

Physique(2h)

Électrostatique, loi de Coulomb et champ électrique

6^{ème} GT

J.N. Gautier

1 La charge électrique

1.1 Introduction

L'électricité est souvent perçue comme une branche « moderne » de la physique, elle fait référence aux ampoules, aux machines électriques, à l'électronique et aux méthodes de communications modernes. Toutefois, l'histoire de l'électricité est très ancienne. En effet, les plus anciennes observations connues dans le monde occidental ont été faites par le philosophe grec Thalès de Millet (600 av JC). Puisque Thalès a fait ses découvertes en manipulant de l'ambre jaune (êlektron en grec), il a appelé ce phénomène électricité.

1.2 Électricité vitreuse et résineuse

Si deux tubes en PVC suspendus à un fil, sont frottés avec un tissu, ils se repoussent. De même, si un tube en PVC frotté est approché de petits objets (morceaux de papier, grains de semoule, billes de polystyrène, ...), ceux-ci sont attirés par le tube. Cette expérience est connue depuis longtemps, mais avant la découverte des matières plastiques, elle se faisait avec de la résine.

Lorsqu'ils sont frottés, certains corps acquièrent une **CHARGE ÉLECTRIQUE**, on dit qu'ils sont électrisés.

Si la même manipulation est faite avec un tube en PVC et un tube en verre, ils s'attirent l'un l'autre. Ceci permet de mettre en évidence l'existence de deux types de charges électriques, autrefois appelées électricité vitreuse et électricité résineuse, mais plus simplement nommées **CHARGES POSITIVES**

1 La charge électrique

et **CHARGES NÉGATIVES** depuis les travaux de Benjamin Franklin. Il a associé de manière complètement arbitraire l'électricité positive à l'électricité vitreuse. Cette convention est encore utilisée de nos jours et a comme conséquence la notion de **SENS RÉEL** et **SENS CONVENTIONNEL** du courant électrique (voir encadré).

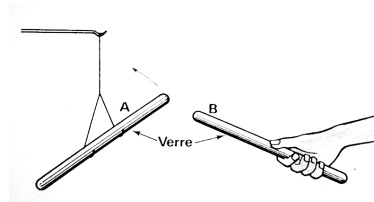


FIGURE 1.1 – Deux tiges en verre électrisées

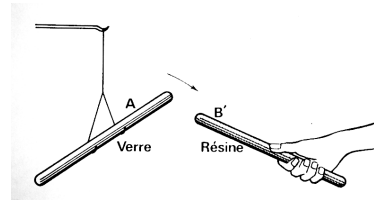


FIGURE 1.2 – Une tige en verre et une tige en résine électrisées

1.2.1 Conservation de la charge

Lorsqu'on frotte des objets pour les électriser, des électrons sont arrachés par l'un et s'accumulent sur l'autre. Il n'y a donc pas réellement de création de charge, plutôt une répartition de celles-ci. C'est un exemple de la loi de conservation de la charge électrique.

La quantité nette de charge électrique produite au cours de n'importe quelle transformation est nulle.

1.2.2 La charge électrique

La « quantité d'électricité » qui peut s'accumuler localement se mesure à l'aide de la charge électrique.

CHARGE ÉLECTRIQUE : q [Coulomb ; C]

Concrètement, les charges apparaissent sous l'effet de déplacement d'électrons ou de protons. La charge d'un électron est de : $q = -1,6 \times 10^{-19}[C]$

1.3 Isolants, conducteurs et résistance

Puisque les charges de mêmes signes se repoussent et que celles de signes contraires s'attirent, les particules chargées peuvent bouger. Elles ne le font cependant pas avec la même facilité dans tous les matériaux. Ceux dans lesquels les charges se déplacent facilement sont appelés **CONDUCTEURS** tandis que ceux dans lesquels les charges se déplacent difficilement et qui empêchent dès lors le passage de l'électricité sont appelés **ISOLANTS**. Le pouvoir isolant d'un corps est mesuré par sa résistance électrique.

RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE : R [Ohm ; Ω]

Sens conventionnel et sens réel du courant électrique

C'est le Français Charles-François de Cisternay Dufay (1698-1739) qui, en frottant du verre et de l'ambre, constate la différence de comportement électrique de ces deux corps. Chacun repoussant ce qui a été mis en contact avec lui même (le verre) et attirant ce qui a été mis en contact avec l'autre (l'ambre). Il en déduit l'existence de deux espèces d'électricité qu'il nomme « vitrée » et « résineuse » et énonce la loi d'attraction et de répulsion : « Deux corps portant la même espèce d'électricité se repoussent, deux corps portant des électricités différentes s'attirent. » L'Américain Franklin (1706-1790), abordant l'électricité en autodidacte, imagine l'électricité comme un fluide unique qui imprègne tous les corps. Le frottement fait simplement passer ce fluide d'un corps dans l'autre. Le corps qui en a reçu est alors chargé positivement, celui qui en a perdu l'étant négativement. Ainsi, propose Franklin, le verre frotté prend de l'électricité au corps qui le frotte. Il se charge « positivement » alors que le soufre ou l'ambre, qui perdent de l'électricité par frottement, se chargent « négativement ». La théorie des deux fluides s'impose en Europe continentale. Celle du fluide unique de Franklin conserve la faveur des britanniques. Tant qu'il ne s'agit que d'étudier les propriétés statiques de l'électricité, cette divergence ne prête pas à conséquence. Le problème devient plus épineux après 1800 et la découverte de la pile électrique par Volta. En effet cette pile produit, en continu, un « courant » d'électricité. La question se pose donc : quel est son sens dans un circuit extérieur ? Pour les partisans de Franklin, aucun problème : la pile ne fournit qu'une seule espèce d'électricité. Le courant circule donc nécessairement du pôle qui porte le plus, le pôle positif, vers celui qui en porte le moins, le pôle négatif. Pas de problème non plus pour les partisans de Dufay qui ont une explication : la pile produit les deux espèces d'électricité. Dans le conducteur il existe deux courants. Le courant de fluide positif circule du pôle + au pôle -, celui d'électricité négative du pôle - au pôle +. Comme la théorie des deux espèces d'électricité, celle

des deux courants s'impose dans l'Europe continentale. Celle du courant unique chez les britanniques. C'est au moment où, en 1820, Oersted découvre l'effet magnétique des courants qu'une convention est proposée par Ampère, lui même partisan des deux courants.

On conviendra dit-il, d'appeler **SENS DU COURANT** , celui dans lequel circule le fluide positif et on se souviendra, dit-il, que le fluide négatif circule en sens contraire. Par cette convention, partisans de Franklin et de Dufay se rencontrent à nouveau. Pour les uns le sens « conventionnel » est le sens réel de circulation du fluide unique. Pour les autres, ce sens est uniquement celui de circulation du fluide positif. La découverte de l'électron par Thomson et Perrin en 1897, puis celle de la structure de l'atome, révèle l'erreur initiale de Franklin : le verre ne gagne pas d'électricité dans le frottement, il en perd ! Il faut donc attribuer une charge négative à ces porteurs d'électricité que sont les particules que l'on désignera ensuite par le terme d'électrons.

Par ailleurs, les partisans de Dufay et des deux courants ne peuvent pas, eux non plus, triompher. Il existe bien deux espèces d'électricité, mais dans un conducteur métallique seul un fluide circule. L'électricité positive portée par les noyaux des atomes est fixe. Seule l'électricité négative portée par les électrons peut circuler.

Ainsi il existe bien un seul courant, mais, constitué d'électrons, il circule dans le sens inverse du sens conventionnel !

Pourquoi ne pas changer les conventions concernant le signe des charges et le sens du courant ? En 1900, l'industrie de l'électricité construite sur les conventions du début du siècle s'est développée. Aucune tentative ne sera faite pour inverser le sens du courant conventionnel. Les signes + et - des charges, ainsi que le sens du courant ne sont, depuis, plus que des conventions mathématiques. ^a

^a. Cette section est basée sur un article paru dans le « Bulletin de l'Union des Physiciens », Vol. 88, janvier 1994

2 Force électrique et loi de Coulomb

Les particules possédant une charge de même signe se repoussent et celles possédant une charge de signe contraire s'attirent. Il existe donc une force s'exerçant entre-elles. C'est à partir des travaux de Charles Coulomb (1736 - 1806) que s'élabore progressivement la loi permettant de calculer les caractéristiques de celle-ci.

LOI DE COULOMB : $F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$ où :

- F est l'intensité de la force, en $[N]$,
- k est la constante de Coulomb, $k = 9 \times 10^9 [N \cdot m^2 \cdot C^{-2}]$,
- q_1 et q_2 sont la valeur de la première et de la deuxième charge, en $[C]$,
- r est la distance entre q_1 et q_2 , en $[m]$.

On notera la frappante similitude entre la loi de Coulomb et celle de la gravité de Newton, ces deux phénomènes n'ayant pourtant rien en commun. La constante de Coulomb est généralement écrite sous une autre forme car elle est une « conséquence » de constantes plus fondamentales.

$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ où $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} [C^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}]$ ϵ_0 est la permittivité diélectrique du vide.

2.1 Exercices

Exercice 1 Combien d'électrons y'a-t-il dans une charge de $1\mu C$?

Exercice 2 Calcule la force d'attraction électrique qui s'exerce entre le noyau d'un atome de fer ($q=26e$) et l'électron qui en est le plus rapproché, sachant que la distance qui les sépare vaut $1,0 \times 10^{-12}[m]$. On considère chaque charge comme étant ponctuelle.

Exercice 3 À quelle distance faut-il placer deux charges de respectivement $0,01[C]$ et $-0,005[C]$ pour que s'exerce entre-elles une force de $0,4[mN]$?

Exercice 4 Jusqu'à quel point faut-il approcher deux électrons pour que la force qui s'exerce entre-eux soit égale au poids de l'un d'eux sur Terre ? Pour rappel : $G = 6,67 \times 10^{-11}$ et $m_e = 9 \times 10^{-31}[kg]$

Exercice 5 Compare la force s'exerçant entre deux charges de $1[C]$ situées à $1[mm]$ de distance à la force de gravité exercée par la Terre sur la lune.

- $G = 6,67 \times 10^{-11}$
- $r_{Terre-Lune} = 380000[km]$
- $m_{Terre} = 5,972 \times 10^{24}[kg]$
- $m_{Lune} = 7,6 \times 10^{22}[kg]$

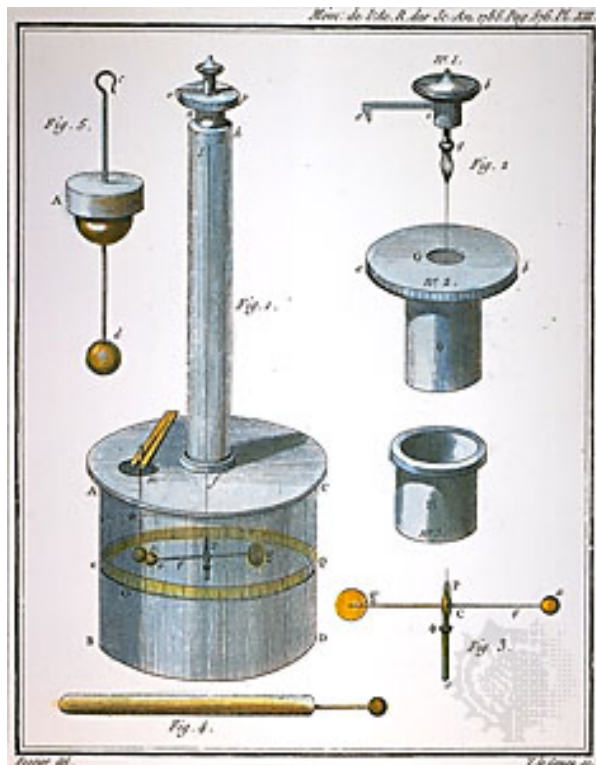


FIGURE 2.1 – La balance à torsion de Coulomb, l'instrument utilisé pour réaliser ses observations.

3 Le champ électrique

La loi de Coulomb est très utile, elle permet de calculer les caractéristiques de la force électrique. Elle pose toutefois plusieurs problèmes :

- Pour qu'une charge puisse exercer un effet sur une autre, elle doit « savoir » que celle-ci existe, mais comment le fait-elle ?
- Si une charge est placée près d'une autre, combien de temps faut-il pour que l'effet se fasse ressentir ? Rien ne peut être instantané.

Pour résoudre ces problèmes, Michael Faraday développe une idée particulièrement féconde : celle de **CHAMP ÉLECTRIQUE**. Cette notion sera plus tard appliquée à d'autres domaines de la physique : champ de gravité, champ magnétique, champ de Higgs...

3.1 Notion de champ

Lorsqu'un radiateur est placé dans un local, il va progressivement réchauffer le local et modifier la température en chaque point de l'espace. Lorsqu'une valeur est définie partout dans un espace ou un plan on parle de champ. Le radiateur dans le local crée ou modifie un champ de température.

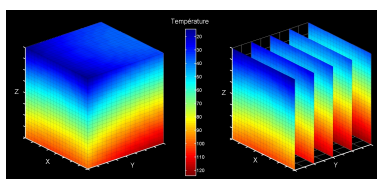


FIGURE 3.1 – Représentation d'un champ de température

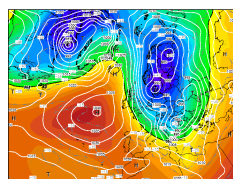


FIGURE 3.2 – Les cartes météo présentent souvent les champs de température et de pression.

3.2 Champ électrique

L'idée de Faraday est que la présence d'une charge modifie les propriétés de l'espace autour d'elle. On peut envisager qu'en tous points de l'espace il existe un champ électrique. Sa valeur peut être nulle, mais la présence de charges modifie celle-ci. Lorsqu'une charge est placée dans un champ électrique, elle ne subit pas l'influence des autres charges mais l'influence du champ à l'endroit où elle se trouve. C'est le champ électrique qui agit sur les charges, c'est lui qui exerce la force électrique.

$$\vec{F}_{elec} = \vec{E} \cdot q, \text{ où :}$$

- \vec{F}_{elec} est le vecteur représentant la force électrique, en $[N]$;
- \vec{E} est le vecteur représentant le champ électrique, en $[V \cdot m^{-1}]$ ou $[N \cdot q^{-1}]$;
- q est la valeur de la charge, en $[C]$.

Par conséquent, la valeur du champ créé par une charge dans l'espace qui l'entoure vaut :

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q}{r^2}$$

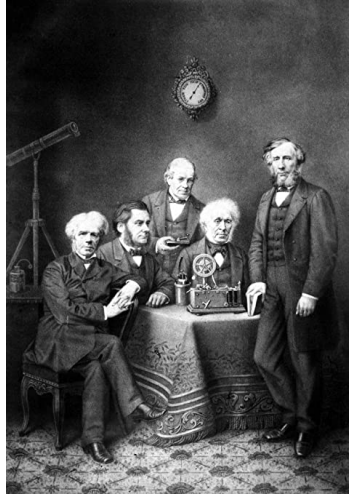


FIGURE 3.3 – Michael Faraday, Thomas Henry Huxley, Charles Wheatstone, David Brewster et John Tyndall.

3.3 Sens et direction du champ

Par convention, les vecteurs champ électrique sont toujours dirigés de manière à fuir les charges positives et à converger vers les charges négatives.

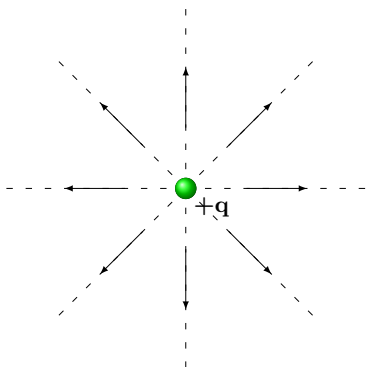


FIGURE 3.4 – Direction des vecteurs champ électrique, charge positive.

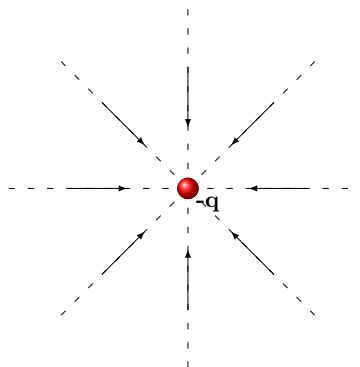


FIGURE 3.5 – Direction des vecteurs champ électrique, charge négative.

3.4 Représentation des champs : les lignes de champ

Il existe plusieurs possibilités pour représenter un champ :

- dessiner un ensemble de vecteurs
- tracer des lignes reliant les points pour lesquels le champ a la même intensité : les équipotentiels de champ.
- tracer des lignes qui suivent le chemin le long duquel le champ varie le plus : **LES LIGNES DE CHAMPS** . Les lignes de champs sont toujours orthogonales aux équipotentiels.

La représentation par lignes de champ permet de se faire une idée de l'aspect de celui-ci lorsque deux charges de signes opposées ou de même signe se trouvent à proximité l'une de l'autre.

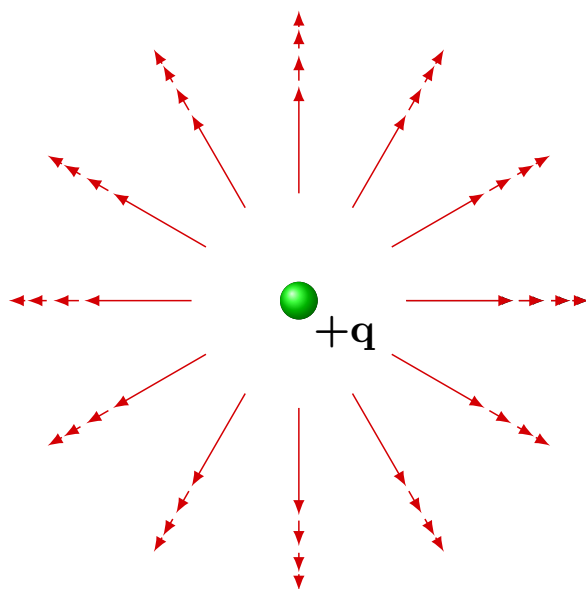


FIGURE 3.6 – Représentation du champ par plusieurs vecteurs.

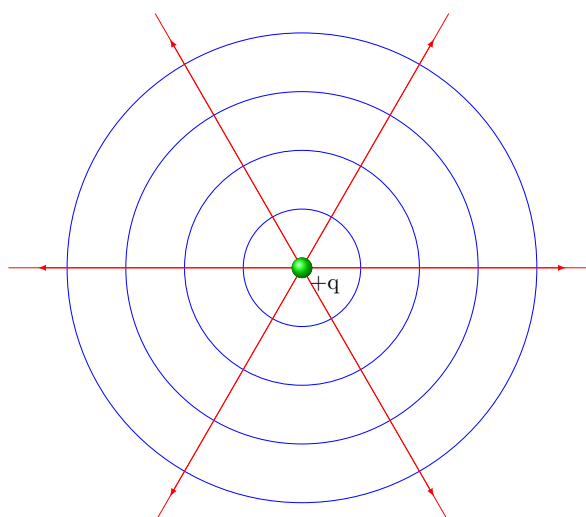


FIGURE 3.7 – Représentation du champ par équipotentiels (en bleu) et lignes de champ (en rouge).

3 Le champ électrique

FIGURE 3.8 – Lignes de champ (en rouge) et équipotentiels (en bleu) entre deux charges de signes opposés.

FIGURE 3.9 – Lignes de champ (en rouge) et équipotentiels (en bleu) entre deux charges de mêmes signes.

FIGURE 3.10 – Lignes de champ et équipotentiels entre six charges positives entourant une charge négative.

3.5 Exercices

Exercice 6 Détermine la grandeur et la direction du champ électrique en un point situé directement au-dessus d'une charge de $50 \times 10^{-5}[C]$ et à $35[cm]$ de celle-ci.

Exercice 7 La force électrique s'exerçant sur une charge de $+2[\mu C]$ correspond à $F = 8 \times 10^{-4}[N]$. Calcule la valeur du champ électrique à l'endroit de cette charge.

Exercice 8 Un proton ($m = 6,67 \times 10^{-27}[kg]$) immobile se trouve en suspension dans le champ gravitationnel à proximité de la surface terrestre et dans un champ électrique uniforme \vec{E} . Détermine les caractéristiques de \vec{E} .

Exercice 9 Détermine les caractéristiques du champ électrique en un coin d'un carré de $80[cm]$ de côté s'il y a des charges $18,2 \times 10^{-7}[C]$ aux trois autres coins.

Exercice 10 Détermine les caractéristiques du champ électrique au sommet d'un triangle équilatéral de $10[cm]$ de côté si les deux autres sommets sont occupés par une charge de $6 \times 10^{-7}[C]$

3 Le champ électrique



FIGURE 3.11 – *Charles-Augustin Coulomb*(1736 - 1806).

Table des matières

1	La charge électrique	3
1.1	Introduction	3
1.2	Électricité vitreuse et résineuse	3
1.2.1	Conservation de la charge	4
1.2.2	La charge électrique	4
1.3	Isolants, conducteurs et résistance	5
2	Force électrique et loi de Coulomb	9
2.1	Exercices	10
3	Le champ électrique	13
3.1	Notion de champ	13
3.2	Champ électrique	14
3.3	Sens et direction du champ	15
3.4	Représentation des champs : les lignes de champ	16
3.5	Exercices	19