

Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd

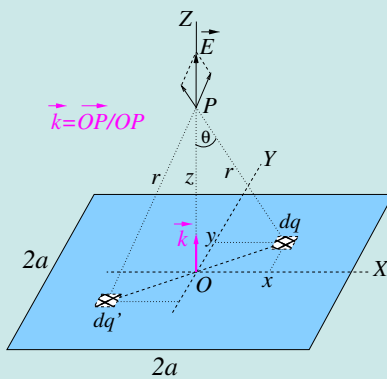
FACULTÉ DE MATHÉMATIQUES

ET INFORMATIQUE

Département Socle Commun - Mathématiques et
Informatique



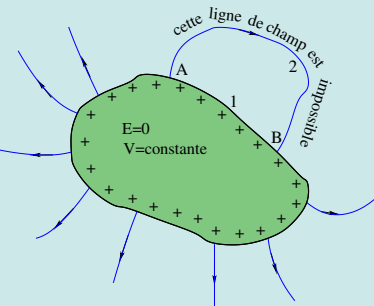
Cours de Phy



$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \tan^{-1} \left(\frac{a^2}{z\sqrt{z^2 + 2a^2}} \right) \vec{k}.$$

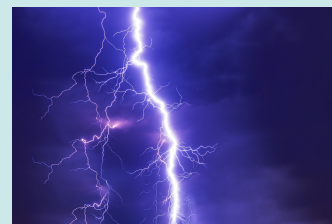
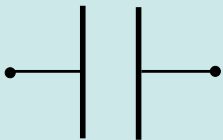
Si les dimensions de la plaque devenaient infiniment grandes, on devrait retrouver le cas du plan infini :

$$\lim_{a \rightarrow \infty} \vec{E} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \vec{k}.$$



Ci-dessus, en bleu, on voit une plaque carrée chargée uniformément. Elle crée en un point P de son axe, de cote z , le champ \vec{E} dont l'expression est écrite à sa droite. Plus à droite, en vert, on a un conducteur à l'équilibre ; ses charges excédentaires se répartissent nécessairement sur sa surface extérieure. Une ligne de champ émergeant du conducteur ne peut pas revenir au conducteur.

Quant aux images d'en bas, à gauche on montre le symbole qu'on utilise pour représenter un condensateur dans un schéma électrique, l'image du milieu montre différents types de condensateurs vendus dans le commerce et celle de droite un éclair typique observé en temps d'orage et résultant d'une décharge électrostatique entre les nuages et le sol.



Prof. M. M. Belkhir 2021-2022

Table des matières

1	Interaction électrostatique	2
1.1	Lexique français-arabe	2
1.2	Notion de charge électrique	2
1.3	Quantification de la charge électrique	3
1.4	Unité SI de la charge électrique	3
1.5	Conservation de la charge	4
1.6	Loi de Coulomb	4
1.6.1	Cas de plusieurs charges : principe de superposition	5
1.7	Matériaux conducteurs et matériaux isolants	5
1.7.1	Comment électriser un objet?	6
1.8	Questions et exemples d'application	7

Chapitre 1

Interaction électrostatique

Qu'est ce que l'électrostatique? C'est l'étude des effets produits par des *charges électriques statiques*, *i.e. immobiles*. Des charges électriques statiques peuvent provoquer le mouvement d'autres charges électriques. L'étude d'un tel mouvement rentre, bien sûr, dans l'électrostatique.

1.1 Lexique français-arabe

Électricité = كهرباء

Électrique = كهربائي

charge électrique = شحنة كهربائية

Électrisation = تكهرب

Électrisation par contact = تكهرب بالتماس

Électrisation par frottement = تكهرب بالإحكاك

Électrisation par influence = تكهرب بالحث

Électron = إلكترون; proton = بروتون; neutron = نوترون

Électron libre = إلكترون حر

Électroscope = كاشف كهربائي

Électronégatif = كهرسالب

Électrostatique (adjectif) = كهرساكن

interaction électrostatique التفاعل الكهروستاتيكي

Électrostatique (nom) = كهرباء ساكنة أو كهروستاتيكية

1.2 Notion de charge électrique

Dans la nature tout objet est fait d'atomes.

Un atome est une particule composée d'un noyau (النواة) et d'un ensemble d'électrons qui gravitent autour du noyau.

Le noyau est fait de neutrons (leur nombre est N_n) et de protons (leur nombre est N_p).

Un atome est caractérisé par son numéro atomique Z et son nombre de masse A avec $Z = N_p$ et $A = N_p + N_n$.

La différence $A - Z$ donne le nombre de neutrons. Pour un atome de symbole X, on résume ces données

sous la notation suivante : ${}^Z_A X$. Exemple le lithium (Li) est identifié par un numéro atomique égale à 3 et un nombre de masse égale à 7, ce que l'on symbolise par ${}^7_3\text{Li}$.

Les électrons sont des particules chargées négativement, les protons sont des particules chargées positivement et les neutrons sont des particules électriquement neutres.

Un proton porte la charge positive $q_p = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, un électron porte la charge négative $q_e = -1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$. En valeur absolue, protons et électrons portent la même charge $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$. On qualifie cette charge de *charge élémentaire* car c'est la plus petite charge observable et mesurable qui existe dans la nature.¹

Dans un atome neutre, il y a Z électrons (charge $-Ze$) et Z protons (charge $+Ze$). Un atome qui perd des électrons se retrouve avec plus de protons et devient un ion positif (exemple Cu^{++}), un atome qui gagne des électrons se retrouve avec plus d'électrons et devient un ion négatif (exemple O^{--}).

De la même façon, dans un objet neutre (عدمية الشحنة) il y a autant d'électrons que de protons. Quand un objet présente un défaut (نقص) ou un excès (زيادة) d'électrons, il n'est plus neutre ; on dit qu'il est chargé électriquement (مشحون كهربائياً) (مكهرب). Sa charge est positive dans le cas d'un défaut d'électrons et négative dans le cas d'un excès.

Synonymes : Chargé électriquement = électrisé = porte une charge électrique. Quand le contexte 'électrique' est clair (السياق واضح), on pourra dire simplement qu'un objet est chargé ou porte une charge sans avoir besoin de rajouter l'adverbe 'électriquement' ou l'adjectif 'électrique'.

1.3 Quantification de la charge électrique

Puisque, comme mentionné précédemment, l'électrisation n'est autre qu'un défaut ou un excès d'électrons, la charge électrique portée par un objet apparaît toujours sous forme d'un multiple de la charge élémentaire e . Autrement dit, toute charge électrique Q observable,² est forcément un multiple de e :

$$Q = \pm ne \tag{1.1}$$

où n est un entier positif ou nul. L'équation (1.1) n'est autre que l'expression de la quantification de la charge électrique.

1.4 Unité SI de la charge électrique

L'unité SI (Système International) de la charge est le coulomb (symbole C). Les charges typiques portées par les objets frottés sont de l'ordre du microcoulomb, nanocoulomb voire du picocoulomb. Le coulomb représente donc une très grande quantité de charge. Souvent, il est plus commode d'utiliser des sous-multiples :

le microcoulomb, $1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$;

le nanocoulomb, $1 \text{ nC} = 10^{-9} \text{ C}$;

et le picocoulomb, $1 \text{ pC} = 10^{-12} \text{ C}$.

Exercice d'application : L'électron et le proton ont respectivement pour charge $q_e = -1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ et $q_p = +1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$. a) Calculer le nombre d'électrons que doit gagner un objet neutre pour qu'il devienne chargé de -1 C . b) Calculer la variation relative de masse si initialement elle était de 1 gramme. La masse de l'électron est $m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

1. Il faut noter, cependant, que la physique des particules a démontré l'existence de **quarks** avec des charges de $\pm\frac{1}{3}e$ ou $\pm\frac{2}{3}e$, c'est-à-dire plus petites que la charge e . Mais, jusqu'à présent, personne n'a pu isoler un quark, on continue donc à considérer la charge e comme étant la plus petite charge mesurable.

2. Les lettres q et Q sont, en général, les symboles utilisés pour désigner les charges électriques portées par les objets.

Solution : a) Pour trouver le nombre d'électrons, on divise -1 C par la charge de 1 électron, i.e. $-1.602 \times 10^{-19}\text{ C}$. On trouve 6.242×10^{18} . Autrement dit, il faut 6.242 milliards de milliards d'électrons pour produire une charge de -1 C . Ceci laisse comprendre que le coulomb est une unité énorme !; b) Si m_i , m_f sont les masses initiale et finale de l'objet, la variation relative de masse est donnée par $(m_f - m_i)/m_i$. Ici $m_i = 1\text{ g}$, $m_f = m_i + m_g$ ($m_g =$ masse des électrons gagnés par l'objet) $\implies (m_f - m_i) = m_g$, ce qui conduit à une variation relative de masse de 5.686×10^{-9} . Cette fraction est tellement petite (نسبة ضئيلة للغاية) qu'on ignore (لا نأخذ بعين الاعتبار) la variation de masse d'un objet entre son état neutre et son état électrisé.

1.5 Conservation de la charge

Dans un système isolé, la charge n'est ni créée, ni détruite; elle ne peut qu'être transférée d'un élément du système à un autre élément du système. Pour un système composé de deux éléments, si une charge apparaît sur un élément du système, une charge de même valeur mais de signe opposé apparaît en même temps sur l'autre élément du système.

Exemple : A glass rod when rubbed with silk cloth, acquires a charge of $1.6 \times 10^{-11}\text{ C}$, then the charge on silk cloth will be :

A) $= 3.2 \times 10^{-11}\text{ C}$; B) $= -3.2 \times 10^{-11}\text{ C}$; C) $= -1.6 \times 10^{-11}\text{ C}$; D) $= 1.6 \times 10^{-11}\text{ C}$.

Answer : When glass rod is rubbed with silk, electrons move from rod to silk.

Since silk gets electrons it becomes negatively charged and the number of electrons gained by silk is same as that lost by rod.

Hence magnitude of charge on silk is same as that on rod.

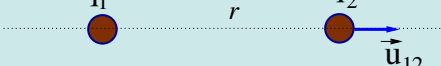
Hence charge on silk $= -1.6 \times 10^{-11}\text{ C}$, the correct answer is C).

1.6 Loi de Coulomb

Quand une charge est portée par une masse ponctuelle, on la nomme *charge ponctuelle*. Le vocable de *particule chargée* est parfois employé à la place de charge ponctuelle.

Considérons deux charges ponctuelles q_1 et q_2 séparées d'une distance r . L'expérience montre que chacune agit sur l'autre avec une force

- i) dirigée suivant la droite joignant q_1 et q_2 ,
 - ii) proportionnelle au produit q_1q_2 , répulsive si q_1 et q_2 sont de même signe et attractive si q_1 et q_2 sont de signes contraires.
 - iii) inversement proportionnelle au carré de la distance entre q_1 et q_2 .
- Si on note $\vec{F}_{1/2}$ la force avec laquelle q_1 agit sur q_2 , alors

$$\vec{F}_{1/2} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_{12} \quad (1.2)$$


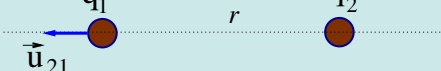
où \vec{u}_{12} est, par définition, un vecteur unitaire porté par la droite joignant les deux charges et orienté de la charge qui exerce la force (تمارس القوة) $\vec{F}_{1/2}$ vers la charge qui subit cette force (تتعرض لهذه القوة)

Remarque

Si \vec{r}_{12} désigne le vecteur joignant q_1 à q_2 , alors $\vec{u}_{12} = \vec{r}_{12}/r_{12} = \vec{r}_{12}/r$ et l'équation (1.2) est s'écrit aussi sous la forme

$$\vec{F}_{1/2} = k \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r}_{12}.$$

Réciproquement, la force exercée par q_2 sur q_1 s'écrit :

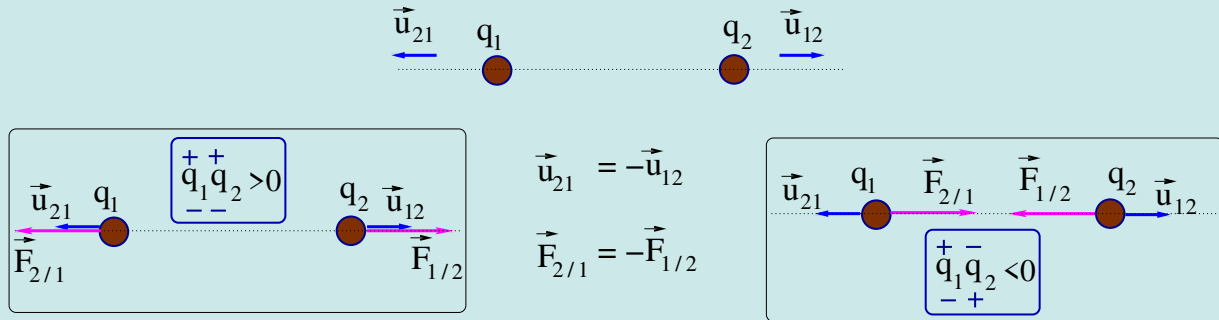
$$\vec{F}_{2/1} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_{21} \quad (1.3)$$


où le vecteur unitaire \vec{u}_{21} est, cette fois-ci, orienté de q_2 (charge qui exerce la force) vers q_1 (charge qui subit la force).

D'après la définition des vecteurs unitaires \vec{u}_{21} et \vec{u}_{12} , il est clair que $\vec{u}_{21} = -\vec{u}_{12}$ et, par suite,

$$\vec{F}_{2/1} = -\vec{F}_{1/2} \quad (1.4)$$

L'égalité (1.4) dit que la force de Coulomb obéit au principe de l'action et de la réaction (troisième loi de Newton).



Même si les vecteurs \vec{u}_{12} et \vec{u}_{21} sont, par définition, complètement définis (module, direction et sens), il n'en est pas de même des forces $\vec{F}_{1/2}$ et $\vec{F}_{2/1}$. Leur sens est déterminé par le signe du produit des charges $q_1 q_2$. Elles sont attractive si q_1 et q_2 sont de signes contraires et répulsive si q_1 et q_2 sont de même signe. La figure ci-dessus résume les différentes situations possibles suivant le signe de chacune des charges. La constante de proportionnalité k est une constante positive appelée parfois constante de Coulomb. Dans le système SI, cette constante s'écrit sous la forme

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}. \quad (1.5)$$

La constante ϵ_0 s'appelle permittivité diélectrique du vide (ou constante diélectrique du vide) et vaut $8.854187817... \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$. L'équation (1.5) donne alors : $k = 8.987551787... \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$, mais pour la plupart des applications numériques, on prend

$$k \approx 9 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}.$$

Maintenant qu'on connaît la valeur de k , on voit sur l'équation (1.2) que si $q_1 = q_2 = 1 \text{ C}$ et $r = 1 \text{ m}$, alors les deux charges vont se repousser avec une force de $9 \times 10^9 \text{ N}$. Cette force est équivalente au poids d'une masse de $900\,000\,000 \text{ kg}$! Il apparaît clairement que le coulomb, comme on l'a déjà mentionné précédemment, est une unité trop grande pour exprimer les quantités de charge statiques usuelles, d'où l'utilité des sous-multiples du coulomb.

1.6.1 Cas de plusieurs charges : principe de superposition

La loi de Coulomb donne la force créée par une charge sur une autre charge. Lorsqu'il y a plusieurs charges $q_1, q_2, q_3, \dots, q_N$ qui agissent sur une charge Q , la force totale sur Q s'obtient en faisant la somme vectorielle des forces exercées sur elle par q_1, q_2, \dots

$$\vec{F}_Q = \vec{F}_{1/Q} + \vec{F}_{2/Q} + \dots + \vec{F}_{N/Q} = \sum_i^N \vec{F}_{i/Q}. \quad (1.6)$$

La force $\vec{F}_{i/Q}$ exercée par q_i sur Q se calcule suivant la loi de Coulomb indépendamment de la présence des autres charges :

$$\vec{F}_{i/Q} = k \frac{q_i Q}{r_{iQ}^2} \vec{u}_{iQ},$$

où r_{iQ} désigne la distance de q_i à Q , et \vec{u}_{iQ} est un vecteur unitaire allant dans les sens $q_i \rightarrow Q$.

1.7 Matériaux conducteurs et matériaux isolants

Du point de vue électrique, la plupart des matériaux (مواد) sont soit conducteurs (ناقلة) (les métaux, les alliages, le corps humain, l'eau, ...) soit isolants (عازلة) (le verre, le soufre, le plastique, l'ambre, le caoutchouc, ...). Un conducteur est un corps dans lequel les charges électriques peuvent se déplacer tandis que dans un isolant les charges électriques ne peuvent pas circuler. Il en résulte que quand on charge un conducteur, les charges se répartissent (توزع) sur tout le corps, même loin de l'endroit où elles ont été déposées. Mais quand on charge un isolant, les charges restent à l'endroit où elles ont été créées (تبقى حيث تم إنتاجها).

1.7.1 Comment électriser un objet ?

Il y a trois façons d'électriser ou charger électriquement un objet.

1) Électrisation par frottement : Lorsqu'on frotte deux corps l'un contre l'autre, il se produit un transfert d'électrons de l'un vers l'autre. Le corps qui gagne des électrons se retrouve avec plus d'électrons que de protons et se charge négativement et celui qui perd des électrons se retrouve avec plus de protons que d'électrons et se charge positivement.

Mais comment savoir lequel des deux perd ou gagne des électrons ?

En se basant sur l'expérience, on classe les objets dans un ordre tel que lorsqu'on frotte deux d'entre eux l'un sur l'autre, celui qui précède l'autre sur la liste (dite *triboélectrique*) s'électrise positivement. Une liste triboélectrique, non exhaustive, est présentée ci-dessous :

Peau humaine sèche - cuir - Fourrure de lapin - Verre - Quartz - Cheveux humains - Nylon - Laine - Fourrure de chat - Soie - aluminium - Papier- Coton - Acier - Bois - Ambre - Cuivre - Argent - Or - Platine - Polystyrène - Cellophane - PVC - Silicone - Téflon - Caoutchouc de Silicone.

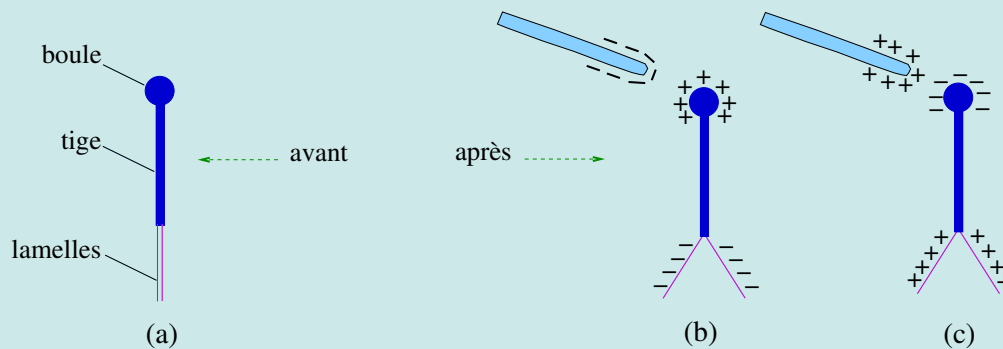
Exemples :

- i) Le verre précède la laine sur la liste précédente. Si on les frotte l'un contre l'autre, le verre se chargera positivement. Mais si le verre est frotté avec une fourrure de lapin de lapin, il se chargera négativement car la fourrure de lapin précède le verre.
- ii) De la même façon, si on frotte une tige en PVC (chlorure de polyvinyle) avec de la laine, des électrons vont passer de la laine à la tige qui se charge négativement.

2) Électrisation par contact : Si un objet chargé touche un conducteur neutre, une partie de la charge de l'objet sera transférée de l'objet vers le conducteur. L'objet chargé peut être un conducteur ou un isolant mais l'objet à charger doit être un conducteur pour permettre le déplacement des charges vers lui.

3) Électrisation par influence : Soit un objet chargé placé près d'un conducteur neutre mais sans le toucher. Selon que l'objet est chargé négativement ou positivement, les électrons du conducteur vont soit s'éloigner le plus loin possible de l'objet, soit s'approcher le plus près possible de l'objet et viendront se regrouper du côté du conducteur près de l'objet. On peut illustrer l'électrisation par influence en faisant une expérience avec l'électroscope (المكشاف الكهربائي).

L'électroscope est un ensemble conducteur constitué d'une tige métallique (قضيب معدني) verticale à l'extrémité de laquelle pendent deux lamelles légères parallèles et une boule fixée au sommet de la tige (figure a). L'électroscope est globalement neutre. On approche de la boule de l'électroscope une baguette chargée. On observe systématiquement une



répulsion des lamelles. Voici l'explication. Si la baguette est chargée négativement, elle repousse les électrons libres de l'électroscope. Ces électrons se retrouvent en excès dans les lamelles qui deviennent chargées négativement et se repoussent (figure b). Si la baguette est chargée positivement, elle attire les électrons libres de l'électroscope. Ces électrons se retrouvent en défaut dans les lamelles qui deviennent chargées positivement et se repoussent (figure c).

Pour compléter vos acquis, je vous donne deux adresses internet où vous pouvez regarder deux vidéos qui montrent quelques phénomènes intéressants d'électrostatique :

<https://www.youtube.com/watch?v=3BnX230Yfvo> ; <https://www.youtube.com/watch?v=gz1NSzdqtm0>

1.8 Questions et exemples d'application

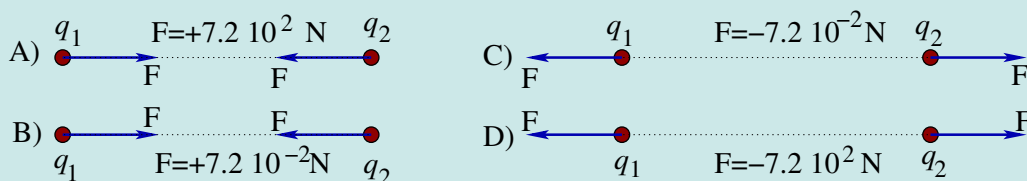
- Le noyau d'un atome est fait de neutrons électriquement neutres et de protons chargés positivement. Pourquoi le noyau ne s'envole-t-il pas en morceaux malgré la très forte répulsion électrostatique entre les protons ?
Si le noyau ne s'envole pas en morceaux, c'est qu'il existe une force qui l'en empêche. Cette force ne relève ni de la gravitation ni de l'électricité. C'est la force dite nucléaire où encore interaction forte. C'est elle qui est responsable de la cohésion du noyau dans les atomes.
- Proposez un moyen d'électriser positivement une sphère métallique à partir d'une tige en plastique préalablement chargée négativement.
i) On approche la sphère près d'une tige préalablement chargée négativement. Les électrons de la sphère seront repoussés le plus loin possible de la tige. ii) Par un fil conducteur, on relie la sphère à la terre et les électrons de la sphère s'éloigneront jusqu'à la terre. iii) On supprime la connexion à la terre et la sphère est laissée avec un déficit d'électrons. On obtient ainsi une sphère chargée positivement.
- L'image sur la page de garde (صفحة الغلاف), en bas à droite, montre un exemple de décharge électrostatique qui se produit par temps d'orage entre un nuage et le sol. Documentez-vous puis expliquez ce phénomène naturel, appelé foudre (برق), du point de vue électrostatique.
- Citez les différentes façons d'électriser un objet.
*Il existe trois façons d'électriser un objet : par frottement (ou friction), par contact (ou conduction) et par influence (ou induction).
 L'électrisation par frottement consiste à frotter un matériau contre un autre, ce qui crée un déplacement d'électrons d'un matériau à l'autre. Cette méthode convient pour électriser, de préférence, les isolants.
 L'électrisation par influence ou par induction (convient pour électriser les métaux). L'électrisation par contact ou par conduction (convient également pour électriser les métaux).*

Voici quelques expériences que chacun de vous peut réaliser.

- Un ballon de baudruche frotté avec un morceau de laine dévie un mince filet d'eau qui coule du robinet.
- Un objet (règle, briquet, stylo, ...) en plastique frotté au cuir chevelu attire de petits morceaux de papier. Si la charge est conséquente, ils dévient aussi un mince filet d'eau.

Pour les applications numériques, on prendra $k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$.

Exemple 1 : Deux charges ponctuelles $q_1 = 1 \mu\text{C}$ et $q_2 = -2 \mu\text{C}$ sont à une distance $d = 50 \text{ cm}$ l'une de l'autre. Quelles sont les forces (grandeur, direction et sens) qui agissent sur ces charges ? Sélectionnez une des réponses ci-dessous :



Rép : Les forces sont attractives car les charges sont de signes contraires. Le module est $k|q_1q_2|/d^2 = 9 \times 10^9 \times |(1 \times 10^{-6})(-2 \times 10^{-6})|/(0.5)^2 = 7.2 \times 10^{-2} \text{ N}$. Donc, la bonne réponse c'est B).

Exemple 2 : Deux sphères identiques de cuivre, chacune de masse 1 kg, sont séparées de 1 m. a) Combien d'électrons chaque sphère contient-elle ? b) Combien d'électrons devraient être extraits de chaque sphère pour avoir une répulsion de 10^4 N entre les deux sphères ? c) Quelle fraction représente la réponse à la question b) par rapport au nombre total d'électrons contenus dans chaque sphère ?

Données : Dans 63.5 grammes de cuivre il y a N_A atomes ($N_A =$ nombre d'Avogadro $= 6.02 \times 10^{23}$) et il y a 29 électrons dans chaque atome de cuivre.

Rép : a) 2.75×10^{26} électrons ; b) 6.59×10^{15} électrons ; c) 2.39×10^{-11} .