



Leçon 4: Forces et champs électriques ou électrostatiques

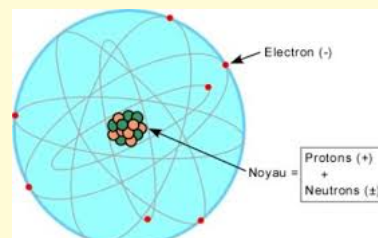
ACTIVITÉ D'INTÉGRATION

Nous savons que la matière est constituée d'atomes dont la structure est rappelée sur la figure ci-contre.

L'atome est lui-même constitué d'électrons, de protons et de neutrons. Ces deux dernières particules (proton et neutron) constituent le noyau de l'atome.

Ce qui est remarquable, c'est que l'électron et le proton possède une charge électrique opposée en signe mais de même valeur $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$. Le neutron quant à lui n'a pas de charge.

La charge électrique est une propriété intrinsèque des particules au même titre que la masse. Par contre, on distingue les charges positives et les charges négatives.



Dans les années **1970**, on s'est rendu compte que le proton et le neutron n'étaient pas des particules élémentaires. Ils sont constitués de trois particules plus fondamentales : les **quarks**. Ces derniers ont des charges de $-\frac{1}{3}e$ et $+\frac{2}{3}e$. 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. Ce qui conduit à la conséquence suivante :

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

En se servant du texte et de vos connaissances, répondez aux questions ci-dessous :

- a. Donner la constitution d'un atome et du noyau atomique.
- b. Quel est le signe de la charge de l'électron et celui du proton ?
- c. Qu'est ce qui justifie le fait que les électrons, pendant leur mouvement autour du noyau, ne se retrouvent pas dans le noyau ?
- d. Quel type d'interaction existe-t-il entre proton et électron ?
- e. Peut-il avoir cette même interaction entre les protons et les neutrons ou entre les neutrons et les électrons ? Justifier.
- f. Proposer une définition des mots ou expressions suivantes : force électrique - charge ponctuelle.

Objectifs

- Définir : charge ponctuelle - force électrique - champ électrique.
- Exprimer et calculer le champ électrique créé par une charge ponctuelle en un point de l'espace.
- Représenter les lignes de champ.

2.1 Mise en évidence de la force électrostatique

2.1.1. Expérience

Si on frotte rigoureusement deux règles en plastique avec un chiffon, celles-ci se **repoussent**. On peut le constater en suspendant une règle à un fil par son milieu, ce qui lui permet de tourner librement (fig. 2.1.a).

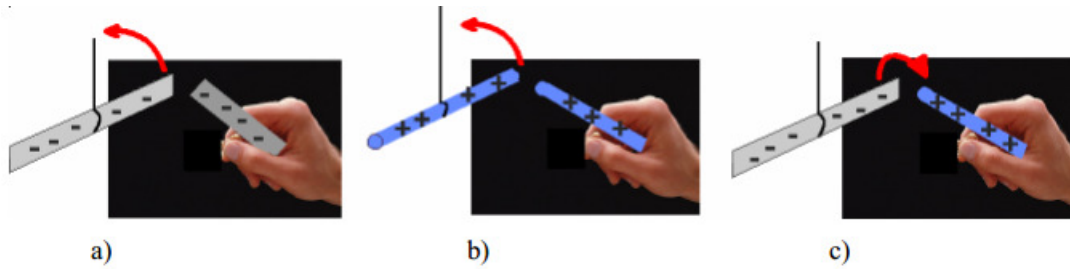


Figure 2.1 : Dispositif expérimental

L'extrémité de l'autre règle est approchée à la règle mobile en la tenant à la main. De même, lorsqu'on approche deux tiges de verre frottées de la même manière, elles se repoussent (fig. 2.1.b). Par contre, lorsqu'on approche celle de verre de celle en plastique ou réciproquement, elles s'attirent (fig. 2.1.c).

La force qui entre en jeu dans l'expérience décrite ci-dessus, est une force différente de la force gravitationnelle pour trois raisons. D'abord, - elle est tantôt **attractive**, tantôt **répulsive**, alors que la force gravitationnelle qui existe entre deux masses est toujours attractive. - Ensuite, elle ne se produit, entre les deux objets, que s'ils sont **frottés** au préalable : leur seule masse ne suffit pas. La force gravitationnelle qui existe entre les règles ou les tiges est si faible qu'on ne l'observe pas. Lorsque les règles ou les tiges ne sont pas frottées, aucune attraction n'est observée. Cette nouvelle force est appelée **force électrique**.

Remarque.

- Une **charge ponctuelle** est un corps (ou particule) chargé(e) dont les dimensions sont négligeables devant la distance d'interaction.
- Les forces sont dites **électrostatiques** lorsqu'elles sont créées par des **charges électriques immobiles**. Par contre, elles sont dites **électriques**, lorsqu'elles sont créées par des charges électriques **mobiles**.
- Il existe deux types de charge électriques : les charges positives (+) et les charges négatives (-). L'expérience montre que deux charges portant le même signe se repoussent alors que deux corps de charges différentes s'attirent.
- Les corps peuvent s'électriser par contact ou par influence.

2.1.2. Interaction entre les charges électriques : Loi de Coulomb

Énoncé

Les forces d'attraction ou de répulsion qui s'exercent entre deux charges ponctuelles q_A et q_B placées respectivement aux points A et B et distants de d , sont :

- dirigées selon (AB)
- proportionnelles à q_A et q_B
- inversement proportionnelles au carré de la distance qui sépare les deux charges
- de module commun :

$$F_{A/B} = F_{B/A} = k \frac{|q_A||q_B|}{d^2} \text{ avec } \begin{cases} F_{A/B} \text{ et } F_{B/A} \text{ en } N \\ q_A \text{ et } q_B \text{ en Coulomb (C)} \\ d \text{ en } m \\ k = \text{constante de proportionnalité} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.10^9 \text{ SI où } \epsilon_0 = 8,84.10^{-12} \text{ SI} = \text{permittivité du vide.}$$

Expression vectorielle



Figure 2.2 : Figure illustrative

$$\begin{cases} \vec{F}_Q = -k \frac{Q \cdot q}{d^2} \vec{u} \\ \vec{F}_q = k \frac{Q \cdot q}{d^2} \vec{u} \end{cases} \quad \vec{F}_Q = -\vec{F}_q$$

Exemple 2.1

Une charge électrique ponctuelle de -10^{-6} C est placée en un point O d'un axe Ox. Trouver la valeur de la charge qu'il faut placer au point M, tel que OM = 5 cm, pour que ces deux charges exercent entre elles une force répulsive d'intensité $F = 3,6$ N.

Solution 2.1

Soient $q_O = -10^{-6}$ C, la charge en O et $q_M = ?$

la charge placée en M. On a :

$$F_{O/M} = F_{M/O} = F = k \frac{|q_O| \cdot |q_M|}{OM^2}$$

$$|q_M| = \frac{F \times OM^2}{k \times |q_O|}$$

$$\text{AN : } |q_M| = 10^6 \text{ C.}$$

Comme les deux charges exercent entre elles une force répulsive, on dira alors qu'elles sont de signe contraire. Donc, $q_M = -10^6$ C.

2.2 Le champ électrique

2.2.1. Notion de champ électrique ou électrostatique

On appelle **champ électrique**, toute région de l'espace où une charge électrique est soumise à une force électrique.

2.2.2. Vecteur champ électrique

Soient une charge q placée en un point A, $\vec{F}$, la force électrique (électrostatique) qui lui est appliquée. On appelle **vecteur champ électrique** au point A, le vecteur $\vec{E}$ tel que :

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (2.2)$$

- Selon cette relation, si la charge q est positive, la charge qu'elle ressent a le même sens que le champ électrique (fig. 2.3.a), si elle est négative, elle subit une force de sens opposé au champ électrique (fig. 2.3.b)
- Il y a un champ électrique autour de q même en l'absence de toute charge d'essai qui sert à la mettre en évidence.
- **Caractéristiques de $\vec{E}$:**
 - point d'application : point A
 - sens : celui de $\vec{F}$ si $q > 0$, contraire à $\vec{F}$ si $q < 0$
 - module :

$$\boxed{\vec{E} = \frac{\vec{F}}{|q|}} \text{ avec } \begin{cases} E \text{ en } N.C^{-1} \\ F \text{ en } N \\ q \text{ en } C \end{cases} \quad (2.3)$$

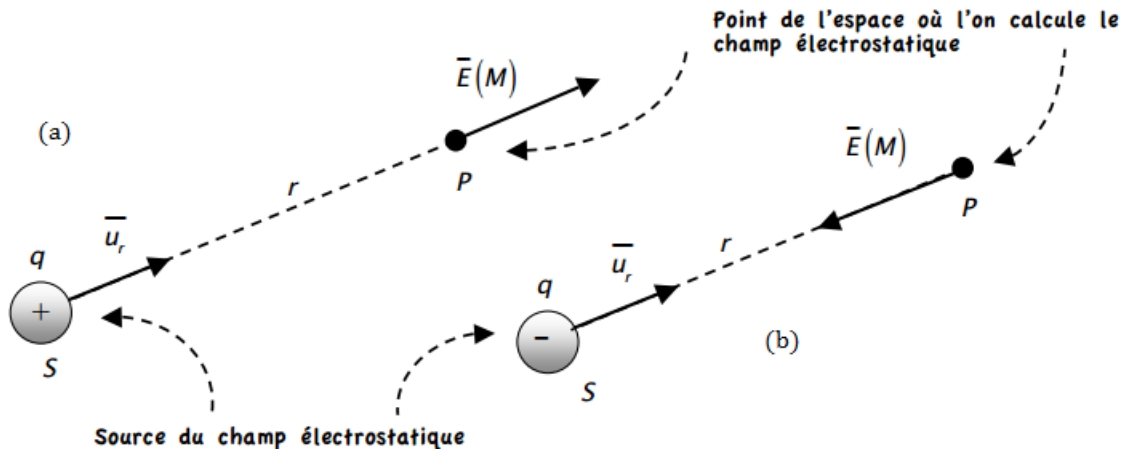


Figure 2.3 : Représentation du vecteur champ électrique $\vec{E}$

2.2.3. Champ électrique créé par une charge ponctuelle q_0 placée en O en un point M de l'espace

Soit q une charge d'essai placée en M. D'après la loi de Coulomb, elle est soumise de la part de la charge q_0 , placée en O (source du champ), à une force électrique

$$\vec{F}_{O/M} = k \frac{q_0 \cdot q}{OM^2} \vec{u}_{OM} \quad (2.4)$$

Le vecteur $\vec{E}_M$ en M est tel que :

$$\vec{E}_M = \frac{1}{q} \vec{F}_{O/M} \quad (2.5)$$

En introduisant (2.4) dans (2.5), on trouve :

$$\vec{E}_M = k \frac{q_0}{OM^2} \cdot \vec{u}_{OM} \quad (2.6)$$

Caractéristiques de $\vec{E}_M$

- point d'application : le point M
- direction : celle de la droite (OM)
- sens : dépend du signe de q_0 . Si $q_0 > 0$ ($O \rightarrow M$), le champ s'éloigne de la source O : on dit qu'il est **centrifuge**. Si $q_0 < 0$ ($M \rightarrow O$), le champ se dirige vers la source O : on dit qu'il est **centripète** ;
- module :

$$E_M = k \frac{|q_0|}{OM^2} \quad (2.7)$$

2.2.4. Champ électrique créé par plusieurs charges ponctuelles

Le vecteur champ électrique créé en un point M par un ensemble de charges ponctuelles (q_i), est égal à la somme vectorielle des vecteurs champs créés par chacune des charges agissant seule :

$$\vec{E}_M = \sum_{i=1}^n \vec{E}_{iM} = k \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{d_i^2} \cdot \vec{u}_i \quad (2.8)$$

où la charge q_i est placée au point A_i telle que : $A_iM = d_i$, $\vec{u}_i = \frac{\overrightarrow{A_iM}}{A_iM}$ = vecteur unitaire et n = nombre total des charges électriques.

Exemple 2.2

2.2.a- Déterminer les caractéristiques du vecteur

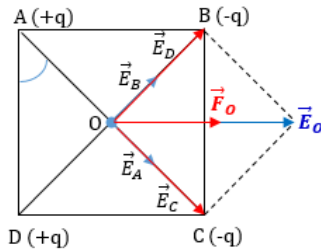
champ électrique créé au centre O d'un carré de côté $a = 20$ cm aux sommets desquels sont placées des charges électriques : $q_A = q_D =$



$+q$; $q_B = q_C = -q$ avec $q = 2 \text{ nC}$.

- 2.2.b-** En déduire les caractéristiques de la force électrique à laquelle est soumise la charge $q_0 = 5 \text{ nC}$ placée au centre O du carré.

Solution 2.2



- 2.2.a-** Caractéristiques de $\vec{E}_0$

- Point d'application : O
- Direction : horizontale
- Sens : Gauche → Droite
- Module E_0

D'après (2.8), on a :

$$\vec{E}_0 = \vec{E}_A + \vec{E}_B + \vec{E}_C + \vec{E}_D$$

$$\begin{cases} E_A = k \frac{|q_A|}{AO^2} = k \frac{q}{OA^2} \\ E_B = k \frac{|q_B|}{OB^2} = \frac{q}{OB^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_C = k \frac{|q_C|}{OC^2} = k \frac{q}{OC^2} \\ E_D = k \frac{|q_D|}{OD^2} = k \frac{q}{OD^2} \end{cases}$$

or, $OA = OB = OC = OD$, $\Rightarrow E_A = E_B =$

$$E_C = E_D$$

$$\text{Posons } \begin{cases} \vec{E}_1 = \vec{E}_B + \vec{E}_D \\ \vec{E}_2 = \vec{E}_A + \vec{E}_C \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E_1 = 2E_B \\ E_2 = 2E_A \end{cases}$$

$$\text{On a alors, } E_0^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2 \underbrace{\cos(\vec{E}_1 ; \vec{E}_2)}_0$$

$$\Rightarrow E_0 = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = 2\sqrt{2}E_A$$

$$\text{or } \begin{cases} E_A = k \frac{q}{OA^2} \\ \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{OA}{a} \end{cases}$$

$$\Rightarrow E_0 = k \frac{q}{a^2} \cdot 4\sqrt{2} = 2,54 \cdot 10^3 \text{ N.C}^{-1}$$

- 2.2.b-** Caractéristique de $\vec{F}_0 = q_0 \vec{E}_0$

- direction : horizontale
- sens : celui de $\vec{E}_0$
- point d'application : O
- module : $F_0 = |q_0| E_0 = q_0 E_0$

$$\text{AN : } F_0 = 1,27 \cdot 10^{-5} \text{ N.}$$

2.2.5. Les lignes de champ

On appelle **ligne de champ**, une courbe qui, en chacun de ses points, est tangente au vecteur champ électrostatique. Cette courbe est orientée dans le même sens que $\vec{E}$.

L'ensemble des lignes de champ d'une région d'un champ électrostatique constitue le **spectre électrostatique**.

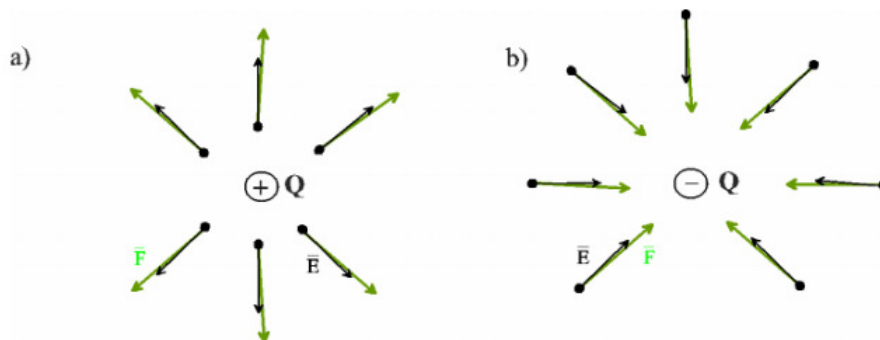


Figure 2.4 : Lignes de champ autour d'une charge ponctuelle

2.2.6. Champ uniforme

Un champ électrostatique est dit **uniforme** en une région de l'espace, si le vecteur champ en tout point de la région est constant en sens, direction et module.

Exemple : Le vecteur champ électrostatique $\vec{E}$ entre deux plaques métalliques planes, parallèles, chargées (cas des armatures d'un condensateur plan,...) est uniforme.

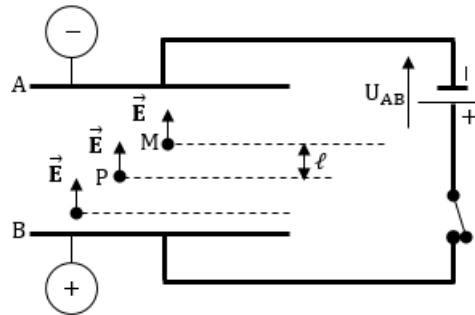


Figure 2.5 : Champ électrique uniforme entre les armatures d'un condensateur plan

Posons :

$$\begin{cases} \vec{E}_M = \vec{E}_P = \vec{E} \\ AB = d \\ V_B - V_A = U = \text{ddp entre les plaques A et B} \\ V_B - V_A = \vec{E} \cdot \overrightarrow{BA} = E \cdot BA \cdot \cos 0^\circ = E \cdot d \end{cases}$$

On a alors :

$$\boxed{E = \frac{|U|}{d}} \text{ avec } \begin{cases} U \text{ en V} \\ d \text{ en m} \\ E \text{ en } V.m^{-1} \end{cases} \quad (2.9)$$

Remarque

$$\begin{aligned} V_P - V_M &= \vec{E} \cdot \overrightarrow{PM} \\ &= E \cdot PM \cdot \cos(\widehat{\vec{E}; \overrightarrow{PM}}) \\ &= E \cdot \ell = \frac{U}{d} \cdot \ell \end{aligned}$$

On a alors :

$$\boxed{U_{PM} = V_P - V_M = \frac{|U|}{d} \cdot \ell} \quad (2.10)$$

car $V_P > V_M$

$\vec{E}$ décroît toujours les potentiels i.e part de $+$ $\rightarrow$ $-$.