

CHAPITRE IV : La charge électrique et la loi de Coulomb

IV.1 : La Force électrique

Si on frotte vigoureusement deux règles en plastique avec un chiffon, celles-ci se repoussent. On peut le constater en en suspendant une à un fil par son milieu, ce qui lui permet de tourner librement (voir figure IV.1.a).

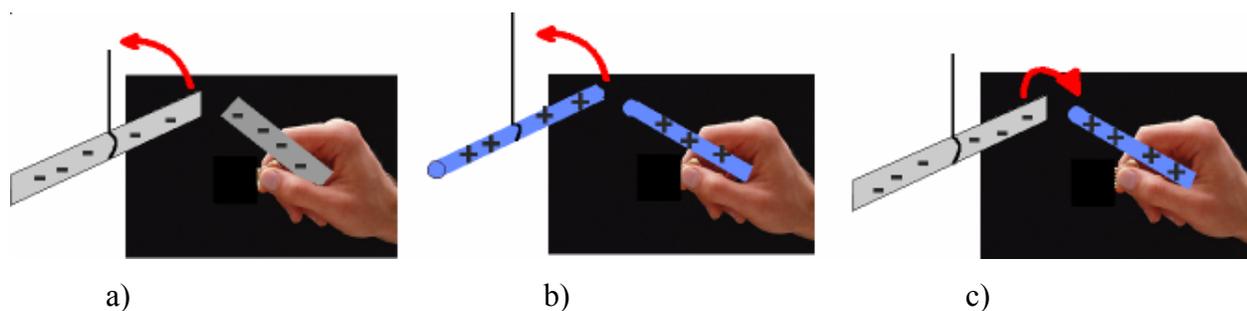


Figure IV.1.

L'extrémité de l'autre règle est approchée de la règle mobile en la tenant à la main. De même lorsqu'on approche deux tiges de verre frottées de la même manière, elles se repoussent aussi. Par contre lorsqu'on approche celle de verre de celle en plastique ou réciproquement, elles s'attirent (voir figure IV.1.b et IV.1.c).

La force qui entre en jeu dans l'expérience décrite ci-dessus est une force différente de la force gravitationnelle pour trois raisons. D'abord, elle est tantôt attractive, tantôt répulsive alors que la force gravitationnelle qui existe entre deux masses est toujours attractive. Ensuite, elle ne se produit entre les deux objets que s'ils sont frottés au préalable : leur seule masse ne suffit pas. Pour terminer, c'est une force beaucoup plus intense que la force gravitationnelle. La force gravitationnelle qui existe entre les règles ou les tiges est si faible qu'on ne l'observe pas. Lorsque les règles ou les tiges ne sont pas frottées, aucune attraction n'est observée. Cette nouvelle force est appelée force électrique.

IV.2 : La charge électrique

La force électrique ne se produit qu'entre deux objets qui ont une propriété particulière, qu'on appelle la charge électrique et qui apparaît notamment lorsqu'on frotte deux objets l'un contre l'autre.

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. On pourrait penser que pour d'autres matériaux, il existe d'autres types d'électricité qui serait attirée par les deux premières. Il n'en est rien : 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.

Les charges électriques de même signe se repoussent, celles de signe contraire s'attirent.

A l'heure actuelle, on explique aisément l'apparition d'une charge électrique sur un objet frotté en faisant appel à la structure atomique de la matière. La matière est constituée d'atomes (de rayon $\approx 10^{-10}$ m). Chaque atome comporte un noyau (de rayon $\approx 10^{-15}$ m) contenant des protons chargés positivement et des neutrons électriquement neutres. Des électrons, de même charge que les protons, en valeur absolue, mais de signe opposé, en nombre égal aux protons, forment la structure extérieure de l'atome. L'atome est donc électriquement neutre, les charges négatives des électrons compensant les charges positives des protons (voir figure IV.2).

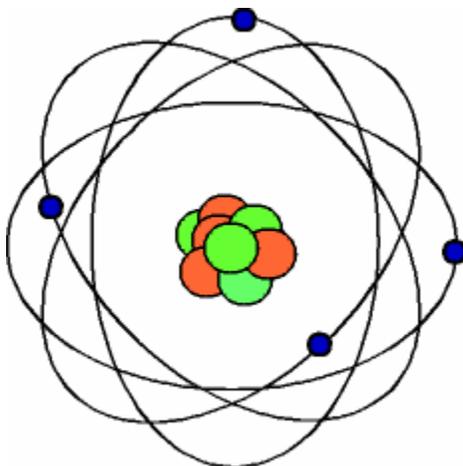


Figure IV.2.

Dans certaines circonstances et notamment lorsqu'il y a frottement ou même simplement contact avec un autre objet, certains atomes de la surface de contact peuvent perdre ou gagner quelques électrons qui sont cédés ou arrachés aux atomes de l'autre objet. Les atomes dont le nombre d'électrons n'est plus égal à celui des protons, sont appelés ions. Les ions ne sont pas électriquement neutres, ils sont soit positifs, soit négatifs, suivant qu'ils aient perdu ou gagné des électrons.

L'unité SI de charge est le coulomb (C). Elle est définie en fonction du courant électrique dont nous parlerons plus tard. Le coulomb correspond à une très grande quantité de charge : en général, la charge qui apparaît sur un corps frotté est de l'ordre de 10^{-8} C, alors que la foudre fait passer jusqu'à 20 C entre un nuage et la terre.

La plus petite charge électrique qu'on ait pu isoler jusqu'à présent est celle qui est portée par un proton et est désignée par e . Elle a été mesurée pour la première fois par Millikan en 1909 et vaut à peu près :

$$e \approx 1,602 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (\text{IV.1})$$

Les charges du proton et de l'électron valent donc :

$$q_p = + e \quad \text{et} \quad q_e = - e$$

IV.3 : La conservation de la charge

Lorsqu'on électrise la règle en plastique ou la tige en verre, il n'y a pas création de charges électriques. Seulement un certain nombre d'électrons passent du chiffon à la règle ou de la tige au chiffon. Il y a transfert de charges d'un objet à l'autre : si un objet acquiert une charge $+ Q$, l'autre acquiert une charge $- Q$. La somme des charges des deux objets reste nulle. Il s'agit d'un exemple de la loi de conservation de la charge électrique d'après laquelle :

La quantité nette de charge électrique produite au cours de n'importe quelle transformation est nulle.

Cette loi peut aussi s'exprimer sous la forme :

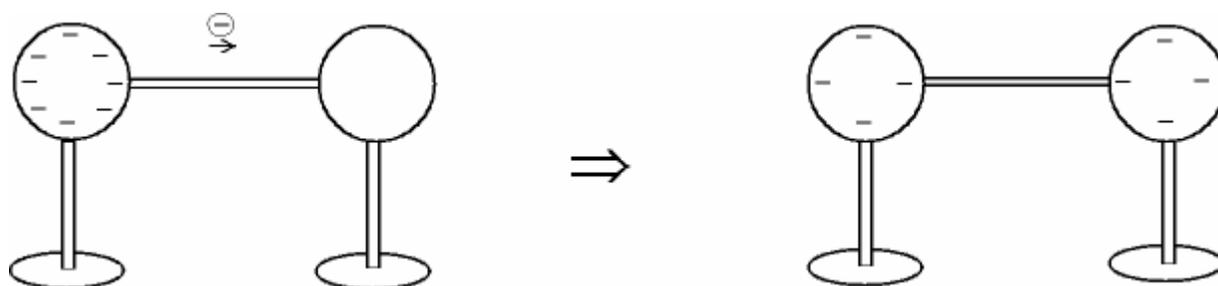
La charge électrique totale d'un système isolé reste constante.

Le terme "isolé" signifie qu'il n'existe pas de passage, tel un fil électrique ou de l'air humide, par lequel des charges pourraient entrer ou sortir du système.

IV.4 : Conducteurs et isolants

Lorsqu'on met une tige de fer en contact avec deux sphères métalliques, l'une dotée d'une forte charge électrique et l'autre neutre, on constate que la deuxième acquiert rapidement une charge électrique (voir figure IV.3a). Par contre, si on relie les deux sphères par une baguette en bois ou un ruban de caoutchouc, la sphère neutre reste neutre et la sphère électrisée, garde sa charge (voir figure IV.3.b). On dit de matériaux comme le fer qu'ils sont conducteurs d'électricité tandis que ceux comme le bois ou le caoutchouc sont isolants.

a) Sphères métalliques reliées par une tige métallique.



b) Sphères métalliques reliées par un ruban de caoutchouc.



Figure IV.3.

A l'échelle atomique, on peut expliquer la différence entre conducteurs et isolants. Elle est due aux électrons de valence des atomes, ceux qui sont les plus éloignés du noyau et donc les moins liés. Dans un isolant comme le chlorure de sodium (Na Cl), l'électron de valence de l'atome de sodium (Na) est pris par l'atome de chlore (Cl). Les ions Na^+ et Cl^- forment entre eux

des liaisons ioniques qui conduisent à une structure cristalline dans laquelle chaque ion a une place bien déterminée (voir figure IV.4). Dans cette structure tous les électrons sont liés à un noyau particulier et ne peuvent se déplacer.

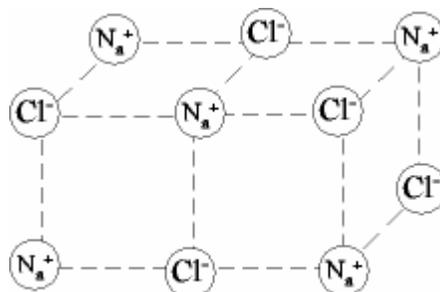


Figure IV.4.

Dans les conducteurs métalliques, un électron de valence par atome environ est très faiblement lié à un noyau et est par conséquent libre de se déplacer aisément d'un atome à l'autre. Un courant d'électrons peut s'établir, sous certaines conditions que nous verrons plus tard, et transporter une charge d'un endroit à l'autre. Dans une solution électrolytique, où certaines molécules sont dissociées en ions de charges opposées, ou dans un gaz ionisé, tous les ions, positifs ou négatifs, peuvent se déplacer aisément et conduire l'électricité.

Un troisième groupe de matériaux, que l'on appelle semi-conducteurs, sont très faiblement conducteurs à l'état pur et voient leur pouvoir conducteur augmenter lorsqu'on y ajoute des impuretés. Les principaux matériaux semi-conducteurs sont le silicium et le germanium. Leurs propriétés particulières sont largement exploitées dans les circuits électroniques qui seront étudiés dans un cours ultérieur.

IV.5 : Charge par conduction et par induction

Un objet peut être chargé par conduction, c'est-à-dire en le mettant en contact avec un objet chargé, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un conducteur, comme c'est le cas sur la figure IV.3.a.

Un objet métallique isolé peut aussi être chargé sans entrer en contact avec un corps chargé. Ce processus de charge sans contact est appelé induction. La figure IV.5 représente deux sphères métalliques A et B, posées sur des socles isolants. A la figure IV.5.a, elles sont en contact et forment de la sorte un seul conducteur. On approche de la sphère A une tige chargée

positivement, mais sans toucher la sphère. Les électrons libres du conducteur A + B sont attirés par la charge positive de la tige et tendent à s'accumuler sur la face gauche de A, ne pouvant rejoindre la tige puisqu'il n'y a pas contact. Ces électrons laissent des ions positifs sur la face droite de B, le plus loin possible de la tige : la présence de la tige a provoqué, ou induit, une séparation des charges. A la figure IV.5.b, on sépare les deux sphères en présence de la tige, à la figure IV.5.c, on retire la tige : les deux sphères ont acquis une charge opposée par induction, sans qu'il y ait eu contact avec la tige.

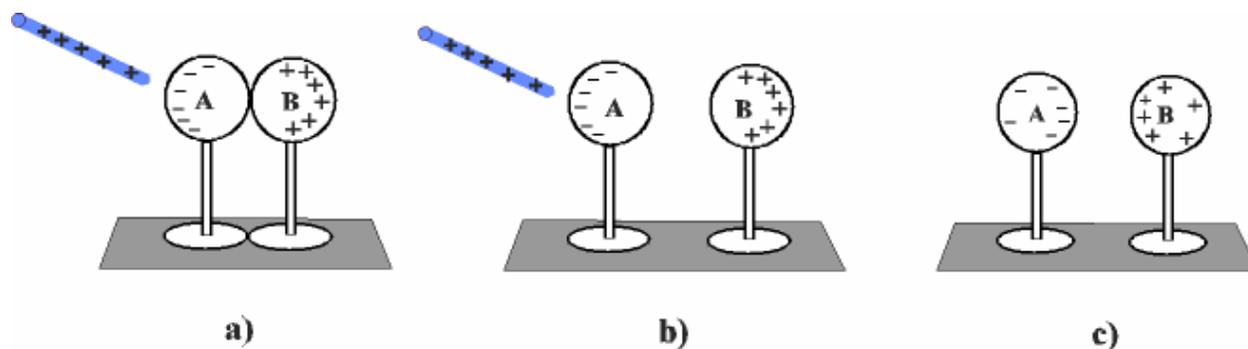


Figure IV.5.

Une sphère métallique unique peut également se charger par induction. Lorsqu'on approche la tige chargée positivement (voir figure IV.6.a), elle provoque la séparation de charges, négatives sur le côté gauche, positives, sur le côté droit de la sphère. On relie ensuite la sphère à la terre, au moyen d'une tige conductrice, comme le montre la figure IV.6.b. Le symbole \perp représente le contact avec le sol, on parle alors de prise de terre. Compte tenu de sa grosseur et de sa nature conductrice, la terre peut facilement recevoir ou céder des électrons ; elle sert ainsi de réservoir de charges électriques. Dans le cas de la figure IV.6.b, des électrons du sol vont être attirés par la charge positive qui apparaît sur la face droite de la sphère et vont la neutraliser. Si on coupe à ce moment la connexion avec la terre, la sphère comporte un excès de charges négatives (figure IV.6.c). Lorsqu'on retire la tige, cette charge négative se répartit uniformément à la surface de la sphère (figure IV.6.d).

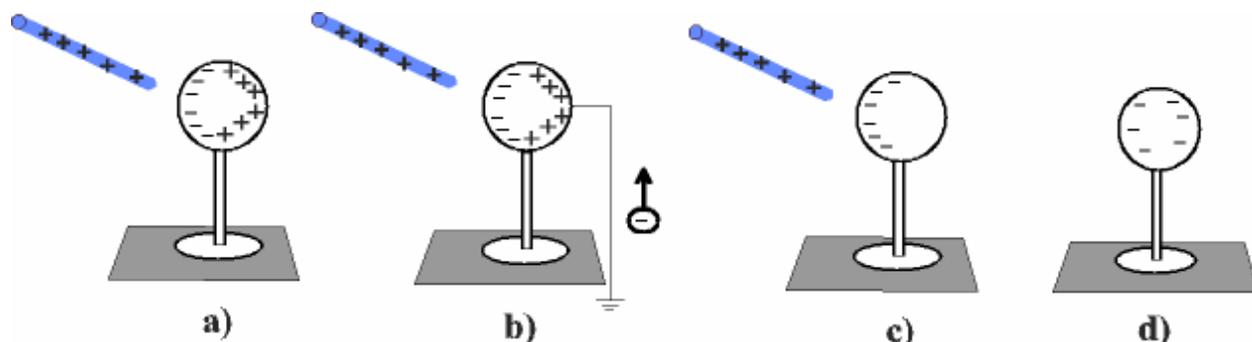


Figure IV.6.

IV.6 : La loi de Coulomb

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_1 et d'un contrepois est suspendu à un fil de soie (voir figure IV.7).

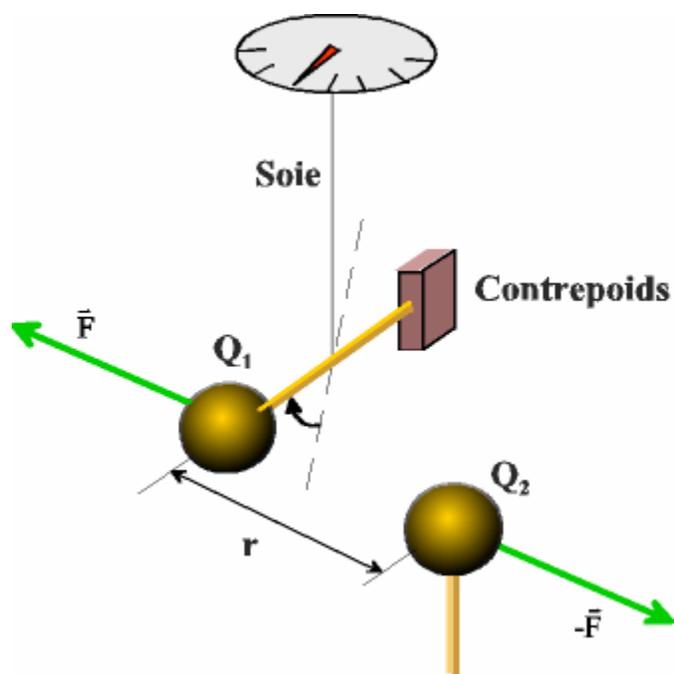


Figure IV.7.

Lorsqu'on approche de la sphère suspendue une autre sphère de charge Q_2 , 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_1 et Q_2 portées par les deux sphères, Coulomb a observé que la force électrique est proportionnelle à chacune des charges Q_1 et Q_2 et inversement proportionnelle au carré de la distance entre elles, ce qui se résume par :

$$F \propto Q_1$$

$$F \propto Q_2$$

$$F \propto 1/r^2$$

En d'autres termes :

$$F = k \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2}, \quad (\text{IV.2})$$

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

$$k = 8,988 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 \approx 9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 \quad (\text{IV.3})$$

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 :

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \quad (\text{IV.4})$$

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

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = (8,854187817\dots) \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2, \quad (\text{IV.5})$$

ou, en arrondissant :

$$\epsilon_0 \approx 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$$

On remarquera l'analogie qui existe entre la loi de Coulomb, exprimée par la relation (IV.2) et la loi de la gravitation universelle (II.7). Les charges électriques jouent ici le rôle des masses.

L'équation (IV.2) 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_1 et Q_2 , vers l'autre

charge si les charges sont de signes opposés, dans le sens contraire si les charges sont de même signe (voir figure IV.8 a et b).

a) Charges de signes opposés : $Q_1 Q_2 < 0$.



b) Charges de même signe : $Q_1 Q_2 > 0$.



Figure IV.8.

En accord avec la troisième loi de Newton, on a :

$$\bar{F}_{12} = -\bar{F}_{21}$$

où \bar{F}_{12} est la force exercée par Q_2 sur Q_1 et \bar{F}_{21} , la force exercée par Q_1 sur Q_2 .

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

$$\bar{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r_{12}^2} \bar{i}_{21} \quad (\text{IV.6})$$

où r_{12} est la distance entre les deux charges et \bar{i}_{21} est un vecteur unité dirigé de 2 vers 1 (voir figure IV.8.b). On peut vérifier aisément qu'avec ce choix de la direction du vecteur unité, \bar{F}_{12} est dirigé vers Q_2 dans le cas de charges de signes opposés et est bien répulsive dans le cas de charges de même signe.

IV.7 : Principe de superposition

La force électrique étant, comme toutes les forces, une grandeur vectorielle, les forces électriques exercées par différentes charges électriques : Q_2, Q_3, \dots, Q_n , sur une charge Q_1 , se calculent indépendamment l'une de l'autre et s'ajoutent vectoriellement. La force totale exercée sur la charge Q_1 par les autres charges, est donnée par :

$$\bar{F}_1 = \bar{F}_{12} + \bar{F}_{13} + \dots + \bar{F}_{1n}. \quad (\text{IV.7})$$

Exemple :

Calculer la force qui s'exerce sur la charge Q_1 , due à la présence des charges Q_2 et Q_3 .
Les trois charges sont situées aux sommets d'un triangle rectangle (voir figure IV.9).

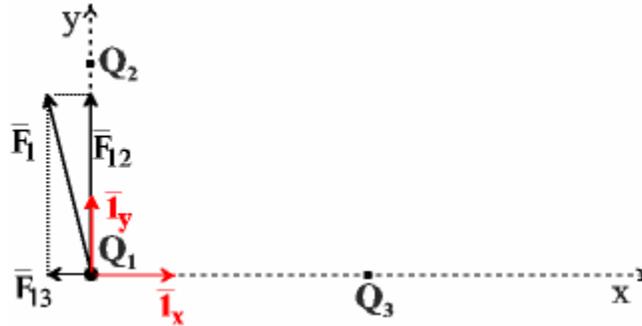


Figure IV.9.

Les charges Q_1 , Q_2 et Q_3 valent respectivement : $30 \mu\text{C}$, $-60 \mu\text{C}$ et $40 \mu\text{C}$. La distance entre Q_1 et Q_2 est de 1 m, celle entre Q_1 et Q_3 , 2 m.

- a) On calcule les modules des forces exercées par chacune de charges électriques en utilisant la loi de Coulomb :

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1 Q_2|}{r_{12}^2} = 9 \times 10^9 \frac{30 \times 10^{-6} \times 60 \times 10^{-6}}{1^2} = 16,2 \text{ N}$$

$$F_{13} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1 Q_3|}{r_{13}^2} = 9 \times 10^9 \frac{30 \times 10^{-6} \times 40 \times 10^{-6}}{2^2} = 2,7 \text{ N}$$

- b) On choisit un système de coordonnées d'axes x et y dans lequel on écrit chaque force en fonction de ses composantes et des vecteurs unités \bar{i}_x et \bar{i}_y (voir figure IV.9) :

$$\bar{F}_{12} = 16,2 \bar{i}_y \text{ N car les charges } Q_1 \text{ et } Q_2 \text{ sont de signes opposés et s'attirent}$$

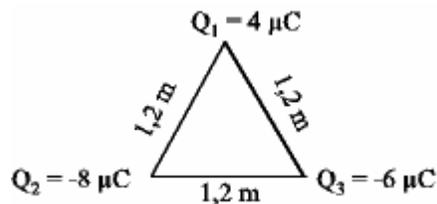
$$\bar{F}_{13} = -2,7 \bar{i}_x \text{ N car les charges } Q_1 \text{ et } Q_3 \text{ sont de même signe et se repoussent.}$$

- c) On effectue la somme vectorielle des différentes forces en ajoutant entre elles les composantes x et les composantes y :

$$\begin{aligned} \bar{F}_1 &= \bar{F}_{12} + \bar{F}_{13} = (0 - 2,7)\bar{i}_x + (16,2 + 0)\bar{i}_y \text{ N} \\ &= -2,7 \bar{i}_x + 16,2 \bar{i}_y \text{ N.} \end{aligned}$$

IV.8 : Exercices

1. Au cours, vous avez pu observer une expérience qui comportait une boule de sureau suspendue à un fil dont on approchait un barreau électrisé. Décrivez ce qui se produisait lorsqu'on approchait le barreau de la boule de sureau. Expliquez les phénomènes observés.
2. Jusqu'à quelle distance faut-il rapprocher deux électrons pour que la force électrique qui s'exerce entre eux soit égale au poids de l'un d'eux, mesuré à la surface de la Terre ? ($m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg). (R : 5,1 m).
3. Dans un modèle simplifié de l'atome d'hydrogène l'électron décrit autour du proton une orbite circulaire de $0,53 \cdot 10^{-10}$ m de rayon.
 - a) Quelle est la force d'attraction entre le proton et l'électron ? (R : $8,2 \cdot 10^{-8}$ N).
 - b) Quelle est la vitesse de l'électron ? (R : $2,2 \cdot 10^6$ m/s).
4. On place trois particules dotées respectivement de charges électriques valant $+4 \mu\text{C}$, $-8 \mu\text{C}$ et $-6 \mu\text{C}$ aux sommets d'un triangle équilatéral dont les côtés mesurent 1,2 m (voir figure). Déterminez la grandeur et la direction de la force nette s'exerçant sur chacune d'elles et attribuable aux deux autres. (R : 0,30 N, 265° ; 0,26 N, 139° ; 0,26 N, 30° ; les angles sont comptés depuis l'axe Q_2Q_3).



5. Soit deux boules identiques, en mousse de polystyrène, de charge Q et de masse $m = 2$ g, suspendues par des fils de longueur $L = 1$ m (voir figure). Les deux fils font un angle de 15° par rapport à la verticale. Trouvez la valeur de Q . (R: $Q = 400$ nC).

