# M4 Mouvement de particules chargées

## I Force de Lorentz

### I.1 Champ électrique

#### I.1.a) Notion de charge électrique

Dès le XVIII$^{e}$ siècle des expériences d'électrisation ont permis de montrer que certains matériaux (verre, plexiglas...), possèdent lorsqu'ils ont été frottés avec d'autres matériaux, la propriété d'attirer des corps légers (corps électrisé).

Les interactions observables conduisent à distinguer deux types d'électrisation : Deux objets semblablement électrisé se repoussent et s'attirent dans le cas contraire.

L'étude quantitative fut réalisé par Coulomb en 1785 et attribua à un état d'électrisation un paramètre $q$ appelée charge électrique (grandeur scalaire extensive et algébrique).

**Interprétation** La matière est constitué d'atomes constitué de $Z$ protons de charge $+e = 1,6.10^{-19}\ C$, $N$ neutrons de charge nulle et $Z$ électrons de charge $-e$. Le frottement produit un déséquilibre entre la charge des noyaux et la charge des électrons :

- Le matériau frotté acquiert une charge positive lorsque des électrons sont arrachés. C'est par exemple le cas du plexiglas lorsqu'on le frotte avec avec un mouchoir en papier ou du verre lorsqu'il est frotté avec de la laine.
- Le matériau frotté acquiert une charge négative lorsque des électrons sont captés (ébonite avec de la peau de chat).

Une fois que ces corps sont électrisés, ils peuvent attirer des corps léger en modifiant la répartition de charges à l'intérieur de ces corps (électrisation par influence).

**Propriétés de la charge**

- La charge $q$ s'exprime en coulomb $C$,
- La charge est quantifiée, elle peut se mettre sous la forme : $q = \pm ne$ où $n$ est un entier.
- La charge se conserve : La charge totale d'un système isolé (absence de contact) reste constante au cours du temps.

#### I.1.b) Loi de Coulomb

Soit une charge ponctuelle $q_1$ en un point $P$ de l'espace. La force exercée sur une charge $q$ s'écrit :

$$\overrightarrow{F_{1\to 2}} = q\frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\overrightarrow{u_{PM}} = q\frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0 PM^3}\overrightarrow{PM}$$

où

- $\overrightarrow{u_{PM}} = \frac{\overrightarrow{PM}}{PM}$ est le vecteur unitaire orienté selon $\overrightarrow{PM}$ ;
- $\varepsilon_0 = 8,8510^{-12}\ F.m^{-1}$ est la permittivité du vide.

#### I.1.c) Définition du champ électrique

On définit le champ électrique au point $M$ par la relation $\overrightarrow{F(M)} = q\overrightarrow{E(M)}$, soit $\overrightarrow{E(M)} = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\overrightarrow{PM}}{PM^3}$.

- E(M) s'exprime en V/m
- Le champ ne dépend pas de la charge $q$ mais uniquement de l'endroit ou elle se situe.
- Lorsque le champ est crée par une distribution de charges, le principe de superposition s'applique.

### I.1.d) Relation Champ-potentiel

Le potentiel électrostatique est relié au champ électrique par la relation :

$$\vec{E}.\vec{d\ell} = -dV$$

### I.1.e) Énergie potentielle associée à la force électrique

L'énergie potentielle est défini par la relation : $\vec{F}.\vec{d\ell} = -dE_p$ or $\vec{F} = q\vec{E}$ et $\vec{E}.\vec{d\ell} = -dV$ soit $dE_p = qdV$. L'énergie potentielle s'écrit alors : $\boxed{E_p = qV + cste}$

## I.2 Champ magnétique

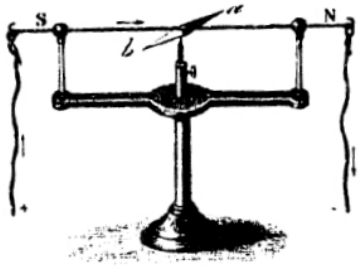
### I.2.a) Observations expérimentales

En présence d'une source de champ électromagnétique (aimant, électro-aimant...), on constate que la force subie par une particule chargée est séparée en deux parties :

- Une composante quelconque qui ne dépend pas de la vitesse de la particule : il s'agit de la force électrique $\vec{F} = q\vec{E}$ ;
- Une composante proportionnelle à la norme de la vitesse de la particule et orthogonale au vecteur vitesse : il s'agit de la force magnétique : $\vec{F}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B}$

### I.2.b) Sources du champ magnétiques

On connaît depuis l'antiquité le pouvoir attracteur de la magnétite ($Fe_3O_4$) sur les objets en fer ordinaire. Ce phénomène caractérise les aimants. Au cours du moyen age, on a constaté qu'un aimant libre à la surface de la Terre prenait une orientation privilégiée proche de celle d'un méridien ce qui a conduit à l'appellation nord et sud des extrémités d'un aimant. D'autres expériences ont montré la répulsion des pôles de même nom et l'attraction de ceux de nom différent, mais il a fallu attendre 1820 pourqu'Oersted montre un lien entre un courant électrique et champ magnétique : une aiguille aimantée est déviée quand on l'approche d'un fil parcouru par un courant continu.



Expérience d'Oersted

Les forces magnétiques correspondent à des interactions à distances entre charges mobiles

- Un courant électrique est un déplacement de porteurs de charges ;
- Un aimant est parcouru par des courants microscopiques. Ces courants ne sont pas distribués au hasard mais présentent une direction privilégiée (anisotropie du matériau) qui permet d'expliquer l'effet magnétique.

### I.2.c) Définition du champ magnétique

Une distribution de courants produit une modification des propriétés de l'espace que l'on appelle champ magnétique $\vec{B}$ défini à partir de la force magnétique $\overrightarrow{F_m} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$

*Propriétés :*

- Dans le système international (SI), la norme de $\vec{B}$ s'exprime en tesla ($T$). Le gauss est une autre unité du champ magnétique 1 $gauss = 10^{-4}\ T$.
- Ordre de grandeur : Champ magnétique terrestre : $0,2.10^{-4}\ T$, Champ magnétique crée par un électroaimant : de $0,1$ à $2\ T$, Champ magnétique crée par un aimant permanent : $\approx 1\ T$

- $\vec{B}$ est un pseudovecteur ou vecteur axial, c'est à dire qu'il dépend d'une convention d'orientation ($\vec{E}$ est un vrai vecteur ou vecteur polaire, il ne dépend pas du choix du système de coordonnées).

## I.3 Force de Lorentz

### I.3.a) Expression

Un point matériel de masse $m$, de charge $q$ et de vitesse $\vec{v}$ placé dans un champ électromagnétique $(\vec{E}, \vec{B})$ dans un référentiel galiléen est soumis à la force de Lorentz : $\boxed{\vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})}$

### I.3.b) Ordre de grandeur

On considère une particule chargée de charge $q$, de masse $m$ se déplaçant à la vitesse $v$ dans un champ électromagnétique à la surface de la Terre. La comparaison des forces de gravitation et des forces électromagnétiques donnent avec $q = 1,6.10^{-19}\ C$, $m_e = 9,1.10^{-31}\ kg$, $v = \frac{c}{10} = 3.10^7\ ms^{-1}$, $B = 0,01\ T$, $E = 3.10^5\ Vm^{-1}$ et $g = 9,8\ m.s^{-2}$ :

$$\frac{Fe}{P} = \frac{qE}{mg} \approx 5.10^{15} \qquad \text{et} \qquad \frac{Fm}{P} = \frac{qvB}{mg} \approx 5.10^{15}$$

On pourra donc négliger l'influence des forces gravitationnelles devant les forces électromagnétiques dans l'étude du mouvement de particules chargées

### I.3.c) Puissance de la force de Lorentz

$$\mathcal{P}_{F_L} = \vec{F}_L.\vec{v} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}).\vec{v} = q\vec{E}.\vec{v}$$

La force magnétique ne travaille pas. D'après le théorème de l'énergie cinétique, la norme de la vitesse d'une particule chargée soumise à un champ magnétique reste constante.