

Chapitre I : charge et interactions électrostatiques

I-1 introduction

L'électrostatique est la branche de la physique qui étudie les phénomènes (champ et potentiel électrostatique) créés par des charges électriques statiques pour l'observateur. Les forces électrostatiques sont décrites par la loi de Coulomb qui présente une certaine analogie avec l'interaction gravitationnelle.

I-2 la charge électrique

I-2.1 Définition

La charge électrique d'une particule est une grandeur **scalaire** (algébrique) qui caractérise les actions électromagnétiques subies ou exercée par la particule. La **charge** électrique joue dans l'interaction électrostatique le même rôle que joue la **masse** (scalaire positive) dans l'interaction gravitationnelle.

Les expériences d'électrisation montrent qu'il existe **deux** classes de particules chargées : deux particules chargées d'une même classe se repoussent alors que deux particules chargées appartenant à des classes différentes s'attirent. Par **convention**, l'une des classes sera dite chargée positivement, l'autre chargée négativement. Ainsi, si le proton est affecté d'une charge positive et l'électron d'une charge négative, aucune considération physique ne peut justifier ce choix qui n'a aucune incidence sur la théorie de l'électromagnétisme.

I-2.2 Quantification de la charge

A l'échelle **microscopique**, l'expérience montre (Millikan, 1913), montre que la charge électrique varie de façon **discontinue** et se présente par unité sous forme de quantité bien déterminée. On dit qu'elle est quantifiée. Sa valeur est un multiple entier d'une charge qu'on peut prendre comme **charge élémentaire**, notée e . C'est la valeur absolue de la charge de l'électron $e = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Les particules élémentaires, constituants de la matière, ont pour charges:

- électron : $q = -e = -1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- proton : $q = +e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- neutron : la charge est nulle.

L'unité de la charge est le coulomb C dans le SI. (MKSA). C'est la quantité de charge transportée par un courant de 1 Ampère pendant 1 seconde ($Q = I t$).

$$1 \text{ C} = 6,25 \cdot 10^{18} e$$

C'est un nombre élevé de particules. Dans la pratique, on utilise le mC et le μC .

Notons, qu'à l'échelle **macroscopiques** (grand nombre de charge élémentaires) la nature discontinue de la charge n'a plus de sens : la charge électrique paraît être une grandeur susceptible de variation **continue**.

I-2.3 Invariance de la charge électrique

Le principe de conservation de la charge est des principes fondamentaux de conservation qui sont à la base de la physique, tels que la conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement, du moment cinétique. La charge totale d'un système n'est pas modifiée par suite du mouvement des charges.

La loi de conservation de la charge est valable en relativité, c'est-à-dire même si la charge se

déplace à une vitesse proche de celle de la lumière. On dit que la charge électrique est une grandeur qui est conservée : c'est un **invariant relativiste**.

Des expériences ont permis de montrer que la valeur de la charge d'un électron ne dépend pas de sa vitesse : la valeur est donc la même pour un observateur en mouvement par rapport à la charge. Ce n'est pas le cas de toutes les grandeurs physiques : l'énergie est conservée mais n'est pas un invariant relativiste.

I-3 loi de coulomb ou principe fondamental de l'électrostatique

Nous commencerons par analyser l'interaction électrostatique (forces et champ) dans le cas de charges ponctuelles. Par charges ponctuelles nous voulons signifier que les dimensions des chargées sont petites par rapport à la distance qui les sépare ; ce n'est donc qu'une **idéalisation mathématique** d'un système physique.

I-3.1 Enoncé de la loi de Coulomb

Considérons **dans le vide**, deux **charges ponctuelles** q_1 et q_2 , **fixées** en M_1 et M_2 . Les deux charges **stationnaires** q_1 et q_2 exercent l'une sur l'autre une force proportionnelle à chacune des charges et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. La force électrostatique est dirigée suivant la droite qui joint les charges (figure I-1). Elle attractive si les charges sont de signes contraires (figure I-1-a), répulsive lorsque les charges sont de même signe (figure I-1-b).

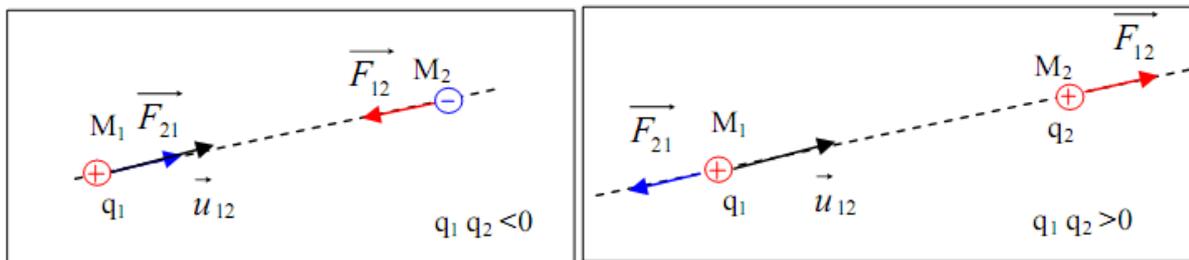


Figure I-a

Figure I-b

La force \vec{F}_{12} exercée par q_1 sur la charge q_2 s'écrit :

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

où r est la distance entre q_1 et q_2 et \vec{u}_{12} le vecteur unitaire défini par :

$$\vec{u}_{12} = \frac{\overrightarrow{M_1 M_2}}{\| \overrightarrow{M_1 M_2} \|} = \frac{\overrightarrow{M_1 M_2}}{r}$$

Conformément au principe de l'action et de la réaction, la force F_{21} exercée par q_2 sur la charge q_1 est égale et opposée à \vec{F}_{12} :

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$$

Les forces F_{12} et F_{21} sont portées par la droite qui joint les charges q_1 et q_2 . C'est une caractéristique que l'on peut expliquer en évoquant le principe d'**isotropie** : dans un univers vide, aucune direction ne peut être privilégiée par rapport à une autre, toutes les directions sont **équivalentes**.

La constante de proportionnalité est liée aux unités choisies pour exprimer la force, la longueur et la charge. Dans le système d'unités international (S.I.), sous sa forme rationalisée, K s'écrit :

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cong 910^9 \text{ SI } (V m / C)$$

où ϵ_0 est la permittivité du vide et a pour valeur :

$$\epsilon_0 = 8,85410^{-12} \text{ F m}^{-1}$$

I-3.2 Validité de la loi de Coulomb

La loi de Coulomb est valable pour des charges au **repos** où à la limite en mouvement relatif **lent**. Elle est aussi valable **dans le vide** et approximativement **dans l'air**.

La loi de Coulomb reste valable pour les très grandes distances dans le domaine microscopique : jusqu'à 10^{-15} m, ordre de grandeur des dimensions du noyau atomique. Cette loi n'est **pas valable** pour des distances inférieures à 10^{-15} m (dimension du noyau atomique). Dans ce dernier cas, il sera nécessaire d'utiliser la mécanique quantique pour l'étude du comportement des particules sous l'effet des forces coulombiennes.

Dans d'autres **milieux linéaires** homogènes et isotropes (l.h.i.), l'interaction électrostatique est bien décrite par la loi de Coulomb à condition de remplacer ϵ_0 par une constante ϵ différente qui tient compte de l'influence du milieu (ses caractéristiques électriques). ϵ s'appelle la permittivité diélectrique du milieu et l'on pose dans ce cas $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ où ϵ_r est la permittivité diélectrique relative du milieu (quantité sans dimension).

I-3.3 Analogie avec l'interaction de gravitation

Deux points matériels de masse m_1 et m_2 , placés respectivement en M_1 et M_2 exercent l'un sur l'autre une force de gravitation ; la force F_{12g} exercée par m_1 sur m_2 est :

$$\vec{F}_{12g} = -G m_1 m_2 \frac{\vec{u}_{12}}{r^2} \quad (2)$$

Où G est la constante de gravitation universelle. La force de gravitation a la même formulation mathématique que la force électrostatique : elle est portée par la droite qui joint les masses m_1 et m_2 et inversement proportionnelle au carré de la distance qui sépare les deux masses.

D'après le cours de mécanique du point, la force de gravitation joue un rôle fondamental dans la mécanique des **objets macroscopiques** et dans la dynamique céleste. Cependant, à **l'échelle atomique** et subatomique, la force de gravitation est **négligeable**.

A titre d'exemple, comparons la force de gravitation qui s'exerce entre l'électron et le proton d'un atome d'hydrogène à la force électrostatique s'exerçant entre eux. La distance r qui sépare l'électron de masse $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg du proton de masse $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27}$ kg est environ $5 \cdot 10^{-11}$ m.

$$\begin{aligned} \|\vec{F}_e\| &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(5 \cdot 10^{-11})^2} = 9 \cdot 10^{-8} \text{ N} \\ \|\vec{F}_g\| &= G \frac{m_e m_p}{r^2} = 6,7 \cdot 10^{-11} \frac{(9,1 \cdot 10^{-31})(1,7 \cdot 10^{-27})}{(5 \cdot 10^{-11})^2} = 4 \cdot 10^{-47} \text{ N} \end{aligned}$$

La force électrostatique est 10^{39} fois supérieure à la force de gravitation. On peut alors

s'étonner du fait que dans notre vie quotidienne, nous ne ressentons pas de manifestations de ces forces énormes d'origine électrique. L'existence de deux types de charges de signe contraire, mais de même valeur absolue conduit à des forces de répulsion et d'attraction et la neutralité électrique de la matière assure une compensation entre ces forces. Par contre les forces gravitationnelles bien que d'intensité faible, produisent des effets significatifs car elles sont toujours attractives. On peut imaginer ce qu'entraînerait un léger excès d'électrons sur deux personnes distantes de un mètre : si chacune d'elle porte un pour cent de plus d'électrons que de protons, elles exerceraient entre elles une force capable de soulever la terre toute entière.

I-4 PRINCIPE DE SUPERPOSITION

Considérons trois charges ponctuelles q_1 , q_2 et q **fixées** respectivement en P_1 , P_2 et M (Figure I-2).

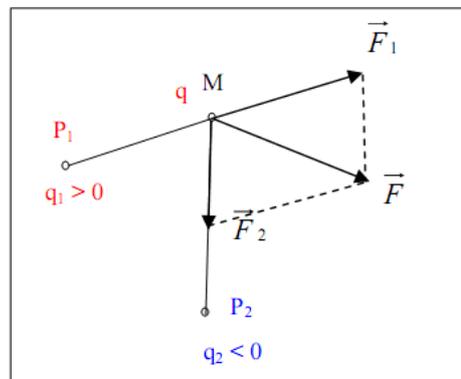


Figure 2

Quelle est la force F que subit la charge q placée en présence des charges q_1 et q_2 ? La loi de Coulomb permet de calculer la force F_1 subie par la charge q lorsqu'elle est uniquement en présence de q_1 . On peut de la même manière calculer F_2 force subie par q lorsque seule q_2 est en présence de la charge q .

L'expérience montre que la force F subit par q lorsqu'elle est en présence des deux charges q_1 et q_2 est la somme vectorielle des forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 :

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \frac{q q_1}{4\pi \epsilon_0} \frac{\overrightarrow{P_1 M}}{\|P_1 M\|^3} + \frac{q q_2}{4\pi \epsilon_0} \frac{\overrightarrow{P_2 M}}{\|P_2 M\|^3} \quad (3)$$

Ce résultat est vérifié quel que soit le nombre de charges en présence. La force résultante subie une charge q placée en M , en présence de n chargées $q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n$ fixées en $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$ est la somme vectorielle des forces dues à l'interaction des charges avec q , calculées séparément :

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = q \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi \epsilon_0} \frac{\overrightarrow{P_i M}}{\|P_i M\|^3} \quad (4)$$

Cette expression exprime le principe de superposition. la force totale F due à un ensemble de charges est la somme vectorielle de l'effet de chaque charge prise individuellement. Ce qui suppose que la force s'exerçant entre deux charges n'est pas modifiée par la présence d'une troisième charge.

La solution est simplement la somme des solutions calculées pour chaque couple de charges. Il en résulte que les équations de l'électrostatique sont des équations linéaires. Le principe de superposition s'applique aux phénomènes électromagnétiques : les équations de Maxwell équations de base de l'électromagnétisme sont des équations linéaires.