

Chapitre 2

Electrisation, charge électrique, loi de Coulomb

L'interaction électromagnétique est l'une des interactions fondamentales, avec la gravitation et les interactions nucléaires faibles et fortes. Elle décrit l'interaction entre deux charges électriques. Lorsque les charges électriques sont immobiles, on est dans le domaine de l'électrostatique et la force d'interaction est décrite par la loi de Coulomb.

I/ Aspects expérimentaux

1) Triboélectricité

Les premières observations de phénomènes électriques artificiels remontent à l'Antiquité : en frottant un bloc d'ambre (en grec, ambre se dit "elektron" $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\nu$), celui-ci attire de petits morceaux de paille.

Par frottement, certains objets se chargent électriquement. C'est la **triboélectricité**. On peut déposer ces charges sur des objets isolés. Deux objets chargés à partir d'un même troisième se repoussent.

Par contre de l'ébonite chargée par frottement avec une peau de chat, repousse du verre chargé par frottement avec de la laine.

Par convention, l'ébonite est chargée **négativement**, le verre **positivement**

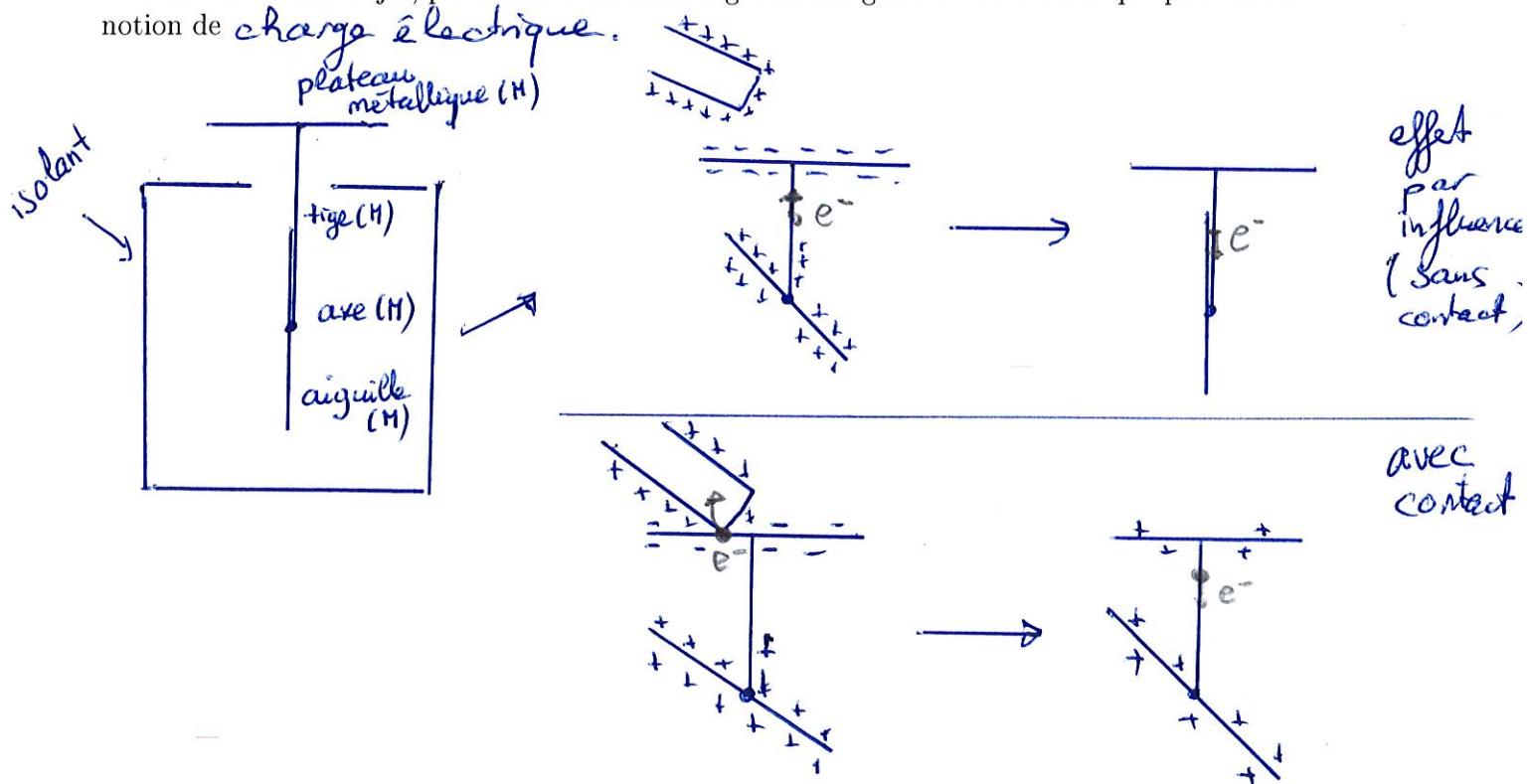
Les métaux ne peuvent se charger par frottements et lorsqu'on dépose des charges sur un métal relié à la terre, celles-ci s'évacuent vers la terre : on a alors un courant éphémère de charges.

2) Electroscopé

Un électroscopé est constitué d'une partie métallique, donc conductrice, contenue dans une enceinte isolante et dont une partie en forme de plateau dépasse de l'enceinte. La partie métallique contenue dans l'enceinte comporte une aiguille mobile autour d'un axe fixe.

Lorsqu'on approche un corps chargé par frottements du plateau sans les mettre en contact, l'aiguille s'écarte de la verticale. Si on éloigne le corps chargé, l'aiguille revient à sa position de départ. Si on met en contact l'objet avec le plateau, des charges passent sur le plateau et l'aiguille s'écarte de la verticale. Lorsqu'on retire l'objet, l'aiguille reste inclinée.

Plus on frotte l'objet, plus la déviation de l'aiguille sera grande : c'est de là que provient la notion de charge électrique.



3) Conservation

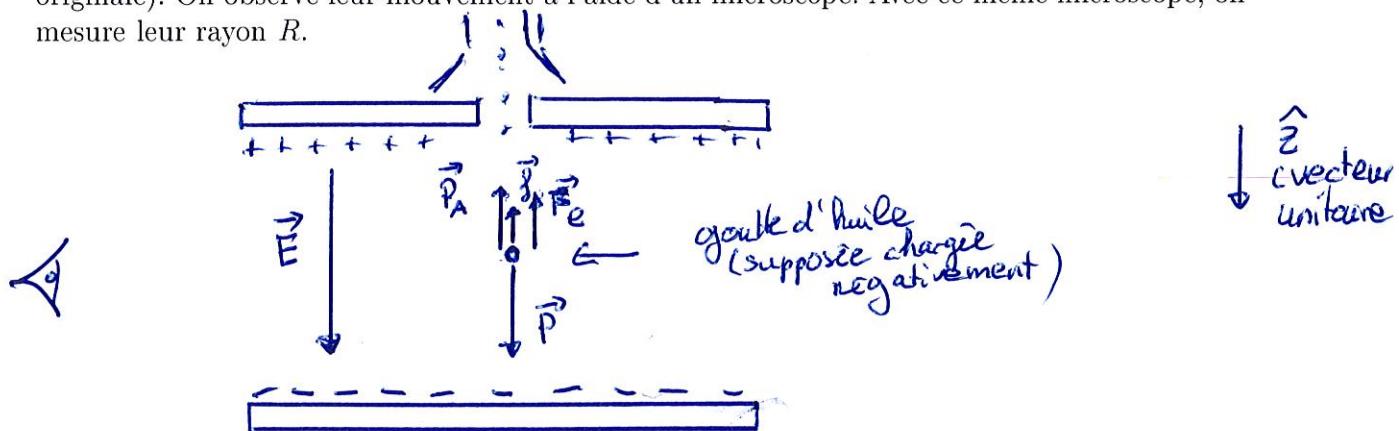
L'électroscopé permettant de "voir" les charges, on se rend compte que les charges se déplacent, mais ne disparaissent pas. Si on approche l'objet chargé d'un électroscopé 1 sans les mettre en contact, on relève l'indication de la charge initiale. Puis, on l'approche d'un électroscopé 2 en les mettant en contact, une charge apparaît sur celui-ci. Enfin, on approche à nouveau l'objet chargé de l'électroscopé 1 et on relève l'indication de la charge finale. On constate que la charge finale est inférieure à la charge initiale : les charges se sont déplacées.

Ainsi, les charges se déplacent, se compensent éventuellement, mais on ne crée pas de charge

Que ce soit dans ces expériences de triboélectricité, en chimie, ou en physique nucléaire, la charge totale se conserve toujours : c'est le principe de conservation de la charge électrique.

4) Expérience de Millikan 1909 (Nobel de physique 1923)

Le principe (simplifié) de cette expérience est le suivant. On injecte des gouttelettes d'huile entre les plaques d'un condensateur où règne un champ électrique uniforme. Ces gouttelettes sont électrisées par frottements avec le gicleur (ou par rayons X dans le cas de l'expérience originale). On observe leur mouvement à l'aide d'un microscope. Avec ce même microscope, on mesure leur rayon R .



Dans la version originale, Millikan mesure pour un champ donné leur vitesse de dérive qui est constante et fait intervenir les frottements liés à la viscosité de l'air. On peut obtenir la même conclusion en essayant d'immobiliser les gouttelettes en faisant varier \vec{E} (la méthode est plus simple mais moins précise).

Entre les plaques du condensateur, elles sont soumises à 4 forces :

- leur poids $\vec{P} = \frac{4\pi R^3}{3} \rho_{huile} g \hat{z}$ (avec ρ_{huile} , la masse volumique de l'huile)
- la poussée d'Archimède $\vec{P}_A = -\frac{4\pi R^3}{3} \rho_{air} g \hat{z}$ (avec ρ_{air} , la masse volumique de l'air)
- la force électrique $\vec{F}_e = q \cdot \vec{E} = q E \hat{z}$ *q: charge de la goutte*
- les frottements avec l'air $\vec{f} = -\beta \vec{v} = -6\pi\eta R \vec{v}$ (avec η , la viscosité de l'air). *v, vitesse de la goutte*

Pour une gouttelette immobile, $\vec{f} = \vec{0}$ et $\vec{P} + \vec{P}_A + \vec{F}_e = \vec{0}$ De cette dernière relation, on tire :

$$q = -\frac{4\pi R^3}{3} (\rho_{huile} - \rho_{air}) / E$$

En réalisant l'expérience sur un grand nombre de gouttes, on constate que *la charge q est un multiple entier d'un nombre e, elle est quantifiée.*

Millikan a initialement mesuré $e = 1,592 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (l'erreur étant due à l'époque à une valeur erronée de la viscosité de l'air).

5) Courant électrique

En 1800, Volta met au point le premier générateur électrique (la pile électrochimique). Cela permet de maintenir un déplacement constant de charges électriques à travers des matériaux conducteurs. Nous reviendrons plus en détails sur cet aspect lorsque nous parlerons des champs magnétiques.

En électrostatique, les charges sont supposées immobiles.

II/ Notion de charge électrique

1) Définition et propriétés

Les constituants de la matière sont caractérisés par une propriété physique appelée charge électrique notée traditionnellement q .

- L'unité internationale de charge électrique est le Coulomb (C)
- Cette charge est quantifiée. Elle est un multiple d'une charge élémentaire notée e , telle que $e = 1,602176634 \cdot 10^{-19} C$
- Elle peut être positive ou négative
- Le principe de conservation électrique a toujours été vérifié jusqu'à ce jour. Il n'y a ni création, ni annihilation de charge.

$$e = \sqrt{\frac{2 h \alpha}{\mu_0 c}}$$

(Valeur exacte
à partir du
20 mai 2013, réf.
du système international)

2) Les unités de charge électrique

28.1.20

- Le Coulomb est la charge véhiculée par un courant d'un Ampère pendant une seconde au travers d'une section du conducteur :

$$1 \text{ Ampère} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ seconde}} \quad \text{ou} \quad 1C = 1 \cdot A \times 1s$$

$$C = A \cdot s$$

h : constante de Planck

α : constante de structure fine

μ_0 : perméabilité magnétique du vide

c : vitesse de la lumière dans le vide

- Le Faraday, utilisé parfois en électrolyse, est la charge d'une mole de charges élémentaires :

$$1 \text{ Faraday} = N_A \cdot e \approx 96485 C$$

N_A : nombre d'Avogadro (rarement utilisé)

- L'ampère-heure est utilisé, dans la pratique, pour désigner la charge d'un accumulateur :

$$1 \text{ Ampère-heure} = 1 \text{ Ampère} \times 1 \text{ heure}$$

$$= 3600 C$$

3) Porteurs de charge

Les porteurs de charges sont :

- soit des particules élémentaires (électron, proton, positron, ...) dont la taille est de l'ordre du *femtomètre (10^{-15} m)*
- soit des ions (cations ou anions) dont la taille est de l'ordre de *quelques Angströms (10^{-10} m)*

A l'échelle macroscopique, ces porteurs de charges pourront être considérés comme

ponctuels.

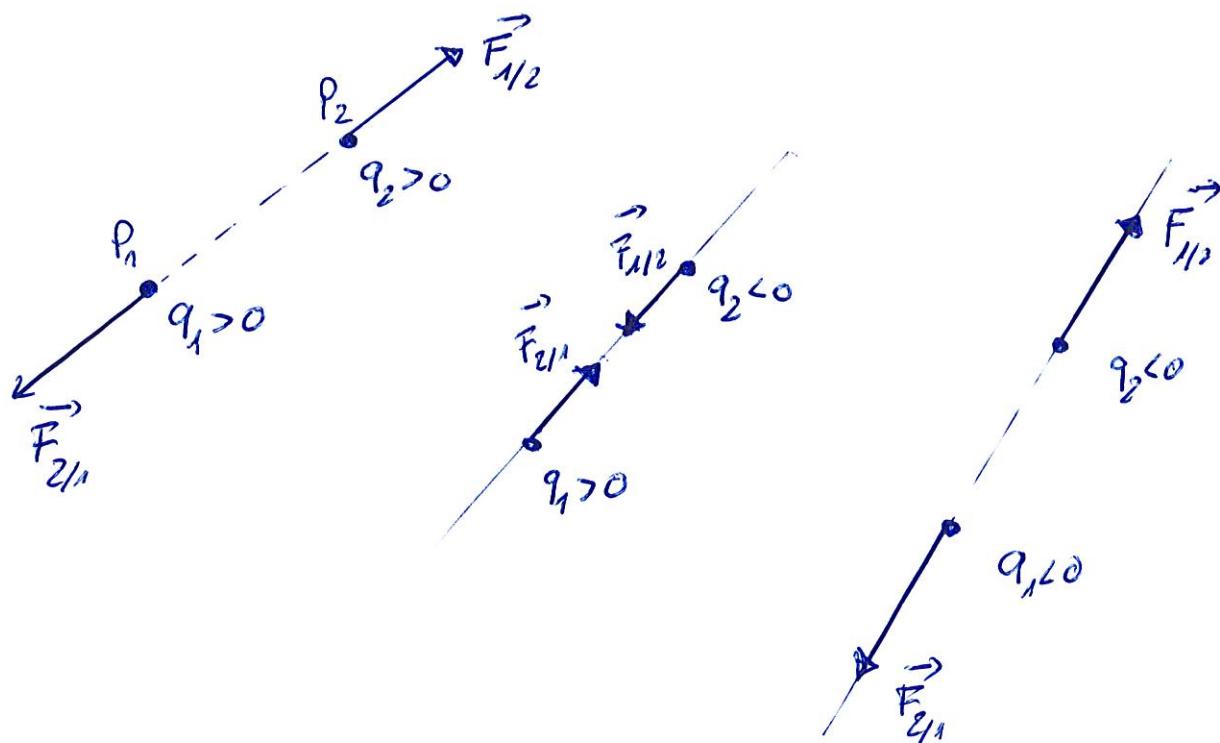
Remarque :

Certains matériaux conduisent les charges, ce sont *les conducteurs (électriques)*, au rang desquels figurent les métaux. D'autres ne laissent pas passer les charges, ce sont *les isolants ou diélectriques*. En pratique, les conducteurs parfaits et les diélectriques parfaits n'existent pas.

III/ Force électrostatique

1) Observations expérimentales

Expérimentalement, on constate que deux charges q_1 et q_2 , ponctuelles et immobiles, placées respectivement en Q_1 et Q_2 s'attirent si elles sont de signes contraires et se repoussent si elles sont de mêmes signes. Par ailleurs, la force agissant est dirigée selon la droite passant par les deux charges. Son intensité est proportionnelle à chacune des charges et varie comme l'inverse du carré de la distance $r = Q_1Q_2$ les séparant. De ces observations, on déduit l'expression suivante de la force, connue sous le nom de loi de Coulomb



2) Loi de Coulomb

Deux charges électriques q_1 et q_2 , immobiles, placées dans le vide, respectivement dans les points P_1 et P_2 , interagissent par des forces

$$\vec{F}_{1/2} = -\vec{F}_{2/1} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{P}_1 \vec{P}_2}{|\vec{P}_1 \vec{P}_2|^3} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2} \hat{u}_{12}$$

où $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \frac{F}{m} = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \frac{A^2 s^4}{kg m^3}$ désigne la permittivité

diélectrique du vide (appelée aussi constante électrique) et

$\hat{u}_{12} = \frac{\vec{P}_1 \vec{P}_2}{|\vec{P}_1 \vec{P}_2|}$ désigne le vecteur unitaire porté par le vecteur

$\vec{P}_1 \vec{P}_2$ et $r = |\vec{P}_1 \vec{P}_2|$ est la distance entre P_1 et P_2 . Si le vide est remplacé par un diélectrique, ϵ_0 est remplacé par le produit $\epsilon \epsilon_0$, où ϵ est la constante diélectrique relative du milieu ($\epsilon \approx 1$ pour l'air).

Remarque :

Si deux charges d'1 Coulomb chacune sont séparées d'1 mètre, la force d'interaction vaut $9 \cdot 10^9$ N !! Un tel système est instable. Les charges se mettront en mouvement et l'on sort du cadre de l'électrostatique.

3) Additivité

On observe expérimentalement que les forces électrostatiques sont additives. Cela signifie que, si une charge q est placée en P , dans le voisinage de deux charges q_1 et q_2 placées respectivement en P_1 et P_2 , alors elle subit une force totale

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \frac{q_1 q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{P}_1 \vec{P}}{|\vec{P}_1 \vec{P}|^3} + \frac{q_2 q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{P}_2 \vec{P}}{|\vec{P}_2 \vec{P}|^3} = \frac{q_1 q}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \hat{u}_1 + \frac{q_2 q}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \hat{u}_2$$

Cette propriété se généralise à un nombre N quelconque de charges

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i = \sum_{i=1}^N \frac{q_i q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{P}_i \vec{P}}{|\vec{P}_i \vec{P}|^3}$$

$$= \sum_{i=1}^N \frac{q_i q}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \hat{u}_i$$

$$\hat{u}_i = \frac{\vec{P}_i \vec{P}}{|\vec{P}_i \vec{P}|}$$

$$\hat{u}_i = \frac{\vec{P}_2 \vec{P}}{|\vec{P}_2 \vec{P}|}$$

