

# 1 LA FORCE ÉLECTRIQUE

*Pourquoi les cheveux de cette personne deviennent-ils comme ça quand la personne devient chargée ?*



[www.youtube.com/watch?v=jZEFuCx7BE](http://www.youtube.com/watch?v=jZEFuCx7BE)

**Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre**

## 1.1 LES CHARGES POSITIVES ET NÉGATIVES

On connaissait très peu de choses concernant l'électricité avant 1500. On savait qu'en frottant certains objets, il se produit un phénomène d'attraction. Par exemple, si on frotte un tuyau de plastique avec de la fourrure, on remarque que le tuyau de plastique attire des morceaux de papier. Si on frotte une ballonne dans nos cheveux, elle peut rester collée sur le mur.

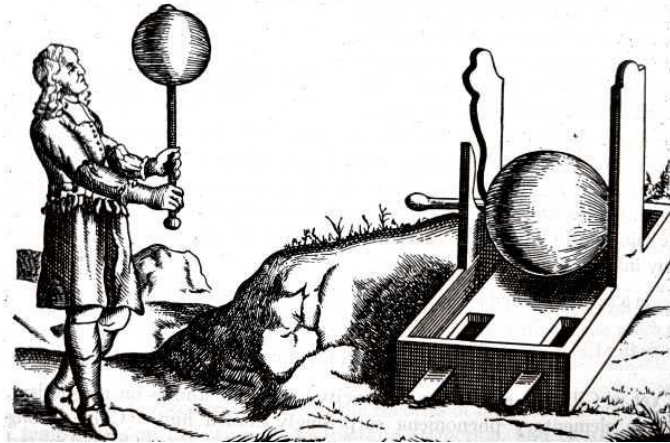
<http://www.youtube.com/watch?v=6zv0WVzdXJU>

<http://www.youtube.com/watch?v=7qfv6HaQJas>

Dans la Grèce antique (et peut-être même avant), on constata que cet effet est particulièrement intense pour l'ambre. Comme cette substance s'appelle *elektron* en grec, on parle aujourd'hui d'*électricité* et la force s'appelle la *force électrique*.

Il est quand même étonnant de constater que la force d'attraction électrique faite par le tube sur les morceaux de papier est plus grande que la force d'attraction faite par toute la Terre sur les morceaux de papier. C'est déjà une première indication que la force électrique est beaucoup plus intense que la force gravitationnelle.

Il fallut attendre qu'Otto von Guericke invente, dans les années 1660, une machine permettant d'accumuler beaucoup de charges pour l'étude de l'électricité progresse. C'était en fait une simple boule de soufre (on utilisa du verre par la suite) qui tournait sur elle-même. En plaçant la main sur la sphère en rotation, le frottement chargeait la personne qui touchait à la sphère. Cela permet à von Guericke d'accumuler des charges beaucoup plus importantes que ce qui avait été fait auparavant. Il put alors constater que les objets chargés peuvent aussi se repousser l'un et l'autre. Il existait donc de l'attraction électrique et de la répulsion électrique. Il observa également qu'il se formait parfois de petits éclairs à la surface de la sphère et il émit l'hypothèse que les éclairs sont un phénomène électrique.



[physics.kenyon.edu/EarlyApparatus/Static\\_Electricity/Electricity\\_from\\_Glass/Electricity\\_from\\_Glass.html](http://physics.kenyon.edu/EarlyApparatus/Static_Electricity/Electricity_from_Glass/Electricity_from_Glass.html)

Au cours des cinquante années suivantes, on utilise ce genre de machine pour étudier davantage l'électricité. Durant cette période, certains postulèrent qu'il y avait plusieurs types d'électricité. Il y en a qui allèrent même jusqu'à dire qu'il existait autant de types d'électricité qu'il existait de substances pouvant être électrisées. Toutefois, Charles François Du Fay détermina en 1733 qu'il n'y avait que deux types d'électricité : celle obtenue en frottant de l'ambre, qu'il nomma *électricité résineuse*, et celle obtenue en frottant du verre, qu'il nomma *électricité vitreuse*. Il observa aussi que

- Deux objets chargés avec de l'électricité résineuse se repoussent.
- Deux objets chargés avec de l'électricité vitreuse se repoussent.
- Un objet chargé avec de l'électricité résineuse attire un objet chargé avec de l'électricité vitreuse.

En 1746, L'Anglais William Watson proposa d'appeler ces deux types de charges *positive* et *negative*, une terminologie qui se propagea avec les travaux des Américains Benjamin Franklin et Ebenezer Kinnersley. Nous verrons dans la section suivante pourquoi On arrive donc à la conclusion suivante

### Charges

Il existe deux types de charges électriques : positive et négative.

Les objets ayant des charges de mêmes signes se repoussent mutuellement.  
Les objets ayant des charges de signes contraires s'attirent mutuellement.

## 1.2 LA NATURE DE L'ÉLECTRICITÉ

Au départ, on pense que l'électricité est un fluide invisible, sans masse. Quand un objet est chargé, c'est qu'il contient une certaine quantité de fluide électrique. Dans la théorie de du Fay, il y a deux fluides : le résineux et le vitreux. On peut ajouter l'un ou l'autre de ces fluides pour charger un objet. De nombreux autres savants de l'époque développèrent de semblables théories à deux fluides. D'autres, comme Watson, Franklin et Kinnersley, optèrent plutôt pour une théorie avec un seul fluide. Selon eux, les corps qui ne sont pas chargés contiennent naturellement une certaine quantité de fluide. Si l'objet a un excès de fluide, il a une charge positive et s'il y a un manque de fluide dans l'objet, il a une charge négative. Franklin et Kinnersley déterminèrent le signe des charges en observant l'éclair qui se forme entre deux objets de charge opposée à proximité l'un de l'autre. Comme ils pensèrent voir l'éclair aller de l'un vers l'autre, ils en conclurent qu'ils venaient d'observer le mouvement du fluide allant de l'objet possédant un excès de fluide vers celui qui avait un manque de fluide. C'est ainsi qu'ils déterminèrent quel type d'électricité était positif. En réalité, il est tout à fait impossible de voir la direction de l'éclair dans cette situation et on peut donc dire que les signes positifs et négatifs donnés aux charges sont le résultat du hasard.

À la théorie du fluide s'opposait la théorie corpusculaire de l'électricité. Dans cette théorie, il y a des particules d'électricité qui peuvent être ajoutées aux objets. En 1891, George Johnson Stoney nomma ces particules *électrons*.

Pendant près de 100 ans, il n'y avait aucune preuve expérimentale en faveur de ces théories. La théorie du fluide fut très populaire, mais cette popularité ne reposait sur aucune observation, c'était uniquement une question de préférence personnelle. Les preuves de la

théorie corpusculaire vont toutefois commencer à s'accumuler à partir de 1858, quand on étudia pour la première fois le passage de l'électricité dans des gaz à basse pression. Voici un exemple de ce passage de l'électricité dans de tels gaz.

[http://www.youtube.com/watch?v=Xt7ZWEDZ\\_GI](http://www.youtube.com/watch?v=Xt7ZWEDZ_GI)

En 1874, William Crookes montra que l'électricité passant dans ces gaz exerce une certaine pression, donc qu'on peut pousser des objets avec le passage de l'électricité.

<http://www.youtube.com/watch?v=yX2T4k-WySA>

Cela laissait penser que cette poussée était faite par la collision des particules électriques avec l'objet.

En 1879, Crookes montrait que ces particules avaient une charge négative et qu'on pouvait les dévier avec un champ électrique. Finalement, J.J. Thomson put mesurer le rapport entre la charge et la masse de ces particules en 1897 en les déviant avec un champ magnétique.

<http://www.youtube.com/watch?v=Sikzu09q6cc>

Cette dernière expérience ne laissait plus de doute : l'électron existe. Thomson reçut d'ailleurs le prix Nobel en 1906 pour sa découverte des électrons. Il fallut attendre 1909 pour que Robert Andrews Millikan mesure séparément la masse et la charge des électrons

Mais l'électron n'est pas la seule particule chargée. En 1914, Lord Rutherford découvrait le proton qui a une charge identique à celle de l'électron, mais positive. Ce sont les deux seules particules chargées dans la matière qui nous entoure. Voici donc comment on obtient une charge électrique.

### Charges d'un objet

Les charges sont dues à la présence de proton ( $p^+$ ) et d'électron ( $e^-$ )

Pour les objets neutres	Nombre de protons = Nombre d'électrons
Pour les objets ayant une charge +	Nombre de protons > Nombre d'électrons
Pour les objets ayant une charge -	Nombre de protons < Nombre d'électrons

En fait, il existe de nombreuses autres particules chargées, mais aucune n'est présente naturellement dans la matière.

Déjà en 1895, avant même la découverte de l'électron, Hendrik Anton Lorentz avait refait la théorie de l'électromagnétisme en la basant sur l'existence de particule chargée.

## 1.3 LA MESURE DE LA CHARGE

On mesure la charge d'un objet avec le coulomb. La définition exacte du coulomb est un peu compliquée et on la verra dans un chapitre ultérieur. On peut cependant donner une définition temporaire simple et facile à comprendre.

**Définition temporaire du coulomb**

La charge d'un électron est de  $-1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$   
 La charge d'un proton est de  $+1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$

Le nombre  $1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$  revient souvent en électricité. On le représente donc par le symbole  $e$ , appelé la *charge élémentaire*.

**Définition de la charge élémentaire ( $e$ )**

$$e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

La charge du proton est donc de  $+e$  et la charge de l'électron est de  $-e$ .

**Exemple 1.3.1**

Un objet a une charge de  $1 \mu\text{C}$ . Combien de protons y a-t-il en excès dans l'objet ?

Comme chaque proton ajoute une charge de  $+e$ , le nombre de protons en excès est

$$n = \frac{1\mu\text{C}}{e} = \frac{10^{-6} \text{ C}}{1,602 \times 10^{-19} \text{ C}} = 6,242 \times 10^{12}$$

Il y a donc  $6,242 \times 10^{12}$  protons (6242 milliards de protons) de plus qu'il y a d'électrons.

**1.4 LA QUANTIFICATION DE LA CHARGE**

Quand on charge un objet, on ajoute ou on enlève des protons ou des électrons. Comme il est impossible d'ajouter ou d'enlever une fraction de proton ou d'électron, la charge de l'objet doit être un multiple entier de la charge élémentaire  $e$ . C'est la quantification de la charge (*Quantification* signifie qu'une quantité ne peut prendre que certaines valeurs). Si on note la charge d'un objet avec la lettre  $Q$ , on a

**Quantification de la charge**

$$Q = ne$$

où  $n$  est un entier

Cette quantification fut démontrée par les expériences de Millikan en 1909, ce qui lui valut, en partie, le prix Nobel de 1923.

Notons que les quarks, qui sont les particules composant les protons et les neutrons, ont des charges plus petites que la charge fondamentale. En effet, le quark up a une charge de  $+2e/3$  et le quark down a une charge de  $-e/3$ . Ce sont les seules particules ayant une charge qui n'est pas un multiple entier de la charge élémentaire. Cependant, comme il est impossible qu'un quark soit libre, on ne peut pas donner une charge de  $+2e/3$  ou de  $-e/3$  à un objet.

## 1.5 LA CONSERVATION DE LA CHARGE

On remarqua assez vite que la quantité de charges reste constante. Quand on fait passer de la charge électrique d'un corps à l'autre, la somme des charges électriques des deux objets est toujours la même. Déjà, Franklin et Kinnersley avaient postulé que le fluide électrique était indestructible pour expliquer ces observations.

Dans la plupart des interactions électriques qui se produisent, on ne produit ou on ne détruit pas les électrons et les protons. Comme on a toujours le même nombre de protons et d'électrons, la charge totale reste toujours la même. On ne peut que déplacer les électrons et les protons.

Mais même quand on détruit ou crée ces particules (ou d'autres) dans les accélérateurs de particules, on remarque que la charge est la même avant et après la réaction. En fait, la théorie moderne prévoit que la charge doit toujours être conservée puisqu'elle est une conséquence directe d'une symétrie de la nature appelée *symétrie de jauge*, symétrie que nous n'expliquerons pas ici.

Nous avons donc le principe de conservation suivant.

### Principe de conservation de la charge

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

Notez que si on laisse un objet chargé dans l'air, il va se décharger lentement. La charge électrique ne s'est toutefois pas perdue. C'est qu'il y a dans l'air de nombreux ions de charges positives ou négatives. L'objet va donc attirer les ions de charges opposés, ce qui va lentement annuler la charge de l'objet.

## 1.6 LA SÉPARATION DE LA CHARGE

Les électrons dans une substance ne sont pas tous liés de la même façon. Certaines substances perdent des électrons assez facilement alors que d'autres auront tendance à voler des électrons à d'autres substances. Ainsi, quand on met en contact deux objets, il est possible qu'il y ait un transfert d'électrons d'une substance à l'autre.

La table suivante, appelée *série triboélectrique*, nous indique comment se fera ce transfert selon les matières qu'on met en contact. On trouve, dans la table, les deux substances qu'on met en contact. Celle qui est la plus basse dans la liste va voler des électrons à l'autre substance. La substance la plus haute dans la liste va donc avoir une charge positive et celle la plus basse dans la liste va avoir une charge négative. En frottant les deux substances l'un sur l'autre, on favorise grandement le transfert d'électrons.

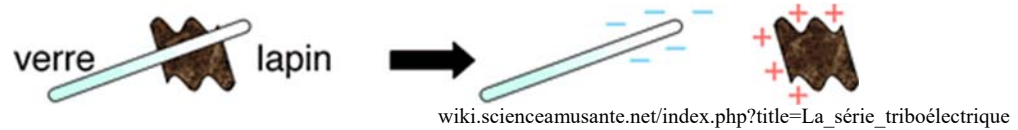
### Série triboélectrique

<b>Matières positives</b>
mains sèches
fouurrure de lapin
verre
cheveux
nylon
laine
fouurrure de chat
plomb
soie
aluminium
papier
coton
acier, inox
bois, ambre, résine
soufre
caoutchouc dur (ébonite)
nickel, cuivre
laiton, argent
or, platine
polyester
polystyrène
polyuréthane
polyéthylène (ruban de scotch)
polypropylène
polychlorure de vinyle (PVC)
silicone
téflon
<b>Matières négatives</b>

[wiki.scienceamusante.net/index.php?title=La\\_série\\_triboélectrique](http://wiki.scienceamusante.net/index.php?title=La_série_triboélectrique)



Ainsi, si on frotte ensemble du verre et de la fourrure de lapin, le verre aura une charge négative et la peau de lapin une charge positive.



Les charges accumulées ne sont pas si importantes. On parle de charge d'environ  $10^{-8}$  C, ce qui correspond environ à un échange d'un électron par 100 000 atomes dans les substances.

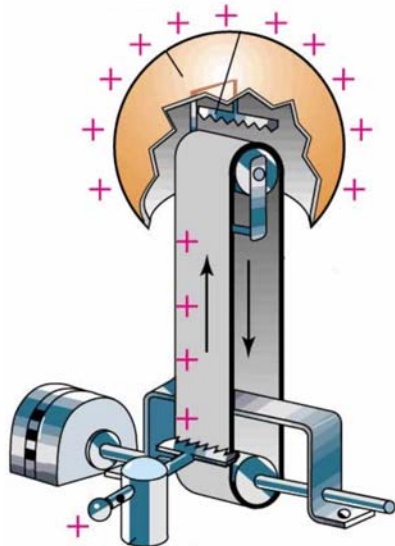
C'est sur ce simple principe que fonctionnait le générateur électrostatique de von Guericke et c'est sur ce principe que fonctionne un générateur van de Graaf. C'est le célèbre appareil utilisé pour faire des démonstrations comme celle sur cette photo. (Le générateur van de Graaf est à gauche)

Vous pouvez voir un vidéo d'une personne qui se charge.

[www.youtube.com/watch?v=jZEFuCx7BE](http://www.youtube.com/watch?v=jZEFuCx7BE)



blog.taser.com/how-does-a-taser-work-electricity-101/



Une bande de caoutchouc frotte sur un peigne métallique, ce qui donne une charge à la bande. Le déplacement de la bande amène les charges vers une sphère métallique, où elles se déposent. Si on touche la sphère, on va également accumuler des charges. Si on accumule beaucoup de charges, on se ramasse avec les cheveux dressés sur la tête. La charge va aussi dans les cheveux et comme les charges identiques se repoussent mutuellement, tous les cheveux se repoussent mutuellement.

www.yourdictionary.com/van-de-graaff-generator



## 1.7 LES ISOLANTS ET LES CONDUCTEURS

Au départ, on avait classé les substances en *substances électriques* et *substances non électriques*. Les substances électriques sont celles qu'on pouvait charger en les frottant avec un autre objet. Parmi les substances non électriques, on retrouvait les métaux. Vous pouvez frotter une tige de fer que vous tenez dans votre main avec une fourrure de lapin, il ne se passe rien.

En 1729, Stephen Gray découvrit que cette classification n'était pas valide puisqu'il parvint à charger n'importe quelle substance, incluant les substances non électriques. Selon Gray, on devait plutôt séparer les substances en *substances isolantes* et en *substances conductrices*. Les charges peuvent se déplacer dans les substances conductrices alors qu'elles sont immobiles dans les substances isolantes. On pouvait charger les substances isolantes, car les charges restaient sur l'objet. Par contre, on ne parvenait pas à charger les substances conductrices si on les tenait dans notre main, car les charges se déplaçaient alors dans l'objet pour aller dans notre main. Les charges ne restant pas dans l'objet, on ne parvenait pas à les charger. Gray suspendit donc une tige de métal avec des fils de soie (qui sont isolants) et parvint à charger la tige, car les charges ne pouvaient plus quitter la tige.

En fait, la classification n'est pas si nette parce que les charges peuvent se déplacer dans toutes les substances. C'est simplement qu'elles ont beaucoup plus de facilité à se déplacer dans certaines substances, comme les métaux, que dans d'autres, comme les plastiques. On mesure cette facilité qu'ont les charges à se déplacer dans une substance avec le temps de relaxation qui donne le temps nécessaire pour les charges atteignent leur position d'équilibre dans un objet. Voici une table donnant le temps de relaxation de quelques substances.

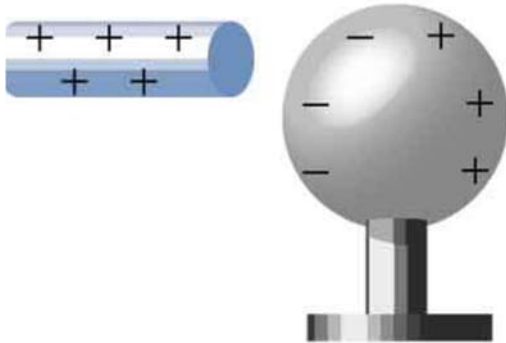
Substance	Temps de relaxation (s)
Cuivre	$10^{-12}$ s
Verre	2 s
Ambre	4000 s
Polystyrène	$10^{10}$ s (300 ans)

On voit que les charges atteignent rapidement leur position d'équilibre dans le cuivre, alors que c'est beaucoup plus long pour le polystyrène.

Ces temps de relaxation sont évidemment déterminés par la façon dont les atomes se lient dans l'objet. Dans les métaux, des électrons sont partagés par de très nombreux atomes (liaisons métalliques), ce qui permet aux électrons de se déplacer assez facilement. Dans les autres substances, dans lesquelles il y a des liens ioniques ou covalents, le déplacement des électrons est beaucoup plus difficile.

## 1.8 L'INDUCTION ÉLECTRIQUE

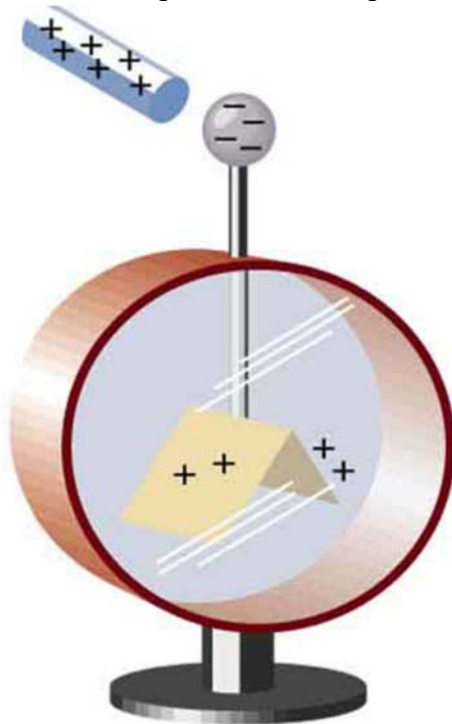
Voyons ce qui se passe si on approche une tige chargée (elle sera positive dans notre exemple) d'une sphère conductrice qui n'est pas chargée. Supposons que les charges positives et négatives peuvent se déplacer dans la sphère conductrice.



Dans la sphère, les charges négatives dans la sphère sont attirées par la tige et les charges positives sont repoussées par la tige. Il en résulte une séparation de charge dans l'objet telle qu'illustrée sur la figure.

[cnx.org/content/m42306/latest/?collection=coll11406/latest](http://cnx.org/content/m42306/latest/?collection=coll11406/latest)

On peut mettre en évidence cette séparation si on fait les mêmes manipulations en utilisant un électroscope à feuille à la place de la sphère conductrice. Un électroscope est une tige verticale au bout de laquelle deux feuilles d'or sont suspendues. Quand on approche une charge (la tige positive sur la figure) près du haut de la tige, il y a une séparation de charge dans la tige.

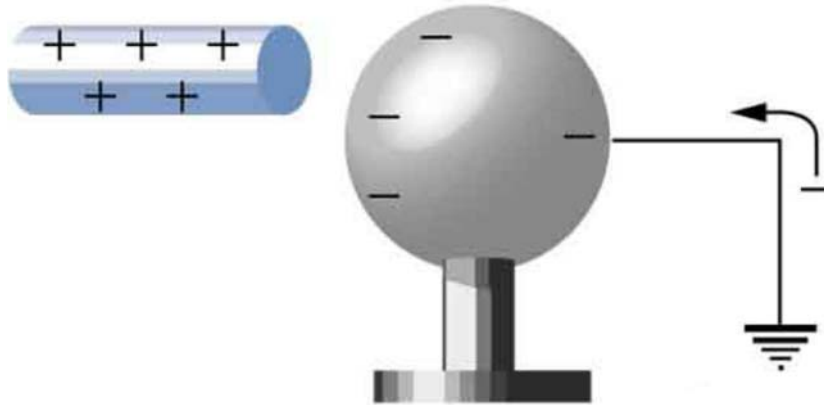


Dans notre exemple, le haut de la tige devient négatif et le bas de la tige, incluant les feuilles d'or, devient positif. Comme les deux feuilles ont alors des charges de même signe, elles se repoussent. Elles ne sont donc plus verticales, elles forment plutôt un V inversé. Si on éloigne la sphère chargée de la tige (et qu'il n'y a jamais eu de contact entre la sphère chargée et la tige), la séparation de charge dans la tige disparaît et les deux feuilles redeviennent verticales, car elles ne se repoussent plus.

Ce phénomène s'appelle la *séparation de charge par induction*. En électricité, *induction* signifie que l'effet se fait à distance, sans contact.

[cnx.org/content/m42306/latest/?collection=coll11406/latest](http://cnx.org/content/m42306/latest/?collection=coll11406/latest)

Il est aussi possible de charger un conducteur par induction. Pour y arriver, on doit relier le conducteur au sol avec un fil conducteur. Dans ce cas, les charges positives, repoussées par la tige, pourront quitter la sphère en passant par le fil pour aller dans la Terre et les charges négatives, attirées par la tige, pourront quitter le sol pour aller dans la sphère. La sphère acquiert ainsi une charge négative. Si on enlève ensuite le fil puis la tige positive, on a maintenant une sphère chargée négativement et on n'a jamais touché à la sphère. C'est la *charge par induction*.



[cnx.org/content/m42306/latest/?collection=col11406/latest](http://cnx.org/content/m42306/latest/?collection=col11406/latest)

(Remarquez le symbole indiquant que le fil est relié au sol, c'est un symbole très utilisé en électricité.)

## 1.9 LA LOI DE COULOMB

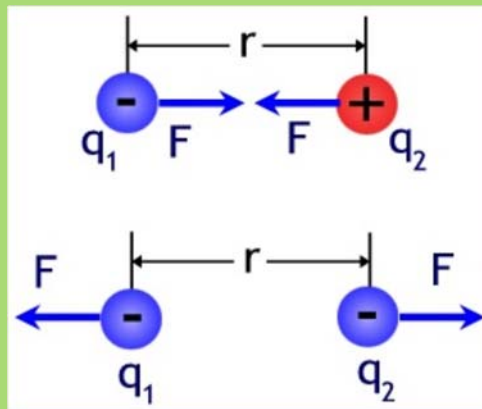
### La formule

On va maintenant voir quelle est la grandeur de la force entre les charges électriques. Priestley avait déjà découvert en 1766 que la force devait diminuer avec le carré de la distance en montrant que la force sur une charge placée n'importe où à l'intérieur d'une sphère chargée était nulle. Comme on peut montrer mathématiquement que la force est nulle partout à l'intérieur uniquement si la force diminue avec  $r^2$ , cela montrait qu'on devait avoir

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

En 1785, Charles Augustin Coulomb fit des expériences très précises pour trouver la formule donnant la force entre les charges électriques de petite taille. Il a ainsi obtenu la formule donnant la force entre des charges ponctuelles. Voici ce qu'il a obtenu

#### Loi de Coulomb (Force électrique entre des charges ponctuelles)



[ffden-2.phys.uaf.edu/212\\_fall2003.web.dir/don\\_bahls/coulombs\\_law.html](http://ffden-2.phys.uaf.edu/212_fall2003.web.dir/don_bahls/coulombs_law.html)

#### 1) Grandeur de la force

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

où  $k = 8,98755 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$

#### 2) Direction de la force

Les charges de mêmes signes se repoussent mutuellement  
Les charges de signes contraires s'attirent mutuellement

#### 3) Point d'application de la force

Pour une charge ponctuelle : sur la charge

Évidemment, chacune des charges subit la force et ces deux forces sont de même grandeur et de direction opposée en vertu de la troisième loi de Newton.

## La constante électrique

Quelques mots sur la constante. Premièrement, notez qu'en pratique, on utilisera  $k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ . Deuxièmement, cette constante n'est pas une constante fondamentale puisqu'elle dépend en fait d'une autre constante qui, elle, est considérée comme fondamentale. Il s'agit de la constante électrique  $\epsilon_0$  (aussi appelée permittivité du vide)

### Constante électrique ( $\epsilon_0$ )

$$\epsilon_0 = 8,854\,188 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}$$

Le lien entre les deux constantes est

### Lien entre $k$ et $\epsilon_0$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

## Le principe de superposition

Si une charge (qu'on va appeler 1) est entourée de plusieurs charges (qu'on va numéroter de 2 à N), alors la force sur la charge 1 est simplement la somme des forces faites par les autres charges. C'est le principe de superposition.

### Principe de superposition

$$\vec{F}_{\text{nette sur la charge 1}} = \vec{F}_{\text{charge 2 sur la charge 1}} + \vec{F}_{\text{charge 3 sur la charge 1}} + \dots + \vec{F}_{\text{charge N sur la charge 1}}$$

## Exemples

**Exemple 1.9.1**

Quelle est la force nette sur la charge  $Q$  ?

Il y a trois charges qui exercent une force sur la charge  $Q$ . On va donc trouver la force exercée par chacune de ces forces puis sommer vectoriellement ces trois forces.

La force faite par la charge  $q_1$  est

$$\begin{aligned} F_1 &= k \frac{|Q \times q_1|}{r_1^2} \\ &= 9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \frac{|2 \times 10^{-6} \text{C} \times 8 \times 10^{-6} \text{C}|}{(2\text{m})^2} \\ &= 0,036 \text{N} \end{aligned}$$

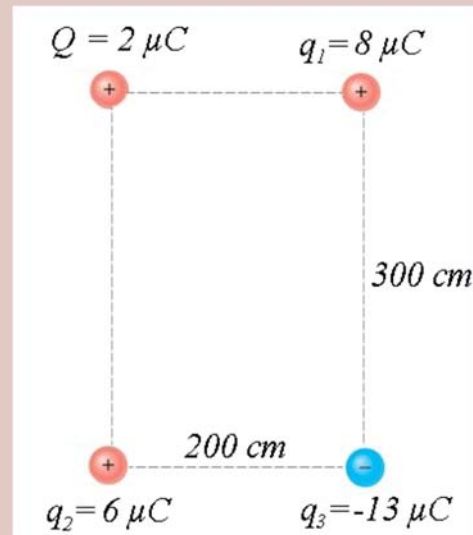
La force faite par la charge  $q_2$  est

$$\begin{aligned} F_2 &= k \frac{|Q \times q_2|}{r_2^2} \\ &= 9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \frac{|2 \times 10^{-6} \text{C} \times 6 \times 10^{-6} \text{C}|}{(3\text{m})^2} \\ &= 0,012 \text{N} \end{aligned}$$

La force faite par la charge  $q_3$  est

$$\begin{aligned} F_3 &= k \frac{|Q \times q_3|}{r_3^2} \\ &= 9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \frac{|2 \times 10^{-6} \text{C} \times 13 \times 10^{-6} \text{C}|}{\left(\sqrt{(2\text{m})^2 + (3\text{m})^2}\right)^2} \\ &= 0,018 \text{N} \end{aligned}$$

(La distance entre la charge  $Q$  et la charge  $q_3$  est la longueur de la diagonale du rectangle.)





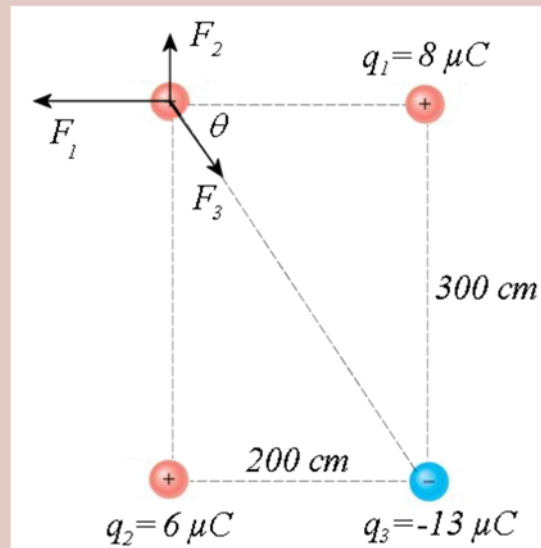
Représentons graphiquement ces forces qui s'appliquent sur la charge  $Q$ . Les forces sont

La force  $F_1$  est vers la gauche, car la charge  $Q$  est repoussée par la charge  $q_1$ .

La force  $F_2$  est vers le haut, car la charge  $Q$  est repoussée par la charge  $q_2$ .

La force  $F_3$  est vers la charge  $q_3$ , car la charge  $Q$  est attirée par la charge  $q_3$ .

**(Remarquez comme tous les vecteurs forces partent de la charge  $Q$ , c'est-à-dire de la charge qui subit la force)**



On doit maintenant faire la somme des forces. Cette somme est une somme vectorielle. On doit donc séparer les vecteurs en composantes. Pour y arriver, on doit connaître la direction de toutes les forces. C'est évident pour les forces  $F_1$  et  $F_2$ , mais on doit faire le petit calcul suivant pour trouver l'orientation de la force  $F_3$ .

$$\tan \theta = \frac{3m}{2m}$$

$$\theta = 56,3^\circ$$

Les composantes des forces sont donc

$$\begin{aligned} F_{1x} &= -0,036N & F_{1y} &= 0N \\ F_{2x} &= 0 & F_{2y} &= 0,012N \\ F_{3x} &= 0,018N \cos(-56,3^\circ) & F_{3y} &= 0,018N \sin(-56,3^\circ) \\ &= 0,009985N & &= -0,014977N \end{aligned}$$

Les composantes de la force nette sont donc

$$\begin{aligned} F_x &= F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} \\ &= -0,036N + 0N + 0,009985N \\ &= -0,026015N \\ \\ F_y &= F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} \\ &= 0N + 0,012N - 0,014977N \\ &= -0,002977N \end{aligned}$$

La force est donc

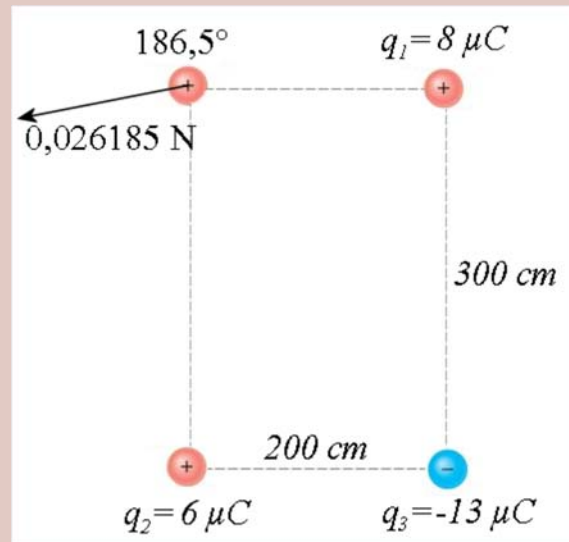
$$\vec{F} = (-0,026015\vec{i} - 0,002977\vec{j}) N$$

(On peut également donner la grandeur de la force

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 0,026185 N$$

et sa direction

$$\theta = \arctan \frac{F_y}{F_x} = 186,5^\circ$$



C'est long, mais que de plaisir...



### Erreur fréquente : Mettre les vecteurs force sur les mauvaises charges.

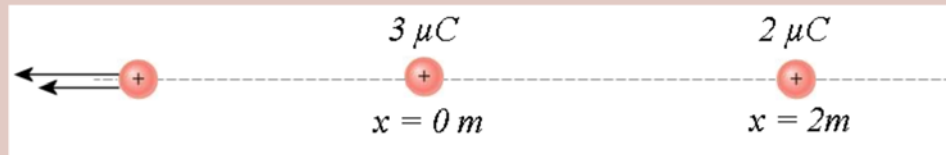
On voit parfois dans les solutions des étudiants que les vecteurs forces sont sur les mauvaises charges. Si on demande la force sur une charge, les vecteurs forces doivent tous partir de cette charge qui subit la force et non pas des charges qui font la force.

### Exemple 1.9.2

Sur un axe, il y a une charge de  $3 \mu C$  à  $x = 0$  et une charge de  $2 \mu C$  à  $x = 2$  m. Où doit-on placer une troisième charge  $q$  pour que la force nette sur cette charge soit nulle ?

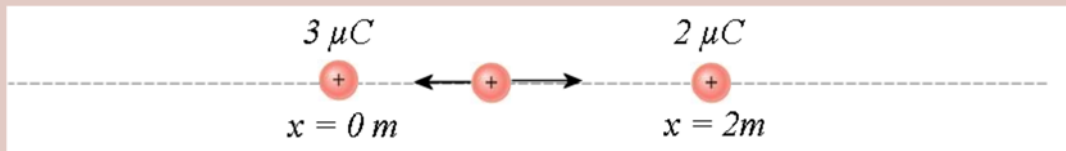


Les deux charges délimitent trois régions sur notre axe ( $x < 0$  m,  $0$  m  $< x < 2$  m et  $x > 2$  m). Examinons le sens des forces sur une charge positive placée dans ces régions. Dans la région  $x < 0$  m, on a



Dans cette région, les deux forces de répulsion sont dans la même direction. Il est donc impossible que les deux forces de répulsion s'annulent. Ce n'est donc pas dans cette région qu'on doit placer la charge.

Dans la région  $0 \text{ m} < x < 2 \text{ m}$ , les directions des forces de répulsions sont



Dans ce cas, il est possible que les forces s'annulent puisqu'elles sont dans des directions opposées.

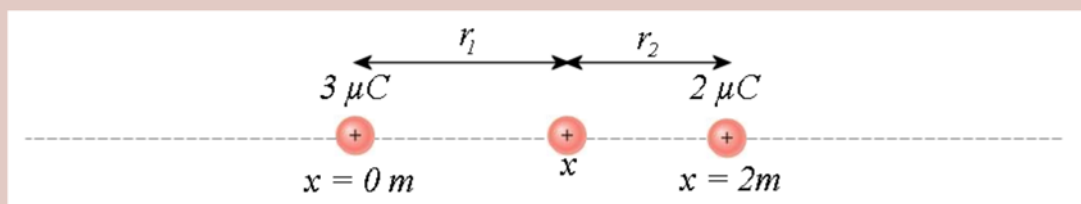
Dans la région  $x > 2 \text{ m}$ , les deux forces de répulsion sont encore une fois dans la même direction. Il est donc impossible que la force soit nulle dans cette région.



On sait donc qu'on doit placer notre charge dans la région  $0 \text{ m} < x < 2 \text{ m}$ .

Pour que la somme des forces soit nulle, les deux forces de répulsion doivent être de même grandeur. On doit donc avoir

$$k \frac{|q \times 3\mu C|}{r_1^2} = k \frac{|q \times 2\mu C|}{r_2^2}$$



Notre charge est la position  $x$ . La distance entre la charge à la position  $x$  et la charge de  $3 \mu C$  à la position  $x = 0 \text{ m}$  est

$$r_1 = x$$

La distance entre la charge à la position  $x$  et la charge de  $2 \mu\text{C}$  à la position  $x = 2 \text{ m}$  est

$$r_1 = 2m - x$$

On a donc

$$k \frac{|q \times 3\mu\text{C}|}{r_1^2} = k \frac{|q \times 2\mu\text{C}|}{r_2^2}$$

$$\frac{|3\mu\text{C}|}{x^2} = \frac{|2\mu\text{C}|}{(2m - x)^2}$$

$$\frac{3}{x^2} = \frac{2}{(2m - x)^2}$$

$$3(2m - x)^2 = 2x^2$$

$$3(x^2 - (4m)x + 4m^2) = 2x^2$$

$$3x^2 - (12m)x + 12m^2 = 2x^2$$

$$x^2 - (12m)x + 12m^2 = 0$$

C'est une équation quadratique donc les solutions sont  $x = 10,899 \text{ m}$  et  $x = 1,101 \text{ m}$ . Comme la solution doit être entre  $x = 0 \text{ m}$  et  $x = 2 \text{ m}$ . Notre solution est

$$x = 1,101 \text{ m}$$

(L'autre solution correspond à l'endroit où les forces de répulsion sont de même grandeur, mais dans la même direction)

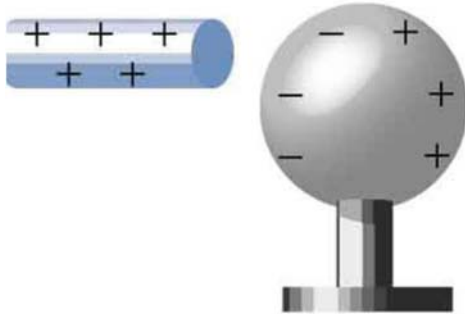
Note : nous avons placé une charge positive sur l'axe, mais on ne spécifiait pas dans la question qu'on devait placer une charge positive ou une charge négative. Les conclusions restent heureusement les mêmes si on avait utilisé une charge négative. Dans ce cas, toutes les forces changent de direction ce qui fait que la seule région où elles peuvent s'annuler reste  $0 \text{ m} < x < 2 \text{ m}$ . De plus, rien ne change dans le calcul à cause de la valeur absolue qui élimine le signe de la charge. On peut donc imaginer qu'on place une charge positive ou négative sur l'axe, ça ne change rien au résultat.

## Attraction d'un objet neutre par induction

La formule de Coulomb nous permet de comprendre aussi pourquoi un objet conducteur qui n'a pas de charge sera attiré par une charge placée à proximité. On pourrait croire à première vue que la force électrique sera nulle parce que le conducteur n'est pas chargé.

En effet, si une des charges est nulle dans la loi de Coulomb, il n'y a pas de force. La situation est un peu plus compliquée que cela

Examinons ce qui se passe si on approche une charge positive d'un conducteur. On va supposer que les charges positives et négatives peuvent se déplacer dans le conducteur.



Dans ce cas, la charge positive va attirer les particules négatives et repousser les particules positives. Il y aura alors une séparation de charges telle qu'illustrée sur la figure. C'est en fait de l'induction électrique comme on l'a vue précédemment. La sphère de métal n'a pas de charge nette, mais les charges ne sont plus distribuées uniformément.

[cnx.org/content/m42306/latest/?collection=coll11406/latest](http://cnx.org/content/m42306/latest/?collection=coll11406/latest)

On remarque alors que les charges négatives sont plus près de la tige que les charges positives. Comme la loi de Coulomb nous montre que la force électrique diminue avec la distance, cela veut dire que la force d'attraction entre les charges négatives et la tige est plus grande que la force de répulsion entre les charges positives et la sphère. Comme il y a plus d'attraction que de répulsion, la sphère est attirée par la tige même si sa charge nette est nulle !

## RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

### Charges

Il existe deux types de charges électriques : positive et négative.

Les objets ayant des charges de mêmes signes se repoussent mutuellement.

Les objets ayant des charges de signes contraires s'attirent mutuellement.

### Charges d'un objet

Les charges sont dues à la présence de proton ( $p^+$ ) et d'électron ( $e^-$ )

Pour les objets neutres

Nombre de protons = Nombre d'électrons

Pour les objets ayant une charge +

Nombre de protons > Nombre d'électrons

Pour les objets ayant une charge -

Nombre de protons < Nombre d'électrons

### Définition temporaire du Coulomb

La charge d'un électron est de  $-1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$

La charge d'un proton est de  $+1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$

**Définition de la charge élémentaire ( $e$ )**

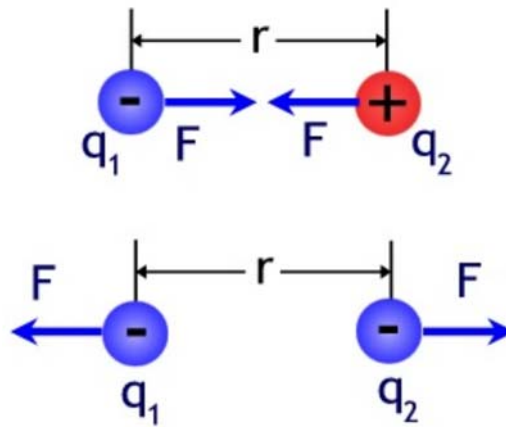
$$e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

**Quantification de la charge**

$$Q = ne$$

**Conservation de la charge**

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

**Loi de Coulomb (Force électrique entre des charges ponctuelles)**

[ffden-2.phys.uaf.edu/212\\_fall2003.web.dir/don\\_bahls/coulombs\\_law.html](http://ffden-2.phys.uaf.edu/212_fall2003.web.dir/don_bahls/coulombs_law.html)

## 1) Grandeur de la force

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

où  $k = 8,98755 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$

## 2) Direction de la force

Les charges de mêmes signes se repoussent mutuellement  
Les charges de signes contraires s'attirent mutuellement

## 3) Point d'application de la force

Pour une charge ponctuelle : sur la charge



**Constante électrique ( $\epsilon_0$ )**

$$\epsilon_0 = 8,854\,188 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$$

**Lien entre  $k$  et  $\epsilon_0$** 

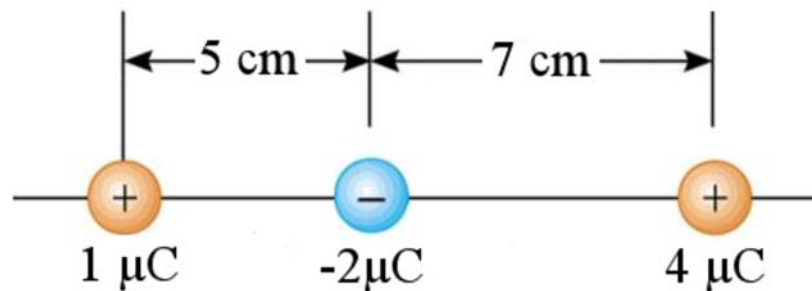
$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

**Principe de superposition**

$$\vec{F}_{\text{nette sur la charge 1}} = \vec{F}_{\text{charge 2 sur la charge 1}} + \vec{F}_{\text{charge 3 sur la charge 1}} + \dots + \vec{F}_{\text{charge N sur la charge 1}}$$

**EXERCICES****1.9 La loi de Coulomb**

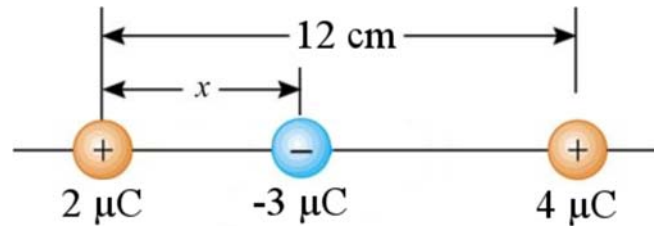
1. Dans un cristal de sel, l'ion de sodium ( $Q = e$ ) est à une distance de  $2,82 \times 10^{-10}$  m de l'ion de chlore ( $Q = -e$ ). Quelle est la grandeur de la force d'attraction entre ces deux ions ?
2. La force d'attraction entre une charge de  $5 \mu\text{C}$  et de  $-10 \mu\text{C}$  est de 10 N. Quelle est la distance entre les charges ?
3. Dans la situation suivante



[www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/three-charges-lie-along-x-axis-figurebelow-positive-charge-q1-15-c-islocated-d-2-m-positiv-q171333](http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/three-charges-lie-along-x-axis-figurebelow-positive-charge-q1-15-c-islocated-d-2-m-positiv-q171333)

- a) Quelle est la force nette sur la charge de  $1 \mu\text{C}$  ?
- b) Quelle est la force nette sur la charge de  $-2 \mu\text{C}$  ?

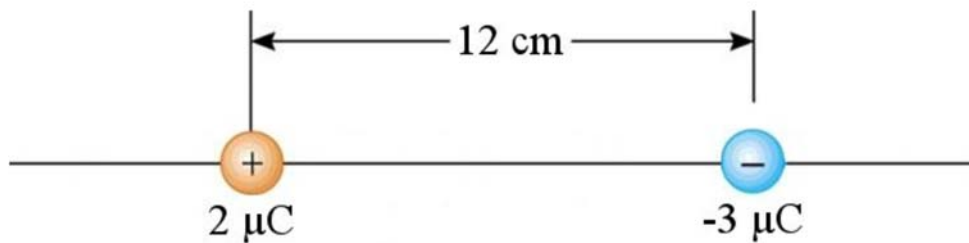
4. Dans la situation suivante, on a une charge de  $-3 \mu\text{C}$  située entre 2 charges positives.



[www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/three-charges-lie-along-x-axis-figurebelow-positive-charge-q1-15-c-islocated-d-2-m-positiv-q171333](http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/three-charges-lie-along-x-axis-figurebelow-positive-charge-q1-15-c-islocated-d-2-m-positiv-q171333)

Quelle doit être la valeur de  $x$  pour que la force nette sur la charge de  $-3 \mu\text{C}$  soit nulle ?

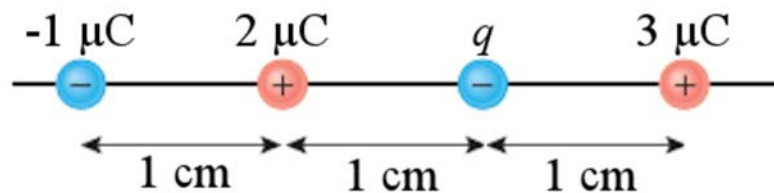
5. Dans la situation suivante



[www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/three-charges-lie-along-x-axis-figurebelow-positive-charge-q1-15-c-islocated-d-2-m-positiv-q171333](http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/three-charges-lie-along-x-axis-figurebelow-positive-charge-q1-15-c-islocated-d-2-m-positiv-q171333)

on doit placer une charge sur la ligne à un endroit où elle va subir une force nette nulle. Où doit-on la placer ? (Évidemment, on élimine les solutions  $x = \infty$  et  $x = -\infty$ )

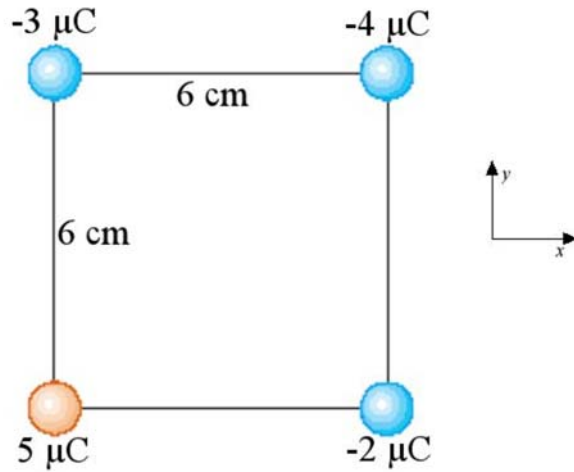
6. Dans la situation suivante



[www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/anyone-help-problem-dna-molecule-base-pair-adenine-thymine-held-together-two-hydrogen-bond-q3590523](http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/anyone-help-problem-dna-molecule-base-pair-adenine-thymine-held-together-two-hydrogen-bond-q3590523)

Quelle doit être la valeur de  $q$  pour que la force sur la charge de  $-1 \mu\text{C}$  soit nulle ?

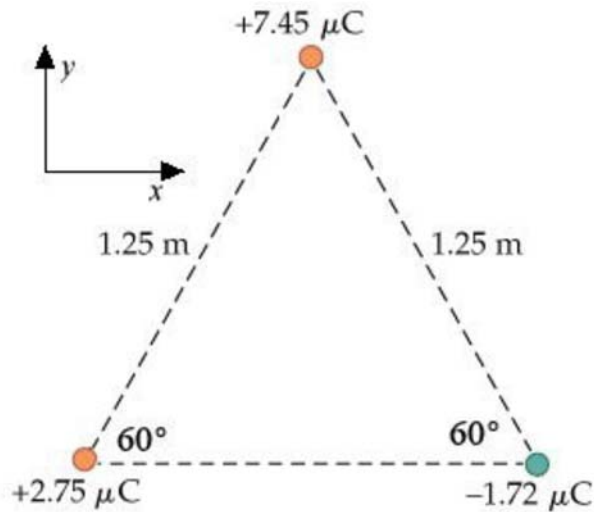
7. Dans la situation suivante



[www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/four-point-charges-situated-corners-square-with-sides-length-figure-p154-figure-p154-find-e-q165600](http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/four-point-charges-situated-corners-square-with-sides-length-figure-p154-figure-p154-find-e-q165600)

Quelle est la force nette (grandeur et direction) sur la charge de  $-2 \mu\text{C}$  ?

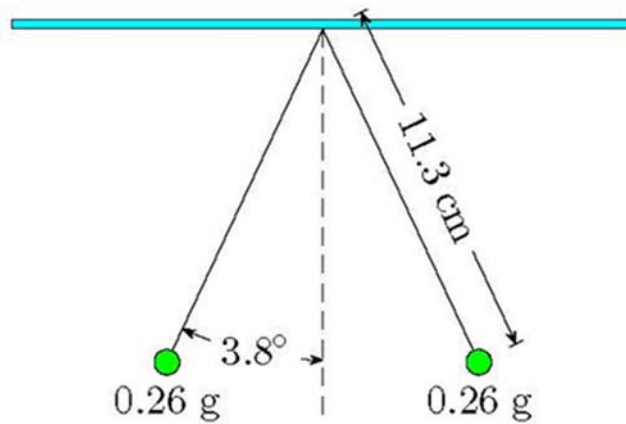
8. Dans la situation suivante



[www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/physics-archive-2012-september-16](http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/physics-archive-2012-september-16)

Quelle est la force nette (grandeur et direction) sur la charge de  $2,75 \mu\text{C}$  ?

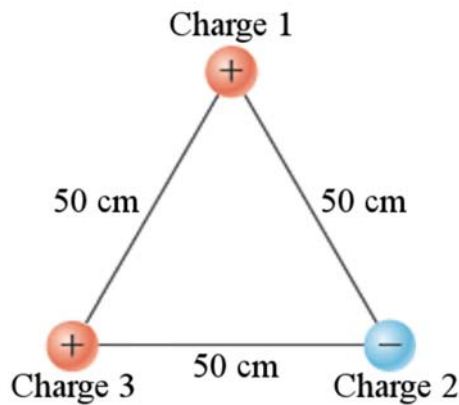
9. Deux boules de 0,26 g ayant des charges électriques identiques sont en équilibre dans la configuration montrée sur la figure.



[www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/001-three-positive-point-charges-arranged-atriangular-pattern-plane-shown--find-magnitude--q1397023](http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/001-three-positive-point-charges-arranged-atriangular-pattern-plane-shown--find-magnitude--q1397023)

En vous rappelant qu'à l'équilibre la somme des forces sur chaque boule doit être nulle, déterminez la valeur de la charge des boules.

10. Dans la situation suivante



[www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/three-point-charges-located-corners-equilateral-triangle-figure--find-magnitude-direction--q2813718](http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/three-point-charges-located-corners-equilateral-triangle-figure--find-magnitude-direction--q2813718)

On sait que les grandeurs des forces entre les charges sont

$$F_{12} = 18N$$

$$F_{13} = 45N$$

$$F_{23} = 72N$$

Déterminez  $q_1$ ,  $q_2$  et  $q_3$ .

## RÉPONSES

### 1.9 La loi de Coulomb

1.  $2,904 \times 10^{-9} \text{ N}$
2. 0,2121 m
3. a) 4,7 N vers la droite      b) 7,49 N vers la droite
4. 4,97 cm
5. À 53,39 cm à gauche de la charge de  $2 \mu\text{C}$
6.  $-9,333 \mu\text{C}$
7. 32,07 N à  $-127,9^\circ$
8. 0,10702N à  $-107,3^\circ$
9. 2,054 nC ou  $-2,054 \text{ nC}$
10.  $q_1 = 17,68 \mu\text{C}$      $q_2 = -28,28 \mu\text{C}$      $q_3 = 70,71 \mu\text{C}$