Électrostatique Introduction

Sidi M. Khefif

Département de Physique EPST Tlemcen

24 février 2013

I.1. Introduction

- Les phénomènes électriques ont été découverts très tôt dans l'histoire de l'humanité.
- ▶ Ils ont été d'abord des objets de curiosité ou de crainte, puis d'expériences spectaculaires au 17e et 18 siècles.
- Leur analyse scientifique entre 1785 et 1875 a conduit à l'élaboration d'une théorie cohérente de l'électricité dont la validité subsiste encore aujourd'hui sans modification essentielle.

I.2 Lois qualitatives

- Frottons, par exemple, un bâton en verre avec un tissu en laine. On constate que le bâton attire des corps légers (bouts de papier).
- ▶ Cette propriété est à l'origine de la découverte de *l'électrisation*.
- Il est ainsi possible d'électriser certains corps; ce phénomène obéit à des lois qualitatives:
- Les corps électrisés exercent des *actions mécaniques*.
- L'électrisation peut être transférée d'un corps à un autre.
- ▶ Il existe deux électrisations, conventionnellement qualifiées de *positive* et de *négative*.
- Deux corps de même électrisation se repoussent, alors que deux corps d'électrisations différentes s'attirent.
- ▶ Tout corps non électrisé est attiré par un corps électrisé, quel que soit le type d'électrisation.

I.3 Charge électrique élémentaire

- Les résultats expérimentaux sur l'électrisation ont été interprétés dès 1785 par le physicien français C. Coulomb.
- ► Cependant, une explication totalement satisfaisante n'a pu être donnée que plus tard, lors de la découverte des particules élémantaires chargées, notamment de l'électron par le physicien anglais J. J. Thomson en 1881.
- ▶ Il est remarquable que les expériences les plus fines et les plus récentes n'aient pas remis en cause l'existence des charges élémentaires.
- ▶ À noter que certaines particules chargées se sont révélées être, elles-mêmes, des systèmes complexes d'éléments encore plus fondamentaux (quarks).

I.4. Propriétés de la charge électrique

La charge électrique, qui caractérise l'état d'électrisation d'une charge élémentaire, est toujours liée à la matière : toutes les particules élémentaires chargées ont une masse non nulle. En outre, la charge électrique possède des propriétés remarquables.

- 1. Charge positive et charge négative
 - La charge électrique peut exister sous deux formes, l'une qualifiée de *positive*, l'autre de *négative*. Ce choix est purement conventionnel.
- 2. Extensivité de la charge
 - La charge électrique d'un système est une grandeur *extensive*; elle peut se mettre sous la forme de la somme algébrique des charges élémentaires qui la constituent.
- Conservation de la charge L'expérience montre que la charge électrique totale d'un système ne peut être ni détruite, ni crée.

I.4. Propriétés de la charge électrique (suite)

4. Quantification de la charge

De nombreuses expériences, dont la plus célèbre fut réalisée par la physicien américain P. Millikan en 1920, montrent que la charge électrique d'un système ne peut varier que par multiples entiers d'une charge élémentaire de valeur

$$e = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C} \sim 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

L'unité C du système international étant le coulomb. La charge d'un système quelconque s'écrit donc : Q = Ze, Z étant un entier positif ou négatif.

5. Invariance de la charge

La charge électrique d'un système est *invariante* par changement de référentiel galiléen; sa valeur ne dépend pas du référentiel galiléen dans lequel on la mesure.

II. Distributions de charges

II.1. Charge volumique

Dans la plupart des cas, la charge électrique dQ contenue dans le volume élémentaire dV est proportionnelle à ce dernier.

On introduit alors la charge volumique ρ telle que

$$dQ \propto dV$$
, ou bien $dQ = \rho dV$,

où ρ , que l'on exprime en C/m^3 en S.I., est une fonction de la position de l'élément dV. On l'appelle aussi densité volumique de charge.

La charge totale de la distribution est alors la somme algébrique des charges de chaque élément de volume :

$$Q=\int_V
ho dV$$

Notons que si la charge est répartie uniformément, la charge volumique s'identifie à la charge volumique moyenne \mathbb{Q}/\mathbb{V} .

II. Distributions de charges

II.2. Charge surfacique

Il arrive que les seuls éléments de volume contenant des charges soient situés autour d'un élément de surface ds et que la charge qu'il contient est proportionnelle à ds.

Aussi, définit-on une charge surfacique σ selon

$$dQ = \rho dV = \rho a ds,$$

où a est l'épaisseur.

Alors

$$dQ = \sigma ds$$
 avec $\sigma = \rho a$

L'unité S.I. de σ est C/m². La charge totale Q s'obtient alors en intégrant sur la surface

$$Q = \int_{S} \sigma ds$$

II. Distributions de charges

II.3. Charge linéique

Dans certains cas, les charges se répartissent dans le voisinage d'un fil de longueur L et de section s sur des distances très faibles devant sa longueur.

On définit une charge linéique λ

$$dQ = \rho dV = \rho \, s \, dl$$

soit

$$dQ = \lambda dl$$
 avec $\lambda = \rho s$

L'unité S.I. de λ est C/m. La charge totale Q s'obtient alors en intégrant sur la longueur du fil

$$Q = \int_L \lambda \, dl$$

III. Loi de Coulomb

La loi d'interaction de Coulomb entre deux particules disctinctes, établie en 1785, comporte deux aspects fondamentaux :

1. La norme de la force $\overrightarrow{F}_{A \to B}$ qu'exerce la charge ponctuelle A sur la charge ponctuelle B est inversement proportionnelle au carré de la distance AB qui sépare les deux charges :

$$F_{A o B} = \left\| \overrightarrow{F}_{A o B} \right\| = \frac{K(A, B)}{AB^2},$$

où K(A, B) est un coefficient qui dépend des charges en présence mais non de leur position relative.

2. La direction de $\overrightarrow{F}_{A \to B}$ est celle de \overrightarrow{AB} . On peut donc écrire, \hat{u}_r étant le vecteur unitaire de la direction (AB)

$$\overrightarrow{F}_{A \to B} = \frac{K(A, B)}{AB^2} \hat{u}_r = \frac{K(A, B)}{AB^3} \overrightarrow{AB},$$

K(A, B) est donc une grandeur scalaire.

III. Loi de Coulomb

III.1. Expression de la loi de Coulomb

Compte tenu de ce qui précède, on écrit la force de Coulomb entre deux charges ponctuelles immobiles dans le vide, sous la forme

$$\overrightarrow{F}_{AB} = rac{1}{4\pi\epsilon_0}rac{q_Aq_B}{AB^2}\hat{u}_r$$

οù

$$\hat{u}_r = \overrightarrow{\overline{AB}} \quad ext{et} \quad \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sim 9 \times 10^9 SI$$

La quantité ϵ_0 est appelée la permittivité électrique du vide.

III. Loi de Coulomb

Étude de cas : Forces dans un atome d'hydrogène

$$F_{\text{électrique}} \equiv \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_A q_B}{AB^2} = 9 \times 10^9 \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(52.9 \times 10^{-12})^2} \sim 82 \times 10^{-9} \text{ N}$$

$$F_{\text{gravitation}} \equiv G \frac{m_A m_B}{AB^2} = 6.67 \times 10^{-11} \frac{1846 (0.9 \times 10^{-30})^2}{(52.9 \times 10^{-12})^2} \sim 35 \times 10^{-48} \text{ N}$$

$$P_{\text{proton}} \equiv m_p g = - \sim 16.7 \times 10^{-27} \text{ N}$$

$$P_{\text{électron}} \equiv m_e g = - \sim 9 \times 10^{-30} \text{ N}$$

- $\frac{F_{\text{\'electrique}}}{F_{\text{gravitation}}} \sim 10^{39}$
- ▶ On néglige donc l'interaction gravitationnelle entre particules chargées, ainsi que leurs poids devant l'interaction électrostatique.
- ▶ Bien que très faible par rapport à l'interaction électrostatique, c'est la force de gravitation qui régit l'équilibre de l'univers à grande échelle, en raison de la compensation des forces électrostatiques entre charges positives et négatives.

IV.1. Champ créé par une charge ponctuelle

Considérons en un point M une charge (cible) q en interaction coulombienne avec une charge (source) q_i située au point P_i . On a :

$$rac{\overrightarrow{F}_{P_i}}{q} = rac{1}{4\pi\epsilon_0}rac{q_i}{P_iM^2}\hat{u}_i = rac{1}{4\pi\epsilon_0}rac{q_i}{P_iM^2}rac{\overrightarrow{P_iM}}{P_iM}$$

- ▶ Ce rapport ne dépend que de la charge q_i , en P_i , et de la position de M.
- ightharpoonup C'est une fonction, à valeur vectorielle, appelée *champ électrostatique* créé en M par la charge q_i située en P_i

$$\overrightarrow{E}_i(M) = rac{1}{4\pi\epsilon_0}rac{q_i}{P_iM^2}rac{\overrightarrow{P_iM}}{P_iM}$$

- L'unité S.I. de \overrightarrow{E} est le volt par mètre (V/m).
- Le champ apparait comme une *grandeur physique locale* permettant d'analyser l'interaction à distance entre particules chargées.
- Le champ électrostatique créé par une charge ponctuelle n'est pas défini en son point source, car $\frac{1}{DM^2}$ tend vers l'infini.

IV.2. Champ créé par une distribution discrète de charges

L'additivité vectorielle des forces électrostatiques permet d'écrire, dans le cas d'une charge q placée en M est soumise à l'action d'un ensemble de N charges distinctes $\left\{q_i\right\}$ situées aux points $\left\{P_i\right\}$:

$$\overrightarrow{F}(M) = \sum_{i=1}^{N} \overrightarrow{F}_i(M) = rac{1}{4\pi\epsilon_0} q \sum_{i=1}^{N} q_i rac{\overrightarrow{P_i M}}{P_i M^3}$$

d'où

$$\overrightarrow{E}(M) = rac{\overrightarrow{F}(M)}{q} = rac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i rac{\overrightarrow{P_i M}}{P_i M^3} = \sum_i \overrightarrow{E}_i(M)$$

IV.2. Champ créé par une distribution continue de charges

- ightharpoonup Considérons une répartition volumique de charge caractérisée par sa densité volumique ho dans un volume V.
- En un point M suffisamment éloigné de tout point P de la distribution, un élément de volume dV, entourant P, apparaît comme une charge ponctuelle $dQ = \rho(P)dV$ créant le champ élémentaire

$$\overrightarrow{dE}(M) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dQ}{PM^2} \frac{\overrightarrow{PM}}{PM} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\rho(P)dV}{PM^2} \frac{\overrightarrow{PM}}{PM}$$

Le champ résultant en M s'écrit donc

$$\overrightarrow{E}(M) = \int_V \overrightarrow{dE}(M) = rac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V rac{\overrightarrow{PM}}{PM^3}
ho(P) dV.$$

Dans le cas de distributions de charges surfacique ou linéique, on remplace

$$dq o \lambda dl \sim \sigma ds \sim \rho dV$$

- Les lignes de champ de \overrightarrow{E} sont les courbes orientées telles que leurs tangentes, en chaque point, aient même direction et même sens que le champ électrostatique.
- ▶ Ainsi, les lignes de champ produit par une charge ponctuelle placée au point *P* sont des droites passant par *P*.
- ▶ Au voisinage d'une charge ponctuelle *positive* (*négative*), les lignes de champ sont *divergentes* (*convergentes*).
- En un point où se coupent deux lignes de champ, \overrightarrow{E} est soit nul, soit indéfini.
- Comme les lignes de champ sont caractéristiques de \overrightarrow{E} , la visualisation spatiale de ces lignes permet de connaître la topologie du champ \overrightarrow{E} , i.e., sa répartition spatiale.
- L'intensité du champ est renseignée par la densité des lignes de champ, non par la longueur des lignes.

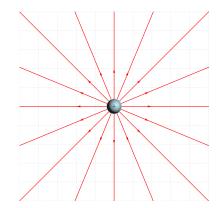


FIGURE: Lignes de champ produit par une charge ponctuelle positive

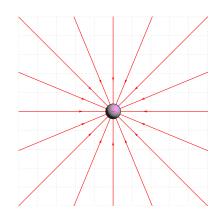


FIGURE : Lignes de champ produit par une charge ponctuelle négative

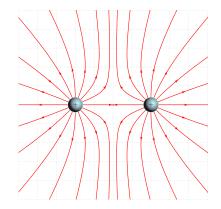
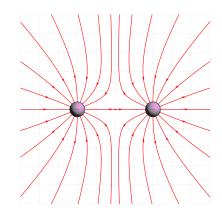
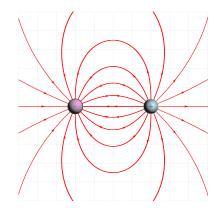


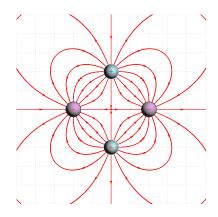
FIGURE : Lignes de champ produit par un doublé ++



 $\begin{tabular}{ll} Figure : Lignes de champ produit par un doublé -- \\ \hline \\ \end{array}$



 $\label{eq:figure:lignes} \textbf{Figure}: Lignes \ de \ champ \ produit \ par \ un \ dipole$



 $\label{figure:lignes} \mbox{Figure: Lignes de champ produit par un } \\ \mbox{quadripole}$