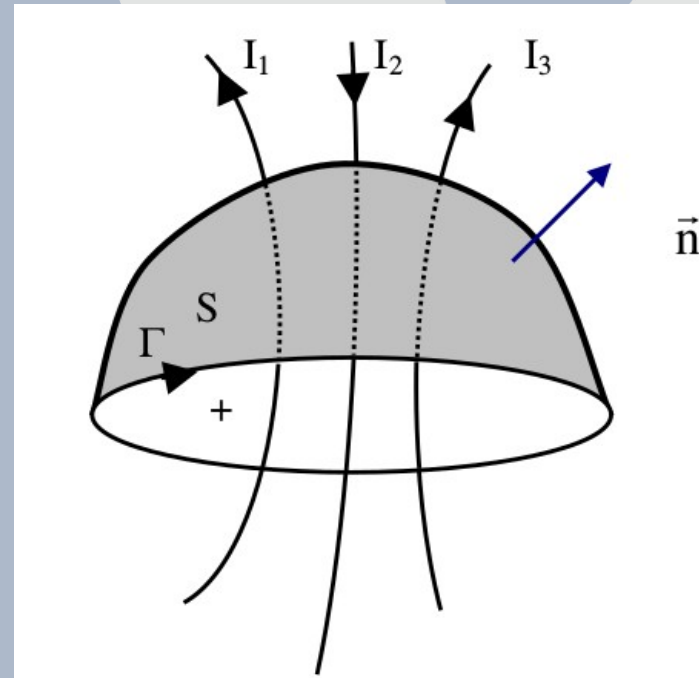


Électromagnétisme

Chapitre 1 – Champ magnétique - Force de Lorentz

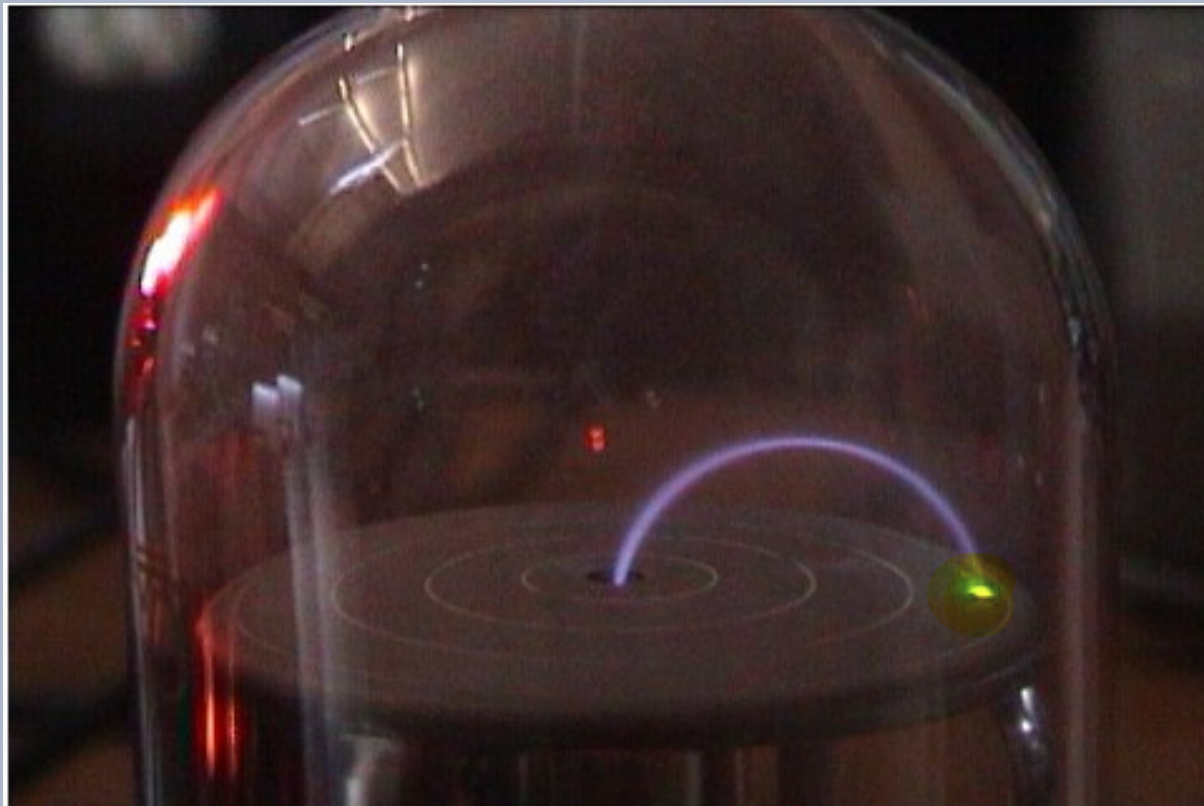


Programme de Magnétostatique

- Chapitre 1 - Champ magnétique - Force de Lorentz
- **Chapitre 2 - Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries**
- Chapitre 3 - Équations de Maxwell

Programme de Magnétostatique

On envoie un atome de krypton ionisé 1 fois avec une vitesse de $40\,000\text{ m/s}$
dans un spectromètre de masse où il y a un champ magnétique de $0,6\text{ T}$.
L'atome frappe la plaque à une distance de $11,044\text{ cm}$ du point d'entrée de
l'atome.
Quelle est la masse de l'atome ?



[4]

$E_x 3 \quad T_D 5$

2.1.1 Aimants et champ magnétique

www.ehow.com/how_6317827_read-compass-rose.html

Découverte de la force magnétique : _____



- [Antiquité, Grèce](#) : magnétite (Magnésia, Turquie), pierre attirant de petits morceaux de fer. Aimants naturels
- [IXe siècle, Chine](#) : alignement des aimants dans la direction Nord-Sud invention de la boussole.
- [1752](#) : Franklin découvre la nature électrique de la foudre et plusieurs témoignages sur le fait que :
 - Les orages perturbent les boussoles
 - La foudre frappant un navire aimante tous les objets métalliques.

Franklin en déduisit « la possibilité d'une communauté de nature entre les phénomènes électriques et magnétiques ». Coulomb (1785) montre la décroissance en $1/r^2$ des deux forces.

2.1.1 Aimants et champ magnétique

Découverte de la force magnétique : _____

[4]
[3]

- XIXe siècle : expérience d'Oersted en 1820.
 - L'étude quantitative des interactions entre aimants et courants fut faite par les physiciens Biot et Savart (1820) : force agissant sur un pôle est dirigée perpendiculairement à la direction reliant ce pôle au conducteur et qu'elle varie en raison inverse de la distance.
 - Davy en 1821 dans une expérience où il montra qu'un arc électrique était dévié dans l'entrefer d'un gros aimant.
- Fin XIXe siècle et XXe siècle : Mise en équations par Maxwell qu'en **1873** et ne trouva d'explication satisfaisante qu'en 1905, dans le cadre de la théorie de la relativité d'Einstein.

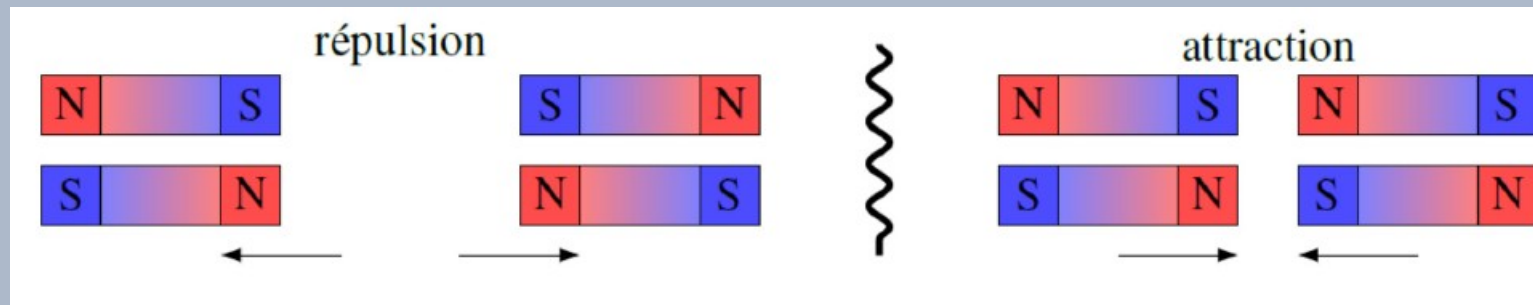
2.1.1 Aimants et champ magnétique

Force entre les pôles d'un aimants

[3]

Il existe deux types de pôles sur un aimant : **nord** et **sud**

- Les pôles de types contraires s'attirent mutuellement
- Les pôles de même type se repoussent mutuellement



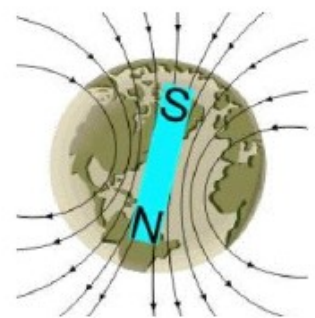
2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.1 Aimants et champ magnétique

La Terre est un aimant

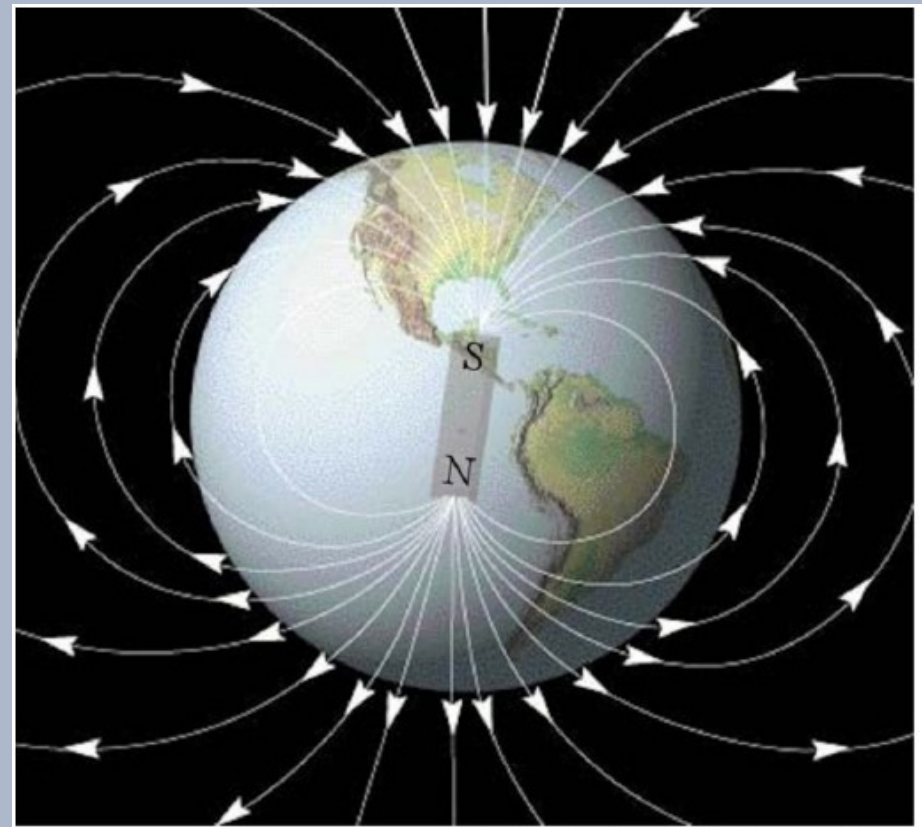
Ordres de grandeur :

- champ magnétique terrestre : 47 μT en France



composante horizontale :
 $\approx 20 \mu\text{T}$

- aimant courant : $10 \text{ mT} = 10 \times 10^{-3} \times 10^4 = 100 \text{ G}$
- champ magnétique intense du LCMI (Grenoble)
34 T (24 MW, 31 000 A)
- bobine supraconductrice : 10 T
- étoile à neutrons 10^8 T



www.thisoldearth.net/Geology_Online-1_Subchapters.cfm?Chapter=3&Row=4

[3]
[4]

Unité du champ magnétique : le tesla (T)

$$1\text{T} = 1 \frac{\text{Ns}}{\text{Cm}} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{Cs}}$$

Autre unité du champ magnétique : le gauss (G)

$$10^4 \text{ G} = 10\,000 \text{ G} = 1\text{T}$$

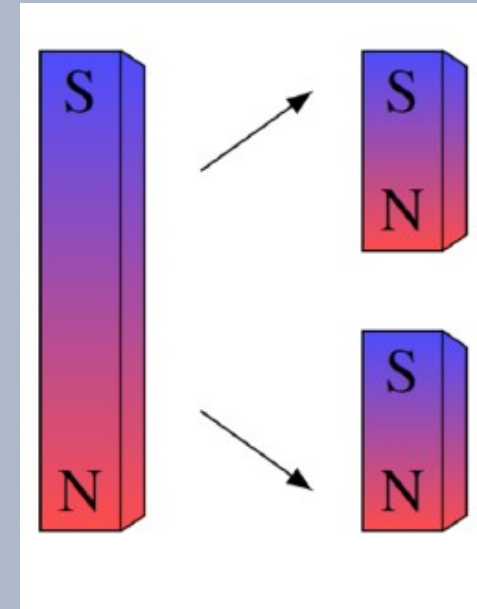
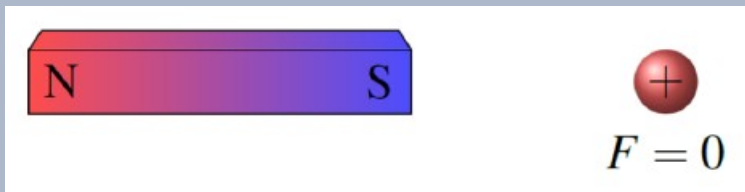
2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.1 Aimants et champ magnétique

Pas de monopôles magnétiques

John Mitchell (1750) : 2 pôles de l'aimant toujours exactement la même intensité.

Aucun effet sur charges électriques au repos



[3]

2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.1 Aimants et champ magnétique



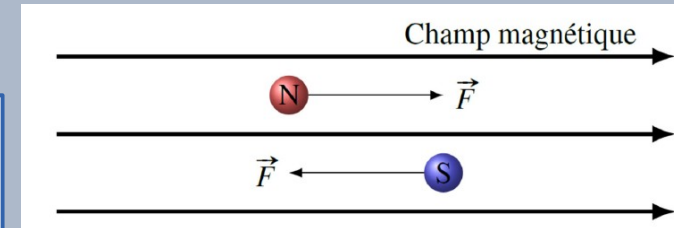
2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.1 Aimants et champ magnétique

Champ magnétique :

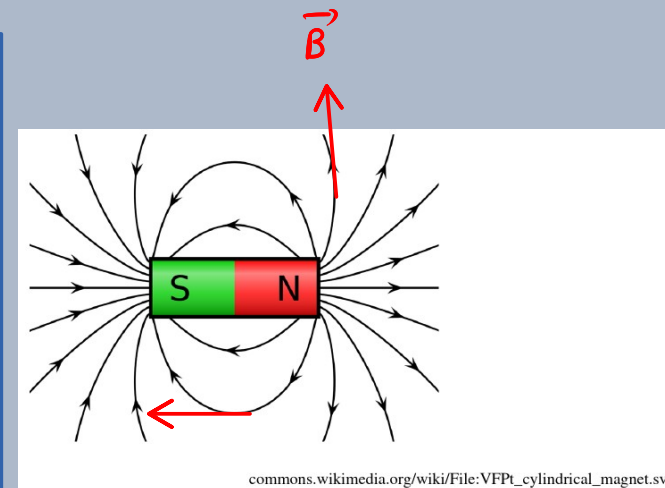
Si un pôle magnétique subit une force quand il est à un endroit, alors il y a un champ magnétique à cet endroit, noté **B**.

Plus le champ est fort, plus la force sur les pôles est grande



Lignes de champ

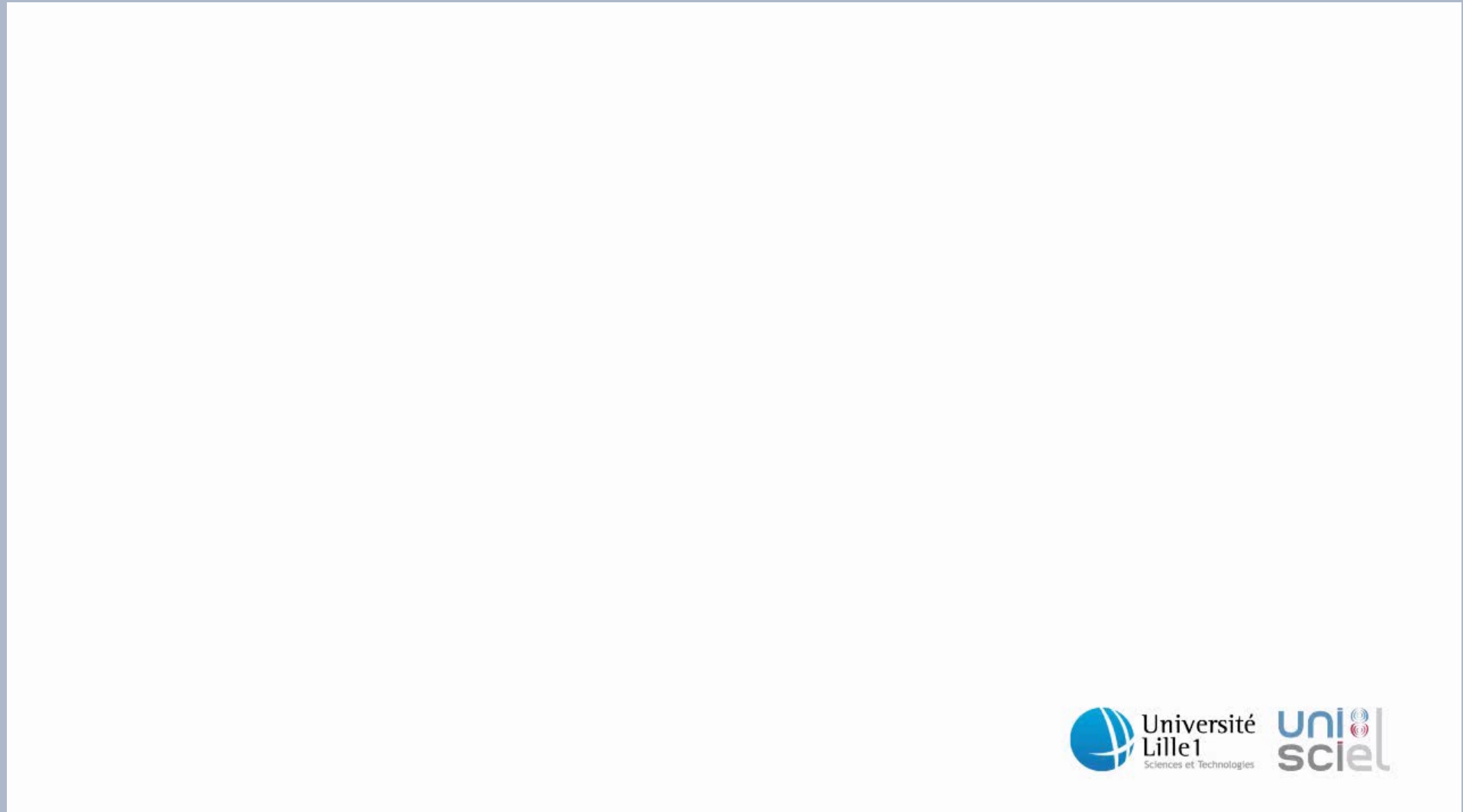
- 1) Le champ est toujours tangent à la ligne de champ, dans la direction de la ligne.
- 2) Plus les lignes de champ s'approchent les unes des autres, plus le champ est fort.
- 3) Les lignes de champ ne peuvent pas apparaître ou disparaître dans le vide.
- 4) Le nombre de lignes de champ qui arrivent ou qui partent d'un pôle est proportionnel à l'intensité du pôle.
- 5) Les lignes de champ ne se croisent pas.



2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.1 Aimants et champ magnétique

Lignes de champ

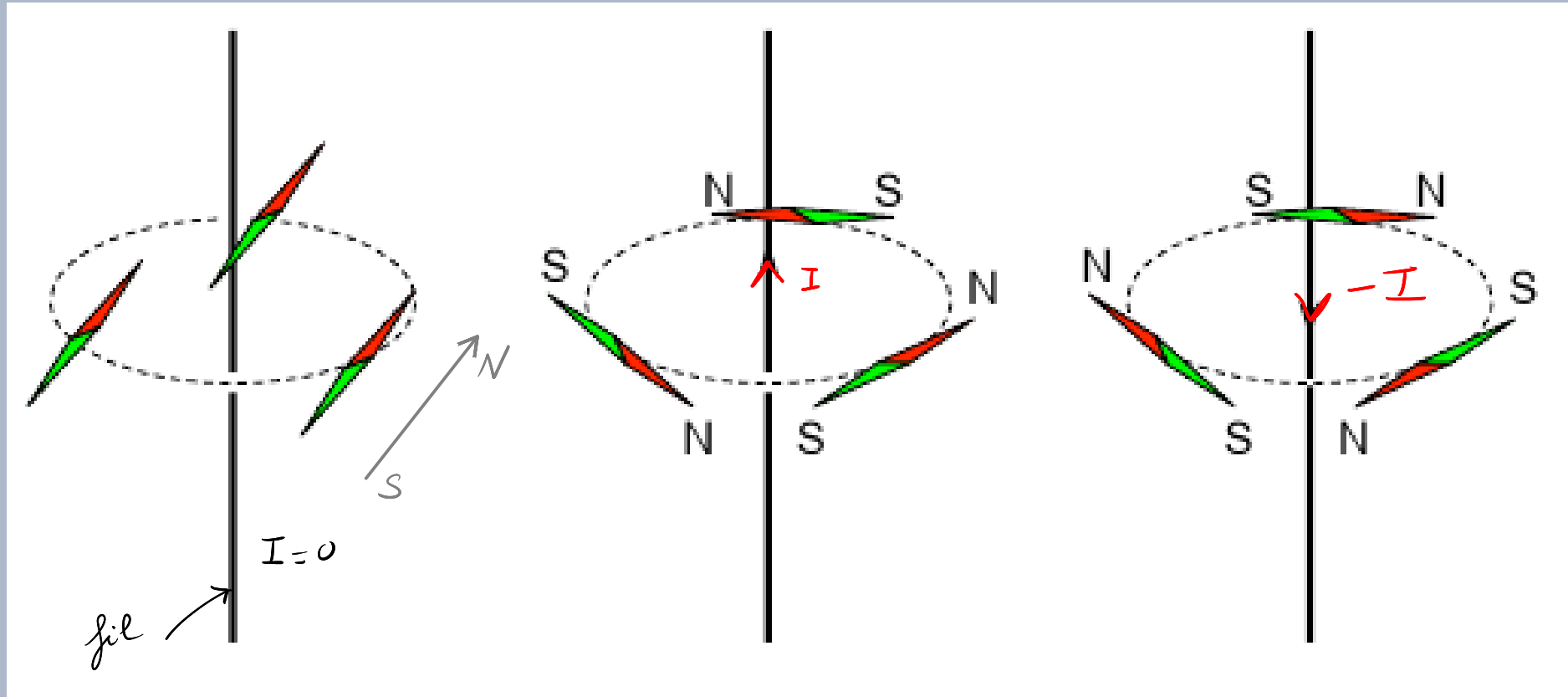


2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.1 Aimants et champ magnétique

Force magnétique sur une charge en mouvement - Expérience d'Ersted (1819) :

[3]



Alignement selon champ magnétique terrestre

Courant +I : boussoles alignées selon cercle entourant le fil.

Courant -I :

[Expérience d'Oersted \(Unisciel\)](#)

2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.1 Aimants et champ magnétique

Force magnétique sur une charge en mouvement - Expérience d'Ørsted (1819) :

[3]

Expériences de Physique à main levée

Magnétisme

Une expérience à la façon d'Ørsted

unisciel

Université
Lille1

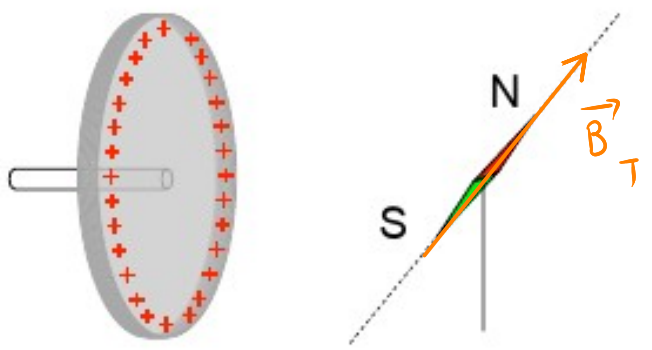
[Expérience d'Oersted \(Unisciel\)](#)

2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

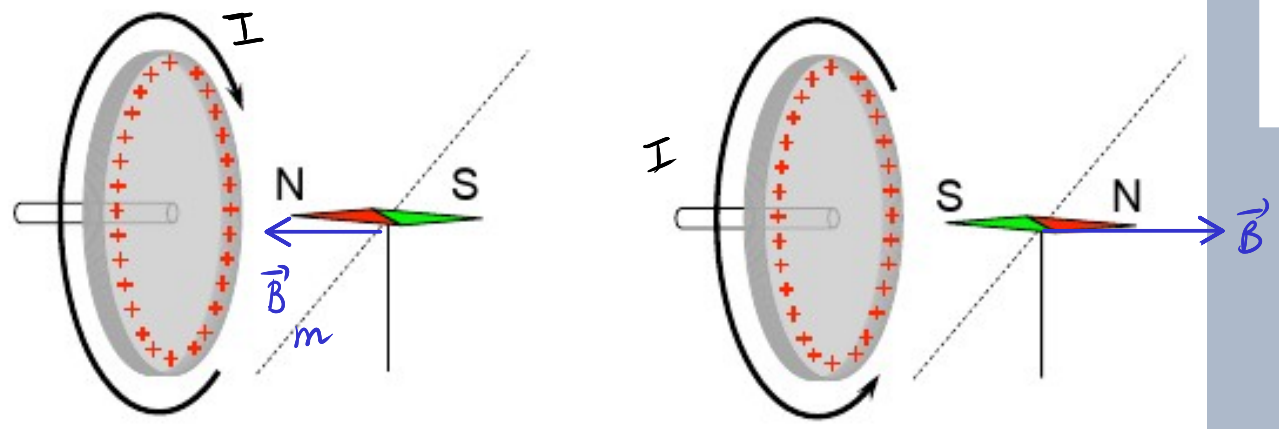
2.1.1 Aimants et champ magnétique

Force magnétique sur une charge en mouvement – Expérience de Rowland (1876) : _____

[3]



Si la roue chargée tourne, on observe une déviation de la boussole



Boussole soumise à des forces dont l'intensité diminue avec l'éloignement et dont le sens varie avec :

- le sens du mouvement des charges,
- le signe des charges

2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.1 Aimants et champ magnétique

Force de Lorentz :

mouvement de charges (courant I) à la vitesse \vec{v}

majeur

$$\vec{f} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$$

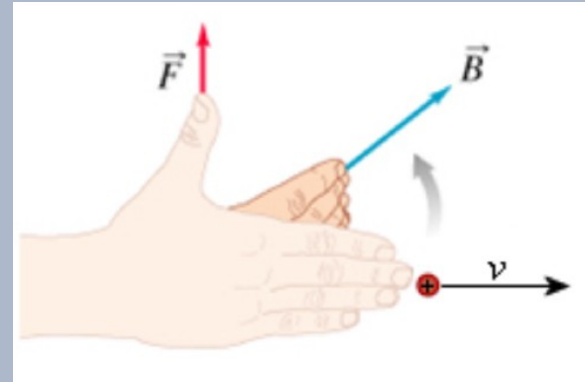
index

avec

\vec{f}	force de Lorentz en Newton [N]
q	charge en Coulomb [C]
\vec{B}	champ magnétique en Tesla [T]
\vec{v}	vitesse [m.s ⁻¹]

force

ou règle de la main droite



Force de Laplace :

$$\vec{f} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

avec

force de Coulomb

\vec{f}	force de Lorentz en Newton [N]
q	charge en Coulomb [C]
\vec{B}	champ magnétique en Tesla [T]
\vec{E}	champ électrostatique (V.m ⁻¹ ou N.C ⁻¹)
\vec{v}	vitesse [m.s ⁻¹]

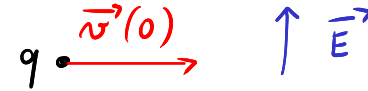
2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.1 Aimants et champ magnétique

Force de Laplace : _____

[4]

Une particule plongée dans un champ électrostatique uniforme décrit une trajectoire parabolique si la vitesse initiale et le champ électrostatique ne sont pas colinéaires, une droite décrite de manière uniformément accélérée dans le cas contraire.



La vitesse v de la particule chargée varie au cours de son déplacement, car celui-ci s'effectue dans le champ d'énergie potentielle $E_p = qV$.

$$\vec{E} = -\text{grad } V$$

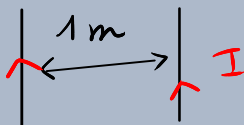
Le mouvement d'une particule chargée plongée dans un champ magnétique uniforme et stationnaire s'effectue à vitesse v constante.

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \text{ constant}$$

Définition de l'Ampère : _____

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q(\vec{v} \wedge \vec{B}), \quad \vec{v} = v_x \vec{e}_x \quad \frac{dv_x}{dt} = 0$$

L'**ampère** est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs rectilignes, infinis et parallèles, de section circulaire négligeable et distants de 1 m, produit une force d'interaction entre ces deux conducteurs égale à $2 \cdot 10^{-7}$ N par mètre de conducteurs.



2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.2 Champ électromagnétique et relativité galiléenne

Relativité galiléenne

→ →
Champ électromagnétique : (E, B)

Référentiel galiléen R où (E, B) et R' galiléen où (E', B') alors invariance de la force de Lorentz par changement de référentiel galiléen :

- R et R' en translation rectiligne uniforme à la vitesse V :
- charge invariante par changement de référentiel
- Relativité galiléenne : $\vec{F}' = \vec{F}$

$$\vec{F}' = q' \left(\vec{E}' + \vec{v}' \wedge \vec{B}' \right) \rightarrow q \left(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B} \right) = q \left(\vec{E} + (\vec{v}' + \vec{V}) \wedge \vec{B} \right) = q' \left(\vec{E}' + \vec{v}' \wedge \vec{B}' \right)$$

$$\vec{B}' = \vec{B}$$

$$\vec{E}' = \vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B}$$



$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{V}, \quad q' = q$$

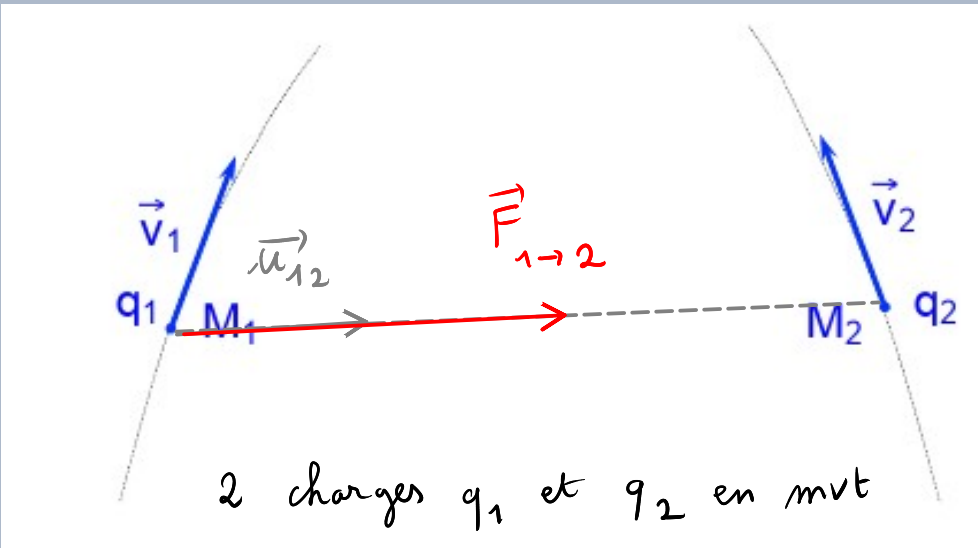
$$\vec{E} + \vec{v}' \wedge \vec{B} + \vec{V} \wedge \vec{B} = \vec{E}' + \vec{v}' \wedge \vec{B}'$$

[3]
[4]

2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.2 Champ électromagnétique et relativité galiléenne

Force de Lorentz :



$$\vec{u}_{12} = \frac{\vec{M}_1 M_2}{M_1 M_2} \quad \vec{F}_{1 \rightarrow 2} = q_2 \vec{E}_1 + \text{force de Lorentz } q_2 \vec{v}_2 \wedge \vec{B}_1 \quad [4]$$

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left[\vec{u}_{12} + \frac{\vec{v}_2}{c} \wedge \left(\frac{\vec{v}_1}{c} \wedge \vec{u}_{12} \right) \right]$$

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \underbrace{\frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}_{12}}_{q_2 \vec{E}_1} + \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left[\frac{\vec{v}_2}{c} \wedge \left(\frac{\vec{v}_1}{c} \wedge \vec{u}_{12} \right) \right]$$

$$\frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left[\frac{\vec{v}_2}{c} \wedge \left(\frac{\vec{v}_1}{c} \wedge \vec{u}_{12} \right) \right]$$

= contribution du **champ d'induction magnétique**, appelé abusivement champ magnétique.
 force magnétique : correction en $(v/c)^2$ à force de Coulomb

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = q_2 \left[\vec{E}_1 + \vec{v}_2 \wedge \vec{B}_1 \right]$$

2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.2 Champ électromagnétique et relativité galiléenne

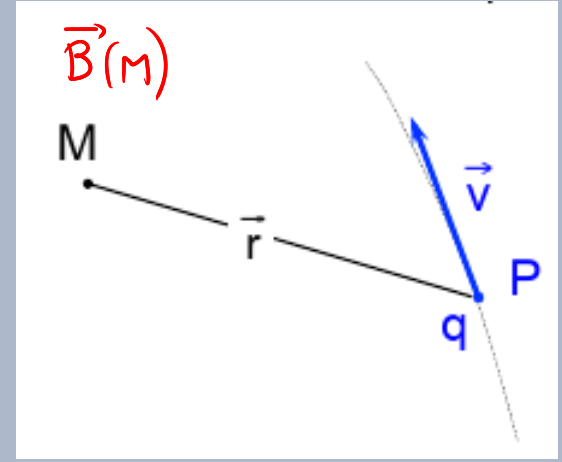
Force de Lorentz - Champ magnétique :

$$\vec{B} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{q\vec{v} \wedge \vec{PM}}{PM^3}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \wedge \vec{r}}{r^3}$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \vec{v}(P) \wedge \vec{PM}}{\|\vec{PM}\|^3}$$

$\mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 c^2}$ perméabilité magnétique du vide
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ $[\mu_0] = \text{M L I}^{-2} \text{T}^{-2}$



[3]
[4]

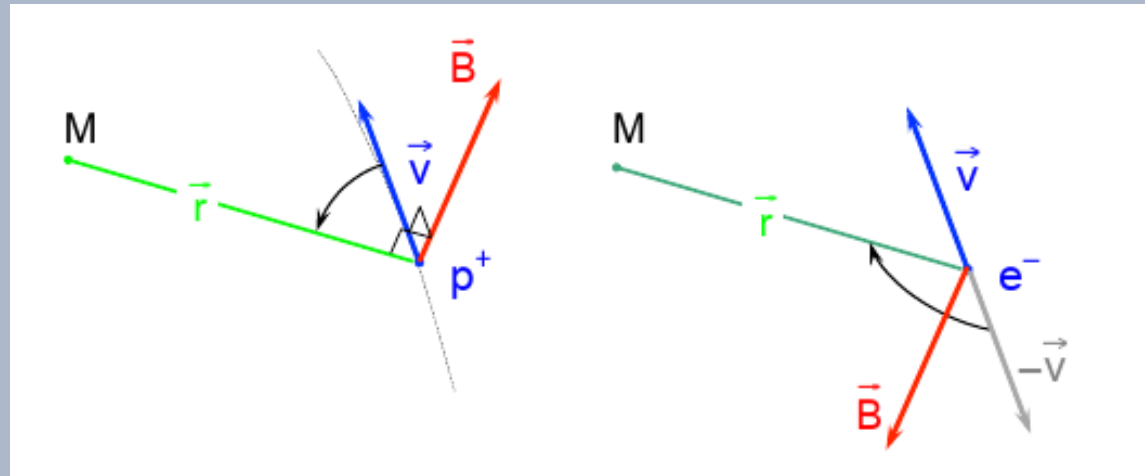
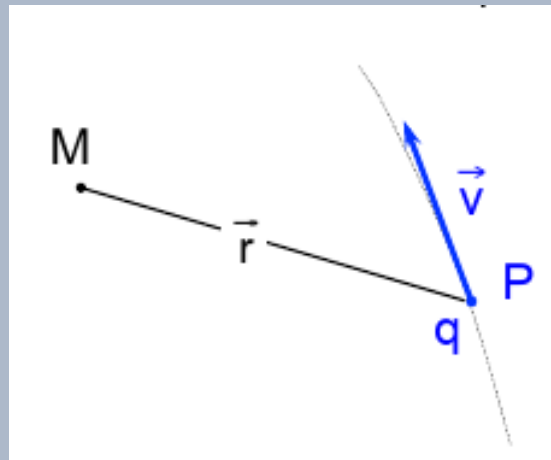
Remarques :

- L'expression de B n'est valable que dans le cas où les particules se déplacent à des vitesses très inférieures à c . $v \ll c$
 → magnétostatique
- Cette expression dépend du choix du référentiel .
-
- B diminue en $1/r^2$ comme \vec{E}
-
- B est défini par un produit vectoriel de deux grandeurs polaires = grandeur axiale ou pseudo-vecteur.
- le principe de superposition s'applique au champ magnétique.

2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.2 Champ électromagnétique et relativité galiléenne

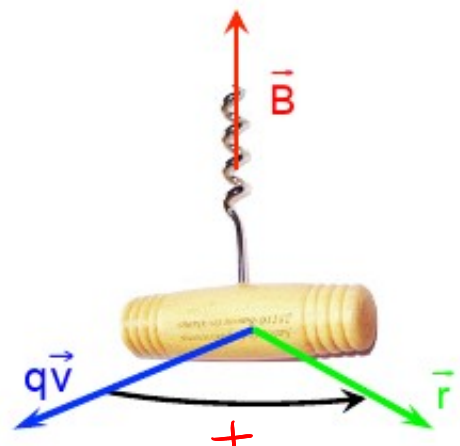
Direction du champ magnétique : trièdre direct



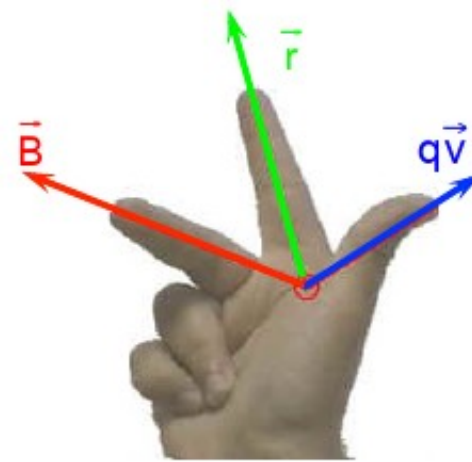
[3]
[4]

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \vec{v} \wedge \vec{r}}{r^2}$$

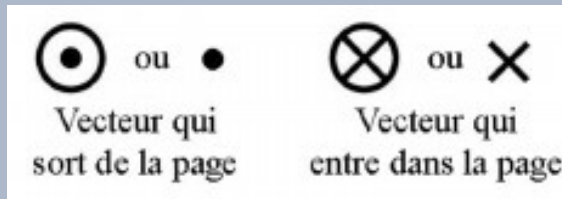
Règle du tire-bouchon



Règle des trois doigts



main droite !!!



2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.2 Champ électromagnétique et relativité galiléenne

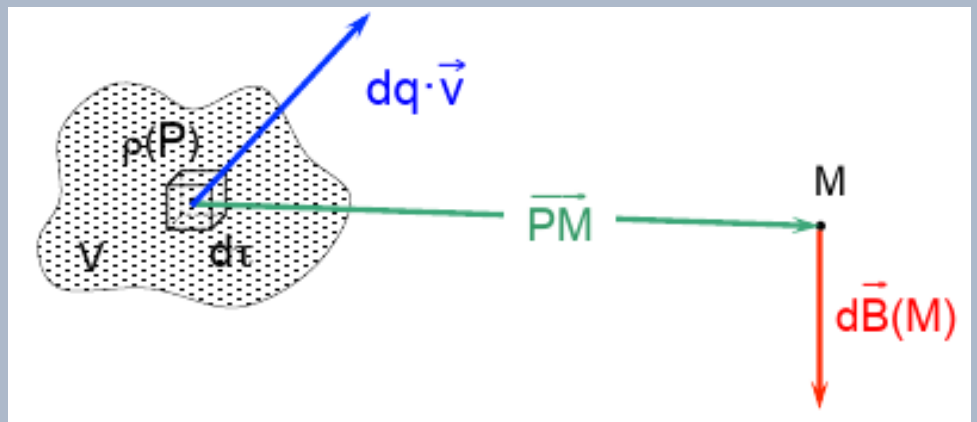
Principe de superposition : distribution discrète

N particules de charges q_i situés en des points P_i et de vitesse \vec{v}_i

[3]
[4]

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{v}_i \wedge \overrightarrow{P_i M}}{\|\overrightarrow{P_i M}\|^3}$$

Principe de superposition : distribution continue



$dq = \rho d\tau$
champ élémentaire

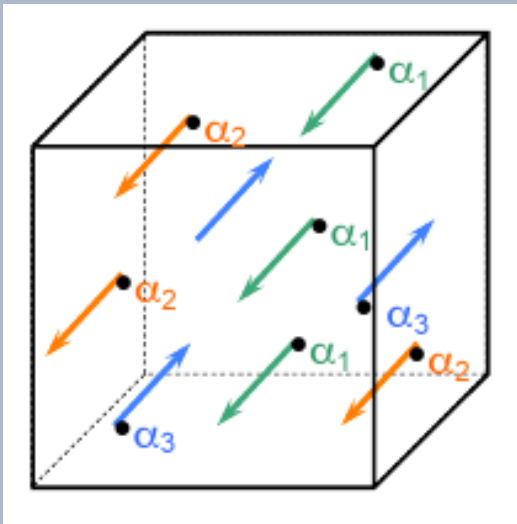
$$d\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{dq \vec{v} \wedge \overrightarrow{PM}}{PM^3}$$

2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.2 Champ électromagnétique et relativité galiléenne

Principe de superposition : distribution continue

[3]
[4]



volume infinitésimal $d\tau$

$$dq \cdot \vec{v} = \sum_{\alpha} \rho_{\alpha} q_{\alpha} \vec{v}_{\alpha} d\tau$$

ρ_{α} : densité de particules de type α (ayant une charge q_{α})
 \vec{v}_{α} : vitesses des particules de type α

dist. discrète: $dq_{\alpha} = (q_{\alpha} \rho_{\alpha}) d\tau$
 ρ'_{α} : densité de charges

$$\vec{j} = \sum_{\alpha} \underbrace{\rho_{\alpha} q_{\alpha}}_{\rho'_{\alpha}} \vec{v}_{\alpha}$$

densité de courant flux de charges par unité de temps

$$\vec{j}_{\alpha} = \rho'_{\alpha} \vec{v}_{\alpha} \rightarrow \vec{j} d\tau = dq \vec{v}$$

Distribution volumique quelconque de charges en mouvement

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_{\text{volume en P}} \frac{\vec{j}(P) \wedge \vec{PM}}{PM^3} d\tau$$

Valable quelque soit la forme du conducteur

- [1] Polycopié de cours
- [2] [CUPGE - CY : Introduction à l'électromagnétisme](#)
- [3] Cours [LP 203 - Champs électrique et magnétique](#) de Nicolas MENGUY
- [4] Cours de Luc Tremblay, collège Mérici - « [Électricité et magnétisme](#) ».
- [5] David Sénéchal - « [Histoire des sciences](#) » PHQ399 Université de Sherbrooke, QC
- [6] pour la suite : [Khan Academy](#), [Unisciel](#) etc.