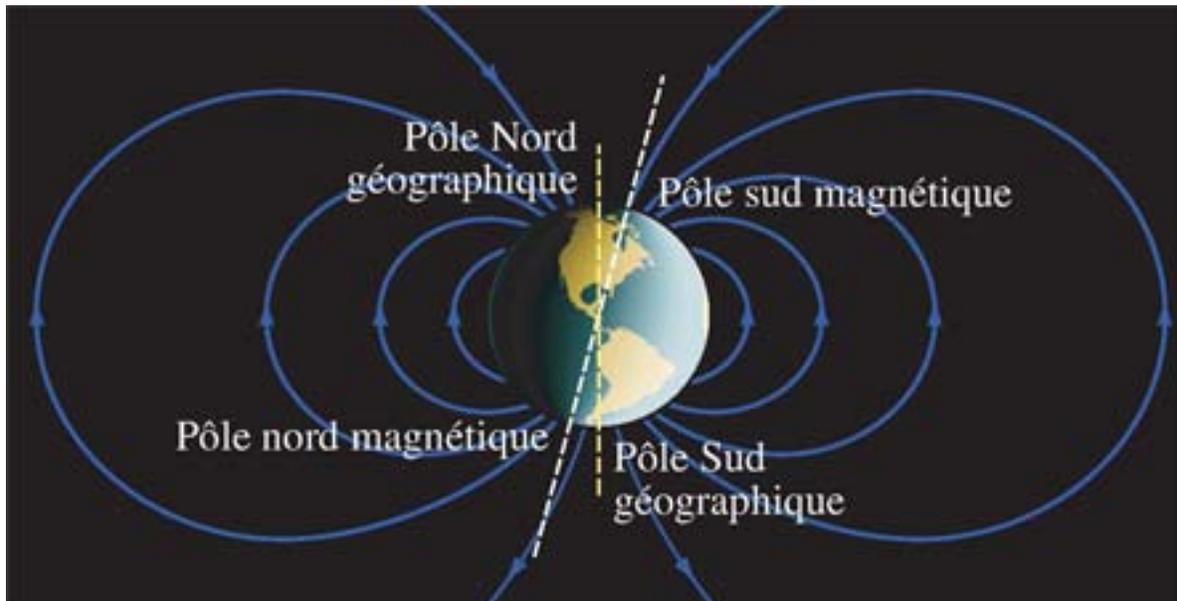


Électricité et magnétisme

Édition A-2012



Département de physique

TABLE DES MATIÈRES

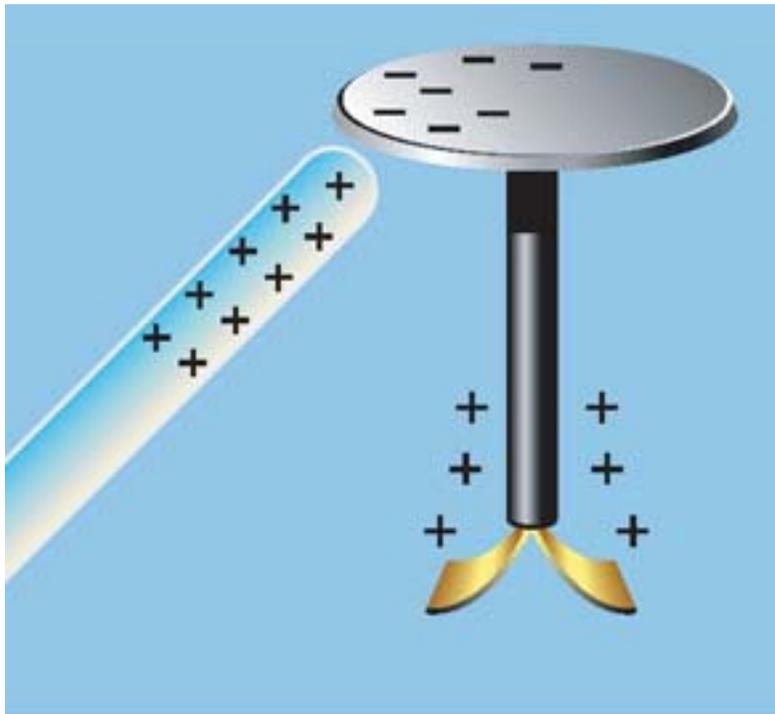
Module 1 – L'électrostatique	1
1.1 Charge électrique	2
1.2 Conducteurs et isolants	6
1.3 Charge par induction	7
1.4 Loi de Coulomb	11
Module 2 – Les circuits alimentés en courant continu (C.C.)	15
2.1 Loi d'Ohm	16
2.2 Éléments d'un circuit électrique	21
2.3 Résistivité	22
2.4 Effet Joule	26
2.5 Lois de Kirchhoff	28
2.6 Résistances en série et en parallèle	31
2.7 Force électromotrice	31
Module 3 – Le champ électrique	33
3.1 Champ électrique	34
3.2 Lignes de champ	38
3.3 Charges en mouvement dans un champ électrique uniforme	40
Module 4 – Le théorème de Gauss	42
4.1 Champ électrique et conducteurs	43
4.2 Flux électrique	44
4.3 Théorème de Gauss	48
4.4 Distributions de charges continues	54

TABLE DES MATIÈRES (suite)

Module 5 – Le potentiel électrique	55
5.1 Potentiel électrique	56
5.2 Conservation de l'énergie	63
5.3 Détermination du champ électrique à partir du potentiel	68
Module 6 – Les condensateurs	70
6.1 Condensateurs	71
6.2 Diélectriques	76
6.3 Condensateurs en série et en parallèle	79
6.4 Circuits RC	81
Module 7 – Le champ magnétique	83
7.1 Champ magnétique	84
7.2 Force magnétique	88
7.3 Sources de champ magnétique	97
Module 8 – L'induction électromagnétique	103
8.1 Flux magnétique	104
8.2 Loi de Faraday	106
Module 9 – Les circuits alimentés en courant alternatif (C.A.)	108
9.1 Notions préliminaires	109
9.2 Circuits RLC	109
9.3 Transformateur	109
Module 10 – Les équations de Maxwell et les ondes électromagnétique	110
10.1 Équations de Maxwell	111
10.2 Ondes électromagnétiques	111

MODULE 1

L'ÉLECTROSTATIQUE



L'électroscope à feuilles

1.1 CHARGE ÉLECTRIQUE

Dans la vie de tous les jours, plusieurs d'entre-vous ont sûrement déjà remarqué certains phénomènes liés à l'électrostatique. Pouvez-vous en nommer quelques-uns ?

Vous pensez peut-être au choc électrique que vous avez reçu en touchant une poignée de porte après avoir marché sur un tapis ou à celui ressenti lorsque vous refermez la portière de l'auto après en être débarqué. Si vous remontez dans le temps de quelques années, vous avez probablement déjà collé des ballons sur un mur après les avoir frottés dans vos cheveux ou plus récemment, remarqué qu'en faisant votre lit fraîchement sorti de la sècheuse que de petites décharges électriques avaient lieu au contact de vos doigts avec les draps. Essayez de le faire dans le noir et vous pourrez observer également la lumière émise lors de ces décharges. Ce sont en fait de mini éclairs !

Ces exemples représentent tous des effets électriques. Plusieurs autres phénomènes sont de nature électrique. Nous n'avons qu'à penser à tous les appareils électriques, aux stations de radio et de télévision, aux réactions chimiques et même à la lumière. En fait, il n'y a que la force gravitationnelle qui ne soit pas de nature électrique, parmi les quatre grandes forces de l'Univers.

- Force gravitationnelle (attraction entre des corps possédant une masse)
- Force électromagnétique (lumière visible, micro-ondes, rayons X, aimants, etc...)
- Force nucléaire forte (interaction entre les particules à l'intérieur du noyau atomique)
- Force nucléaire faible (interaction entre les particules à une échelle extérieure au noyau atomique)

Toutes ces forces, à l'exception de la force gravitationnelle, reposent sur l'interaction entre les charges électriques. Mais qu'est-ce qu'une charge électrique ?

Avant de répondre à cette question, je vous invite à visionner la **démo 1.1** sur LÉA, qui montre un autre exemple des effets que les charges électriques peuvent avoir sur leur environnement. Nous reviendrons sur ce cas un peu plus loin dans ce module pour en donner une explication complète.

Passons maintenant à quelques généralités concernant la charge électrique. Ces éléments sont en grande partie de la révision, cependant il est très important de s'en rappeler pour la suite du cours.

A) Définition : La charge électrique est une propriété de la matière qui lui fait produire et subir des effets électriques et magnétiques.

C'est une propriété de la matière au même titre que la masse. Par exemple, un proton a une masse de $1,672 \times 10^{-27}$ kg et une charge de $1,602 \times 10^{-19}$ C (coulomb). C'est en fait un concept inventé par l'Homme pour lui permettre de décrire et de comprendre les phénomènes de nature électrique. La charge électrique se manifeste à notre point de vue par les effets qu'elle cause.

B) Modèle atomique

D'après le modèle atomique de Bohr, les atomes sont constitués d'électrons gravitant autour du noyau formé par des protons et des neutrons. Chacune de ces particules possède une charge qui lui est propre.

Particules	Charge
Proton (p)	Positive (+)
Neutron (n)	Neutre ou Nulle (0)
Électron (é)	Négative (-)

La nomenclature utilisée, c'est-à-dire les charges positives (+) et négatives (-) est en fait très arbitraire. Elles ont été nommées ainsi simplement par opposition l'une à l'autre.

C) Interaction entre les charges

Vous connaissez sûrement l'expression : " Les contraires s'attirent ". Vous verrez effectivement dans le tableau suivant, que deux particules ayant des signes de charge différents s'attirent, alors que si elles ont des signes identiques se repoussent.

Particule #1	Particule #2	Effet
+	+	Répulsion
-	-	Répulsion
+	-	Attraction
-	+	Attraction

D) Charge élémentaire (quantifiée)

La charge élémentaire est tout simplement un nombre qui correspond à la plus petite valeur de charge qu'un objet ou particule peut posséder (si on fait exception des Quarks en physique quantique). Elle est représentée par la lettre " e " et vaut :

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

Bien que le symbole utilisé soit la lettre " e " , il ne faut pas confondre la charge élémentaire avec l'électron que l'on représente par la lettre " é ". Aussi, l'électron (une particule) possède une charge équivalente à la charge élémentaire, mais n'est pas la charge élémentaire (un nombre).

Particules	Charge
Proton (p)	+ e ou + 1,602 x 10 ⁻¹⁹ C
Électron (é)	- e ou - 1,602 x 10 ⁻¹⁹ C

De plus, la charge " q " d'un objet ou d'une particule est quantifiée, c'est-à-dire qu'elle ne peut avoir comme valeur qu'un multiple entier de la charge élémentaire.

$$q = [0 ; \pm e ; \pm 2 e ; \pm 3 e ; \dots] \text{ C}$$

ou

$$q = [0 ; \pm 1,602 \times 10^{-19} ; \pm 3,204 \times 10^{-19} ; \pm 4,806 \times 10^{-19} ; \dots] \text{ C}$$

Un objet ne peut donc pas avoir une charge $q = 4,0 \times 10^{-19} \text{ C}$, puisque c'est une valeur qui se situe entre 2 fois et 3 fois la valeur de la charge élémentaire. On ne peut fractionner cette charge élémentaire.

Nous venons de voir que le proton et l'électron possède une charge équivalente à la charge élémentaire. Or, pour charger un objet, il faut ajouter ou enlever des électrons à cet objet. On ne peut enlever une fraction d'électron, il faut l'enlever au complet ou pas du tout, d'où la notion de quantification de la charge.

Notons que pour de grandes valeurs de charge, il n'est pas nécessaire de se soucier de la quantification de la charge, puisque le fait d'avoir un électron de plus ou de moins ne peut être pris en compte par la précision de la mesure de cette charge. Par exemple, si un objet possède une charge $q_1 = -3,4 \text{ mC}$ ($-3,4 \times 10^{-3} \text{ C}$), l'ajout ou le retrait de 10 000 électrons ($q_2 = 1,602 \times 10^{-15} \text{ C}$), de 1 millions d'électrons ($q_3 = 1,602 \times 10^{-13} \text{ C}$) ou même de 1 milliard d'électrons ($q_4 = 1,602 \times 10^{-10} \text{ C}$) ne peut être perçu dans l'expression de cette mesure.

$$e = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 1602 \text{ C}$$

$$q_1 = 0,0034 \text{ C}$$

L'ajout d'un électron est imperceptible et négligeable !

Si l'objet avait comme valeur de charge :

$$q_5 = 0,003\ 400\ 000\ 000\ 000\ 000\ 0000 \text{ C}$$

L'ajout d'un électron serait perceptible sur la mesure mais demeurerait quand même négligeable (très faible augmentation de la charge) !

La charge élémentaire est donc une très petite valeur de charge, alors que 1 coulomb correspond à une charge relativement grande. Par exemple, on peut atteindre des charges de l'ordre de 10^{-8} C en chargeant un objet par frottement (tige de verre dans la démo 1.1 : Planche de bois). La foudre pour sa part correspond à un transfert de charge de l'ordre de 20 C !

E) Conservation de la charge

La charge électrique est une quantité qui est conservée. Par exemple, lors de la réaction chimique suivante, la charge totale présente dans la solution est identique à la charge totale après la formation du NaCl solide.



$$(+e) + (-e) = (0)$$

Nous verrons des applications de cette conservation à la section 1.3 Charge par induction.

1.2 CONDUCTEURS ET ISOLANTS

Nous verrons dans cette section la différence entre un conducteur et un isolant. La compréhension de cette différence est fondamentale, puisque pour les modules suivants, nous utiliserons ces deux types de matériaux dans plusieurs cas. Dans ces exemples, il sera évidemment important de préciser et de tenir compte de la nature du matériau étudié, puisque qu'un conducteur ne se comporte pas comme un isolant.

A) Définition : Un conducteur est une substance qui laisse circuler librement les charges (présences d'électrons libres autour des noyaux). Exemples : métaux, solutions ioniques.

Un isolant est une substance qui ne laisse pas circuler librement les charges (électrons fortement liés aux noyaux). Exemples : bois sec, caoutchouc, soie, verre.

Notez ici, que dans un matériau solide, ce sont les charges négatives (électrons) qui se déplacent et non les charges positives (protons du noyau). Par contre, les charges positives (ions) peuvent aussi se déplacer dans des liquides (solutions ioniques) ou des gaz (gaz ionisés).

Dans un conducteur, les électrons libres peuvent donc se déplacer d'un bout à l'autre d'une tige puisqu'ils sont faiblement retenus par les noyaux, alors que dans un isolant, cette mobilité d'électrons n'est pas permise de par la forte attraction des électrons par les noyaux.

La mobilité des charges dans une substance peut être caractérisée par un temps de relaxation, ce qui correspond au temps mis par les charges pour atteindre leur position d'équilibre. Dans le cas du cuivre, il est de 10^{-12} s environ, alors que pour le verre, il est de 2 s (il vaut 4×10^3 s dans le cas de l'ambre et environ 10^{10} s pour le polystyrène).

Le temps de relaxation du cuivre montre qu'une charge quelconque acquise par un métal se répartit très rapidement sur sa surface, alors que sur un bon isolant, on rencontre les charges par paquets localisés. Pour faire passer la charge d'un isolant à un autre objet, il est nécessaire d'établir un contact avec l'objet en plusieurs points de l'isolant.

1.3 CHARGE PAR INDUCTION

À la démo 1.1 (que l'on retrouve sur LÉA), nous avons chargé une tige de verre par frottement en retirant des électrons de cette tige avec un chamois. Cette opération a nécessité un contact physique entre le verre et le chamois (2 matériaux isolants).

Nous pouvons également charger certains objets (des matériaux conducteurs) sans qu'il n'y ait de contact physique. On parlera alors de charge par induction.

Dans l'analyse d'une situation impliquant le phénomène de charge par induction, il est important de connaître la nature des matériaux utilisés, car encore une fois, un conducteur ne se comporte pas comme un isolant. Regardons dans un premier temps comment il est possible de charger, dans une même opération, deux sphères métalliques initialement neutres.

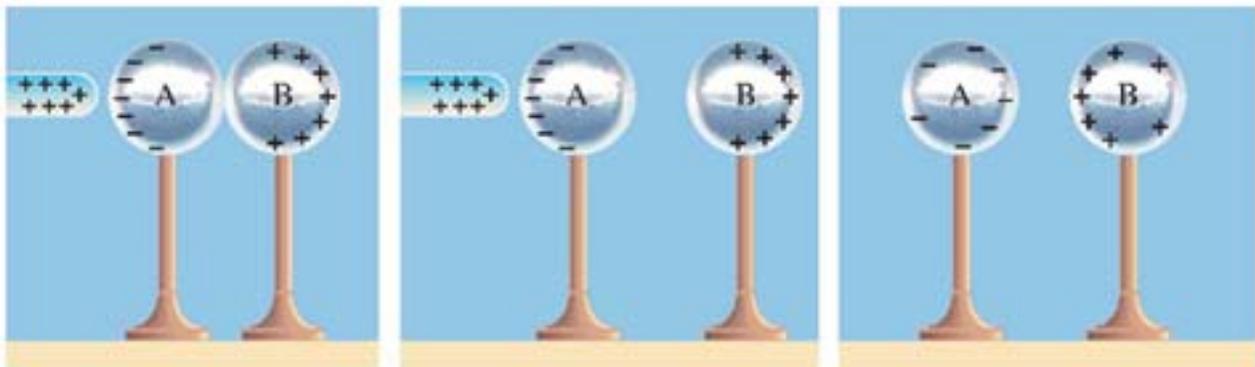


Figure 1.1 Schémas représentant la charge par induction de deux sphères métalliques

Vous avez besoin d'une tige de verre que vous chargez positivement par frottement et de deux sphères métalliques montées sur pivot isolant. En collant initialement les deux sphères, puis en approchant la tige chargée de l'une d'elle, mais sans y toucher, la tige (charges positives) attire certains des électrons libres (charges négatives) présents dans les sphères près de la tige, mais ils restent toujours dans la sphère métallique de gauche, créant ainsi un déséquilibre de charge entre la sphère de gauche et celle de droite (un manque d'électrons donne une charge positive). Ce déplacement d'électrons est évidemment permis puisqu'il s'agit de sphères métalliques, donc conductrices.

Pour compléter l'opération, il suffit d'éloigner les deux sphères l'une de l'autre tout en maintenant la tige de verre près de la sphère A, sinon, les charges négatives vont reprendre leur place dans la sphère B et annuler le déséquilibre des charges que nous voulons générer.

Une fois les deux sphères éloignées, on peut retirer la tige et il nous reste une sphère A chargée négativement et une sphère B chargée positivement. Remarquez qu'à la fin, il demeure une asymétrie dans la distribution des charges sur les deux sphères (qui sont encore à proximité l'une de l'autre), puisque les charges de chaque sphère sont attirées par celles de l'autre. Notez également que dans la sphère B, ce n'est pas les charges positives qui se déplacent vers la surface gauche de la sphère, mais bien les électrons qui s'éloignent le plus loin possible (surface droite de la sphère B), créant ainsi un manque d'électrons, d'où la représentation d'un nombre de charges positives plus élevé sur la figure.

À la **démo 1.2** (sur LÉA), on vous présente une expérience réalisée avec un électroscope à feuilles illustrant le comportement des charges électriques dans différentes situations. Cet appareil est constitué de deux minces feuilles d'aluminium fixées à une tige métallique qui est elle-même reliée à une sphère métallique ou à un plateau métallique (voir figure 1.2).



Figure 1.2 Schémas représentant différentes situations impliquant un électroscope

Lorsqu'on approche une tige chargée positivement de l'électroscope initialement neutre (sans y toucher), ses feuilles s'écartent l'une de l'autre. Cela s'explique par la nature conductrice des matériaux composant l'électroscope. Les électrons libres présents dans les feuilles sont attirés par la tige et viennent s'agglomérer dans le plateau (près de la tige), créant ainsi un manque d'électrons dans les feuilles. Elles ont maintenant chacune une charge positive, elles se repoussent donc.

Si nous éloignons la tige, les feuilles retombent à la verticale, puisque les électrons retournent à leur place, n'étant plus attirés par la tige. Tout au long de cette expérience, il ne faut pas oublier que la charge nette de l'électroscope est toujours neutre (il y a autant de + que de - dans tout l'appareil), bien que localement, il y ait des parties de l'appareil qui soient chargées positivement (les feuilles) ou négativement (le plateau).

À la deuxième image de la figure 1.2, la tige a touché le plateau et lui a transmis une charge positive. En fait, il serait plus juste de dire que certains des électrons libres accumulés dans le plateau sont passés dans la tige lors du contact. Notons ici que ces électrons n'ont pu venir occuper une place libre que près de la surface de contact de la tige, puisqu'elle est isolante. Une grande quantité de charge n'a donc pas pu être transmise. Après le contact, remarquez que les feuilles de l'électroscope demeurent éloignées l'une de l'autre, puisqu'elles possèdent chacune une charge positive maintenant que des électrons sont passés du plateau à la tige. L'électroscope n'est plus neutre dans son ensemble.

À la troisième image de la figure 1.2, nous reprenons la situation finale du paragraphe précédent pour identifier le signe inconnu de la charge d'une tige. L'électroscope étant chargé positivement, nous pouvons déduire le signe de la charge de la tige en observant le comportement de ses feuilles lorsqu'on approche la tige du plateau.

Si les feuilles de l'appareil se rapprochent l'une de l'autre, c'est que des électrons sont venus diminuer la force de répulsion entre elles. Ces électrons proviennent du plateau et ont été repoussés par la tige qui doit être chargée négativement pour pouvoir créer cet effet. Si les feuilles de l'appareil se repoussent davantage, c'est que des électrons ont quitté les feuilles augmentant la charge positive de celles-ci en augmentant du même coup la force de répulsion. Ces électrons n'ont pu être attirés vers le plateau que par une tige de charge positive.

Pour terminer cette section, nous allons finalement revenir sur la **démo 1.1 Planche de bois** pour en donner une explication complète. Nous venons de voir deux situations (les deux sphères métalliques et l'électroscope à feuilles) impliquant des conducteurs. Pour sa part, la démo 1.1 implique un isolant (la planche de bois).

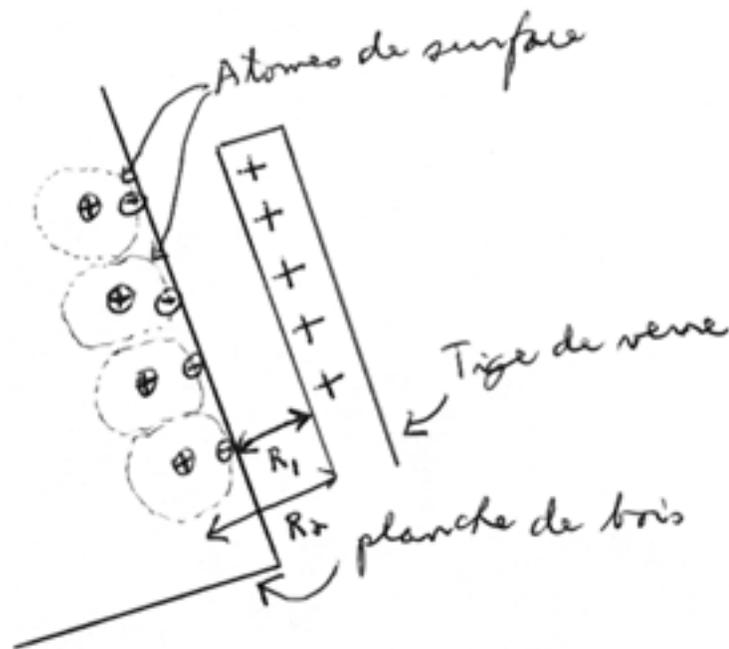


Figure 1.3 Schéma expliquant la démo 1.1 Planche de bois

Dans cette situation, nous avons approché une tige de verre (préalablement chargée positivement par frottement) d'une planche de bois neutre montée sur un support pivotant (pour diminuer le frottement). Bien que la planche de bois soit un isolant (et neutre par surcroît), nous observons malgré tout une attraction entre la tige de verre et la planche de bois ! Voici l'explication !

Considérant la figure 1.3, nous pouvons y voir représentés les atomes de surface de la planche de bois. Nous ne considérons que les atomes de surface, puisque l'effet sur les autres atomes est négligeable étant donné la nature isolante de la planche. Lorsque la tige est éloignée de la planche, les électrons des atomes de surface sont situés de façon aléatoire sur chacune de leur orbite respective. Par contre, lorsqu'on approche la tige, ces électrons sont attirés par la charge positive de la tige. Ils se déplacent donc le plus près possible de la tige, mais sans toutefois quitter l'orbite sur laquelle ils se trouvent, puisqu'ils sont fortement liés aux noyaux (matériau isolant).

Ce déplacement d'électrons crée une rangée de charges négatives en face d'une rangée de charges positives. Il y a donc attraction ! Ok, mais les noyaux créent aussi une rangée de charges positives, il devrait donc y avoir une répulsion avec les charges positives de la tige. C'est effectivement ce qui se produit. Cependant, puisque les noyaux sont plus éloignés (distance R_2) de la tige que les électrons des atomes de surface (distance R_1), la répulsion est plus faible que l'attraction. Nous verrons à la section suivante l'influence de la distance sur l'intensité de la force électrique.

1.4 LOI DE COULOMB

Nous avons vu à la section précédente que des charges de signe contraire s'attiraient et que des charges de signe identique se repoussaient. Cependant, nous sommes restés dans le qualitatif sans préciser l'intensité de cette attraction ou de cette répulsion. C'est ce que nous allons faire dans cette section, c'est-à-dire quantifier la force électrique agissant entre deux particules chargées.

$$F = k |q_1 q_2| / r^2$$

Loi de Coulomb (1.1)

où : F = force électrique (N)

k = constante de la loi de Coulomb = $9,00 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2 / \text{C}^2$

q_i = charges ponctuelles (C)

r = distance entre les charges (m)

L'équation 1.1 donne le module du vecteur force électrique. Pour déterminer sa direction, il s'agit d'utiliser le signe des charges en présence : deux charges de même signe se repoussent et deux charges de signe contraire s'attirent. La force électrique est une force radiale (force dirigée selon la droite reliant les deux particules) et de symétrie sphérique (elle ne dépend que de r (pour deux charges données)).

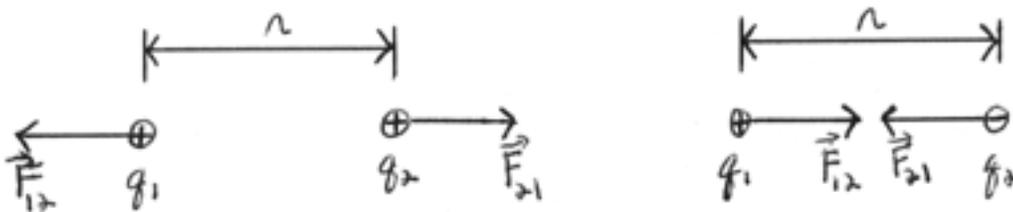


Figure 1.4 Schémas illustrant la direction de la force électrique

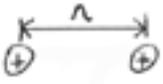
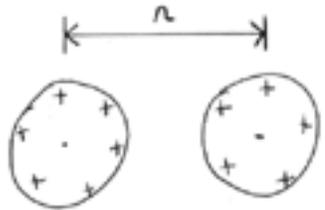
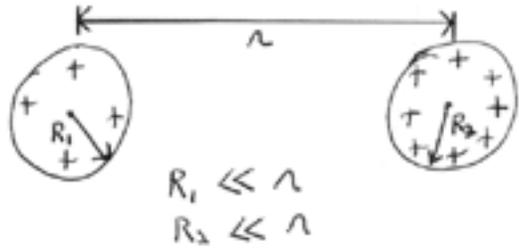
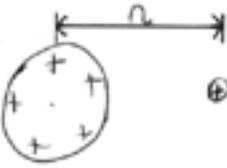
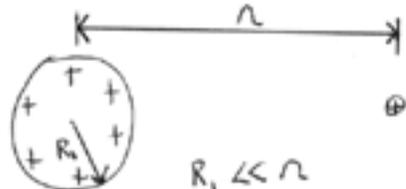
À la figure précédente, nous avons deux charges positives q_1 et q_2 (à gauche) séparées d'une distance r . Connaissant ces trois valeurs, il est facile de calculer la grandeur de la force agissant sur chacune des particules avec la loi de Coulomb. L'orientation de la force ne peut être que selon une ligne joignant les deux particules, donc dans ce cas-ci, horizontale. À savoir maintenant si le sens de cette force sera vers la gauche ou vers la droite, il faut tenir compte du signe des charges.

La particule 1 est repoussée par la particule 2 (ne peut s'en approcher facilement) générant ainsi une force \mathbf{F}_{12} (force exercée sur la particule 1 par la particule 2) vers la gauche. La particule 2 est elle aussi repoussée par la particule 1 générant une force \mathbf{F}_{21} (force exercée sur la particule 2 par la particule 1) vers la droite. Le même raisonnement s'applique dans le cas de charges de signe contraire, cependant il y a attraction entre les particules et non répulsion.

A) Conditions d'application

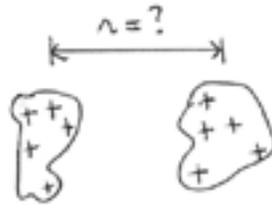
La loi de Coulomb ne s'applique qu'à des charges ponctuelles ou à des objets sphériques dont la charge est uniformément répartie sur sa surface. Dans le cas de corps chargés de forme quelconque, la distance r qui les sépare n'a pas de valeur bien définie, nous ne pouvons donc pas utiliser la loi de Coulomb. Par contre, dans le cas d'un corps sphérique ayant une certaine dimension (non ponctuel) et si la charge est distribuée uniformément sur sa surface (symétrique), nous pouvons utiliser la loi de Coulomb en supposant que toute cette charge est concentrée en son centre (la distance r est donc de centre à centre).

Valide

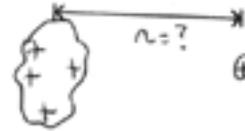
1. Deux charges ponctuelles 
2. Deux corps sphériques isolants (charge uniforme) 
3. Deux corps sphériques métalliques éloignés (charge uniforme) 
4. Un corps sphérique isolant (charge uniforme) et une charge ponctuelle 
5. Un corps sphérique métallique éloigné (charge uniforme) et une charge ponctuelle 

Non valide

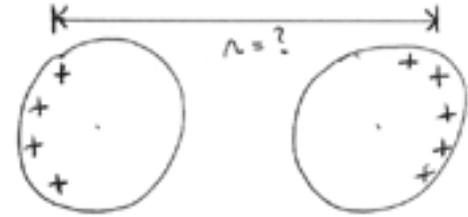
1. Deux corps de forme quelconque



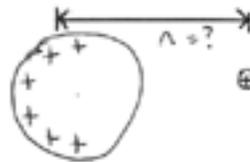
2. Un corps de forme quelconque et une charge ponctuelle



3. Deux corps sphériques métalliques rapprochés (la charge n'est plus uniforme)



4. Un corps sphérique métallique rapproché et une charge ponctuelle (la charge n'est plus uniforme)



B) Principe de superposition

La loi de Coulomb nous permet de calculer la force électrique agissant entre autres entre 2 charges ponctuelles. Si une charge ponctuelle est soumise à l'influence de plusieurs charges, il suffit de calculer la force créée par chacune d'entre-elles sur la particule en question. Par la suite, ces forces s'additionnent vectoriellement, puisque les forces électriques obéissent au principe de superposition.

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} + \dots + \mathbf{F}_{1N}$$

Principe de superposition (1.2)

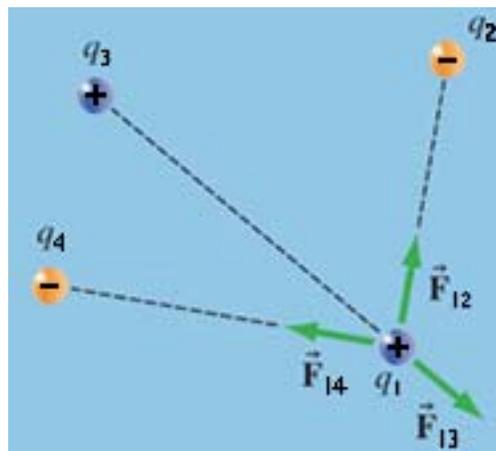


Figure 1.5 Schéma illustrant le principe de superposition

Pour terminer ce module, voici donc un exemple de problème nécessitant l'utilisation de la loi de Coulomb, mais aussi certaines notions vues en mécanique sur l'équilibre des forces. Pour compléter votre apprentissage du module 1, je vous rappelle que vous devez regarder les exemples et solutionner les exercices suggérés sur LÉA (exemples et exercices que vous retrouverez dans le Benson).

Exemple 1.1 : Deux pendules isolants identiques possèdent chacun une masse de 1,0 g et une charge de 0,4 μC . La longueur L des cordes est de 50 cm. Lorsque les pendules sont à l'équilibre, ils se trouvent à $r = 50$ cm l'un de l'autre (voir schéma). Déterminez la force électrique agissant entre eux et la tension dans chacune des cordes.

① schéma de forces

②

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

$$F_e = \frac{(9,0 \times 10^9)(0,4 \times 10^{-6})^2}{(0,50)^2}$$

$F_e = 5,76 \times 10^{-3} \text{ N}$

③ $\sum F_x = 0$

$$-F_e + T \cos \alpha = 0$$

$$T = \frac{F_e}{\cos \alpha}$$

$$T = \frac{5,76 \times 10^{-3}}{\cos 60^\circ}$$

$T = 1,15 \times 10^{-2} \text{ N}$

Note : L'angle α est de 60° puisqu'il s'agit d'un triangle équilatéral. Le schéma de forces a été effectué sur le pendule de gauche, mais aurait pu être fait sur l'autre, étant donné la symétrie du problème.