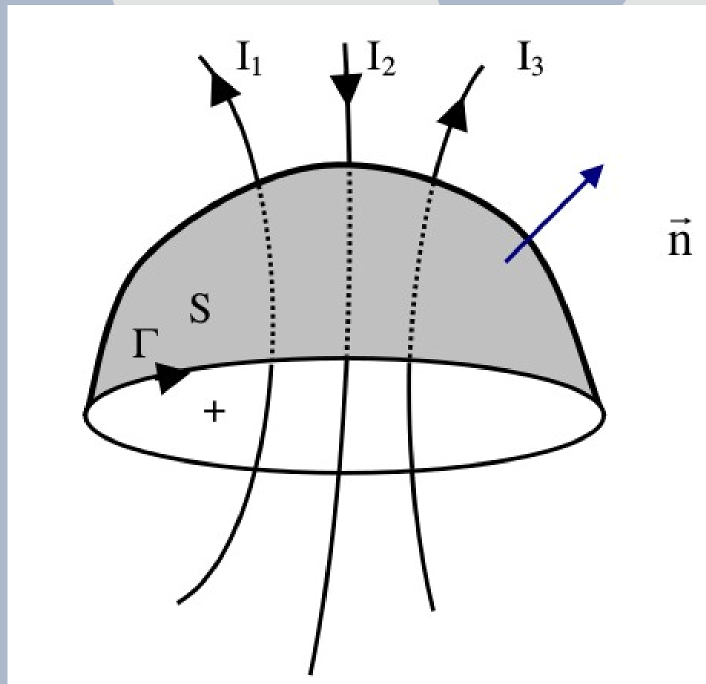
Électromagnétisme

Chapitre 1 – Champ magnétique - Force de Lorentz



Physique - 2023-2024

Présentation rédigée par Émilie Dupont (Cergy) : emilie.dupont@cyu.fr, CY308

Programme de Magnétostatique

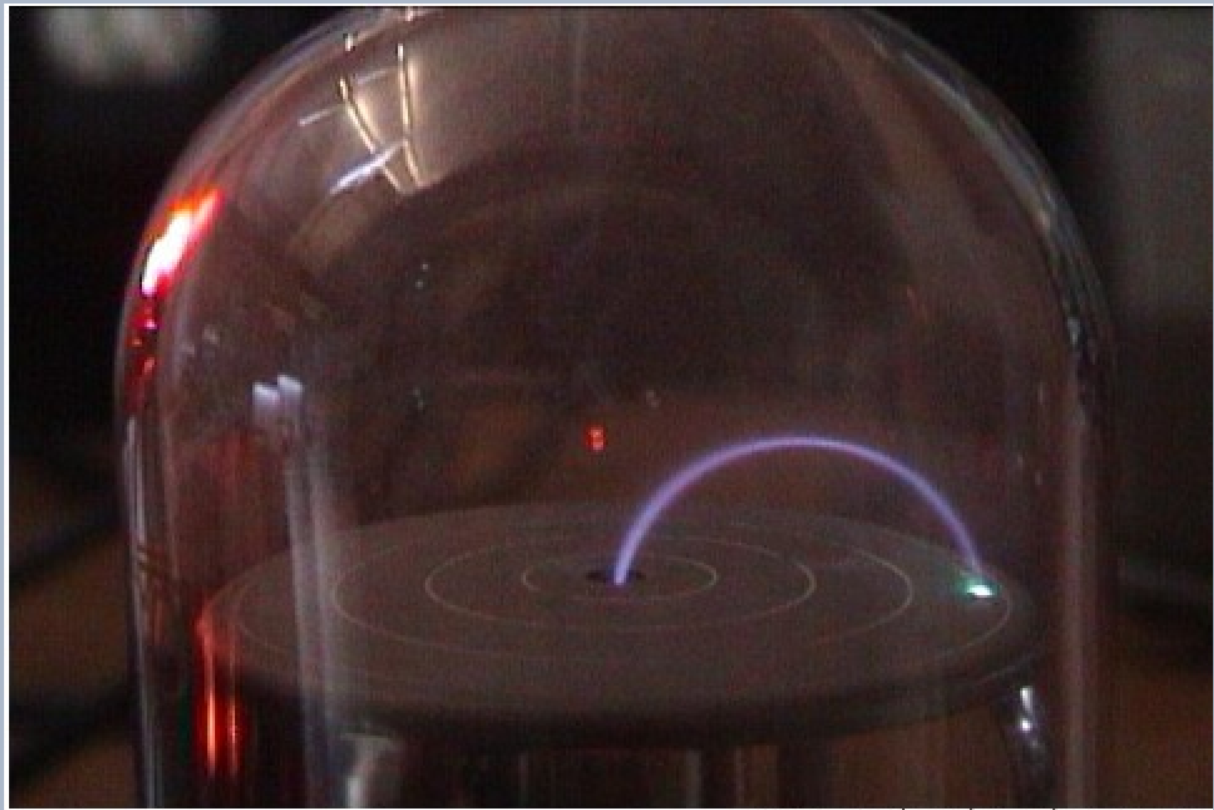
- Chapitre 1 – **Champ magnétique - Force de Lorentz**
- Chapitre 2 – Loi de Biot et Savart - Théorème d’Ampère
- Chapitre 3 – Électrocinétique
- Chapitre 4 – Équations de Maxwell
- Chapitre 5 – Induction électromagnétique

Programme de Magnétostatique

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

Ex. 2 du TD5

↳ force de Lorentz.



www.clemson.edu/ces/phoenix/labs/cupol/eoverm/

[4]

2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

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 Champ magnétique - Force de Lorentz

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. champ $\vec{E}$ et $\vec{B}$: changement de référentiel.

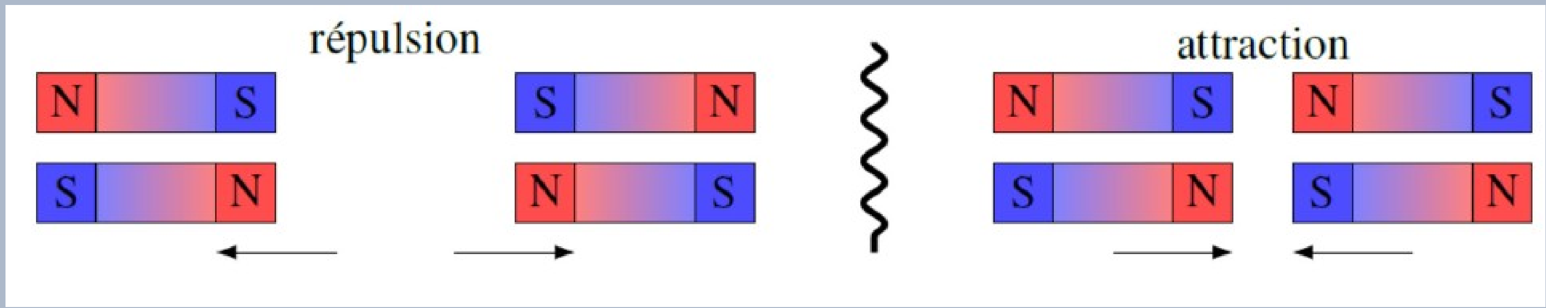
2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

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

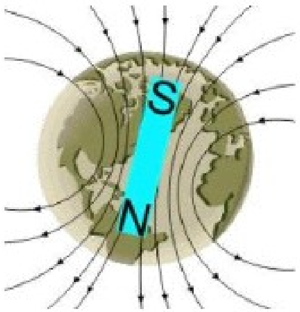
2.1.1 Aimants et champ magnétique

[3] [4]

La Terre est un aimant

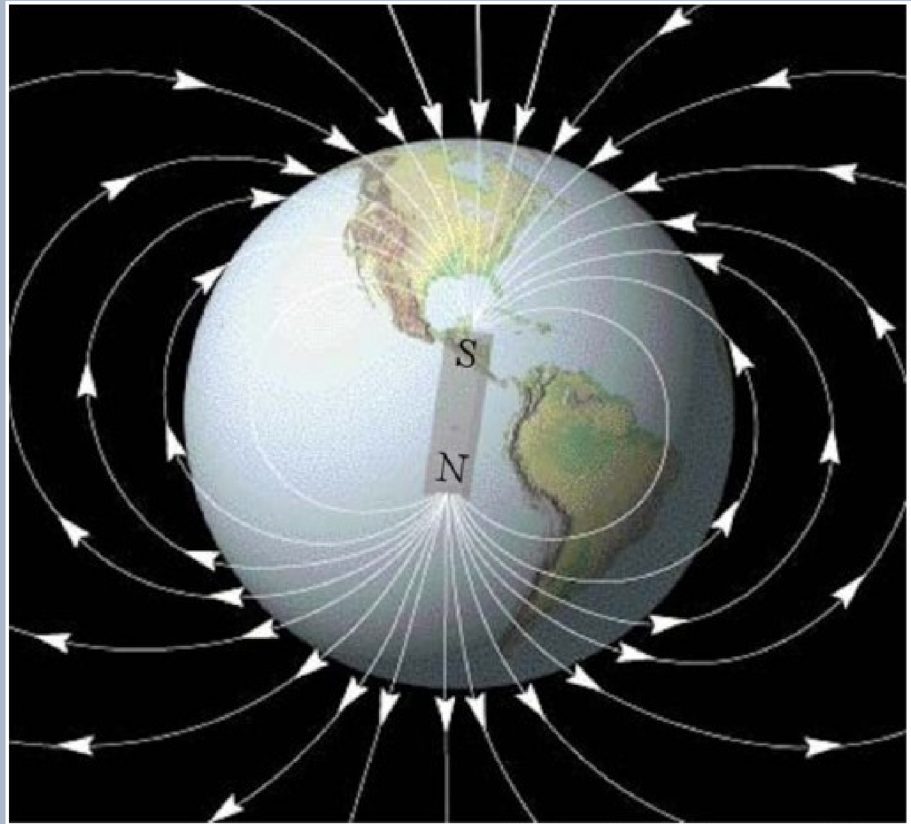
Ordres de grandeur :

- champ magnétique terrestre : 47 µT en France



composante horizontale : ≈ 20 µT

- aimant courant : 10 mT
- 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

Unité du champ magnétique : le tesla (T)

(SI) $1T = 1\frac{Ns}{Cm} = 1\frac{kg}{Cs}$

Autre unité du champ magnétique : le gauss (G)

$1T = 10^5 G$

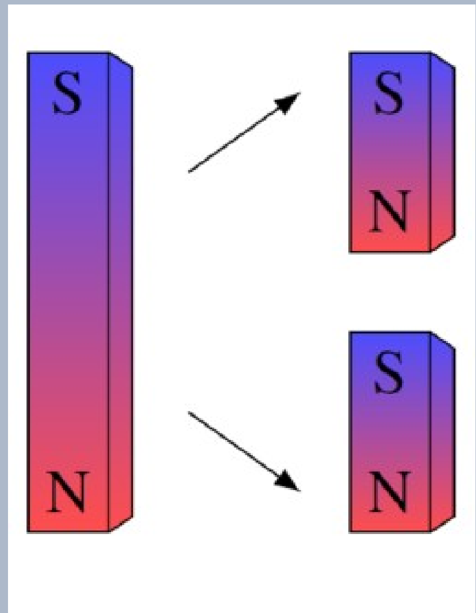
$10^{-5} T = 1 G$

10^5 G $= 10\,000G = 1T$

2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.1 Aimants et champ magnétique

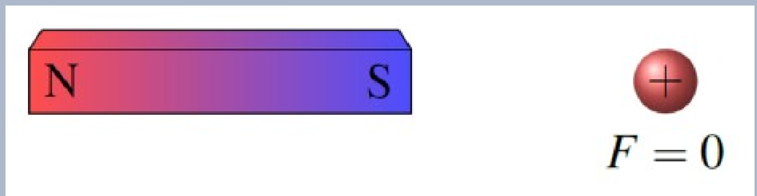
Pas de monopôles magnétiques



[3]

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

Aucun effet sur charges électriques au repos



2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.1 Aimants et champ magnétique

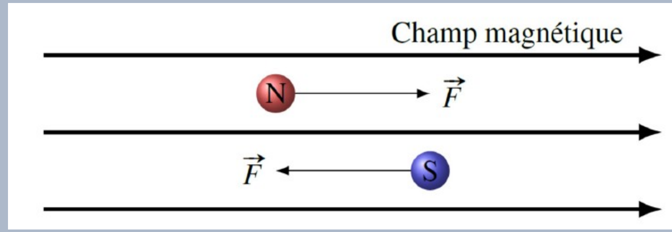
aimant $\Rightarrow$ matériaux ferromagnétiques : spins alignés

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

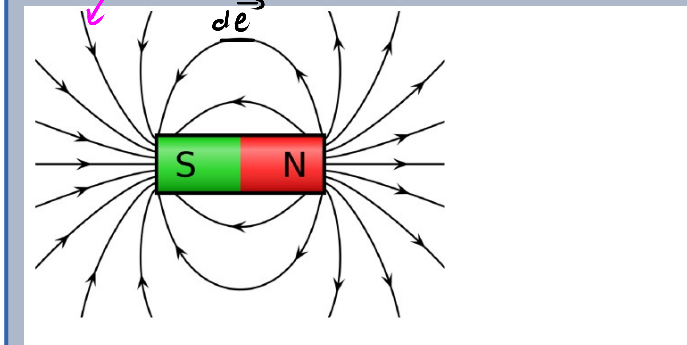


Lignes de champ

1) Le champ est toujours tangent à la ligne de champ, dans la direction de la ligne. $\vec{B} \wedge \vec{d\ell} = \vec{0}$
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.

ligne de champ

$\vec{d\ell}$



commons.wikimedia.org/wiki/File:VFPt_cylindrical_magnet.svg

2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

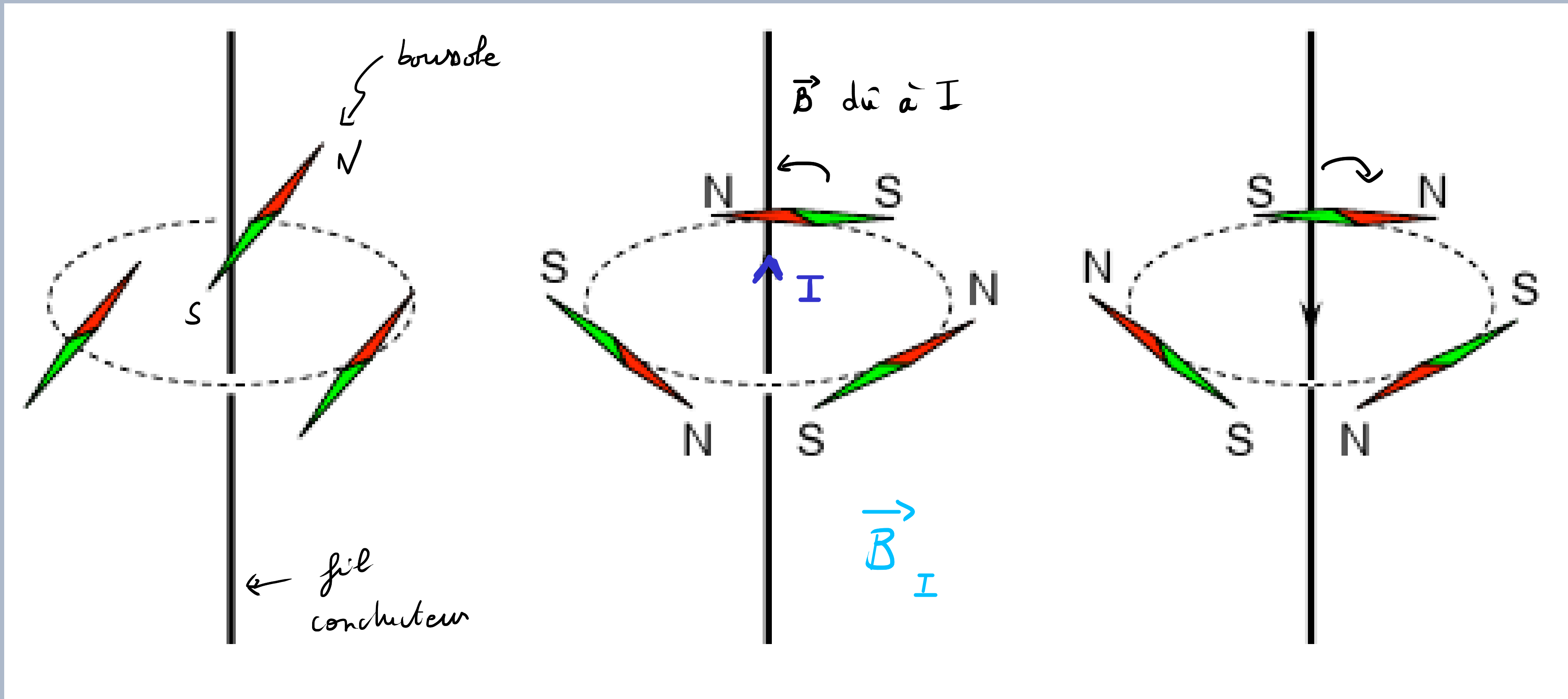
2.1.1 Aimants et champ magnétique

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'Œrsted (1819) : [3]



Alignement selon champ magnétique terrestre $I = 0$

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

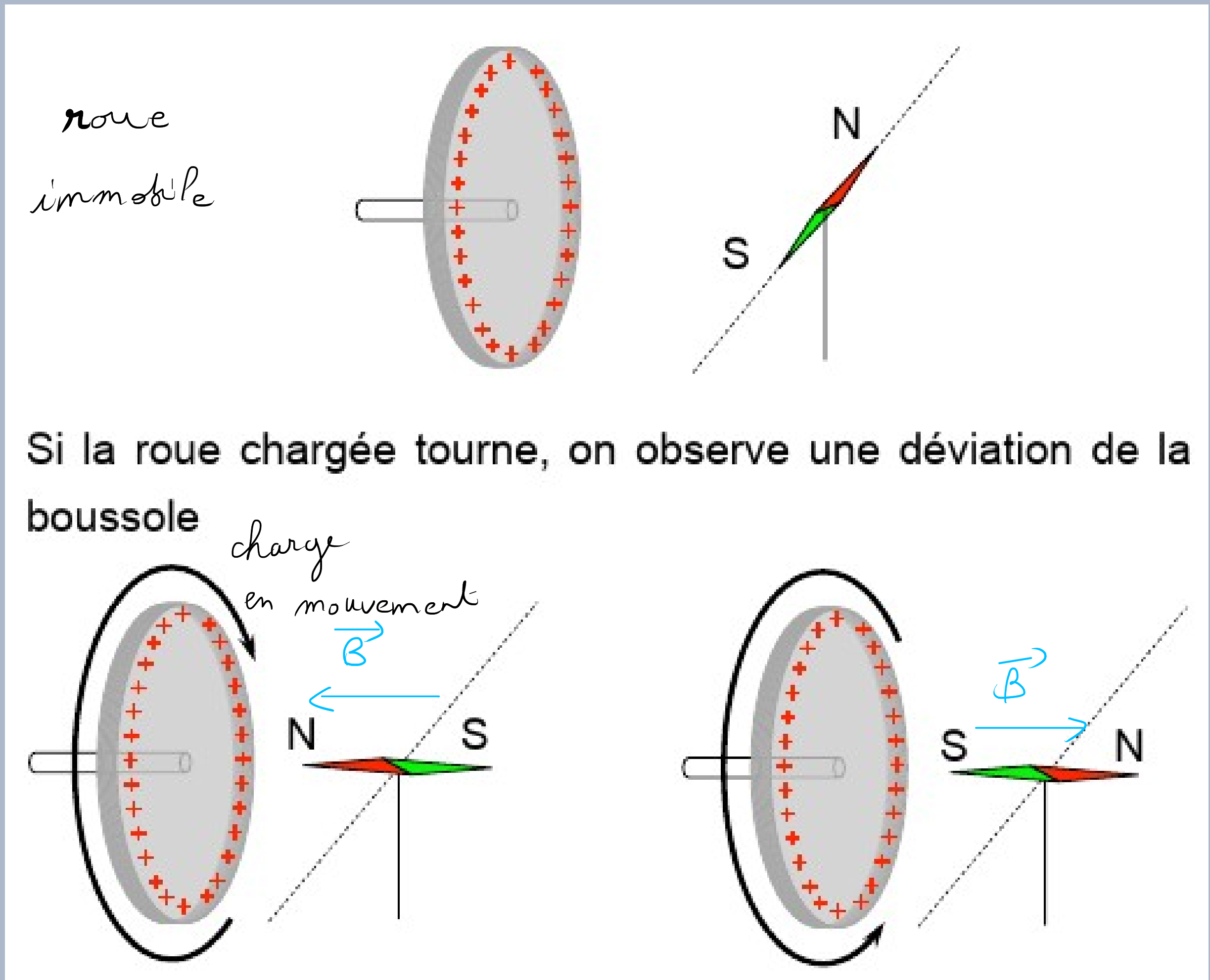
Force magnétique sur une charge en mouvement – Expérience d'Œrsted (1819) : [3]

[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]



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 :

charges q en mouvement

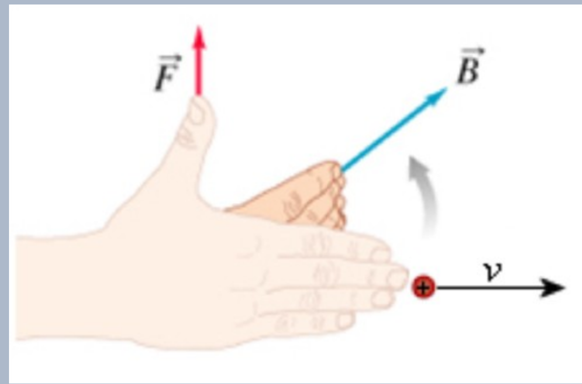
+ champ $\vec{B}$

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

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}] des charges

ou règle de la main droite



Force de Laplace :

$\vec{B}$

$\vec{E}$

Coulomb

Lorentz

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

avec

$\vec{f}$	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}]

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

2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.1 Aimants et champ magnétique

Force de Laplace :

$\vec{f} = q\vec{E} = m\,\frac{d\vec{v}}{dt}$

[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 $E_p = qV$.

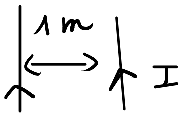
Le mouvement d'une particule chargée plongée dans un champ magnétique uniforme et stationnaire s'effectue à vitesse v constante.

$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m}\left(\vec{v} \wedge \vec{B}\right)$ ex : $v = v_x$

$\frac{dv_x}{dt} = 0 \rightarrow v_x$ const.

Définition de l'Ampère :

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 2.10^{-7} N par mètre de conducteurs.



2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.2 Champ électromagnétique et relativité galiléenne

Relativité galiléenne

[3] [4]

Champ électromagnétique : $(\vec{E}, \vec{B})$

Référentiels galiléens : R où $\vec{E}, \vec{B}$ — alors invariance de la force de Lorentz par
R' où $\vec{E}', \vec{B}'$ — changement de référentiel

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

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

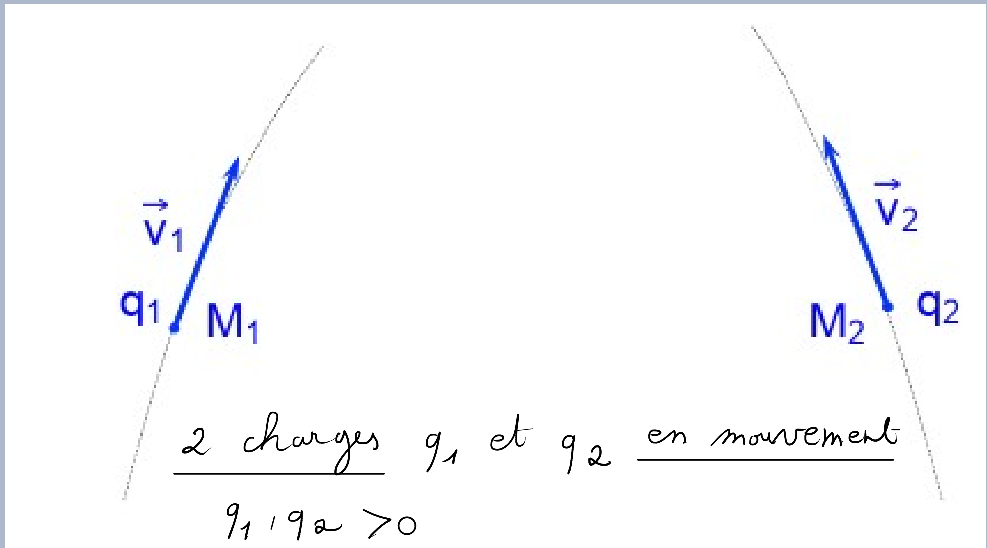
$$\boxed{\begin{aligned}\vec{B}' &= \vec{B} \\ \vec{E}' &= \vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B}\end{aligned}}$$

Référentiel

2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.2 Champ électromagnétique et relativité galiléenne

Force de Lorentz :



$$\vec{u}_{12} = \frac{\overrightarrow{M_1M_2}}{M_1M_2}$$

force de Coulomb

force de Lorentz

[4]

$$\vec{F}_{1\to 2} = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\varepsilon_0\, r^2}\left[\vec{u}_{12} + \frac{\vec{v}_2}{c} \wedge \left(\frac{\vec{v}_1}{c} \wedge \vec{u}_{12}\right)\right]$$

$$\vec{F}_{1\to 2} = \underbrace{\frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\varepsilon_0\, r^2}\,\vec{u}_{12}}_{q_2 \vec{E}_1} + \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\varepsilon_0\, r^2}\left[\frac{\vec{v}_2}{c} \wedge \left(\frac{\vec{v}_1}{c} \wedge \vec{u}_{12}\right)\right]$$

E_1 $\qquad$ $\vec{B}_1$

$$\frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\varepsilon_0\, r^2}\left[\frac{\vec{v}_2}{c} \wedge \left(\frac{\vec{v}_1}{c} \wedge \vec{u}_{12}\right)\right]$$

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

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

2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.2 Champ électromagnétique et relativité galiléenne

Force de Lorentz - Champ magnétique :

$$\vec{B} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 c^2}\,\frac{q\vec{v}\wedge\overrightarrow{PM}}{PM^3}$$

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

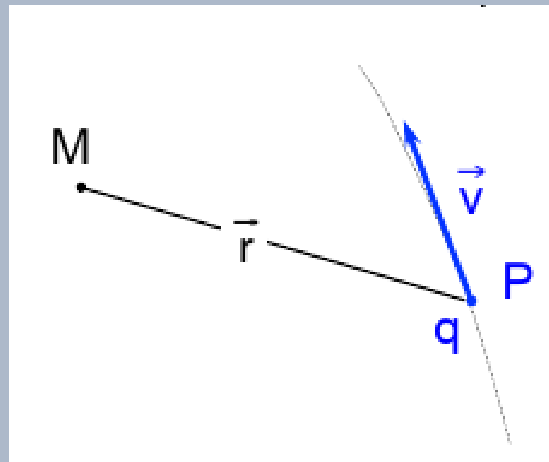
formules avec $\vec{E}$: $\frac{1}{\varepsilon_0}$

" " $\vec{B} = \mu_0$

$\vec{r} = \overrightarrow{PM}$

$\mu_0 = \frac{1}{\varepsilon_0 c^2}$ perméabilité magnétique du vide

$\mu_0 = 4\pi\, 10^{-7}\ \mathrm{Hm^{-1}}$ $[\mu_0] = \mathrm{M\,L\,I^{-2}\,T^{-2}}$



[3]
[4]

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\left[\frac{q\vec{v}\wedge\overrightarrow{PM}}{\|\overrightarrow{PM}\|^3}\right]$$

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*.
- $\vec{B}$ diminue en $1/r^2$ comme $\vec{E}$
- $\vec{B}$ est défini par un produit vectoriel de deux grandeurs polaires = grandeur axiale ou *pseudo-vecteur.*
- *le principe de superposition s'applique au champ magnétique.*

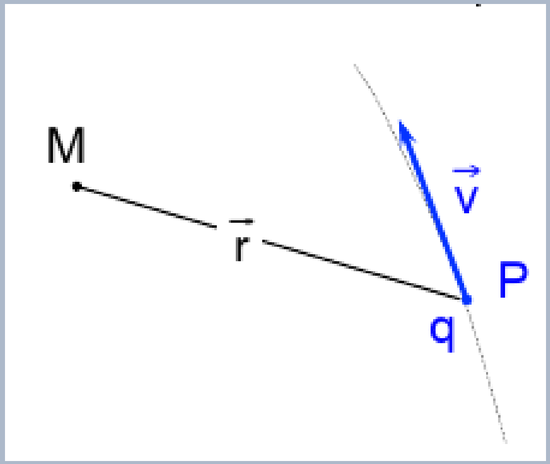
2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

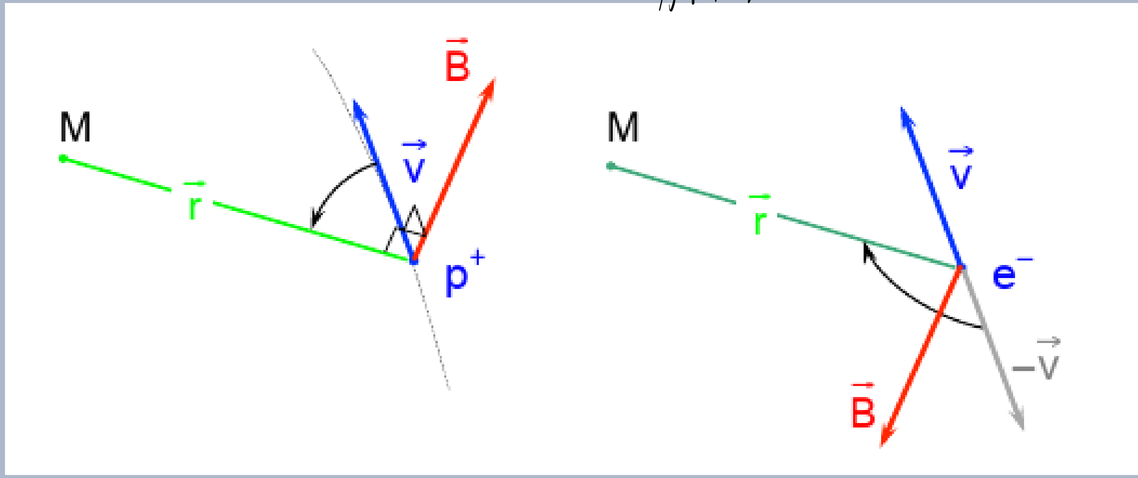
2.1.2 Champ électromagnétique et relativité galiléenne

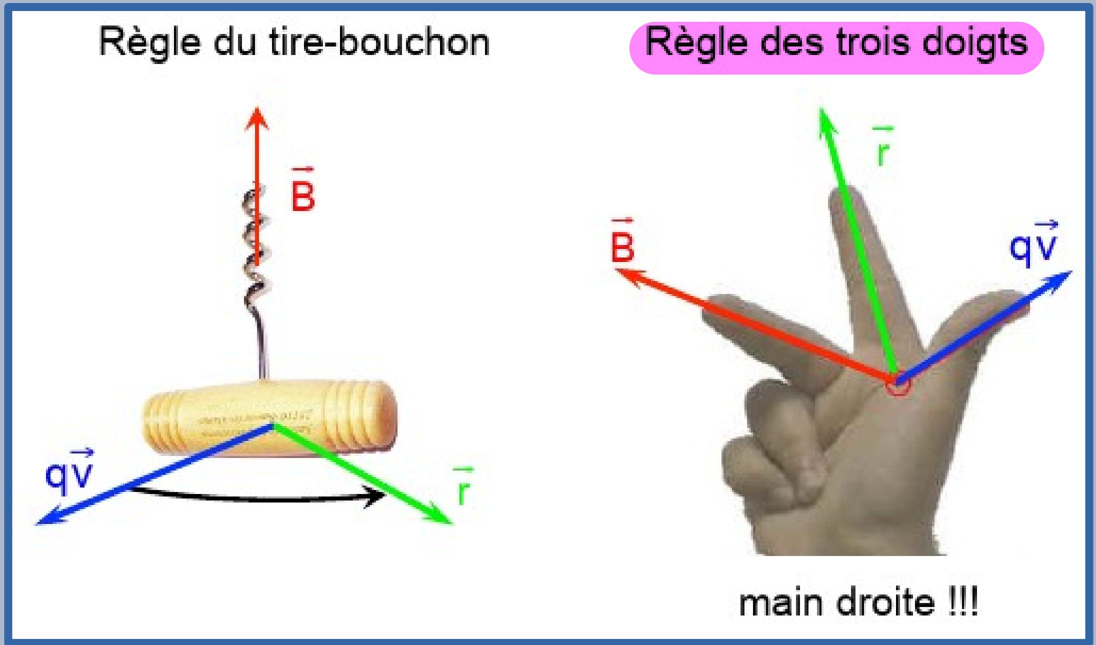
Direction du champ magnétique : trièdre direct

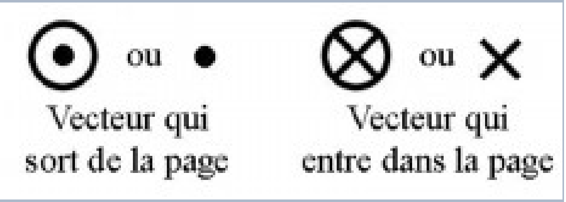
$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \wedge \vec{PM}}{\|\vec{PM}\|^3}$$

[3] [4]









2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

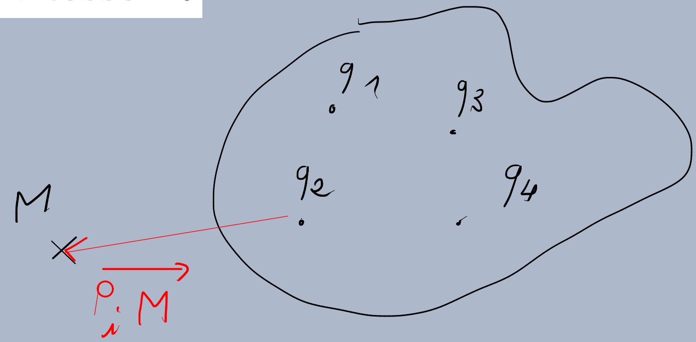
2.1.2 Champ électromagnétique et relativité galiléenne

Principe de superposition : distribution discrète

[3] [4]

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

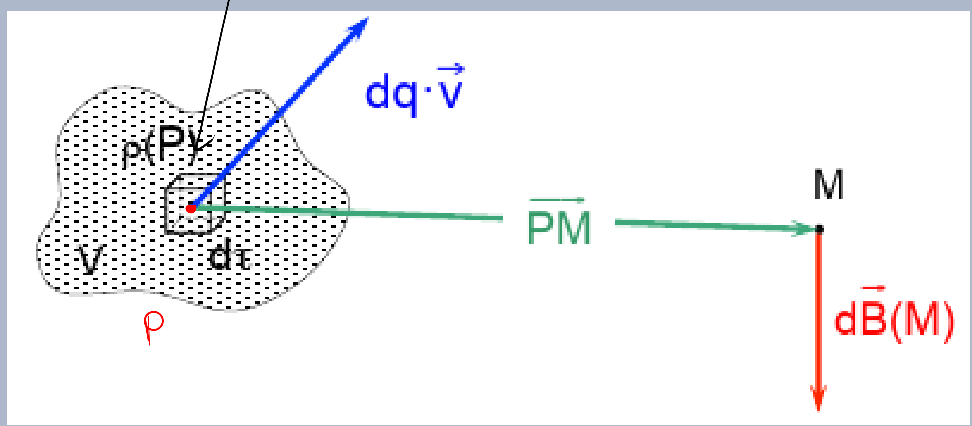
$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi}\sum_{i=1}^{N}\frac{q_i\vec{v}_i \wedge \overrightarrow{P_iM}}{\left\|\overrightarrow{P_iM}\right\|^3}$$



Principe de superposition : distribution continue

$d q$

$\rho = \frac{dq}{d\tau}$



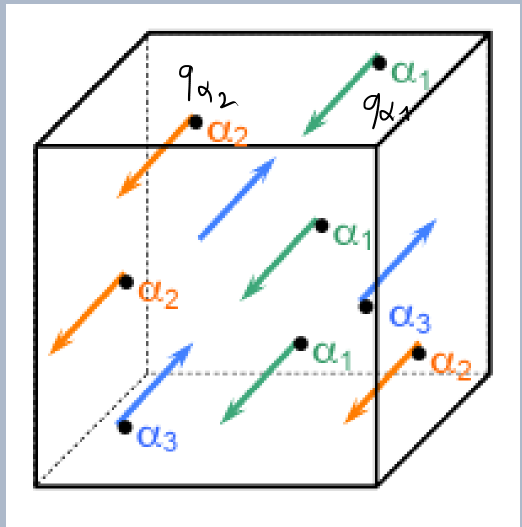
$$d\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{dq\,\vec{v} \wedge \overrightarrow{PM}}{PM^3}$$

$I = \frac{dq}{dt}$

2.1 Champ magnétique - Force de Lorentz

2.1.2 Champ électromagnétique et relativité galiléenne

Principe de superposition : distribution continue



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)

$\vec{v}_\alpha$: vitesses des particules de type α

distribution discrète

$$dq_\alpha = \underbrace{q_\alpha \rho_\alpha}_{\rho_\alpha' \text{ : densité de charges}} d\tau$$

[3] [4]

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

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

densité de courant flux de charges par unité de temps

→ densité de charges × vitesse

Distribution volumique quelconque de charges en mouvement

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

Valable quelque soit la forme du conducteur

Bibliographie

- [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.