# 1 LA FORCE ÉLECTRIQUE

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

***www.youtube.com/watch?v=jZEFuCxD7BE***

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

# 1.1 LES CHARGES POSITIVES ET NÉGATIVES

Dans la nature, il y a des charges positives et des charges négatives.

**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.

Ces règles simples expliquent pourquoi les cheveux de cette personne prennent cette configuration. La personne touche à une machine qui lui donne une charge électrique. Cette charge va partout dans la personne, incluant dans ses cheveux. Les cheveux, qui ont alors tous des charges de même signe, se repoussent les uns les autres.

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

Vous pouvez voir un vidéo d'une personne qui se charge.
www.youtube.com/watch?v=jZEFuCxD7BE

Ça semble très simple, mais il a fallu plus d'un siècle d'observations et d'expériences pour arriver à cette conclusion !

On sait depuis longtemps (le phénomène est mentionné en Grèce antique) que l'ambre, après qu'on l'ait frotté, peut attirer des petits objets comme des morceaux de pailles par exemple. Il faut attendre bien longtemps avant que Gerolamo Cardano (au 16$^{e}$ siècle) et William Gilbert (au début du 17$^{e}$ siècle) montrent que le phénomène est différent du magnétisme. C'est à ce moment que le phénomène reçoit son nom. Comme l'ambre s'appelle *elektron* en grec, Gilbert invente le terme d'*électricité*.

Mais il n'y a pas que l'ambre qui peut être électrifié. Déjà, Gilbert identifie au moins 23 autres substances, dont le soufre, le verre et la cire, qui peuvent être électrifiées comme l'ambre. La liste ne cessera de s'allonger à partir de ce moment.

Voici deux exemples de cette attraction électrique. Si on frotte une balloune dans nos cheveux, elle peut rester collée sur le mur.
https://www.youtube.com/watch?v=7qfv6HaQJas
Si on frotte un tuyau de plastique avec de la fourrure, on remarque que le tuyau de plastique attire des morceaux de papier.
https://www.youtube.com/watch?v=6zv0WVzdXJU

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.

On a une seule règle au début du 17e siècle :

*Les objets chargés attirent la matière.*

On ne découvre pas beaucoup de nouvelles propriétés de l'électricité au cours du 17e siècle. Honoré Fabri (en 1660) et Robert Boyle (en 1675) montrent que l'attraction électrique est mutuelle. Cela signifie que si un objet électrifié attire un petit morceau de papier, alors le petit morceau de papier attire aussi l'objet électrifié.

On ne parle que d'attraction. Pourtant, il y a aussi de la répulsion électrique. Voici deux objets chargés qui se repoussent l'un et l'autre.
www.youtube.com/watch?v=mNS7ZZ7p1_Y
Niccolò Cabeo (en 1629), Thomas Browne (en 1646), Otto von Guericke (années 1660) et Robert Hooke (en 1672) observent la répulsion, mais, curieusement, tous considèrent que la répulsion électrique n'existe pas. Pour eux, la répulsion observée doit être un effet secondaire de l'attraction (un rebond suite à une attraction par exemple), être le résultat de l'attraction faite par d'autres objets à proximité ou encore être générée par quelque chose d'autre que l'électricité. Christiaan Huygens est le seul au 17e siècle à accepter la répulsion électrique (en 1692), mais il ne publie jamais ses notes à ce sujet. En 1709, Francis Hauksbee accepte la répulsion, mais ses propos sont loin d'être clairs. Parfois, il parle de répulsion et parfois, il dit que seule l'attraction existe. Même les écrits du grand Newton à ce sujet ne sont pas plus clairs. Le premier à clairement accepter la répulsion électrique est Willem Jabob 'sGravesande en 1721. Jusqu'à la fin du 18e siècle, il y a des savants qui doutent de l'existence de la répulsion électrique.

Un pas de géant est fait avec Charles François de Cisternay du Fay en 1733. Parmi tous les phénomènes électriques qu'il veut explorer, il y a la répulsion électrique. La question de l'existence de la répulsion n'est toujours pas résolue à ce moment et lui-même n'y croit pas vraiment au début de ses expériences. Une expérience va lui permettre d'élucider ce mystère. Un petit objet qui n'est pas chargé au départ est attiré par un objet chargé. Dès que le petit objet entre en contact avec l'objet chargé, il y a répulsion.
https://youtu.be/_-SdM-mcBp4
Après avoir éliminé méthodiquement toutes les autres explications possibles, du Fay doit conclure que la répulsion électrique existe bel et bien. Mais il va plus loin. Du Fay formule l'hypothèse que cette répulsion se fait entre les objets chargés. Quand le petit objet neutre, attiré par l'objet chargé, entre en contact avec ce dernier, une partie de l'électricité passe de l'objet chargé à l'objet neutre. Comme les objets se repoussent après ce transfert, il en vient ainsi à formuler l'hypothèse que deux objets chargés se repoussent mutuellement. Soudainement, plusieurs phénomènes auparavant incompréhensibles trouvent une explication simple. Selon du Fay, c'est une découverte majeure.

Mais ce n'était pas tout. Du Fay veut vérifier si deux objets électrifiés se repoussent toujours comme le prévoit son hypothèse. Par exemple, on pourrait charger un objet A en le mettant en contact avec une tige de verre chargée et aussi charger un objet B en le mettant en contact avec la même tige de verre. Comme les objets A et B sont maintenant chargés, ils devraient se repousser. Du Fay s'attend donc à toujours observer une répulsion entre les objets chargés. Au cours d'une de ses expériences, il approche une tige d'ambre chargée d'une feuille d'or qui, auparavant, avait été mise en contact avec une tige de verre chargée. C'est la consternation. Contrairement à ce que son hypothèse prévoyait, il y a une attraction entre les deux objets chargés ! Après avoir observé que la résine et la cire attirent aussi la feuille d'or et que le verre et plusieurs cristaux repoussent la feuille d'or, il formule une nouvelle hypothèse révolutionnaire : il y a deux types d'électricité. Il y a celle obtenue en frottant de l'ambre, qu'il nomme *électricité résineuse*, et celle obtenue en frottant du verre, qu'il nomme *électricité vitreuse*. Selon les types d'électricités, il y a les répulsions et attractions suivantes.

- 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.

C'est ainsi qu'on est finalement arrivé au principe donné au début de cette section. Il n'y a que les noms des charges qui ne sont plus les mêmes. En 1746, l'Américain Benjamin Franklin (et ses quelques assistants, dont Ebenezer Kinnersley) propose d'appeler ces deux types de charges *positive* et *négative* (on verra pourquoi plus loin). C'est cette terminologie qui finit par l'emporter.

# 1.2 LA NATURE DE L'ÉLECTRICITÉ

## Les fluides électriques

Au départ, on pense que l'électricité est un genre de fluide invisible sans masse. Quand un objet est chargé, on pense qu'une certaine quantité de fluide électrique a été ajoutée à l'objet. Ces théories impliquant des fluides vont donner des noms liés à un mouvement de fluide à plusieurs concepts en électricité. C'est pour cela qu'on parle de courant, de condensateur et de perméabilité par exemple.

Pour certains, dont du Fay, il y a deux types de fluide : le résineux et le vitreux. On peut ajouter l'un ou l'autre de ces fluides pour charger un objet. Pour d'autres, comme Benjamin Franklin, il n'y a qu'un seul fluide. Selon eux, les corps qui ne sont pas chargés contiennent naturellement une certaine quantité de fluide électrique. Quand un objet a un excès de fluide, ils disent qu'il a une charge positive et quand un objet manque de fluide, ils disent qu'il a une charge négative (c'est ce concept qui a donc donné leur nom aux charges). Malgré toutes les observations, on ne parvient jamais à décider entre ces 2 options (1 ou 2 fluides).

Les partisans de la théorie du fluide unique doivent déterminer si c'est l'électricité vitreuse ou résineuse qui est positive. Franklin associe simplement, au hasard et sans faire d'expérience, la charge positive à l'électricité vitreuse, mais de nombreuses expériences sont réalisées par la suite (par d'autres) pour déterminer quel type d'électricité correspond à la charge positive. Généralement, dans ces expériences, on approche un objet ayant une charge vitreuse d'un objet ayant une charge résineuse. Quand les deux objets sont très près l'un de l'autre, il y a une petite étincelle entre les deux, ce qui signifie qu'il y a un transfert de charge entre les objets. Dans la théorie du fluide unique, cette étincelle est produite par le passage dans l'air du fluide en excès dans un des objets vers l'autre objet qui n'a pas assez de fluide. En observant l'étincelle (dans l'air ou dans un tube où l'air est raréfié), on espère voir dans quelle direction se déplace le fluide. En 1753, Jean-Baptiste Le Roy et Giambatista Beccaria pensent voir le fluide aller de l'objet ayant une charge vitreuse vers l'objet ayant une charge résineuse. Ils en concluent que c'est l'objet qui a une charge vitreuse qui a une charge positive, comme l'avait simplement supposé Franklin. Toutefois, les arguments ne sont pas toujours très solides. Voici comment van Marum, déduit, en 1785, la direction du mouvement du fluide. Selon lui, la forme de l'éclair entre 2 objets de charge opposée montre clairement que le fluide se déplace vers la droite dans la figure suivante.

www.lindahall.org/martinus-van-marum/

En réalité, on pouvait déduire à peu près n'importe quoi à partir de ces observations (comme le faisaient déjà remarquer les partisans de la théorie des 2 fluides) et on peut donc dire que les signes positifs et négatifs donnés aux charges sont le résultat d'un hasard de l'Histoire.

À la fin du 19$^{e}$ siècle, la question du nombre de fluides électriques n'était toujours pas résolue quand la théorie des fluides électriques fut remplacée par la théorie corpusculaire de l'électricité.

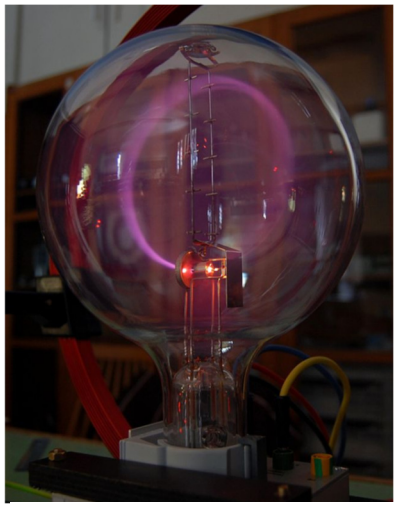
## Les électrons et les protons

Lentement, on se rend compte, au cours de la 2$^{e}$ moitié du 19$^{e}$ siècle, que la charge électrique ne vient pas d'un ou de deux fluides invisibles sans masse. Plusieurs considèrent que de nombreuses expériences s'expliquent plus facilement si on suppose qu'il existe des « atomes d'électricité », c'est-à-dire des particules chargées.

Par exemple, à partir de 1870, on étudie beaucoup le passage de l'électricité dans des gaz à basse pression. Cela permet premièrement de montrer que, dans ce cas, l'électricité se déplace de la cathode vers l'anode. On le voit très bien dans ce vidéo dans lequel on voit l'électricité provenant de la cathode tracer l'ombre de l'anode en la frappant.

https://www.youtube.com/watch?v=Xt7ZWEDZ_GI
Évidemment, ce qu'on observe ici pourrait également être un mouvement de fluide électrique, mais un fluide ne tracerait peut-être pas une ombre aussi nette de la croix.

William Crookes montre en 1874 que l'électricité transporte de l'énergie. Dans ce vidéo, on voit bien l'électricité pousser une petite roue, ce qui signifie qu'elle peut donner de l'énergie à la roue.
https://www.youtube.com/watch?v=yX2T4k-WySA
Cela montre que ce qui se déplace a une masse.


en.wikipedia.org/wiki/Electron

En 1879, Crookes observe que la trajectoire de l'électricité dans le gaz peut être déviée par un champ magnétique (image).
https://www.youtube.com/watch?v=Sikzu09q6cc
Crookes montre, toujours en 1879, que tous ces résultats s'expliquent facilement si on suppose que le mouvement de l'électricité est fait par un flot de particules chargées négativement allant de la cathode à l'anode.

En 1894, George Stoney donne à cette particule le nom d'*électron* et, l'année suivante, Hendrik Anton Lorentz refait la théorie de l'électromagnétisme en supposant l'existence de particules chargées. En 1895, Jean Perrin montre clairement qu'on a affaire à une particule (certains pensaient jusque-là que le passage de l'électricité dans le gaz pouvait aussi s'expliquer en supposant que c'était une onde.) En 1897, J.J. Thomson frappe un grand coup. Il met en évidence la présence de l'électron dans de nombreux phénomènes différents et montre que le rapport de la charge et de la masse est toujours le même, peu importe la provenance de l'électron. En 1899, Thomson mesure la masse et la charge de cette particule. Il n'y avait plus aucun doute, l'électron existe. C'est donc à lui qu'on attribue la découverte de l'électron (Thomson reçut d'ailleurs le prix Nobel en 1906 pour cette découverte).

Mais l'électron n'est pas la seule particule chargée. En 1914, Ernest Rutherford découvre le proton qui a une charge identique à celle de l'électron, mais positive. Ainsi, la charge électrique d'un objet est due à la présence de ces deux types de particules chargées dans l'objet.

**Particules chargées**

Les protons ($p^+$) ont une charge positive.

Les électrons ($e^-$) ont une charge négative.

Ce sont les deux seuls types de particules chargées présents dans la matière qui nous entoure. Il existe de nombreuses autres particules chargées, mais aucune n'est présente naturellement dans la matière.

# 1.3 LA CHARGE ÉLECTRIQUE

Aux 17e et 18e siècles, on doit démêler tous les concepts en électricité et cela inclut le concept de charge électrique. On sait qu'elle correspond à la quantité d'électricité dans un objet (à l'époque, on dit la *quantité de fluide électrique*), mais il faut déterminer comment quantifier cette charge et comment la mesurer. Se mesure-t-elle avec la longueur de l'étincelle qu'un objet chargé peut faire ou par l'angle de déviation qu'elle peut faire sur un pendule chargé ? Plusieurs ont l'impression que la charge est plutôt liée au nombre de tours de manivelle qu'il faut faire pour charger un objet avec une machine électrostatique. Il faut quand même pas mal de temps pour démêler tout ça et on peut dire que tout devient plus clair seulement avec les travaux d'Alessandro Volta (publiés en en 1779).

## La mesure de la charge

Depuis 1881, on mesure la charge d'un objet avec le coulomb. Le coulomb est défini ainsi

**Définition du coulomb**

La charge d'un électron est de $-1{,}602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C
La charge d'un proton est de $+1{,}602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C

Cette valeur est exacte. Toutes les décimales après le 4 sont des 0. Évidemment, le coulomb n'était pas défini ainsi au départ puisqu'on ne connaissait pas les électrons et les protons. La définition du coulomb a souvent changé et ce n'est que depuis 2019 qu'il est défini ainsi à partir des électrons et des protons.

Le nombre $1{,}602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C s'appelle la *charge élémentaire*. Ce nombre revient souvent en électricité et c'est pourquoi on utilise un symbole pour représenter cette valeur. Ce symbole est $e$.

**Définition de la charge élémentaire**

$$e = 1{,}602\ 176\ 634 \times 10^{-19}\ \text{C}$$

(Pour les calculs, on utilisera $1{,}602 \times 10^{-19}$ C.) La charge du proton est donc de $+e$ et la charge de l'électron est de $-e$.

## La charge d'un objet

Si un objet est composé $N_p$ protons qui ont une charge $+e$ et de $N_e$ électrons qui ont une charge $-e$, alors la charge totale de l'objet (qui est souvent notée $Q$ ou $q$) est

$$\begin{aligned} Q &= N_p \cdot (+e) + N_e \cdot (-e) \\ &= N_p e - N_e e \end{aligned}$$

$$= \left( N_p - N_e \right) e$$

On arrive alors à la conclusion suivante.

| | |
|---|---|
| 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 |

Si on appelle *N* la différence entre le nombre de protons et le nombre d'électrons

$$N = N_p - N_e$$

(*N* représente donc l'excès du nombre protons par rapport au nombre d'électrons) alors on arrive à l'équation suivante.

**Charge d'un objet**

$$Q = Ne$$

où *N* est un entier

*N* doit être un entier parce que la différence entre le nombre de protons et le nombre d'électrons doit nécessairement être un entier puisqu'il est impossible d'ajouter ou d'enlever une fraction de proton ou d'électron. En 1910, Millikan montra que la charge de petites gouttes d'huile correspond effectivement à un nombre entier de *e*.

(Notons que les quarks, qui sont les particules composant les protons et les neutrons, ont des charges plus petites que la charge élémentaire. 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.)

## Exemple 1.3.1

Un objet a une charge de 1 μC. Combien de protons y a-t-il en excès dans l'objet ?

La valeur de *N* est

$$Q = Ne$$

$$10^{-6}\,C = N \cdot 1,602 \times 10^{-19}\,C$$

$$N = 6,242 \times 10^{12}$$

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

# 1.4 LA LOI DE COULOMB

## Historique

Pour nous, la mesure de la force semble l'étape évidente après la découverte de l'existence de la force. Pourtant, il y a près d'un siècle entre le moment où Newton clarifie le concept de force avec $F = ma$ en 1687 et la découverte de la loi donnant la force électrique en 1785. Pourquoi cette découverte prend-elle autant de temps ?

*Les fluides et la force électrique*

En fait, plusieurs ne cherchent pas la formule de la force. Pratiquement tous les savants de cette époque tentent avant tout d'expliquer qualitativement l'origine de la force électrique en imaginant toutes sortes de mouvements d'air, d'effluves et de fluides invisibles autour des objets électrifiés. À cette époque, le ou les fluides électriques servent aussi à expliquer l'origine de la force électrique. Le fluide n'est pas simplement dans l'objet, il forme un genre d'atmosphère autour de l'objet chargé. Ce serait donc les mouvements de fluides dans cette atmosphère qui déplacent les objets près de l'objet chargé et qui seraient donc responsables de la force électrique.

D'ailleurs, c'est parce que la répulsion électrique ne cadre pas bien avec ces théories qu'on refuse pendant longtemps de l'accepter, même si on peut clairement l'observer. (On ne voit pas comment un mouvement de fluide dans une direction peut faire une force dans une direction sur un type de charge et dans la direction opposée pour l'autre type de charge.) C'est un exemple frappant du fait que la conception de la nature de celui qui observe influence grandement sa façon d'interpréter les observations. Comme la théorie de l'époque affirme que seule une attraction est possible, tous ceux qui observent la répulsion ne la considèrent pas comme importante. Pourtant, on dit que les scientifiques doivent être objectifs quand ils font des observations…

C'est seulement quand certains constatent que ces théories de mouvements de fluides autour des objets chargés ne semblent jamais fonctionner qu'on voit apparaitre l'idée, au milieu du 18$^{e}$ siècle, qu'il faudrait peut-être prendre l'approche que Newton a prise avec la gravitation en 1687. Il faut arrêter de chercher l'origine de la force et simplement accepter que les charges se repoussent et s'attirent à distance. Alessandro Volta (qu'on qualifie alors de Newton de l'électricité) et Charles Augustin Coulomb sont les premiers savants importants qui, libéré de ce fardeau de devoir fournir une théorie pour expliquer l'origine des forces électriques, font grandement progresser la science de l'électricité. C'est cette approche qui mènera à la découverte de la formule de la force et au développement de l'électricité et du magnétisme tels qu'on les connait aujourd'hui.

*Les charges ponctuelles*

Pendant que presque tous les grands savants sont occupés à développer des théories qualitatives de force avec des mouvements de fluides, certains se lancent dans les premières tentatives de mesure de la force électrique. Elles sont faites par Kratzenstein (1746),

Richmann (1753) (qui sera tué par un éclair en 1753 en tentant de capter la foudre avec une longue tige métallique), Gralath, Bose et Bernoulli (1760).

Toutefois, toutes ces tentatives ne permettent pas de trouver de loi donnant la force électrique. Évidemment, ce n'est pas facile de trouver la formule quand le concept de charge électrique n'est même pas encore bien défini, mais il y a plus que ça. Pour avoir une formule simple, on doit aussi penser qu'on doit chercher la force entre des charges ponctuelles (des objets chargés très petits) en sachant qu'on pourra trouver la force entre des objets chargés qui ont n'importe quelle forme à partir de ce résultat en séparant ces objets en petits morceaux. C'est pourquoi Volta, qui mesure la force entre des disques chargés, ne parvient pas à trouver une formule pour la force.

*La formule*

Il fallait donc attendre qu'on cesse de tenter d'expliquer la force par des mouvements de fluides, qu'on clarifie le concept de charge électrique et qu'on comprenne qu'on doit mesurer la force entre des charges ponctuelles avant de pouvoir trouver la formule de la force électrique. Tous ces éléments sont en place vers 1780. Il ne manque qu'un observateur méticuleux.

Cet observateur, c'est Charles Augustin Coulomb. Avec quelques expériences ingénieuses, il montre que la force varie selon $1/r^2$ (résultat publié en 1785). Il ajoute en 1787 que la force est proportionnelle aux charges des objets, qu'elles soient positives ou négatives, mais sans vraiment en fournir la preuve (pour lui, c'était évident…). Rassurez-vous, d'autres expériences de Coulomb ont montré que la force est effectivement proportionnelle aux charges, même si Coulomb n'en est pas vraiment conscient.

Voici la loi découverte par Coulomb donnant la force entre deux objets ponctuels ayant des charges $q_1$ et $q_2$.

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

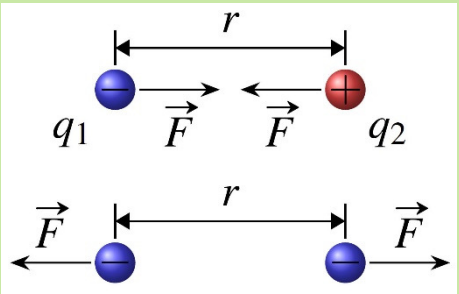
1) Grandeur de la force

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

où $k = 8{,}98755 \times 10^9$ Nm²/C²

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, comme le prévoit la troisième loi de Newton.

En fait, plusieurs mentionnent que la force devrait varier avec $1/r^2$ avant les travaux de Coulomb, mais c'est simplement parce qu'ils font l'analogie avec la force de gravitation. Il n'y a pas de preuve, c'est uniquement une intuition. Cette intuition contribue cependant à ce que la loi de Coulomb soit facilement acceptée par tous en 1785.

On dit souvent que c'est Priestley qui a montré, en 1767, que la force varie avec $1/r^2$ en utilisant une propriété intéressante des forces qui varient de cette façon. Si la force varie avec $1/r^2$, alors la force sur un petit objet chargé placé à n'importe quel endroit à l'intérieur d'une coquille sphérique chargée devrait être nulle. (On le sait parce qu'on a fait le calcul de la force de gravitation à l'intérieur d'une coquille sphérique et on a obtenu un résultat nul. On sait aussi qu'on obtient un résultat nul uniquement si la force diminue avec $1/r^2$.) Toutefois, les arguments de Priestley sont un peu boiteux. Comme Franklin a observé qu'un petit objet placé dans une tasse métallique chargée n'est pas attiré par la tasse, Priestley en conclut alors que la force doit varier avec $1/r^2$. C'est boiteux parce qu'une tasse, ce n'est pas exactement une sphère… Henry Cavendish ne manque pas de souligner l'erreur de Priestley en 1771. Cavendish corrige l'erreur de Priestley et vérifie expérimentalement que la force est bel et bien nulle partout à l'intérieur d'une coquille métallique chargée. Il montre ainsi que la force varie avec $1/r^2$ avant Coulomb, mais il ne publie pas ses résultats. (Dans une analyse des incertitudes un peu étonnante pour l'époque, Cavendish montre même que l'exposant dans $1/r^n$ doit être de 2,00 ± 0,02 selon ses expériences.)

Notez que Coulomb est aussi devancé par John Robison, mais ce dernier publie les résultats de ses expériences, pas très différentes de celles de Coulomb, seulement en 1801. (Il affirme alors que c'était en 1769. C'était surement un peu plus tard que cela, mais c'était avant Coulomb).

### Erreur fréquente : Utiliser $F = kq_1q_2/r^2$ pour calculer la force entre des charges qui ne sont pas ponctuelles

La loi de Coulomb donne la force entre des charges de toute petite taille. On va voir au chapitre suivant qu'elle ne donne pas la force entre des objets non ponctuels chargés, comme la force entre une tige chargée et une sphère chargée par exemple.

## La constante électrique

Quelques mots sur la constante $k$ dans la loi de Coulomb. Premièrement, notez qu'on utilisera souvent $k = 9 \times 10^9$ Nm²/C² pour les calculs. 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 $\varepsilon_0$ (aussi appelée la *permittivité du vide*).

**Constante électrique ($\varepsilon_0$)**

$$\varepsilon_0 = 8,854\,188\times10^{-12}\ \frac{C^2}{Nm^2}$$

On a le lien suivant entre les deux constantes.

**Lien entre $k$ et $\varepsilon_0$**

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

## Le principe de superposition

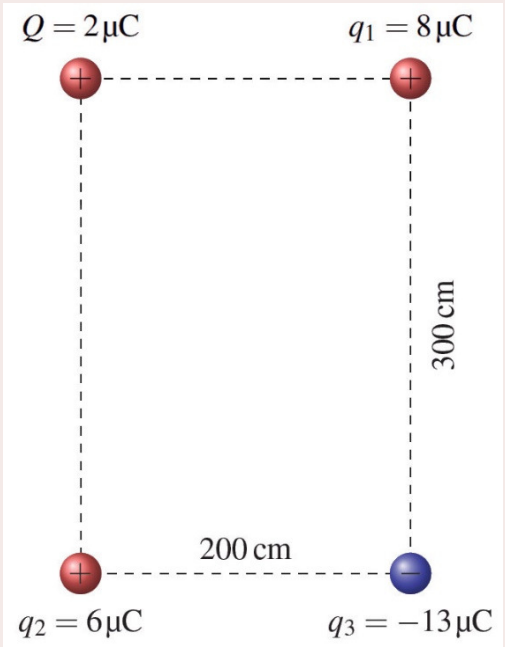
Si une charge (qu'on va appeler 1) est entourée de plusieurs charges (qu'on va numéroter de 2 à *N*), alors la force sur la charge 1 est simplement la somme des forces faites par les autres charges. C'est le principe de superposition.

**Principe de superposition**

$$\vec{F}_{\text{nette sur la charge1}} = \vec{F}_{\text{charge 2 sur la charge1}} + \vec{F}_{\text{charge 3 sur la charge1}} + \ldots + \vec{F}_{\text{charge N sur la charge1}}$$

## Exemple 1.4.1

Quelle est la force nette (grandeur et direction) 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 grandeur de la force faite par la charge $q_1$ est

$$F_1 = k\frac{|Q\cdot q_1|}{r_1^2}$$

$$= 9\times10^9\ \frac{Nm^2}{C^2}\cdot\frac{\left|2\times10^{-6}C\cdot8\times10^{-6}C\right|}{(2m)^2}$$

$$= 0,036N$$

La grandeur de la force faite par la charge $q_2$ est

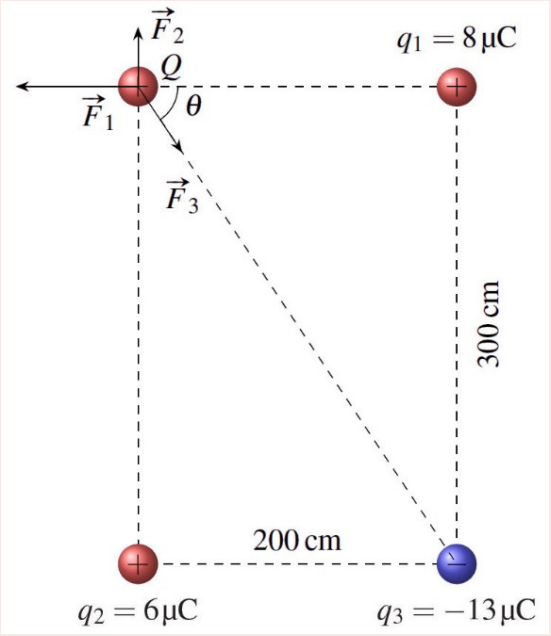
$$F_2 = k\frac{|Q \cdot q_2|}{r_2^2}$$
$$= 9\times10^9 \,\tfrac{Nm^2}{C^2} \cdot \frac{\left|2\times10^{-6}C \cdot 6\times10^{-6}C\right|}{(3m)^2}$$
$$= 0,012N$$

La grandeur de la force faite par la charge $q_3$ est

$$F_3 = k\frac{|Q \cdot q_3|}{r_3^2}$$
$$= 9\times10^9 \,\tfrac{Nm^2}{C^2} \cdot \frac{\left|2\times10^{-6}C \cdot 13\times10^{-6}C\right|}{\left(\sqrt{(2m)^2+(3m)^2}\right)^2}$$
$$= 0,018N$$

(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 $Q$. On voit ces forces sur la figure de droite.




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 que 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 connaitre la direction de toutes les forces. Cette direction est évidente pour les forces $F_1$ et $F_2$, mais on doit faire le petit calcul suivant pour trouver l'orientation de la force $F_3$.

$$\tan\theta = \frac{3m}{2m}$$
$$\theta = 56,3°$$

Les composantes des forces sont donc

$$F_{1x} = -0,036N \qquad F_{1y} = 0N$$
$$F_{2x} = 0 \qquad F_{2y} = 0,012N$$
$$F_{3x} = 0,018N \cdot \cos(-56,3°) \qquad F_{3y} = 0,018N \cdot \sin(-56,3°)$$
$$= 0,009985N \qquad = -0,014977N$$

Les composantes de la force nette sont donc

$$F_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x}$$
$$= -0,036N + 0N + 0,009985N$$
$$= -0,026015N$$

$$F_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y}$$
$$= 0N + 0,012N - 0,014977N$$
$$= -0,002977N$$

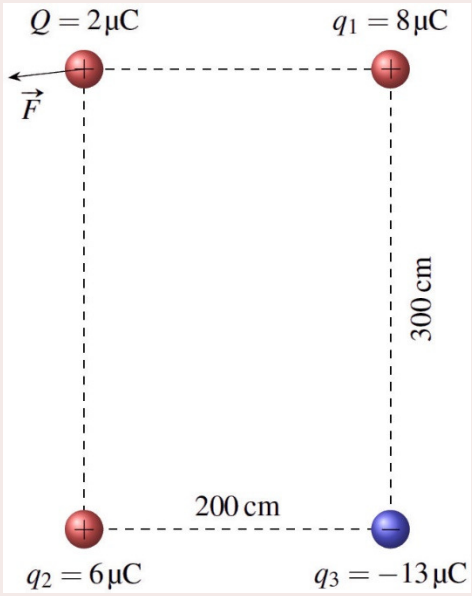
La grandeur de la force est

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$
$$= \sqrt{(0,026015N)^2 + (0,002977N)^2}$$
$$= 0,026185N$$

La direction de la force est

$$\theta = \arctan\frac{F_y}{F_x}$$
$$= \arctan\frac{-0,002977N}{-0,026015N}$$
$$= 186,5°$$

On peut voir cette direction sur la figure.



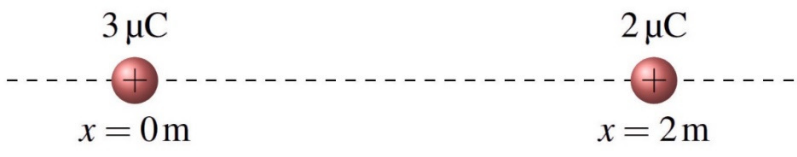

C'est long, mais que de plaisir…

## 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 1.4.2

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




Pour que la somme des forces soit nulle, les deux forces faites par les charges de 3 µC et de 2 µC doivent être de même grandeur. On doit donc avoir

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

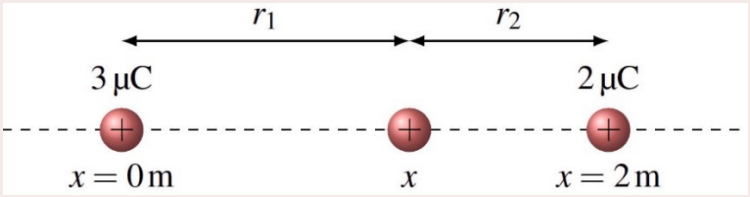
Mais puisque $|AB| = |A|\cdot|B|$, cette équation devient

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

$$\frac{3\mu C}{r_1^2} = \frac{2\mu C}{r_2^2}$$

$$\frac{3}{r_1^2} = \frac{2}{r_2^2}$$

Il reste à trouver les distances.




Notre charge est la position $x$. La distance entre la charge à la position $x$ et la charge de 3 µC à la position $x = 0$ m est

$$r_1 = x$$

La distance entre la charge à la position $x$ et la charge de 2 µC à la position $x = 2$ m est

$$r_2 = 2m - x$$

(La distance entre la charge inconnue à la position $x$ et une autre charge à la position $A$ est toujours $x - A$ ou $A - x$. On peut utiliser n'importe laquelle de ces 2 expressions puisque la distance sera au carré de toute façon.)

On a donc

$$\frac{3}{r_1^2}=\frac{2}{r_2^2}$$

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

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

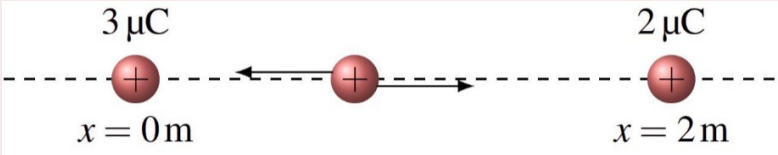
$$3\left(x^2-4m\cdot x+4m^2\right)=2x^2$$

$$3x^2-12m\cdot x+12m^2=2x^2$$

$$x^2-12m\cdot x+12m^2=0$$

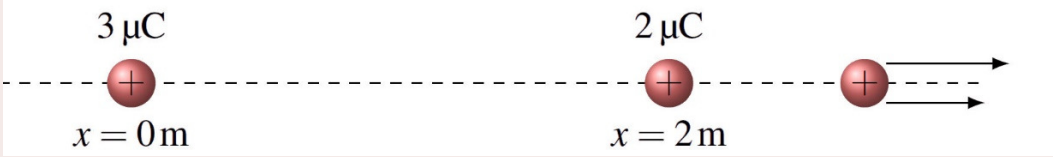
C'est une équation quadratique dont les solutions sont $x$ = 10,899 m et $x$ = 1,101 m. Cependant, une seule de ces réponses est bonne. Pour savoir laquelle, on doit examiner la direction des forces à chacune des positions.

À $x$ = 1,101 m, la charge $q$ est entre les charges de 2 µC et 3 µC. Voici les directions des forces sur $q$ si elle est positive.




Dans ce cas, les forces s'annulent puisqu'elles sont dans des directions opposées. C'est donc une solution acceptable.

À $x$ = 10,899 m, la charge $q$ est à la droite de la charge de 2 µC. Voici les directions des forces sur $q$ si elle est positive.




À cette position, les deux forces de répulsion sont dans la même direction. Il est donc impossible que les deux forces de répulsion s'annulent. La solution $x$ = 10,899 m n'est donc pas acceptable.

La seule solution est donc $x$ = 1,101 m.

Note : nous avons supposé ici que la charge $q$ était positive, mais on ne spécifiait pas dans la question si on devait placer une charge positive ou une charge négative. Les conclusions resteraient 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 m < $x$ < 2 m. De plus, rien ne change dans le calcul parce que la valeur absolue élimine le signe de la charge. On peut donc imaginer que la charge $q$ est positive ou négative et ça ne change rien au résultat.

La loi de Coulomb permet de calculer la force entre les charges, mais elle n'indique pas pourquoi il y a une force. Après avoir cherché, en vain, pendant des décennies pourquoi il y a une force électrique, presque tous les savants abandonnent la recherche de cette explication à la fin du 18$^{e}$ siècle. La force existe. C'est comme ça, c'est tout.

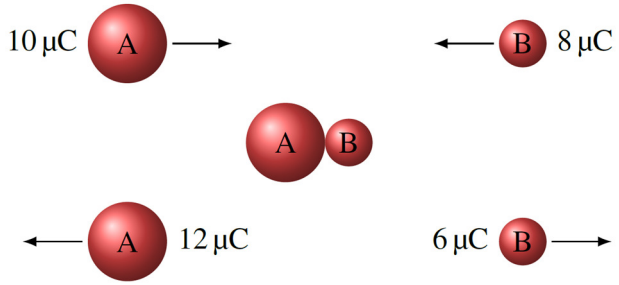
On a un peu la même chose avec les charges électriques. On sait que l'électron est négatif et que le proton est positif, mais on ne sait pas ce qui les rend comme ça.

Il faut attendre le développement de l'électrodynamique quantique avant de comprendre pourquoi il y a une force. Développée durant les années 1950 et 1960, cette théorie stipule que la force électrique provient d'un échange de photons entre les charges. Cette théorie est la théorie la plus précise jamais développée (ce qui signifie que l'accord entre la théorie et les expériences est exceptionnel), mais elle est beaucoup trop complexe pour l'expliquer ici.

# 1.5 LA CONSERVATION DE LA CHARGE

## Le principe de conservation

Quand on fait passer de la charge électrique d'un objet à un autre, la somme des charges électriques des deux objets est toujours la même. Par exemple, la figure suivante nous montre le transfert d'une charge de 2 µC entre deux objets qu'on met en contact.




La charge de l'objet A augmente de 2 µC et la charge de l'objet B diminue de 2 µC. On remarque que la somme des charges des 2 objets avant le transfert est de 18 µC et que la somme des charges des objets après le transfert est encore de 18 µC.

La charge ne peut pas apparaitre ou disparaitre dans un système isolé, elle peut seulement passer d'un objet à un autre. C'est le principe de conservation de la charge.

**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 opposées, ce qui va lentement annuler la charge de l'objet.

On remarqua assez vite que la quantité de charges reste constante. Bien que la découverte soit souvent attribuée à Franklin (1747), à peu près tous les savants tenaient pour acquis, sans nécessairement l'écrire explicitement, que la charge est conservée au moins depuis les travaux de Dufay (1732).

### Pourquoi y a-t-il conservation ?

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 toujours la même avant et après la réaction. En fait, la théorie moderne prévoit que la charge doit toujours être conservée puisque sa conservation est une conséquence directe d'une symétrie de la nature appelée *symétrie de jauge*, symétrie trop complexe pour qu'on l'explique ici.

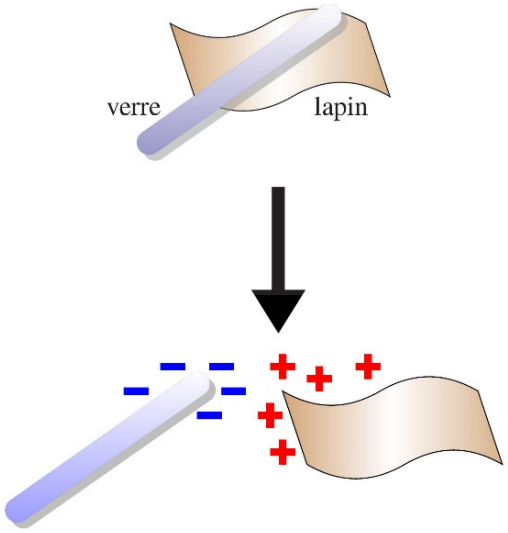
## 1.6 LA SÉPARATION DE LA CHARGE

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'un objet à l'autre.

La table de droite, 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.

Il y a plus de charge quand on frotte parce qu'en frottant les deux substances l'une sur l'autre, on favorise grandement le transfert d'électrons.

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




Le vidéo suivant montre bien que la tige et la fourrure ont des charges opposées.
www.youtube.com/watch?v=ceUApJ_LUzU
Les charges accumulées ne sont pas très importantes. On parle de charges 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 fonctionnaient les premiers générateurs électrostatiques. On plaçait un objet (une pièce de tissu en laine par exemple) en contact avec une sphère (souvent en verre) et un faisait tourner la sphère avec une manivelle. On pouvait alors accumuler des charges assez importantes dans la sphère.

La première véritable machine électrostatique a été inventée par Francis Hauksbee en 1707, mais son utilisation a pris plus d'ampleur après 1737 avec les raffinements apportés par Georg Matthias Bose et Christian August Hausen.

nationalmaglab.org/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/museum/electrostatic-generator-1706/

Notez que les générateurs van de Graaff (à droite), souvent utilisés lors de démonstrations des effets de l'électricité statique, ne génèrent pas l'électricité par frottement puisqu'il n'y a pas de frottement dans ces machines.

Dans cette machine, il y a une courroie (on la voit dans la colonne verticale) qui relie 2 cylindres (un en bas de la colonne et un dans la sphère métallique). Le mécanisme de génération de charge de cette machine, assez complexe, commence par un transfert de charge par simple contact entre la courroie et le cylindre du haut.

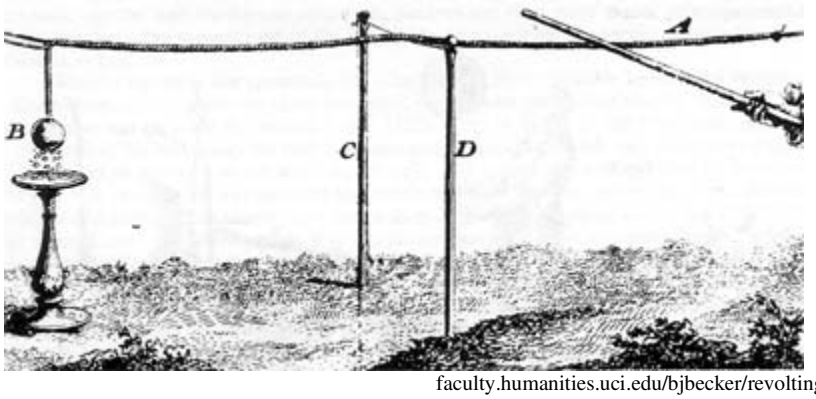
en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic_generator

## 1.7 LES ISOLANTS ET LES CONDUCTEURS

En février 1729, Stephen Gray se lance dans l'étude du passage de l'électricité d'un objet à un autre. Il avait déjà observé cette transmission en 1721 quand il avait vu qu'une plume

qui avait été mise en contact avec un tube de verre chargé pouvait à son tour attirer des petits objets. Cette fois, il décide d'étudier davantage ce phénomène. Il fixe donc des objets de plus en plus longs au bout d'un tube de verre tout en variant les matériaux utilisés (il utilise même des légumes !). Quand il charge le tube en le frottant, il examine si la charge se propage dans l'objet fixé au bout du tube. Ses observations montrent que l'électricité peut effectivement se déplacer sur une distance d'un peu plus d'une dizaine de mètres, ce qui l'amène à penser que l'électricité se déplace dans la matière un peu comme un fluide.

Le 30 juin, Gray s'installe avec ses instruments chez son bon ami Granville Wheler. Ce dernier possède un vaste domaine à la campagne et s'intéresse aussi à l'électricité. Ensemble, ils parviennent à transmettre l'électricité sur une distance de quelques centaines de mètres. (Difficile de préciser cette distance, on dirait que chaque histoire de cette découverte donne une distance différente !)



faculty.humanities.uci.edu/bjbecker/revoltingideas/week7j.html

Tout fonctionne bien tant que le long fil dans lequel se propage l'électricité est soutenu par des fils de soie. Quand ils remplacent les fils de soie par des fils de laiton (parce que les fils de soie étaient trop fragiles), plus rien ne fonctionne ! Jusque-là, ils pensaient que l'électricité ne pouvait pas passer par les fils de soie parce qu'ils étaient trop petits, mais comme les fils de laiton étaient tout aussi petits, cette explication ne tenait pas la route. Le 3 juillet 1729, il devient clair pour eux qu'il y a une différence importante entre le laiton et la soie. La soie ne laisse pas passer facilement l'électricité alors que le laiton laisse passer facilement l'électricité. Quand on soutient le long fil par des fils de laiton, la charge du fil peut s'échapper par les fils de laiton et on ne peut plus le charger.

Ils viennent de faire une découverte majeure. Certaines substances, comme les métaux, laissent très facilement passer l'électricité. Ce sont les *conducteurs.* D'autres substances, comme des fils de soie, ne laissent pas passer l'électricité. Ce sont des *isolants.* (Gray n'utilise pas les termes d'isolants et de conducteurs. Le terme *conducteur* fut introduit par son compatriote Desaguliers en 1740.)

Les découvertes de Gray et Wheler permettent aussi d'expliquer pourquoi on parvenait à charger certains objets et pourquoi on ne parvenait pas à charger d'autres objets. Les substances isolantes peuvent être facilement chargées, car les charges générées par le frottement restent en place sur l'objet. Par contre, les substances conductrices ne peuvent pas se charger si on les tient dans notre main, car les charges créées par le frottement se

déplacent dans l'objet pour aller dans notre main et ensuite se perdre dans le sol. Gray et Wheler montrent qu'on peut charger un conducteur à condition de soutenir l'objet avec des fils isolants plutôt qu'avec la main. Ainsi, les charges ne peuvent pas quitter l'objet et l'objet peut être chargé.

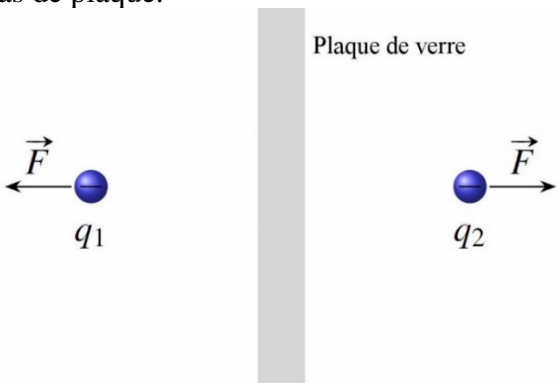
En fait, la classification en isolants et conducteurs n'est pas si nette parce que les charges peuvent se déplacer dans toutes les substances. Il y a une différence simplement parce que les charges ont beaucoup plus de facilité à se déplacer dans certaines substances, comme les métaux, que dans d'autres, 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 que 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 très 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.

Notez que les isolants bloquent le passage des charges, mais ils ne bloquent pas la force électrique. Deux charges identiques séparées par une plaque isolante se repousseront comme s'il n'y avait pas de plaque.

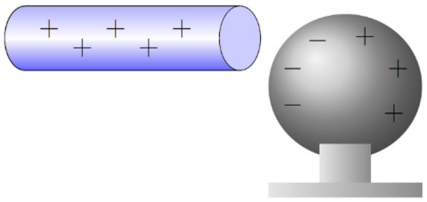



(Cela fut d'ailleurs à l'origine de nombreuses disputes au 18$^{e}$ siècle. Comme on pensait que la force électrique était causée par un mouvement de fluide électrique, le fluide électrique devait donc pouvoir passer librement à travers une plaque de verre puisque le verre ne bloquait pas la force. Pourtant le verre est un isolant ce qui signifie qu'il ne devrait pas laisser passer le fluide…)

# 1.8 L'INDUCTION ÉLECTRIQUE

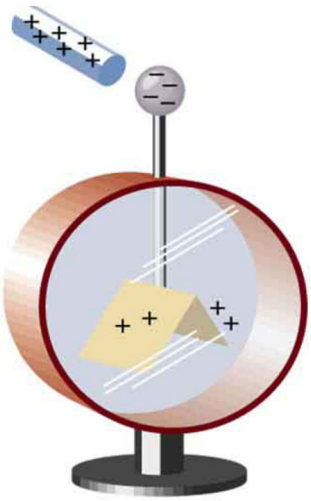
## La séparation de charge

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.

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 disparait et les deux feuilles redeviennent verticales, car elles ne se repoussent plus.

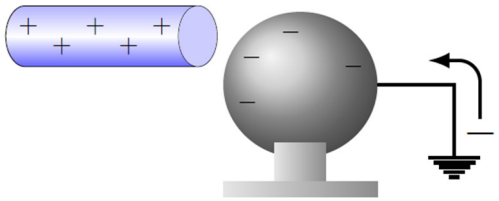


Ce phénomène s'appelle la *séparation de charge par induction*.

cnx.org/content/m42306/latest/?collection=col11406/latest

L'induction fut découverte par Gray et Wheler en 1730. La poursuite de leurs recherches sur le passage de l'électricité d'un objet à un autre les amène à se demander si la transmission ne pourrait pas aussi se faire dans l'air. En approchant des objets chargés près d'autres objets sans qu'il y ait contact, ils observent l'induction. En fait, plusieurs des expériences de 1729 sur la conduction s'expliquent par l'induction. En effet, les fils dans lesquels il devait y avoir transmission de l'électricité étaient fixés à un bouchon de liège placé au bout d'un tube de verre. Toutefois, le liège est un isolant et la charge positive du tube ne pouvait pas traverser le bouchon. En chargeant le tube, on générait en fait de l'induction dans le fil et l'objet placé au bout du fil. L'objet au bout devenait alors chargé et agissait comme si l'électricité positive du tube s'était transmise jusque là.

On peut aussi donner une charge à un conducteur grâce à l'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*.

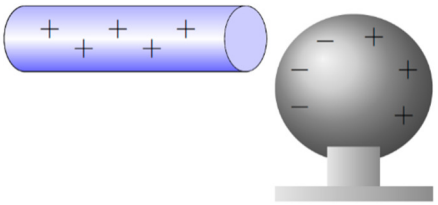


(Remarquez le symbole indiquant que le fil est relié au sol, c'est un symbole très utilisé en électricité.)

## L'attraction d'un objet neutre par induction

On a vu que la seule règle connue en électricité avant les travaux de du Fay en 1732 est qu'un objet chargé peut attirer la matière, c'est-à-dire des objets qui ne sont pas chargés. Un tube chargé attire bel et bien des petits morceaux de papier qui, eux, ne sont pas chargés. Or, selon la loi de Coulomb, la force devrait être nulle si un des objets a une charge nulle ! Comment peut-on avoir une telle attraction ?

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 simplement 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.



On remarque alors que les charges négatives sont plus près de la tige que les charges positives. Comme la loi de Coulomb indique 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 tige. Comme il y a plus d'attraction que de répulsion, la sphère est attirée par la tige même si sa charge nette est nulle !

C'est bien beau tout ça, mais cela n'explique pas comment une tige chargée peut attirer des morceaux de papier. Comme le papier est un isolant, il ne peut pas y avoir de séparation de charge par induction puisque les charges ne peuvent pas se déplacer. Rassurez-vous, nous aurons l'explication au chapitre suivant.

# RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

**Charge d'un objet**

$$Q = Ne$$

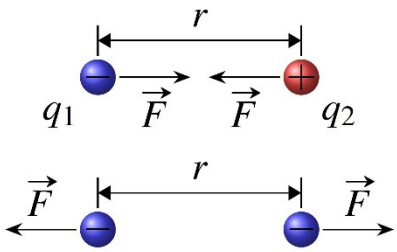
**Loi de Coulomb (Force électrique entre des charges ponctuelles)**

1) Grandeur de la force

$$F = k\frac{|q_1 q_2|}{r^2} \qquad \text{où } k = 8{,}98755 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$$

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

**Lien entre $k$ et $\varepsilon_0$**

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

**Principe de superposition**

$$\vec{F}_{\text{nette sur la charge1}} = \vec{F}_{\text{charge 2 sur la charge1}} + \vec{F}_{\text{charge 3 sur la charge1}} + \ldots + \vec{F}_{\text{charge N sur la charge1}}$$

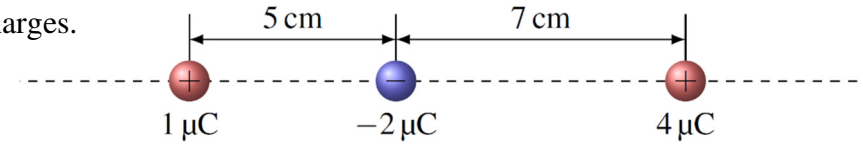
# EXERCICES

## 1.4 La loi de Coulomb

1. Dans un cristal de sel, l'ion de sodium ($Q = e$) est à une distance de 2,82 x $10^{-10}$ m de l'ion de chlore ($Q = -e$). Quelle est la grandeur de la force d'attraction entre ces deux ions ?

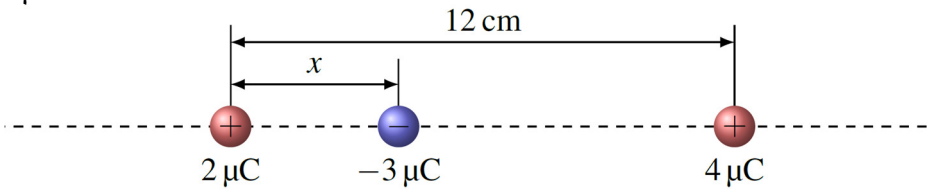
2. La force d'attraction entre une charge de 5 µC et de -10 µC est de 10 N. Quelle est la distance entre les charges ?

3. Voici 3 charges.

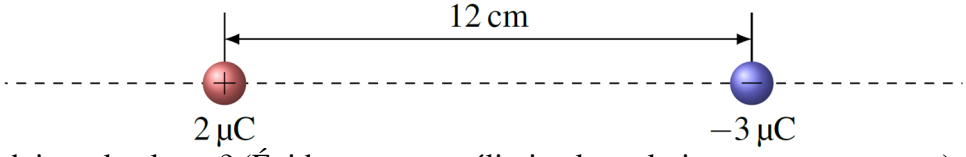



a) Quelle est la force nette sur la charge de 1 µC ?
b) Quelle est la force nette sur la charge de -2 µC ?

4. Dans la situation suivante, on a une charge de -3 µC située entre 2 charges positives. Quelle doit être la valeur de $x$ pour que la force nette sur la charge de - 3 µC soit nulle ?

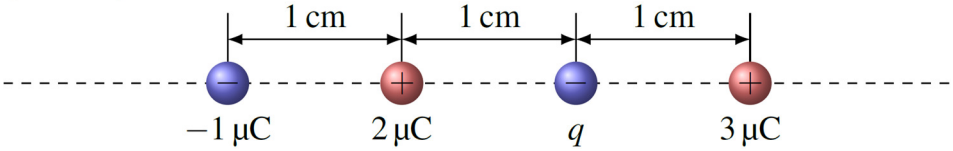



5. Dans la situation suivante, on doit placer une charge sur la ligne à un endroit où elle va subir une force nette nulle.

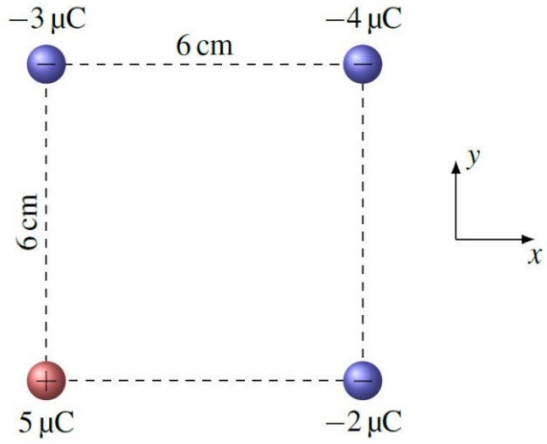



Où doit-on la placer ? (Évidemment, on élimine les solutions $x = \infty$ et $x = -\infty$.)

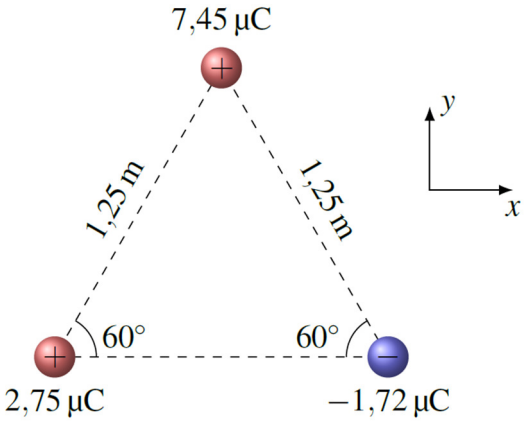
6. Dans la situation suivante, quelle doit être la valeur de $q$ pour que la force sur la charge de -1 µC soit nulle ?



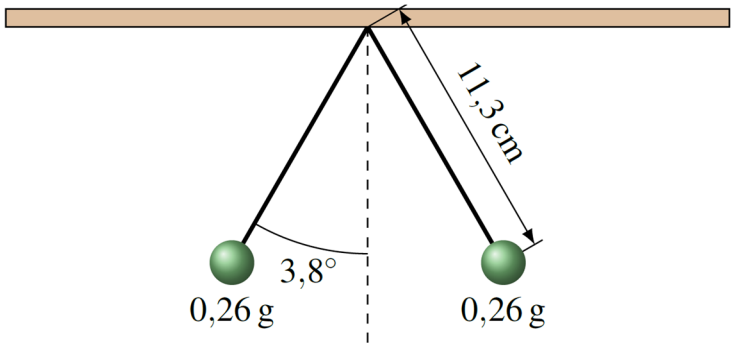

7. Dans cette situation, quelle est la force nette (grandeur et direction) sur la charge de -2 µC ?



8. Dans cette situation, quelle est la force nette (grandeur et direction) sur la charge de 2,75 µC ?




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

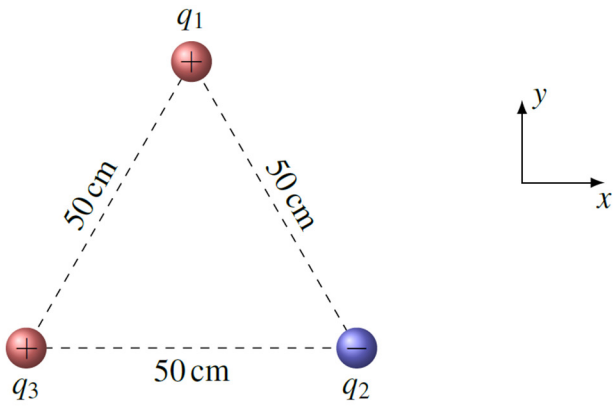



En vous rappelant qu'à l'équilibre la somme des forces sur chaque boule doit être nulle, déterminez la valeur de la charge des boules.

10. Dans la situation montrée sur la figure, on sait que les grandeurs des forces entre les charges sont

$$F_{12} = 18N$$
$$F_{13} = 45N$$
$$F_{23} = 72N$$

Déterminez les valeurs de $q_1$, $q_2$ et $q_3$.



# RÉPONSES

## 1.4 La loi de Coulomb

1. 2,904 x $10^{-9}$ 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 µC
6. -9,333 µC
7. 32,07 N à -127,9°
8. 0,10702 N à -107,3 N
9. 2,054 nC ou -2,054 nC
10. $q_1$ = 17,68 µC $q_2$ = - 28,28 µC $q_3$ = 70,71 µC