

01 – La force électrique



Figure 1 - Avion électrique "Spirit of Innovation" - Rolls-Royce

Remerciements :

Les notes de ce chapitre sont fortement basées (parfois carrément reproduites) sur les notes de M. Luc Tremblay pour son cours électricité et magnétisme qui se trouvent [ici](#). Merci M. Tremblay!

01.1 Les charges positives et négatives

Il existe deux types de charges électriques : les charges *positives* et *négatives*.

Les charges

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

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

La charge électrique d'un objet est due à la présence de deux types de particules chargées dans l'objet : les *protons* et les *électrons*.

Les particules chargées

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

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

01.2 La charge électrique

La charge électrique correspond à la quantité d'électricité dans un corps. Depuis 1881, l'unité de mesure utilisée pour la charge électrique est le coulomb (C).

Le coulomb

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

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

Le nombre $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C est représenté par e , appelé la *charge élémentaire*.

La charge élémentaire

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

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

Un objet composé de n_p protons et de n_e électrons aura une charge (Q) de :

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

On peut donc définir la charge d'un objet selon le nombre de protons et d'électrons qui le composent. S'il y a plus de protons, l'objet a une charge positive. S'il y a plus d'électrons, l'objet a une charge négative. S'il y a autant de protons que d'électrons, la charge de l'objet est *neutre*.

En appelant n la différence est le nombre de protons et d'électrons (n est donc un entier) :

$$n = n_p - n_e$$

On simplifie la définition de la charge d'un objet :

La charge d'un objet

$$Q = ne$$

Exemple 01.2.1

Un objet a une charge de $1 \mu\text{C}$. Est-ce que cet objet a une charge neutre, positive ou négative?

Puisque la charge n'est pas 0, la charge de l'objet n'est pas neutre. Elle n'est pas négative non plus puisque le signe serait négatif (-). L'objet a donc une **charge positive**.

Est-ce qu'il y a des protons ou électrons en excès? Si oui, lesquels et combien?

Puisque la charge de l'objet est positive, il y a des **protons en excès**. Pour savoir combien, on utilise la formule de la charge :

$$Q = ne$$

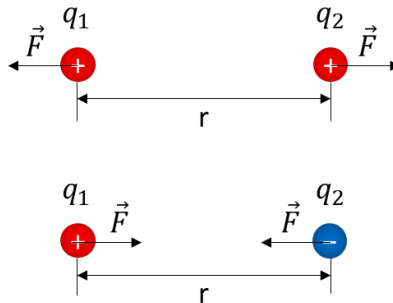
$$10^{-6}\text{C} = n \cdot 1,602 \times 10^{-19}\text{C}$$

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

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

01.3 La loi de Coulomb

On définit une *charge ponctuelle* comme un objet chargé très petit. Cette définition nous permet de décomposer un objet plus grand et plus complexe en petites composantes simples pour lesquelles on pourra calculer la force électrique. En 1785, Charles Augustin Coulomb montre que la force varie selon $1/r^2$. Il montre aussi que la force est proportionnelle aux charges des objets, qu'elles soient positives ou négatives. La loi de Coulomb définit donc la force électrique entre des charges ponctuelles :



La loi de Coulomb

1 – Grandeur de la force

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

Où $k = 8,98755 \times 10^9 \text{ N m}^2 / \text{C}^2$

2 – Direction de la force

Les charges de mêmes signes se repoussent mutuellement

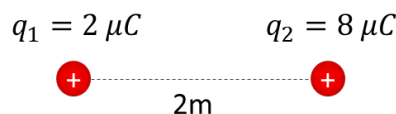
Les charges de signes contraires s'attirent mutuellement

3 – Point d'application de la force

Pour une charge ponctuelle : sur la charge

Exemple 0.1

Quelle est la force nette (grandeur et direction) sur la charge q_1 ?



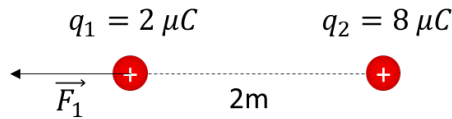
La force faite par la charge q_2 est :

$$F_2 = k \frac{|q_1 q_2|}{r_2^2}$$

$$F_2 = 9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \frac{|2 \times 10^{-6} \text{C} \cdot 8 \times 10^{-6} \text{C}|}{(2\text{m})^2}$$

$$F_2 = 0,036N$$

Puisque les charges sont de mêmes signes, la charge q_2 repousse la charge q_1 . On peut représenter graphiquement la force qu'exerce q_2 sur q_1 :



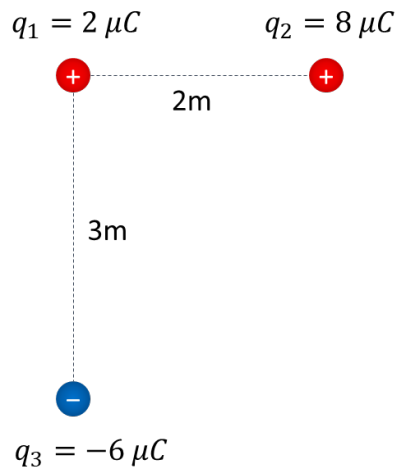
Lorsqu'il y a plus de deux charges (numérotées de 1 à N), le *principe de superposition* permet de calculer la force exercée sur chacune d'elle. Si une charge est entourée de plusieurs charges, la force sur cette charge est la somme des forces faites par les autres charges :

Principe de superposition

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

Exemple 0.2

Quelle est la force nette (grandeur et direction) sur la charge q_1 ?



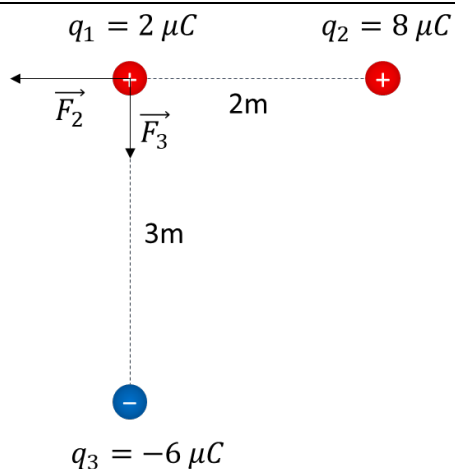
Nous savons déjà que la force exercée par q_2 est de 0,036N, vers la gauche. Pour q_3 :

$$F_3 = k \frac{|q_1 q_3|}{r_3^2}$$

$$F_3 = 9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \frac{|2 \times 10^{-6} C \cdot 6 \times 10^{-6} C|}{(3m)^2}$$

$$F_3 = 0,012N$$

Cette fois, la force est exercée vers le bas puisque les signes sont contraires. On peut représenter graphiquement les deux forces exercées sur q_1 :



Les composants de la force nette sur q_1 sont donc :

$$F_x = F_{2x} + F_{3x}$$

$$F_x = -0,036\text{N} + 0\text{N}$$

$$F_x = -0,036\text{N}$$

$$F_y = F_{2y} + F_{3y}$$

$$F_y = 0 + -0,012\text{N}$$

$$F_y = -0,012\text{N}$$

La grandeur de la force est :

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$F = \sqrt{0,036^2 + 0,012^2}$$

$$F = 0,03795\text{N}$$

La direction de la force est :

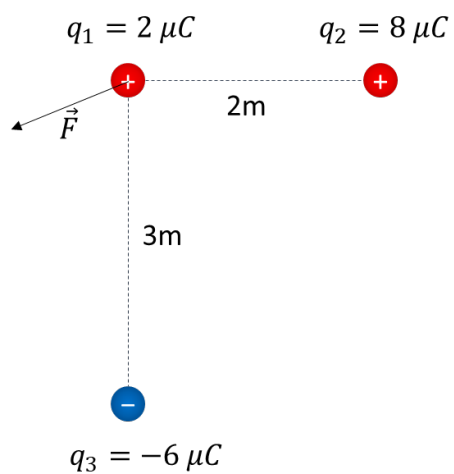
$$\theta = \tan^{-1} \frac{F_y}{F_x}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{-0,012\text{N}}{-0,036\text{N}}$$

$$\theta = 18,4^\circ$$

Puisque le vecteur de force résultant se retrouve dans le troisième quadrant (F_x et F_x sont négatifs), on ajoute 180° :

$$\theta = 18,4^\circ + 180 = 198,4^\circ$$



01.4 La séparation de la charge

Lorsque deux objets sont mis en contact, il est possible qu'un transfert d'électrons ait lieu d'une substance à une autre. C'est la **triboélectricité**. La *série triboélectrique* indique comment se fera ce transfert selon les matières mises en contact. On trouve dans la liste les deux matières qui seront mises en contact. Celle la plus basse va voler des électrons à celle la plus haute. La plus basse va donc avoir une charge négative, et la plus haute une charge positive. Plusieurs listes existent, en voici un exemple :

Matières positives
mains sèches
fouffure de lapin
verre
cheveux
nylon
laine
fouffure 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
Matières négatives

Figure 2 - Série triboélectrique - scienceamusante.net

Par exemple, si on frotte du verre et de la fouffure de lapin, le verre aura une charge négative et la fouffure de lapin aura une charge positive. Le vidéo suivant montre quelques exemples (du téflon, de la fouffure de lapin et du verre) www.youtube.com/watch?v=ceUApJ_LUzU.

01.5 Les isolants et les conducteurs

Certaines substances, comme les métaux, laissent très facilement passer l'électricité. On les appelle les *conducteurs*. D'autres substances, comme des fils de soie, ne laissent pas passer l'électricité. Ce sont des *isolants*.

En fait, la classification en isolants et conducteurs 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 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
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.

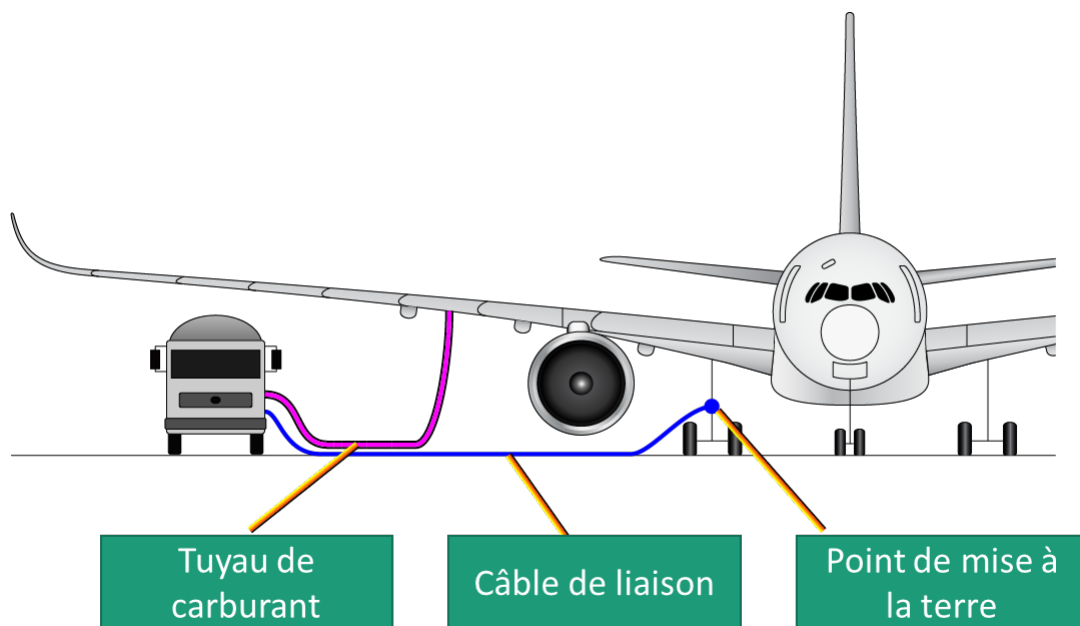
Ces temps de relaxation sont évidemment déterminés par la façon dont les atomes se lient dans l'objet. Dans les métaux, des électrons sont partagés par de très nombreux atomes (liaisons métalliques), ce qui permet aux électrons de se déplacer assez facilement. Dans les autres substances, dans lesquelles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

01.6 Protection des décharges électrostatiques - Ravitaillement

En aviation, la triboélectricité amène son lot de problèmes. On s'attarde ici à deux façons dont elle se manifeste, ainsi qu'à leurs solutions.

Lorsqu'un liquide s'écoule dans un tuyau, comme c'est le cas lors du ravitaillement en carburant, l'effet triboélectrique se manifeste par un échange d'électrons entre le carburant et le camion ravitailleur. Par frottement, le carburant vole des électrons au métal du tuyau. Si l'avion et le camion ravitailleur ne sont pas liés électriquement, cette charge n'est pas dissipée et augmente pendant le ravitaillement. Le potentiel pour une décharge statique augmente rapidement, et puisqu'une telle décharge aurait lieu à l'endroit même où le carburant entre dans les réservoirs, il y a un fort risque d'explosion ou de feu.

La méthode de protection la plus efficace consiste à permettre aux électrons excédentaires du carburant de retourner dans le métal du camion ravitailleur. Ceci est fait en connectant un câble métallique entre le camion ravitailleur et l'avion (sur un point d'attache métallique qui est relié au fuselage). Cette précaution assure que la charge électrique est la même pour le camion ravitailleur et l'avion (équipotentialité). Pour plus de sécurité, un câble peut être aussi branché à la terre pour que quelconque charge électrique résiduelle soit complètement dissipée.



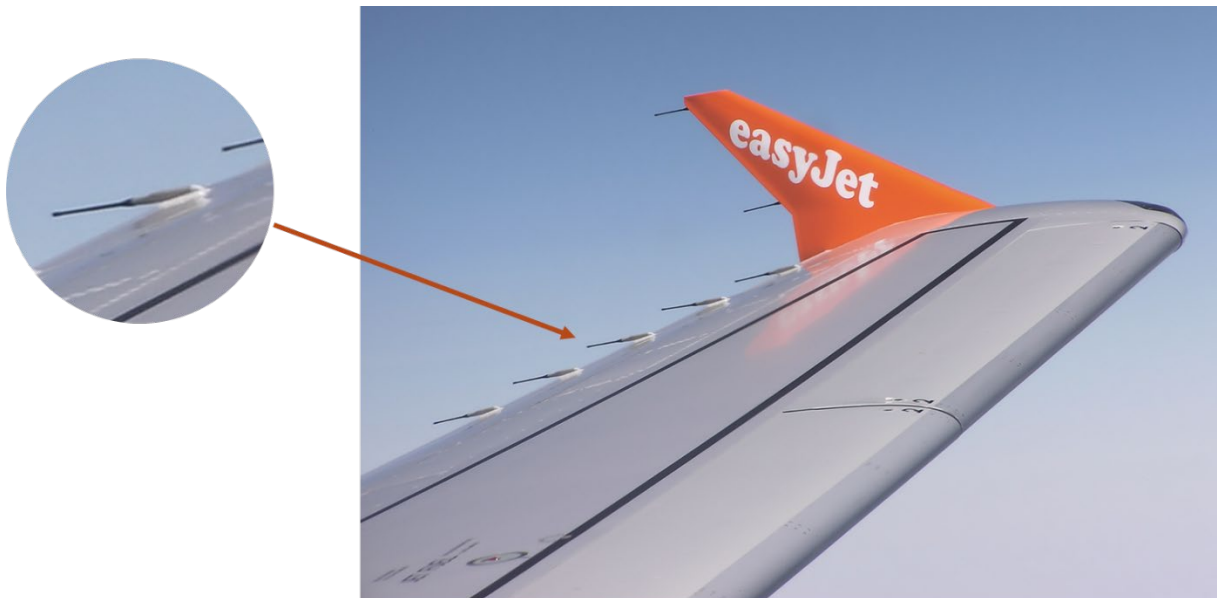
<https://safetyfirst.airbus.com/safe-aircraft-refuelling/>

01.7 Dissipation des charges statiques pendant le vol

L'écoulement de l'air sec ou des précipitations (cristaux de glace, neige, nuages) sur le fuselage pendant le vol produira, vous l'aurez deviné, un gain d'électrons dans le fuselage de l'avion. Si elles ne sont pas dissipées, ces charges affectent les systèmes de communication et de navigation. En effet, les électrons ont tendance à se dissiper par les parties petites et pointues du fuselage, comme les antennes radio et les antennes de navigation. Les antennes doivent maintenir une charge relativement nulle pour que la performance soit maximale. Si on permet aux électrons excédentaires de s'accumuler dans les antennes, on risque par exemple d'obtenir du bruit de fond dans les communications, d'affecter les récepteurs de navigation VOR et GPS, et aussi d'affecter le compas magnétique.

Pour contrer ce problème, nous allons offrir aux électrons une façon plus facile de se dissiper : ce sont les *déperditeurs d'électricité statique*. Ils dispersent l'électricité statique qui s'accumule sur le fuselage (vol dans les nuages ou encore frottement de l'air sec).

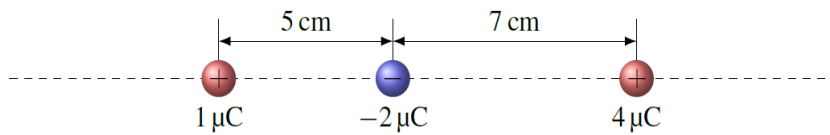
Ils doivent être correctement liés au fuselage. Les mèches sont fabriquées avec des fibres de carbone enveloppées dans une gaine.



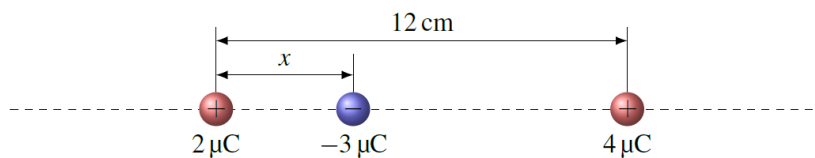
By Adrian Pingstone (Arpingstone) - Own work, Public Domain,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7840012>

Exercices

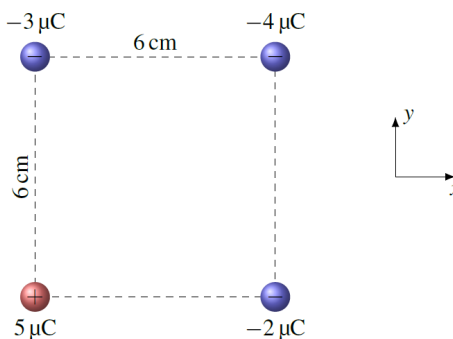
- Dans un cristal de sel, l'ion de sodium ($Q = e$) est à une distance de $2,82 \times 10^{-10}$ m de l'ion de chlore ($Q = -e$). Quelle est la grandeur de la force d'attraction entre ces deux ions?
- La force d'attraction entre une charge de $5 \mu\text{C}$ et de $-10 \mu\text{C}$ est de 10 N. Quelle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



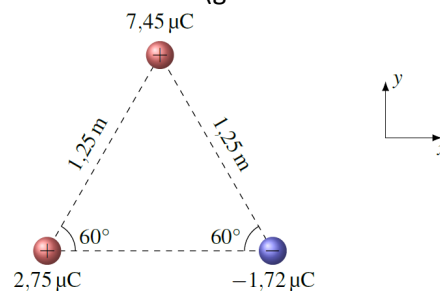
- Quelle est la force nette sur la charge de $1 \mu\text{C}$?
 - Quelle est la force nette sur la charge de $-2 \mu\text{C}$?
- Quelle doit être la valeur de x pour que la force nette sur la charge de $-3 \mu\text{C}$ soit nulle ?



- Dans cette situation, quelle est la force nette (grandeur et direction) sur la charge de $-2 \mu\text{C}$?



- Dans cette situation, quelle est la force nette (grandeur et direction) sur la charge de $2,75 \mu\text{C}$?



Réponses

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. 32,07 N à $-127,9^\circ$
6. 0,10702N à $-107,3^\circ$