

LE CHAMP ELECTROSTATIQUE : UNE INTRODUCTION

“Le seul moyen de se délivrer d'une tentation, c'est d'y céder. Résistez et votre âme se rend malade à force de languir ce qu'elle s'interdit.”

Oscar Wild dans Le portrait de Dorian Gray

I – L'électromagnétisme dans les sciences physiques et historique

On peut définir l'électromagnétisme comme l'étude de l'ensemble des phénomènes liés aux interactions entre particules chargées.

1.1 Importance de l'électromagnétisme dans les sciences physiques et dans la société

L'interaction **électromagnétique** est une des quatre interactions fondamentales de la physique contemporaine avec l'interaction **gravitationnelle**, l'interaction **forte** et l'interaction **faible**.

Si l'on « néglige » l'interaction gravitationnelle qui nous cloue au sol et si l'on ne regarde pas ce qui se passe à l'intérieur des noyaux (ce qui n'est pas le cas dans les centrales nucléaires par exemple), l'interaction électromagnétique permet une très grande partie des phénomènes naturels que l'on rencontre sur notre planète. Elle est responsable, par exemple, des phénomènes suivants :

- De la cohésion des atomes.
- Des liaisons chimiques qui assurent la cohésion des molécules (rôle essentielle en biologie et donc dans la vie...).
- La cohésion de la matière condensée (liquide et solide).
- Des propriétés physiques d'un corps dans un état donné (viscosité, dureté etc...).
- Des phénomènes électriques et magnétiques proprement dit.
- De la lumière qui n'est qu'un domaine particulier des ondes électromagnétiques (ondes radio etc...) (voir cours de PT).

Cette liste n'est bien sur pas exhaustive.

Les applications industrielles et technologiques qui reposent sur les lois de l'électromagnétisme sont considérables. Ces applications ont façonné la société dans laquelle nous vivons. Voici une liste de ces dernières qui là encore n'est pas exhaustive :

- La production et le transport de l'électricité donc d'énergie.
- L'électronique qui est présente dans tous les appareils qui nous entourent de la machine à laver en passant par les ordinateurs, votre lecteur MP3 etc...
- La communication à distance : les ondes radios, les fibres optiques, les satellites, les téléphones portables etc...

1.2 Historique rapide

- Vers 600 av J.C, les Grecs découvrent qu'un morceau d'ambre préalablement frotté attire les objets légers. Les pierres de Magnésie (cité située dans l'actuelle Turquie) attirent la limaille de fer.
- Au XVIII^{ème} siècle, Charles Augustin Coulomb (1736–1806) montre l'existence de deux types de charge et met en évidence la dépendance en $1/r^2$ de l'interaction électrostatique.
- En 1800, Volta (1745–1827) réalise sa pile électrique et produit des courants électriques.
- Durant le XIX^{ème} siècle, des expériences mettent en évidence que les courants électriques sont à la source d'un champ magnétique.
- En 1831, Faraday (1791–1867) met en évidence les phénomènes d'induction électromagnétique
- En 1864 Maxwell publie ses fameuses quatre équations qui unissent les phénomènes électrique et magnétique. On parle dès lors d'électromagnétisme :

EQUATIONS DE MAXWELL

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

En PTSI, nous étudierons une petite partie de ces équations, ***l'ensemble sera étudié en PT.***

- En 1905, la théorie de la relativité d'Einstein ne modifie pas les équations de Maxwell, ces dernières sont déjà compatibles avec le principe de relativité d'Einstein.
- Après 1945 est développée la version quantique de l'électromagnétisme par, notamment, Feynman, Schwinger et Tomonaga (ils recevront tous trois le prix Nobel de physique), on parle d'électrodynamique quantique. Il s'agit à l'heure actuelle de la théorie physique la plus précise, les résultats théoriques et expérimentaux sont identiques avec 8 chiffres après la virgule.

II – Charge électrique

2.1 Structure de la matière et charge

Vous savez déjà que la matière est constituée d'atomes dont la structure est rappelée sur la figure ci-dessous. Un atome est lui-même constitué d'électrons, de protons et de neutrons. Ces deux dernières particules constituent le noyau de l'atome.

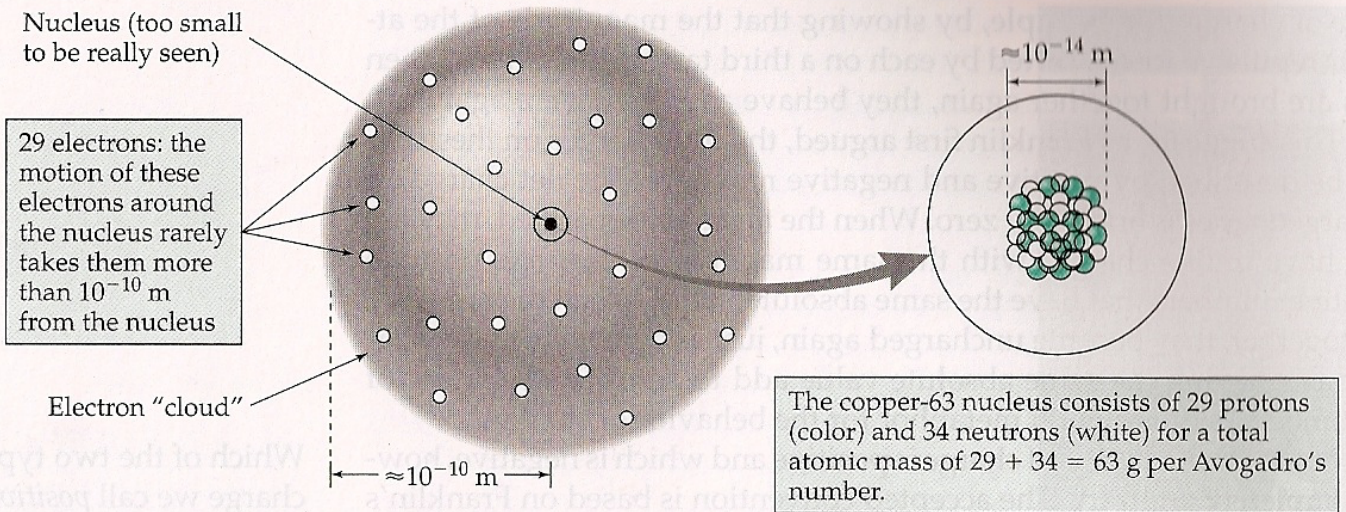


Figure E1.4

A schematic representation of a copper-63 atom. (Quantum mechanics implies that the charge of the 29 electrons behaves as if it were distributed smoothly throughout the gray "cloud" instead of being concentrated at 29 points.)

Ce qui est remarquable c'est que l'électron et le proton possèdent une charge électrique opposée en signe mais de même valeur $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ (charge positive pour le proton et négative pour l'électron). Le neutron n'est pas chargé.

La **charge électrique est une propriété intrinsèque des particules** au même titre que la masse. Par contre, il existe des **charges positives** et des **charges négatives** (une masse est une grandeur toujours positive).

Dans les années 1970, on s'est rendu compte que le proton et le neutron n'étaient pas des particules élémentaires. Ils sont constitués chacun de trois particules plus fondamentales ; **les quarks** (voir figure ci-dessus). Ces derniers ont des charges de $-\frac{1}{3}e$ ou $+\frac{2}{3}e$. Mais nous n'avons jamais observé expérimentalement de quarks à l'état libre et il y a de bonnes raisons théoriques de croire qu'ils doivent rester confiner à l'intérieur du proton et du neutron.

Ceci a pour conséquences la propriété notable suivante :

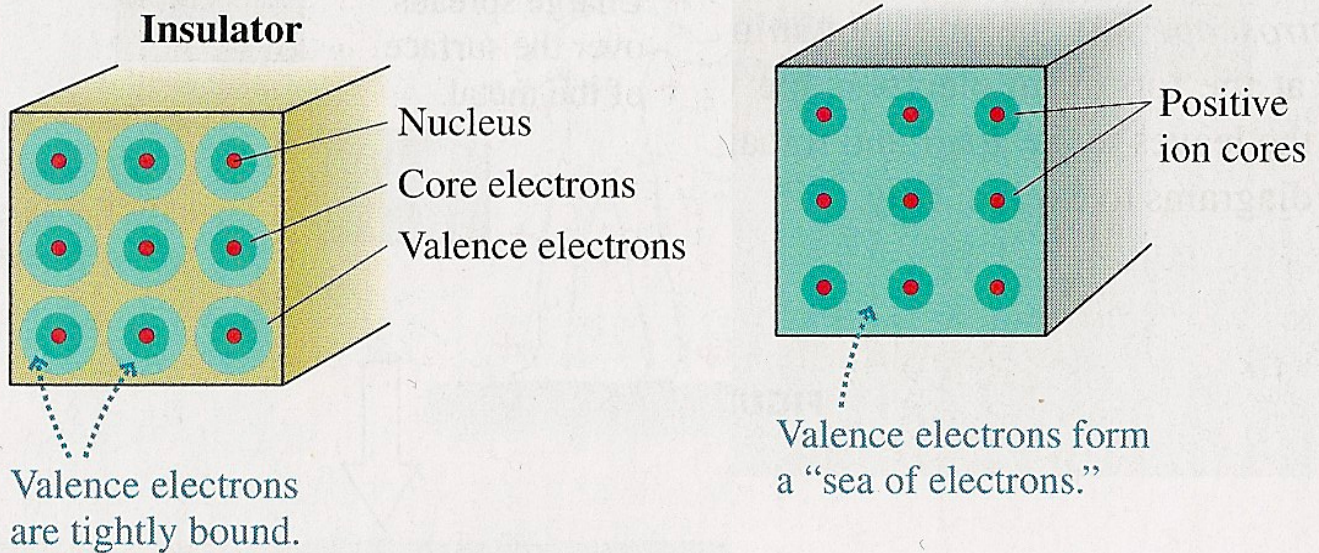
Les charges observées dans la nature sont toujours des multiples entiers de la charge élémentaire $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$, la charge est une grandeur quantifiée.

Dans une première approximation, en ce qui concerne ses propriétés électriques, les matériaux peuvent être classés en deux grandes catégories : **les conducteurs et les isolants**.

→ Les isolants sont constitués d'atomes non-métalliques. Dans ces derniers, les électrons externes (appelés électrons de valence) sont fortement liés au noyau. Ils ne sont donc pas libres de se déplacer dans l'ensemble du matériau. Il n'est alors pas possible de générer dans les isolants un courant électrique (c'est-à-dire un mouvement d'ensemble ordonné de charges électriques).

→ Les conducteurs sont constitués d'atomes métalliques. Dans ces derniers, les électrons de valence sont faiblement liés au noyau. Ainsi quand les atomes métalliques s'associent pour former le métal, les électrons de valence sont libres de se mouvoir dans l'ensemble du matériau. Le métal dans son ensemble reste neutre, nous n'avons ni ajouté ni enlevé d'électrons. Cependant, les électrons libres forment une sorte de gaz ou liquide chargé nommé par les physiciens une **mer d'électrons**. Cette dernière est facile à mettre en mouvement (par application d'un champ électrique comme nous le verrons) pour générer un courant électrique.

FIGURE 26.5 A microscopic look at insulators and conductors.



2.2 Conservation de la charge

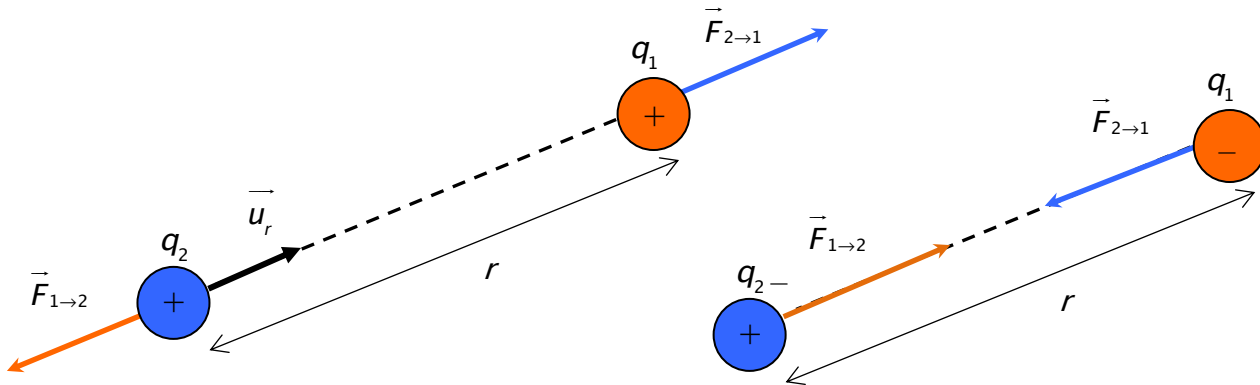
La charge électrique vérifie le principe suivant :

La charge électrique d'un système fermé garde une valeur constante. Elle est identique dans tous les référentiels d'étude. La charge est une grandeur conservative.

Il peut se produire des créations de charges à l'intérieur du système mais si une charge $+e$ est produite, elle doit s'accompagner de la création d'une charge $-e$. Par exemple, un photon (charge nulle) peut se matérialiser en une paire électron (charge $-e$)-positon (charge $+e$). Le positon est un antiélectron.

3.1 Expression

Deux masses interagissent par l'intermédiaire de la force de gravité. De façon analogue, deux charges vont interagir par l'intermédiaire de la force électrostatique ou force de Coulomb.



L'expression de la force électrostatique, connue sous le nom de loi de Coulomb, entre deux charges a été formulée par Charles Augustin de Coulomb en 1784. Elle est donnée par (avec les notations du schéma ci-dessus):



$$\vec{F}_{2 \rightarrow 1} = -\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_r$$



$\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ est la force que la particule 2 exerce sur 1, elle est l'opposé de la force que 1 exerce sur 2 d'après la troisième loi de Newton. ϵ_0 est une constante appelé **permittivité du vide** qui vaut $8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Pour les exercices, il est plus simple de retenir que :

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}.$$

$\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ est répulsive si les charges sont de même signe et attractive si elles sont de signes opposés.

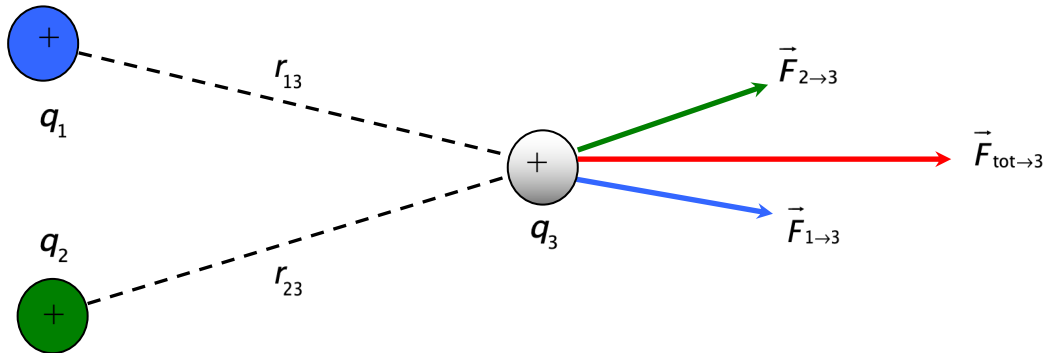
Charles Augustin de Coulomb (1736-1796). Officier, ingénieur et physicien français.

Si la charge q_1 se trouve au point de coordonnées (x_1, y_1, z_1) et la charge q_2 en (x_2, y_2, z_2) , dans un système de coordonnées cartésienne, la norme de la force $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ vaut :

$$F_{2 \rightarrow 1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \text{ car } r^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2.$$

3.2 Principe de superposition

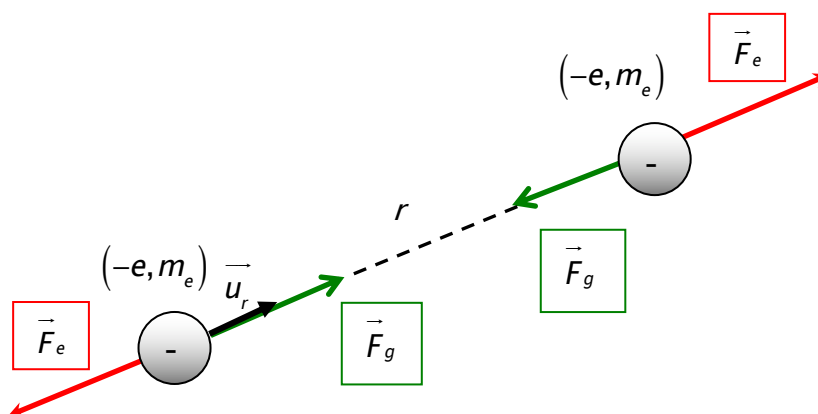
On considère la répartition de charges du schéma suivant. Quelle est la force totale subite par la particule de charge q_3 ?



La loi de Coulomb décrit uniquement l'interaction entre deux charges. Mais l'expérience montre que lorsque deux charges exercent simultanément une force sur une troisième charge, la force totale sur cette dernière est la somme vectorielle des forces que les deux charges exercent individuellement. On a donc simplement $\vec{F}_{\text{tot} \rightarrow 3} = \vec{F}_{1 \rightarrow 3} + \vec{F}_{2 \rightarrow 3}$. Ce résultat se généralise à une distribution quelconque de plusieurs charges. Il s'agit du **principe de superposition** qui joue un rôle très important dans l'étude de l'électromagnétisme, nous en reparlerons.

3.4 Comparaison entre l'intensité de la force électrostatique et l'intensité de la force de gravitation

On considère la situation du schéma ci-dessous où deux électrons sont distants de r .

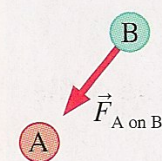


IV – Le champ électrostatique

4.1 Le concept de champ

Quand deux particules chargées interagissent dans l'espace, comment l'une connaît la présence de l'autre ? Qu'est ce qui est présent dans l'espace pour transmettre l'action d'une particule sur une autre ? On peut en partie répondre à ces questions par une reformulation de la loi de Coulomb d'une façon très enrichissante qui introduit le concept de **champ électrostatique** $\vec{E}$. Un champ est une fonction mathématique scalaire $f(x,y,z)$ ou vectorielle $\vec{f}(x,y,z)$ (c'est le cas ici) qui prend une valeur en chaque point de l'espace (x,y,z) . On connaît déjà des champs scalaires, le champ de température dans une salle, le champ de pression de l'atmosphère par exemple.

FIGURE 26.25 Newton's and Faraday's ideas about long-range forces.



In the Newtonian view, A exerts a force directly on B.



In Faraday's view, A alters the space around it. (The wavy lines are poetic license. We don't know what the alteration looks like.)



Particle B then responds to the altered space. The altered space is the agent that exerts the force on B.

TABLE 23.1

SOME ELECTRIC FIELDS

At surface of pulsar	$\approx 10^{14} \text{ N/C}$
At orbit of electron in hydrogen atom	6×10^{11}
In X-ray tube	5×10^6
Electrical breakdown of air	3×10^6
In Van de Graaff accelerator	2×10^6
Within lightning bolt	$\approx 10^4$
Under thundercloud	1×10^4
Near radar transmitter (FPS-6)	7×10^3
In sunlight (rms)	1×10^3
In atmosphere (fair weather)	1×10^2
In beam of small laser (rms)	1×10^2
In fluorescent lighting tube	10
In radio wave	$\approx 10^{-1}$
Within household wiring	$\approx 3 \times 10^{-2}$

Pour introduire le modèle du champ électrostatique, étudions les schémas suivants :

FIGURE 26.27 Charge q' is used to probe the electric field of point charge q .

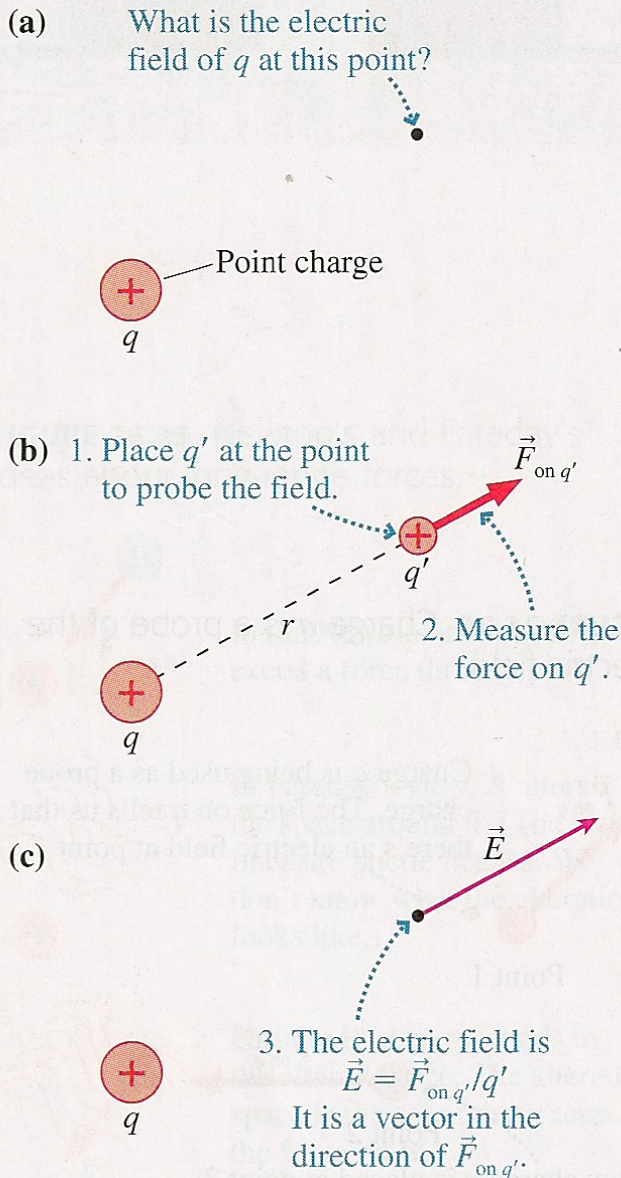
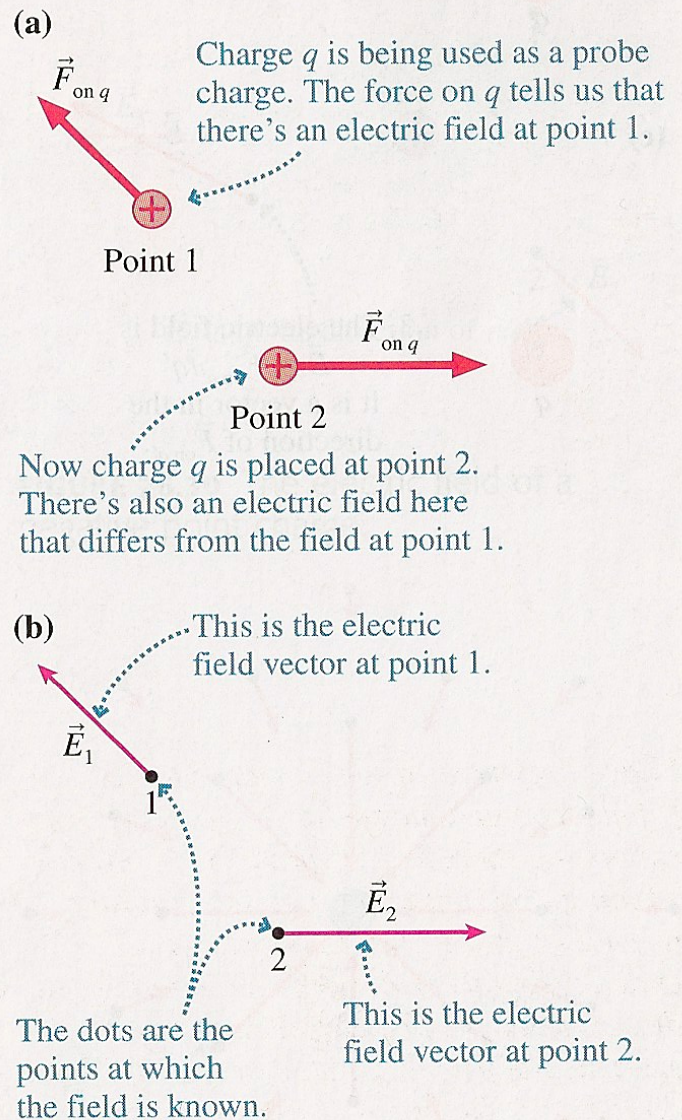


FIGURE 26.26 Charge q is a probe of the electric field.



→ On considère une particule dite **particule source** de charge positive quelconque q .

→ On considère une particule dite **particule teste** de charge q' .

→ La particule source produit en un point P quelconque de l'espace un champ électrostatique $\vec{E}$, elle perturbe l'espace qui l'entoure.

→ La particule teste se trouvant au point P va ressentir cette perturbation par l'action d'une force $\vec{F} = q'\vec{E}$ qui va s'exercer sur elle. Cette force n'est rien d'autre que l'interaction électrostatique dû à la présence de la particule source.

On définit le champ électrostatique $\vec{E}$ qui règne en un point P de coordonnées (x,y,z) comme la force par unité de charge à laquelle est soumise une particule test de charge q' située au point P :

$$\vec{E}(x,y,z) = \frac{\vec{F}}{q'}$$



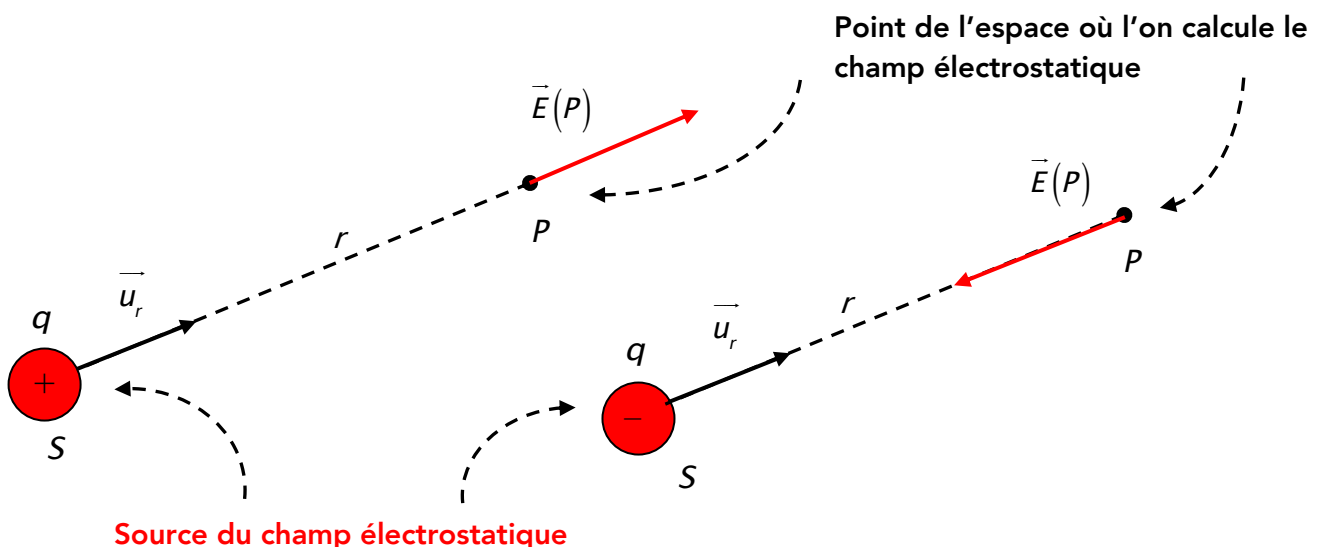
La norme de $\vec{E}$ s'exprime en N.C^{-1} mais nous verrons que c'est équivalent à des V.m^{-1} . La notion de champ est beaucoup plus riche que celle de force. Elle évite de considérer des forces à distances s'exerçant de façon instantanée entre particules (on sait qu'aucune interaction ne peut se propager plus vite que la vitesse de la lumière) comme précisément l'interaction électrostatique mais aussi l'interaction gravitationnelle. Dans la physique moderne, la notion de champ a supplanté la notion de force.

4.2 Le champ électrostatique d'une charge ponctuelle

D'après l'expression de la loi de Coulomb, le champ électrostatique produit en un point P par une charge source en un point S s'écrit :

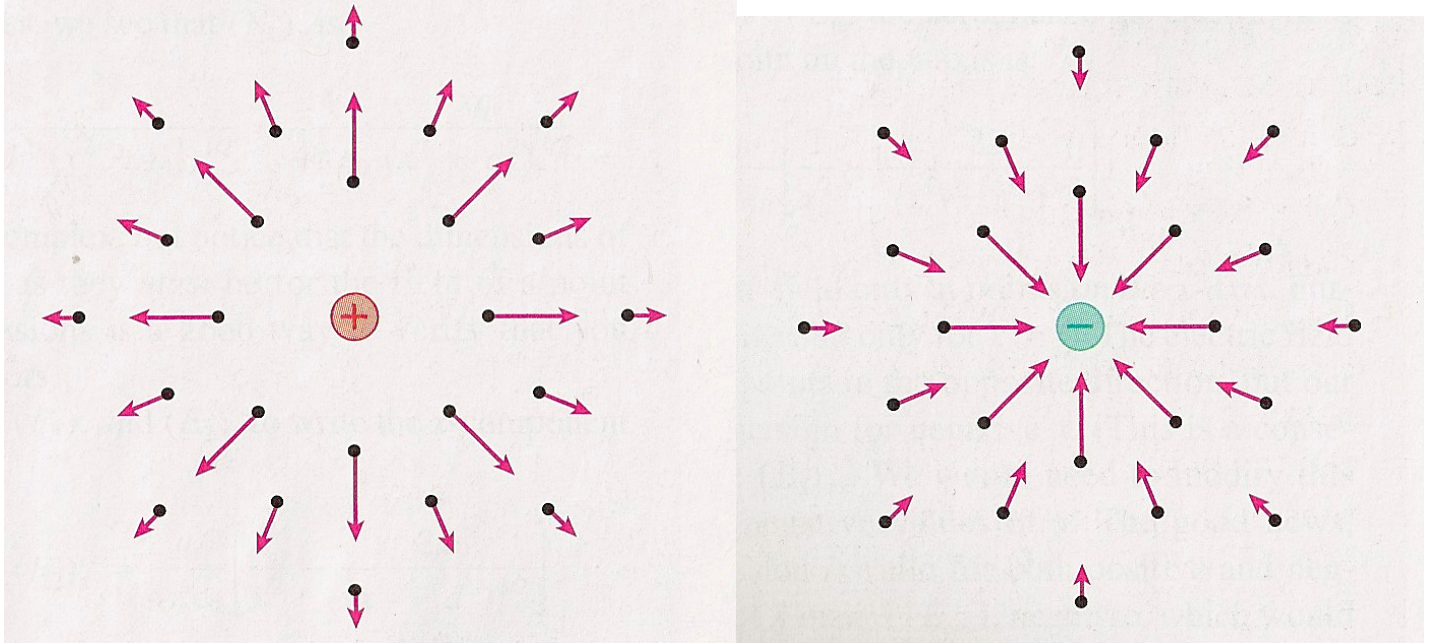


$$\vec{E}(P) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{u}_r}{r^2}$$



On constate que le champ électrostatique est radial et décroît en $\frac{1}{r^2}$. Pour une charge positive, le champ électrostatique « part » de la charge alors que pour une charge négative, il se « dirige » vers la charge (voir figure ci-dessous).

FIGURE 27.2 The electric field of a positive and a negative point charge.

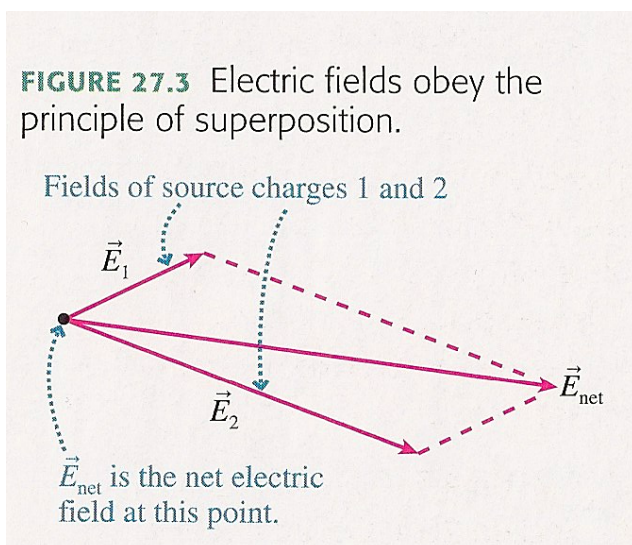


4.3 Superposition du champ électrostatique

On place au point S_1 une charge q_1 , en S_2 une charge q_2 etc... Quel est le champ électrostatique total créé par l'ensemble de ces charges en un point P quelconque de l'espace ?

La réponse est simple : le champ électrostatique total est la somme vectorielle des champs électrostatiques créés par chaque charge : $\vec{E}_{\text{tot}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$

FIGURE 27.3 Electric fields obey the principle of superposition.



Il s'agit du **principe de superposition du champ électrostatique** qui découle du principe de superposition de la force électrostatique. En effet, ce principe est encore valable pour le champ électrostatique car ce dernier est une force électrostatique par unité de charge. La figure ci-dessous illustre le résultat précédent dans le cas de deux charges.

Les figures ci-dessus donnent une représentation en 2D du champ électrique produit par deux charges de signe opposées. L'ensemble de ces deux charges s'appelle un **dipôle électrique** et joue un rôle important en particulier en chimie. Il ne faut oublier que le champ électrique existe en tout point de l'espace et pas seulement en quelques points de l'espace comme cela est représenté sur la figure pour plus de lisibilité.

FIGURE 27.7 The dipole electric field at two points.

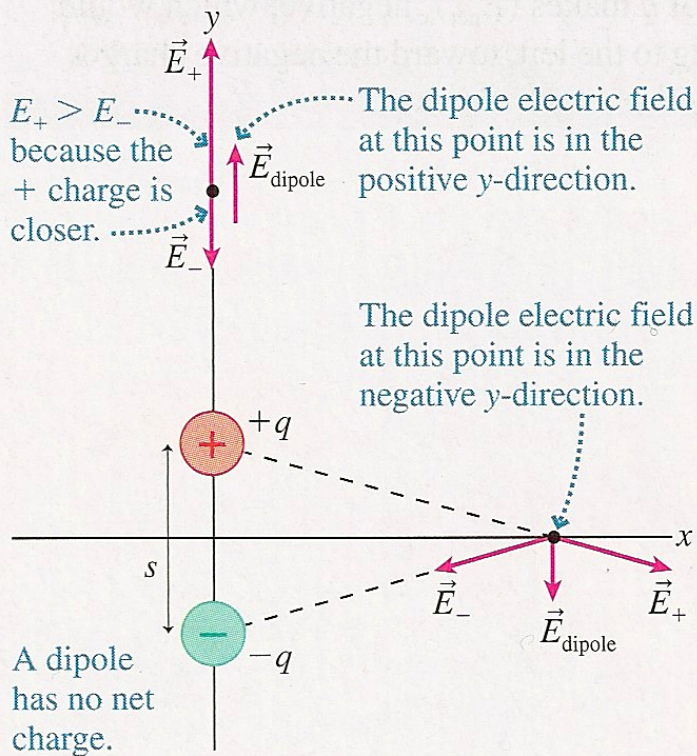
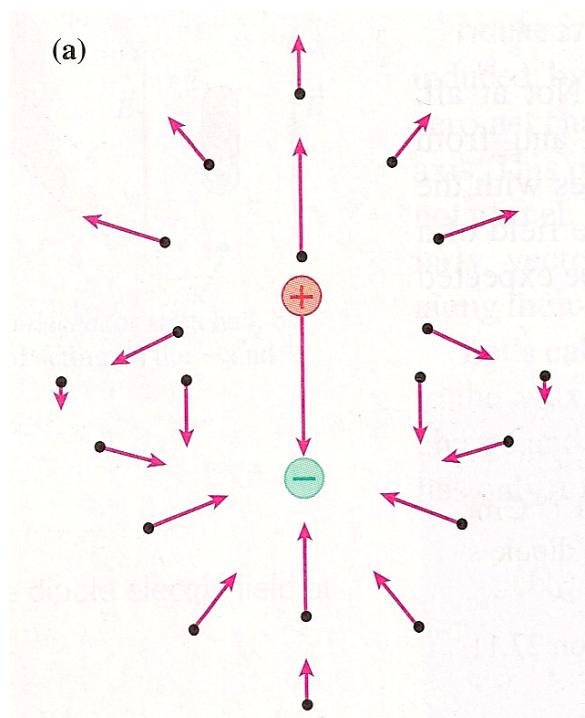
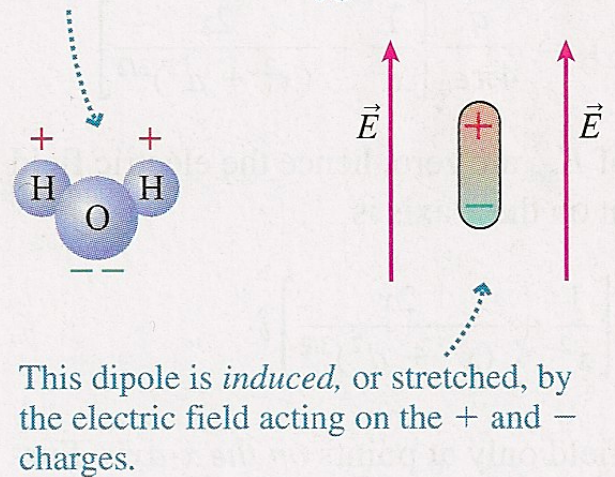


FIGURE 27.6 Permanent and induced electric dipoles.

A water molecule is a *permanent* dipole because the negative electrons spend more time with the oxygen atom.



Exercice d'application 2: Champ électrique produit par un dipôle

Déterminer le champ électrique au point P créée par le dipôle de la figure ci-dessous.

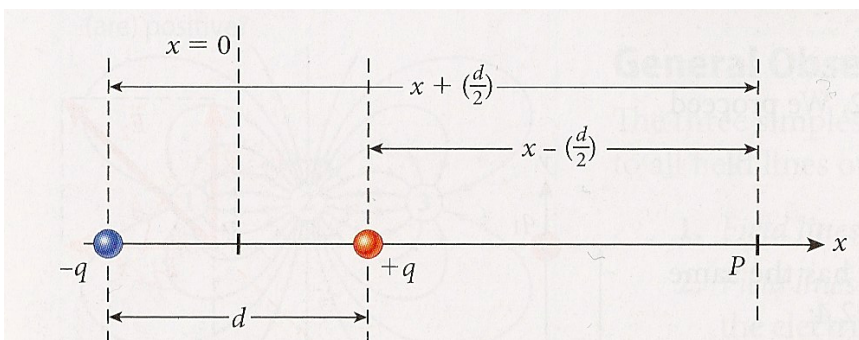


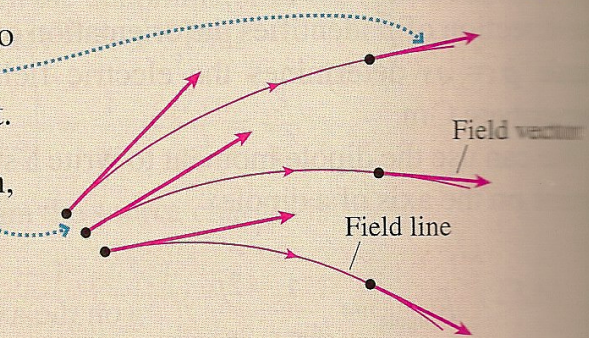
FIGURE 22.11 Calculation of the electric field from an electric dipole.

4.4 Lignes de champ électrostatique

Il est difficile de se représenter le champ électrostatique $\vec{E}$ dans l'espace, il n'est pas directement « visible ». C'est pourquoi nous allons introduire des lignes imaginaires dites **lignes du champ électrostatique** pour nous aider à visualiser $\vec{E}$. Attention, ces lignes restent un outil commode pour visualiser $\vec{E}$, il ne faudra pas les assimiler complètement à $\vec{E}$ qui est un champ de vecteur.

TACTICS BOX 27.1 Drawing and using electric field lines

- 1 Electric field lines are continuous curves drawn tangent to the electric field vectors. Conversely, the electric field vector at any point is tangent to the field line at that point.
- 2 Closely spaced field lines represent a larger field strength, with longer field vectors. Widely spaced lines indicate a smaller field strength.
- 3 Electric field lines never cross.
- 4 Electric field lines start from positive charges and end on negative charges.



Les lignes de champ électrostatique **sont des lignes tangentes, dans une région de l'espace, au vecteur champ électrique et dirigées suivant ce vecteur**. La figure ci-dessus illustre le concept de lignes de champ.

Les lignes de champ électrostatiques vérifient les propriétés suivantes :

- Elles vont toujours des charges positives vers les charges négatives : les charges positives « émettent » des lignes de champ et les charges négatives « absorbent » des lignes de champ.
- Le nombre de lignes qui partent d'une charge ou qui se dirigent vers elles est proportionnel à la valeur de la charge.
- L'intensité du champ est proportionnelle à la densité des lignes de champ, c'est-à-dire au nombre de lignes traversant une surface unitaire normale au champ.
- Les lignes de champ ne se coupent jamais : sinon, à l'endroit où elles se couperaient, le champ aurait deux directions différentes !

Les lignes de champ ne sont qu'une représentation en deux dimensions du champ électrostatique qui est présent dans un espace à trois dimensions.

Les figures ci-dessous montrent des exemples de lignes de champ :

FIGURE 27.10 The electric field of two equal positive charges.

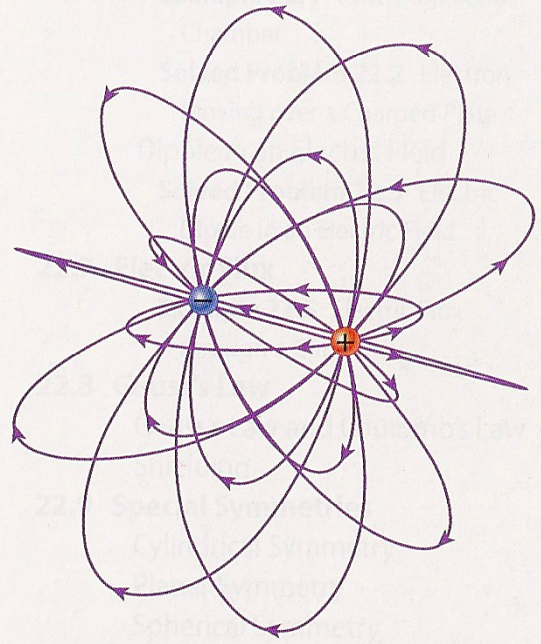
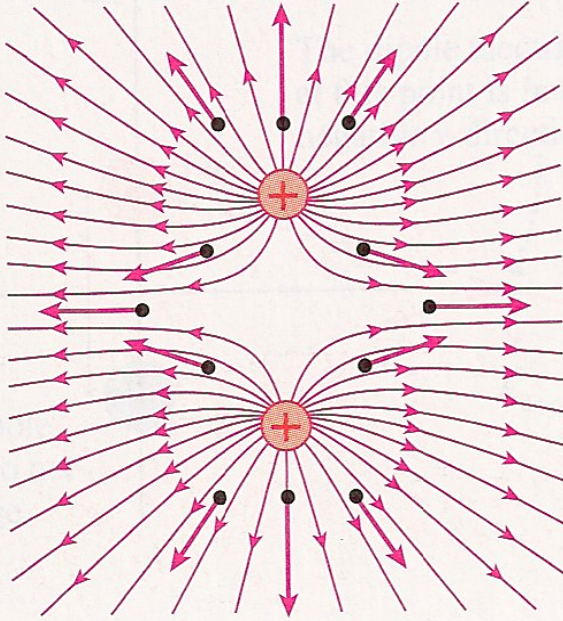


FIGURE 22.5 Three-dimensional representation of electric field lines from two point charges with opposite signs.

(b)

The electric field vectors are tangent to the electric field lines.

