CHAPITRE I

CHARGES ELECTRIQUES

A. L'ESSENTIEL DU COURS

L'électricité est une science qui étudie les phénomènes dus aux charges électriques. Elle s'est peu à peu constituée à partir de simples observations des phénomènes de la nature. L'électrostatique est une branche de l'électricité qui étudie les interactions entre les charges électriques statiques.

1. Phénomènes d'électrisation

L'électrisation figure parmi les phénomènes électriques les plus anciennement connus. Elle se manifeste par l'attraction de certaines substances par d'autres.
L'électrisation est un processus de **séparation** des charges électriques positives et négatives existant dans une substance en quantités égales.
Les principaux phénomènes d'électrisation sont obtenus par: frottement (triboélectricité), contact, source électrique, influence électrostatique pour la plupart des corps, et par contrainte mécanique (piézoélectricité) et variation de température (pyroélectricité), pour certains corps seulement.

➤ Propriétés des charges électriques

✓ L'électricité qui apparaît par frottement sur du verre est différente de celle qui apparaît sur le plastique frotté. Il existe donc deux espèces d'électricité:

- l'électricité **positive** (ou vitreuse) qui se développe sur le verre électrisé.
- l'électricité **négative** (ou résineuse) qui se développe sur le plastique électrisé.

✓ Deux corps électrisés **s'attirent** lorsqu'ils portent des charges de **signes contraires**.
✓ Deux corps électrisés **se repoussent** lorsqu'ils portent des charges de **mêmes signes**.
✓ L'unité de charge électrique est le **Coulomb** (symbole *C*) qui correspond à $6{,}25.10^{18}$ électrons.

➤ Conducteurs et isolants

Tous les corps s'électrisent. On les classe en deux grandes catégories:

✓ ***Les isolants*** (le verre, le caoutchouc, le bois, la soie, le Nylon, les matières plastiques, l'huile, les gaz secs,...) où l'électrisation ne se déplace pas. Dans un isolant, les **électrons** ne peuvent pas se déplacer, on dit qu'ils sont **liés** aux atomes.

✓ ***Les conducteurs*** (métaux, flammes, acides, bases, sels, l'eau, le sol, le corps humain,...) où l'électrisation se déplace. Dans un conducteur, les électrons se déplacent facilement entre les atomes du réseau cristallin, on les appelle les **électrons libres** du cristal.

▪ ***Remarque:*** la quantité d'électrons libres est exactement ce qui distingue les conducteurs des isolants**.**

2. Quantification de la charge électrique

A la fin du 19ème siècle, on pensait que l'électricité est un fluide continu. Au stade actuel de nos connaissances, il est établi en revanche que la charge électrique n'apparaît pas sous la forme d'une quantité continue. C'est une grandeur discontinue qui est toujours égale à un multiple entier d'une unité fondamentale ou quantum ***e***. On dit que la charge électrique est **quantifiée**.

L'expérience de Millikan[1] a montré l'existence de l'électron, particule élémentaire de charge négative – *e*, en tant que constituant fondamental de la matière. Jusqu'à aujourd'hui aucune charge isolable plus petite n'a pu être trouvée.
La charge élémentaire – *e* d'un électron vaut:

$$\boxed{-e = -\,1{,}602.10^{-19}\ C}$$

Remarque:

– la charge électrique est invariante par changement de référentiel.

3. Structure électrique de la matière

La **matière** est composée de molécules et d'**atomes**. Un atome est constitué par un **noyau** très dense chargé positivement autour duquel gravitent des particules élémentaires chargées négativement appelées **électrons**. L'atome est constitué essentiellement de **vide** (99,99 %).

✓ La matière est composée essentiellement par de l'électricité positive et négative, et par des neutrons électriquement neutres.

✓ Un **atome** est composé de particules élémentaires:

- l'**électron**, particule chargée négativement, de masse $m_e = 9{,}11.10^{-31}\ Kg$;
- le **proton**, particule chargée positivement, de masse $m_p = 1{,}672.10^{-27}\ Kg$;
- le **neutron**, particule non chargée, de masse $m_n = 1{,}675.10^{-27}\ Kg$.

✓ Un **atome**, à l'état normal, est électriquement **neutre** car la charge positive du noyau est compensée par la charge négative totale des électrons. Cependant, un atome peut **gagner** ou **perdre** un ou plusieurs électrons et se transformer en **ion**.

- Un ion **positif** est un atome qui a **perdu** un ou plusieurs **électrons** de valence (exemples : Na^+, Al^{+++},...).
- Un ion **négatif** est un atome qui a **gagné** un ou plusieurs **électrons** (exemples: Cl^-, O^{--}, ...).

La figure I.1 représente la structure d'un atome d'hélium. Les électrons décrivent des trajectoires elliptiques autour du noyau.

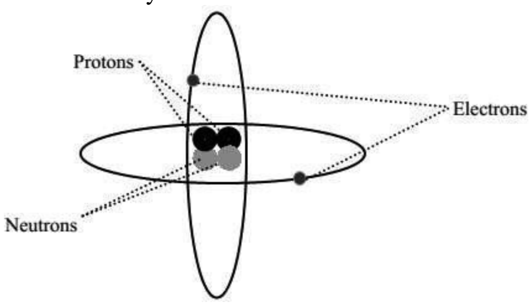

Fig. I.1

[1] Robert Andrews **Millikan** (1868–1953): physicien américain.

- On a postulé en 1964, l'existence de **quarks** qui sont des particules très fortement liées entre elles et donc non isolables, dont la charge est une **fraction** de e.

4. Conservation de la charge électrique

Les expériences précédentes ont montré un principe fondamental en physique: la charge totale d'un système isolé se **conserve**. Il n'y a pas de création, ni de destruction de charges, mais simplement un **transfert** de charges.
La charge électrique d'un corps est égale à la somme algébrique des charges électriques des particules *qui le* constituent: on dit que la charge électrique est **extensive**.

5. Distributions continues de charges

Quand les **dimensions** linéaires du volume contenant la charge q ne sont **pas négligeables**, on peut considérer que la **charge** est répartie de façon **continue** (différentiable) à l'intérieur du volume.

- On définit respectivement la densité **linéique** de charges λ, la densité **superficielle** de charges σ et la densité **volumique** de charges ρ (Fig. I.2), par :

$$\lambda = \frac{dq}{dl}, \quad \sigma = \frac{dq}{dS} \quad et \quad \rho = \frac{dq}{d\tau}$$

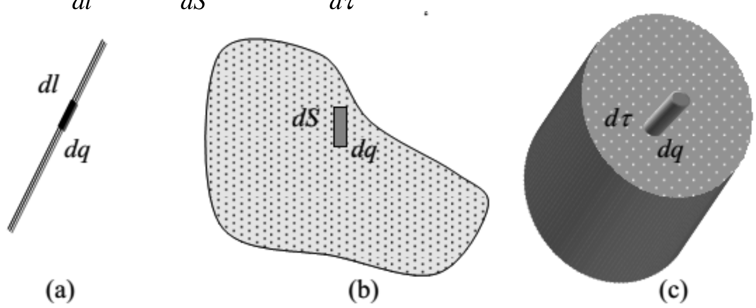

Fig. I.2

- La **charge totale** contenue respectivement dans la **ligne** de longueur **L**, la **surface** ***S*** et le **volume** τ (Fig. I-2) s'obtient par **intégration**, et est donnée par:

$$q = \int_L \lambda\, dl, \quad q = \iint_S \sigma\, dS, \quad q = \iiint_\tau \rho\, d\tau$$

6. Interactions fondamentales

Au stade actuel de nos connaissances, il est établi que la nature est gouvernée par quatre types d'interactions fondamentales (d'intensité relative I):

- **L'interaction nucléaire forte:** I = 1 (portée 10^{-15} m)
- **L'interaction électromagnétique:** I = 10^{-2} (portée infinie)
- **L'interaction nucléaire faible:** I = 10^{-5} (portée = 10^{-18} m)
- **L'interaction gravitationnelle:** I = 10^{-38} (portée infinie).

7. Loi de Coulomb

Par analogie avec la loi de la gravitation (loi de Newton), Coulomb[2] a établi expérimentalement la loi de l'interaction électrostatique des charges électriques.

[2] Charles-Augustin de **Coulomb** (1736 – 1806): physicien français.

On considère deux charges ponctuelles immobiles q_1 et q_2 se trouvant dans le vide et séparées par une distance *r* (Fig. I.3). La force d'interaction électrostatique entre ces deux charges est :

- radiale, c'est à dire portée par la droite séparant les deux charges;
- proportionnelle au produit des deux charges;
- enfin, inversement proportionnelle au carré de la distance *r* qui les sépare.

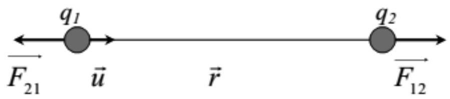

Fig. I.3

✓ La force d'interaction électrostatique est une force conservative centrale en $\frac{1}{r^2}$.

Dans le système d'unités S.I., la formule exprimant la loi de Coulomb est:

$$\boxed{\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1\ q_2}{r^2}\vec{u};\quad \vec{u} = \frac{\vec{r}}{r}}$$

Souvent, on pose $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9.10^9$ S.I., où $\varepsilon_0 = 8{,}85.10^{-12} = \frac{1}{36\pi.10^9}\,C^2.N^{1}.m^{-2}$ est la permittivité du vide, reliée à la perméabilité du vide $\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7}$ S.I. par la relation $\varepsilon_0\mu_0 c^2 = 1$, où *c* est la célérité de la lumière dans le vide $c = 299\ 792{,}458\ km.s^{-1}$, soit $c \cong 3.10^8\ m.s^{-1}$.

- La charge q_1 exerce une force $\overrightarrow{F_{12}}$ sur la charge q_2; La charge q_2 exerce une force $\overrightarrow{F_{21}}$ sur la charge q_1. D'après le principe de l'action et de la réaction, $\overrightarrow{F_{21}} = - \overrightarrow{F_{12}}$.

- Si q_1 et q_2 sont de **même signe** ($q_1 > 0$ et $q_2 > 0$; $q_1 < 0$ et $q_2 < 0$), la force $\overrightarrow{F_{12}}$ est positive, ce qui correspond à une **répulsion** des deux charges.

- Si q_1 et q_2 sont de **signes contraires** ($q_1 > 0$ et $q_2 < 0$; $q_1 < 0$ et $q_2 > 0$), la force $\overrightarrow{F_{12}}$ est négative, ce qui correspond à une **attraction** des deux charges.

8. Principe de superposition

Si *N* charges ponctuelles $q_1, q_2, q_3, \ldots, q_i, \ldots, q_N$ (Fig. I-4) exercent respectivement sur une charge ponctuelle q les forces $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$, …, $\vec{F}_i$, …, $\vec{F}_N$, la force résultante appliquée à la charge q est la somme vectorielle de toutes les forces $\vec{F}_i$ appliquées séparément, avec i = 1, 2, 3, ..., N.

$$\boxed{\vec{F} = \sum_{i=1}^{N}\vec{F}_i = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{N}\frac{q\,q_i}{r_i^2}\,\vec{u}_i}$$

Nous supposons que les charges sont au repos et que les dimensions des charges sont très petites devant les distances qui les séparent.

La propriété de superposition des forces électrostatiques est un fait d'expérience : c'est le principe de superposition (comme tout principe, il n'est pas démontré).

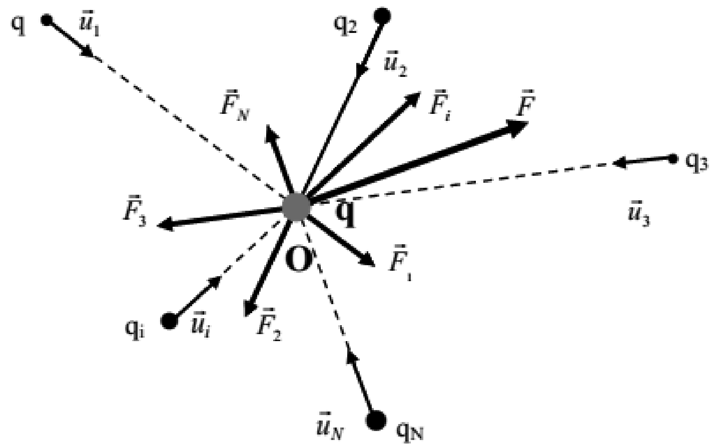

Fig. I.4

B. APPLICATIONS

Exemple N°1 — Interaction entre trois charges ponctuelles

On considère un plan *xOy*. Deux charges ponctuelles q' et $-q'$ sont placées sur l'axe des x, respectivement aux points A et B, de coordonnées $(3,0)$ et $(-3,0)$, comme indiqué sur la figure I.5.
Déterminer la force électrostatique résultante qui s'exerce sur une charge ponctuelle q située en un point C de l'axe des y, de coordonnées $(0,4)$, comme indiqué sur la figure 5.
On suppose $q > 0$, $q' > 0$ et $q >> q'$ de façon à négliger l'interaction entre les charges q'.

Application numérique : $q' = 10^{-8}\ C;\ q = 10^{-6}\ C.$

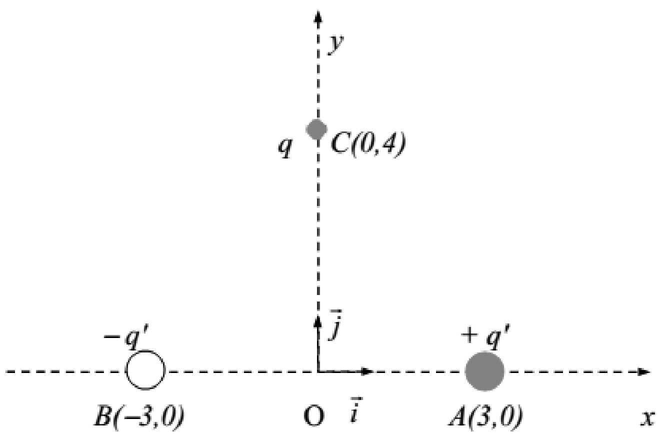

Fig. I.5

Solution :

Dans la figure I.6, on a représenté le diagramme des forces pour la charge q. Il montre toutes les forces électriques qui agissent sur cette charge.

- La charge q' située en A étant positive, elle interagit avec la charge q (également positive) située en C, avec une force électrostatique répulsive $\vec{F}_{AC}$:

$$\vec{F}_{AC} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q'q}{r_{AC}^2}\vec{u}_{AC} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q'q}{(AC)^2}\left(-\cos\theta\,\vec{i} + \sin\theta\,\vec{j}\right); \quad \text{avec} \quad \vec{u}_{AC} = -\cos\theta\,\vec{i} + \sin\theta\,\vec{j}$$

$$\cos\theta = \frac{OA}{AC} = \frac{OA}{\sqrt{(OA)^2+(OC)^2}} \quad \text{et} \quad \sin\theta = \frac{OC}{AC} = \frac{OC}{\sqrt{(OA)^2+(OC)^2}}.$$

- La charge $-q'$ située en B étant négative, elle interagit avec la charge q (positive) située en C, avec une force électrostatique attractive $\vec{F}_{BC}$:

$$\vec{F}_{BC} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q'q}{r_{AC}^2}\vec{u}_{BC} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q'q}{(BC)^2}\left(\cos\theta\,\vec{i} + \sin\theta\,\vec{j}\right); \text{ avec } \vec{u}_{BC} = \cos\theta\,\vec{i} + \sin\theta\,\vec{j}\ ;$$

$$\cos\theta = \frac{OB}{BC} = \frac{OB}{\sqrt{(OB)^2+(OC)^2}} \quad \text{et} \quad \sin\theta = \frac{OC}{BC} = \frac{OC}{\sqrt{(OB)^2+(OC)^2}}.$$

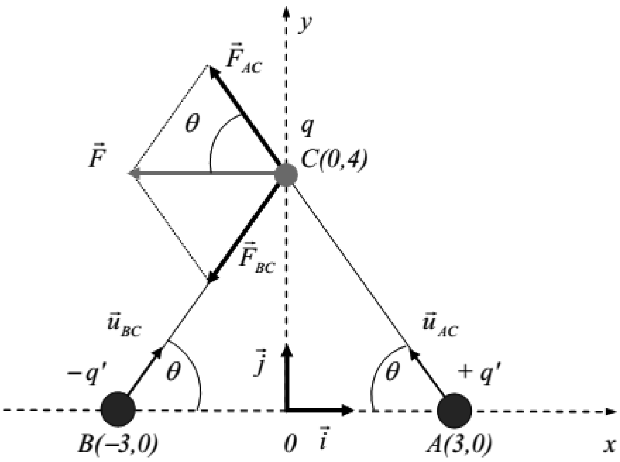

Fig. I.6

Pour déterminer la force résultante qui s'applique sur la charge q, on applique le principe de superposition. Ce qui revient à faire la somme vectorielle des forces $\vec{F}_{AC}$ et $\vec{F}_{BC}$, en remarquant que les composantes le long de l'axe Oy s'annulent par compensation.

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i = \vec{F}_{AC} + \vec{F}_{BC} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q'q}{(AC)^2}2\cos\theta\,\vec{i} = -\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{q'q}{(AC)^2}\frac{OA}{AC}$$

On obtient:

$$\boxed{\vec{F} = -\frac{q'q}{2\pi\varepsilon_0}\frac{OA}{\left[(OA)^2+(OC)^2\right]^{\frac{3}{2}}}\vec{i}}$$

Application numérique : *$q' = 10^{-8}$ C; $q = 10^{-6}$ C; $OA = 3$ m; $OC = 4$m.*

$$\vec{F} = -\frac{q'q}{2\pi\varepsilon_0}\frac{OA}{\left[(OA)^2+(OC)^2\right]^{\frac{3}{2}}}\vec{i} = -10^{-6}.10^{-8}.2.9.10^{9}\frac{3}{(25)^{\frac{3}{2}}}\vec{i}$$

$$\boxed{\vec{F} = -4{,}32.10^{-6}\vec{i}\ N}$$

Exemple N°2 — Pendule électrique

Deux petites sphères ayant chacune une masse de *0,01 g* sont suspendues à des fils de *50 cm* de longueur (Fig. I.7.1).
Après avoir reçu la même quantité d'électricité positive, les deux sphères se sont écartées l'une de l'autre de *7,2 cm*. Calculer la charge de chaque sphère.

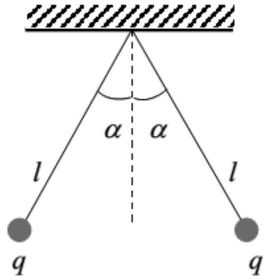

Fig. I.7.1

Solution :

Chaque bille est soumise à l'action de trois forces (Fig. I.7.2):
- le poids $\vec{P}$, vertical et dirigé vers le bas;
- la force électrique $\vec{F}_e$, horizontale et répulsive;
- la tension du fil $\vec{T}$, dirigée le long du fil.

A l'équilibre, la résultante de ces forces est nulle:

$$\vec{P}+\vec{T}+\vec{F}_e = \vec{0}$$

Par conséquent, la condition d'équilibre des pendules s'écrit:

$$tg\alpha = \frac{\vec{F}_e}{\vec{P}} = k\frac{q^2}{m\,g\,a^2} = \left(\frac{k}{m\,g}\right)\left(\frac{q}{a}\right)^2$$

Par hypothèse, $a << l$, donc $sin\ \alpha \approx tg\ \alpha \approx \alpha = \frac{a}{2l}$

D'où: $$\alpha = \frac{a}{2l} = \left(\frac{k}{m\,g}\right)\left(\frac{q}{a}\right)^2 = \left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0 m\,g}\right)\left(\frac{q}{a}\right)^2$$

Par conséquent, la charge électrique q s'exprime :

$$\boxed{q = a^{\frac{3}{2}}\sqrt{\frac{2\pi\varepsilon_0 mg}{l}}}$$

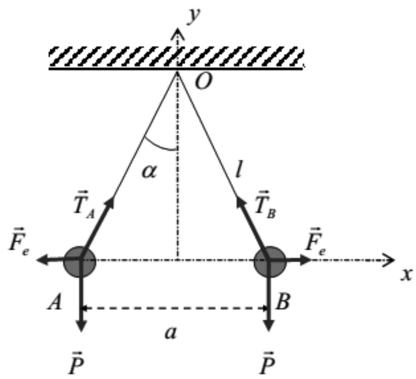

Fig. I.7.2

Application numérique *: l = 50 cm; a = 7,2 cm; m = 0,01 g; g = 9,81 m.s^{-2}.*

$$q = a^{\frac{3}{2}}\sqrt{\frac{2\pi\varepsilon_0 mg}{l}} = \left(7{,}2.10^{-2}\right)^{\frac{3}{2}}\sqrt{\frac{10^{-5}\times 9{,}81}{2.9.10^{9}\times 0{,}5}}$$

$$\boxed{q = 2.10^{-9}\,C}$$