulier pour le calcul de la force résultante, d'où :

$$\vec{F}_q = \sum_{i=1}^{n}\vec{F}_{q,Q_i} = \sum_{i=1}^{n}k\frac{qQ_i}{r_i^2}\vec{u}_{r_i}$$

Dans la plupart des exercices du livre de référence, il faut se donner un système d'axes de référence pour exprimer les composantes de chacune des forces et ensuite obtenir l'expression vectorielle de la force résultante sur une charge donnée. Lire les exemples 1.1, 1.2, et 1.3 du livre de référence.

1.6 Exercices à faire dans le chapitre 1 du livre de référence

(Nouvelle ou ancienne édition)

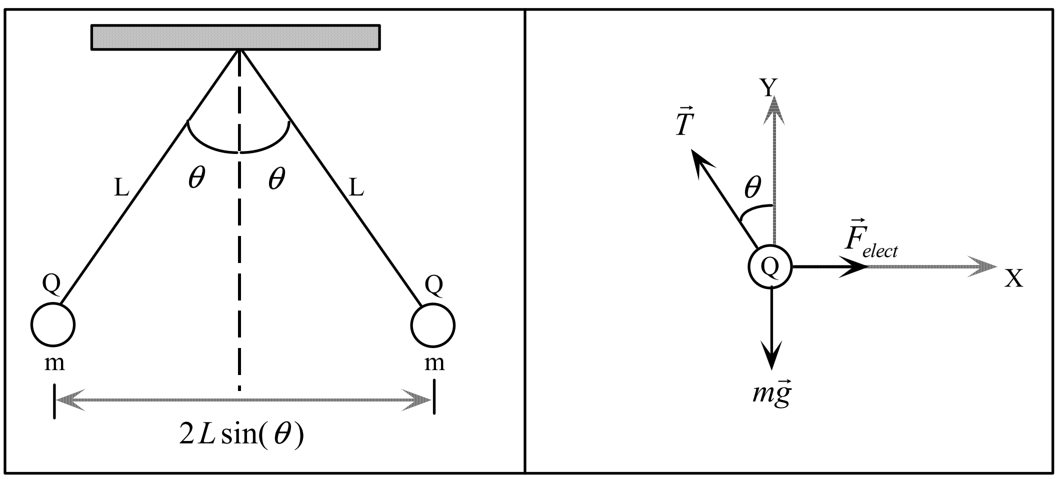
Exercices # 3, 5,10,11,12,16

Problèmes : 3, 6 et 10

1.7 Exercices résolus

Exercices 1-12

Les 2 sphères de la figure de gauche de la figure qui suit sont faites de matière isolante, identiques, de charges égales Q et de masses égales m. Du fait de leurs charges, celles-ci se repoussent de sorte que les fils de longueur L qui les retiennent font un angle θ avec la verticale. On demande l'expression de la charge Q des 2 sphères en fonction des autres paramètres (θ, m, L), sachant qu'elles sont en équilibre tel qu'illustré dans la figure de gauche.



Solution

La somme des forces sur chacune des sphères est nulle. Celles-ci sont représentées dans la figure de droite. Les conditions d'équilibre exprimées dans le système d'axes illustrés donnent les relations suivantes :

$$\begin{cases} \text{en X} : F_{elect} - T\sin(\theta) = 0 \\ \text{en Y} : T\cos(\theta) - mg = 0 \end{cases} \Rightarrow \left\{ \frac{T\sin(\theta)}{T\cos(\theta)} = \frac{F_{elect}}{mg} \right.$$

De ces relations, on tire donc

$$\tan(\theta) = \frac{F_{elect}}{mg}$$

D'autres part, la loi de Coulomb permet d'exprimer la force électrique entre les sphères :

$$F_{elect} = \frac{kQ^2}{\left(2L\sin(\theta)\right)^2}$$

Des 2 dernières égalités, on obtient le résultat cherché :

$$\begin{cases} \tan(\theta) = \dfrac{F_{elect}}{mg} \\ F_{elect} = \dfrac{kQ^2}{\left(2L\sin(\theta)\right)^2} \end{cases} \Rightarrow \quad \frac{kQ^2}{\left(2L\sin(\theta)\right)^2} = mg\tan(\theta)$$

$$\Rightarrow \qquad Q = \pm\sqrt{\frac{4L^2\sin^2(\theta)mg\tan(\theta)}{k}}$$

Problème 1.6

Deux petites sphères métalliques identiques et distantes de 3 cm s'attirent l'une l'autre avec une force de 150 N. On les relie provisoirement par un petit fil conducteur. Si elles se repoussent maintenant avec une force de 10 N, déterminez la charge initiale sur chacune des sphères.

On suppose que la charge est uniformément répartie sur les petites sphères.

Avant de mettre les sphères en contact, la force est attractive de sorte que le produit des charges est négatif. Alors, la loi de Coulomb permet de produire l'égalité suivante :

$$\frac{k\,Q_1\,Q_2}{d^2} = -150 \qquad (1)$$

où d = 0,03 m .

Après le contact, la charge sur chacune des sphères est égale du fait que les 2 sphères sont identiques. La charge sur chacune est donnée par :

$$Q_1^{'} = Q_2^{'} = \frac{Q_1 + Q_2}{2} \qquad (2)$$

Sachant que la force est alors attractive et valant 10 N, l'application de la loi de Coulomb donne l'égalité

$$\frac{k\left(\dfrac{Q_1+Q_2}{2}\right)^2}{d^2}=10 \qquad (3)$$

où d = 0,03 m .

Les équations (1) et (3) peuvent être résolues pour déterminer la valeur de la charge initiale sur chacune des sphères (Q_1 et Q_2). Il suffit d'isoler Q_2 dans (1) et substituer dans (3) pour trouver une équation quadratique en Q_1. Par suite, on trouve :

$$\begin{cases} Q_1 = \pm 3\ \mu C \quad \text{avec } Q_2 = \mp 5\ \mu C \\ \text{ou} \\ Q_1 = \pm 5\ \mu C \quad \text{avec } Q_2 = \mp 3\ \mu C \end{cases}$$