chap II - électromagnétisme

Introduction : un autre type que l'on rencontre dans la nature est l'interaction magnétique. on a remarqué que Certains minerais tels la magnetite (oxyde de fer trouvé (Fe_3O_4) naturellement sous forme des cristaux) ~~au sein de roches éruptives~~ ont la propriétés d'attirer de petits morceaux de fer. ces corps sont dits magnétiques ou doués de magnétisme.

un corps magnétique est appelé aussi un « aimant ».

Le magnétisme est une interaction qui paraît différente de l'interaction de gravitation et l'interaction électrique.

* tous les aimants s'orientent à la surface de la terre en indiquant une direction voisine de la direction Nord-Sud. (boussole). le pôle de l'aimant qui indique la direction nord appelé pôle nord, l'autre appelé pôle sud.

* ⇒ les pôles de même nom se repoussent.
  " de noms différents s'attirent.

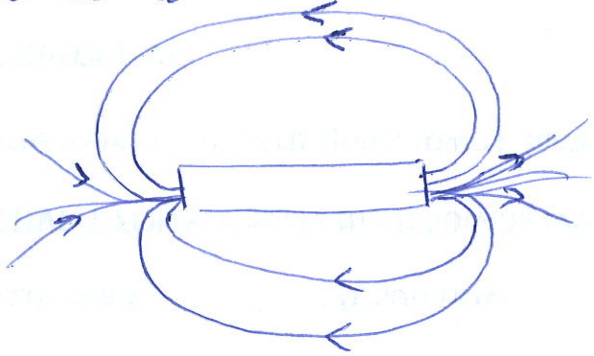
* il est impossible de séparer les pôles nord et sud d'un barreau aimanté : car si on casse un ~~barreau~~ aimant en deux on obtient deux petits aimants ayant chacun pôle nord et sud.

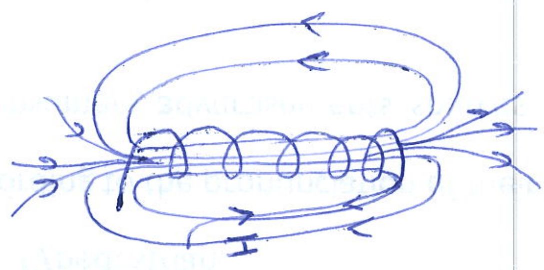
* des expériences (d'oersted (1820)) montrèrent que pour une boucle ou une petite bobine parcourue par un courant électrique possède les même propriétés qu'un aimant naturel (le courant électrique fait dévier une boussole).

⇒ l'électricité et le magnétisme ont la même cause : la charge électrique, ils sont réunis sous l'appelation plus générale « l'électromagnétisme ».

<u>champ d'un aimant</u>: l'espace autour d'un aimant est caractérisé par un champ magnétique.

Nous prenons un barreau aimanté ou une bobine parcourue par un courant continu. près ~~d'une boussole~~ aiguille ~~aimanté~~ d'une boussole





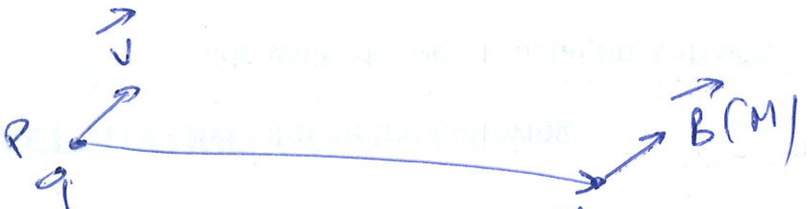
la direction S–N de la boussole indique la direction des flèches du champs magnétique.

⇒ les lignes de champ magnétique quittent le pôle Nord et se referme sur le pôle sud. le spectre a le même aspect pour la bobine.

le vecteur $\vec{B}$ caractérisant le champ magnétique en tout point ~~tangente~~ tangente aux lignes de champ. ce vecteur est appelé "~~induction~~ champ magnétique"

<u>expression du champ magnétique</u>:

<u>champ ~~mg~~ magnétique crée par une charge en mouvement</u>:



champ magnétique $\vec{B}(M)$ crée au point M par une charge q situé en un point p et animée d'une vitesse $\vec{V}$ dans un référentiel galiléen:

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi}\left(\frac{q\vec{V}\wedge\vec{PM}}{\|\vec{PM}\|^3}\right)$$

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi}\left[\frac{q\,\vec{v}\wedge\vec{PM}}{\|\vec{PM}\|^3}\right].$$

$[\vec{B}]$ = Tesla (SI), Gauss (CGS) | 1 Gauss = 10^{-4} TESLA.

μ_0 : perméabilité du vide : il décrit la capacité du à laisser passé le champ magnétique. $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}\ H.m^{-1}$ (H : Henry).

<u>remarque</u> : le principe de superposition s'applique au champ magnétique.

<u>Champ magnétique créé par un ensemble de charges en mouvement</u> :

Considérons N particules de charges q_i situées en ~~des~~ des points P_i et de vitesse $\vec{V_i}$. Le champ magnétique créé en un point M est la somme vectorielle des champs créés par chaque particule

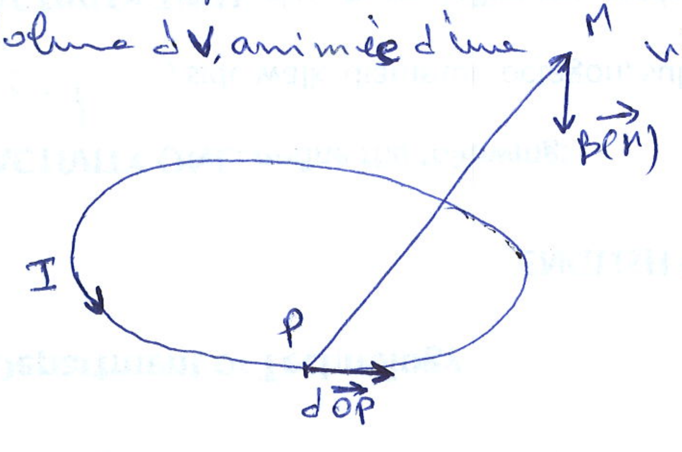
$$\boxed{\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi}\sum_{i=1}^{N}\frac{q_i\,\vec{V_i}\wedge\vec{P_iM}}{\|\vec{P_iM}\|^3}}$$

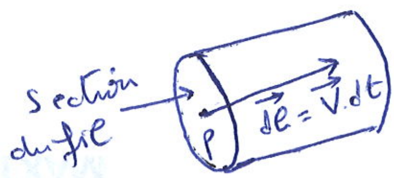
~~par une distribution continue continue :~~

$$\cancel{\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi}\int\frac{dq\,\vec{V}(P')\wedge\vec{P'M}}{\|\vec{P'M}\|^3}}$$

<u>Champ créé par un circuit électrique</u> (formule de Biot et Savart) :

Soit une quantité de charge mobile $dq = \rho\, dV$ contenu dans un Volume dV, animée d'une vitesse $\vec{V}$.





cette charge crée en un point "M" de l'espace situé à une distance $PM = r$. un champ magnétique $\vec{dB}$ avec :

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{v} \wedge \vec{PM}}{\|\vec{PM}\|^3} \rho \, dV. = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{v} \wedge \vec{u}}{\|\vec{PM}\|^2} \rho . dV.$$

avec, $\vec{PM} = \|\vec{PM}\| . \vec{u} = r \vec{u}$.

or à $\rho \vec{v} dV = \rho \vec{v} . S \vec{dl} = \rho v S \, \vec{dl} . = i \vec{dl}$.

$$\Rightarrow \boxed{\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i \vec{dl} \wedge \vec{u}}{r^2}}$$

d'où pour le circuit complet :

$$\boxed{\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int i \frac{\vec{dl} \wedge \vec{u}}{r^2}}$$

formule utilisée pour calculer le champ magnétique généré par un courant circulant dans un fils infiniment long.

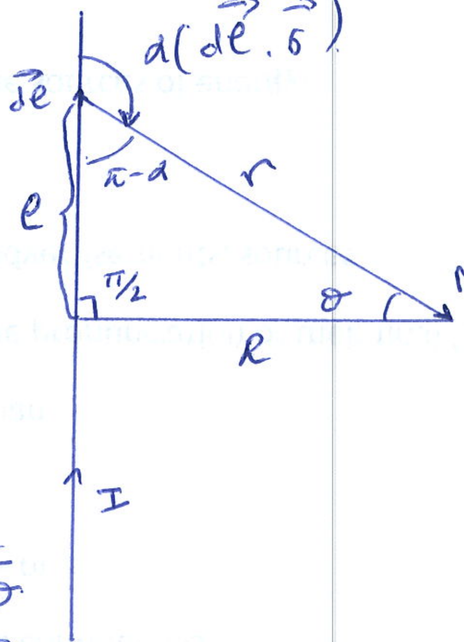
<u>Cas d'une charge isolée,</u> $\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \vec{v} \wedge \vec{u}}{r^2}$

Cas d'un courant volumique, $\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \vec{J} \wedge \frac{\vec{u}}{r^2} dV.$

Exemple :

1/- Champ créé par un conducteur infiniment long :

pour une portion dl du fil :



$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{\vec{dl}\wedge\vec{r}}{r^3}.$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} I \cdot \frac{dl}{r^2} \sin\alpha .$$

on a : $\pi - \alpha + \pi/2 + \theta = \pi \Rightarrow \theta - \alpha + \pi/2 = 0$

$\Rightarrow \theta = \alpha - \pi/2 \Rightarrow \alpha = \theta + \pi/2$.

$\Rightarrow \sin\alpha = \sin(\theta + \pi/2) = \cos\theta = \frac{R}{r} \Rightarrow r = \frac{R}{\cos\theta}$

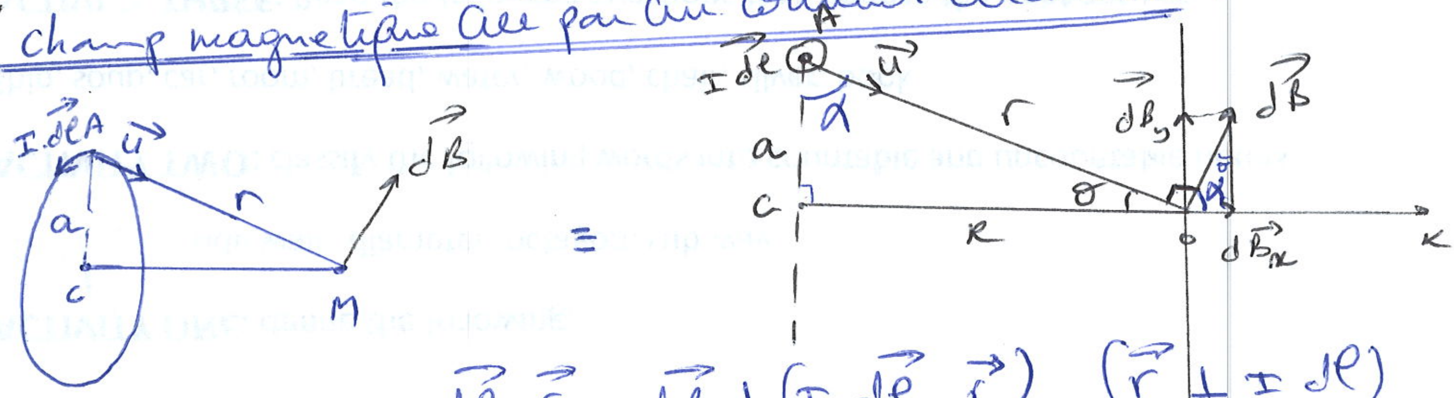
$$\Rightarrow dB = \frac{\mu_0}{4\pi} I \cdot \frac{dl}{r^2} \cos\theta = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot dl}{R^2} \cos^3\theta .$$

d'autre part on a : $tg\theta = \frac{l}{R} \Rightarrow l = R\, tg\theta \Rightarrow dl = R \frac{1}{\cos^2\theta} \cdot d\theta$.

$$\Rightarrow dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} \cos\theta\, d\theta \Rightarrow B = \int dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos\theta\, d\theta$$

$$\Rightarrow \boxed{B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}}$$

2/ Champ magnétique créé par un courant circulaire :



$$\vec{dl} \rightarrow \vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{\vec{dl}\wedge\vec{r}}{r^3}, \quad \vec{dB} \perp (I\vec{dl}, \vec{r}), \quad (\vec{r} \perp I\, dl)$$

$$\Rightarrow dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I\, dl}{r^2}.$$

Compte tenu de la symétrie du système, $\vec{B}$ ne peut être que suivant l'axe (ox) de spire.

$dB_x = dB \cos\alpha$.

et on a : $\theta + \alpha + \pi/2 = \pi \Rightarrow \alpha = \pi/2 - \theta \Rightarrow \cos\alpha = \cos(\pi/2 - \theta) = \sin\theta$.

or d'après le schéma on a $\cos\alpha = \frac{a}{r}$; $r = (a^2+R^2)^{1/2}$

ou $\sin\theta = a/r$; $\int dl = 2\pi a$.

$$\Rightarrow dB_x = \frac{\mu_0 I . dl\, a}{4\pi (a^2+R^2)^{3/2}} \Rightarrow B_x = \int dB_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I a}{(a^2+R^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi a} dl$$

$$\Rightarrow \boxed{B_x = \frac{\mu_0 I a^2}{2(a^2+R^2)^{3/2}}}$$

En particulier au centre de la spire : $R = 0$

$$\Rightarrow \boxed{B = \frac{\mu_0 I}{2a}}$$

pour une bobine de N spire parcourue par un courant I :

$$\boxed{B = \frac{\mu_0 N I}{2a}}$$

Mouvement d'une charge dans un champ magnétique :

Considérons le mouvement d'une particule chargé dans un champ magnétique uniforme

<u>Définition</u> : La force magnétique subie par une particule de charge q et de vitesse $\vec{V}$ dans un champ magnétique $\vec{B}$ s'écrit : $\boxed{\vec{F}_L = q\vec{V} \wedge \vec{B}}$

cette force est appelée force de Lorentz

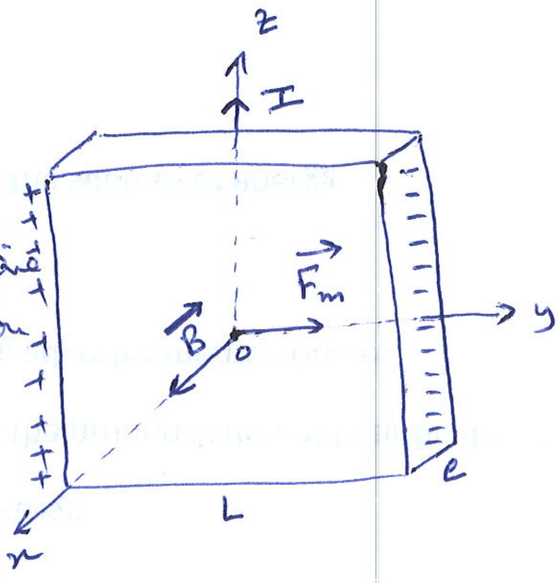
$[q] =$ Coulomb, $[V] = m/s$; $[B] =$ Tesla $\Rightarrow [F_L] =$ Newton.

<u>Caractéristiques</u> :

* $\vec{F} \perp (\vec{v}, \vec{B})$.
* le sens de $\vec{F}$ est donnée par la règle de la main droite.
* $\|\vec{F}\| = |q \sin\alpha| . V . B$. où α est l'angle entre $\vec{V}$ et $\vec{B}$.

Exemple d'application :

L'effet Hall : (1879) :



Soit une plaque métallique traversée par un courant I selon l'axe (OZ) est placée dans un champ magnétique $\vec{B}$ perpendiculaire à cette plaque selon l'axe (Ox). Une force magnétique est apparu. $\vec{F}_m = q\,\vec{v}\wedge\vec{B}$ (avec $q=-e$) suivant l'axe (Oy). Cette force fait dévié les électron vers le coté ~~gauche~~ de la plaque qui devient négatif, le coté gauche devient $\xrightarrow{\text{droite}}$ positif ⇒ il se crée un champ électrique parallèle à l'axe (Oy) et donc création d'une force électrique $\vec{F}_e = -e\vec{E}_H$ dirigée vers l'axe (−Oy) qui compense la force due au champ $\vec{B}$ ~~dév~~ dirigée vers (Oy).

~~⇒ Fe~~ à l'état d'équilibre : $\vec{F}_e + \vec{F}_m = \vec{0}$.

$$\Rightarrow qE_H = q.v.B \Rightarrow eE_H = evB.$$

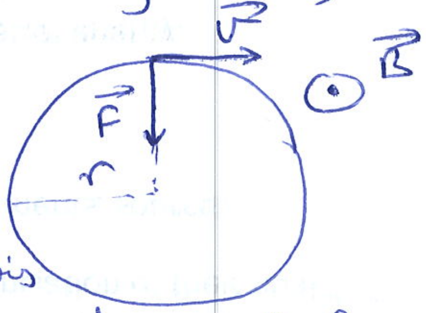
Une différence de potentiel transversal apparait entre les bords opposés du conducteur : $V_H = E.L$.

Le courant $I = nevL.\ell$

⇒ La densité des porteurs de charges est donc :

$$\boxed{n = \frac{IB}{e\ell V_H}}$$

⇒ une particule de masse m et de charge q décrit dans un champ magnétique $\vec{B}$ une trajectoire circulaire avec une vitesse angulaire de rotation qui ne dépend que du rapport q/m et du champ $\vec{B}$ (ω est appelé la fréquence cyclotron).



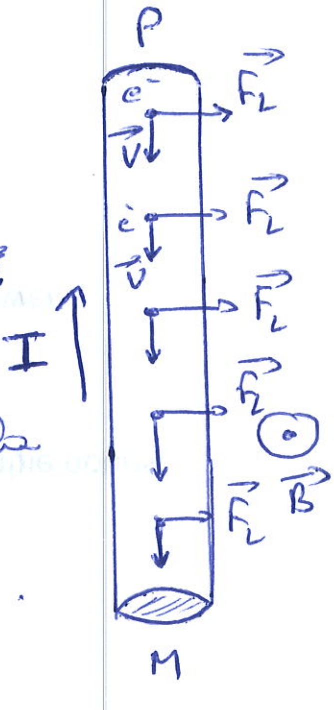
* Lorsqu'une particule est soumise à la fois à un champ électrique et à un champ magnétique, la force résultante qui lui est appliquée est :

$$\boxed{\vec{F}_L = q\left(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}\right)}.$$

Si la particule est immobile seul le premier terme existe.

- Force magnétique agissant sur un courant électrique :

Force de Laplace :



On considère un conducteur rectiligne de longueur $l = PM$ parcouru par un courant électrique d'intensité I. Les N électrons libres contenus dans le conducteur et constituant le courant électrique subissent une force de Lorentz, dont la résultante est "la force électromagnétique de Laplace s'exerçant sur le conducteur tout entier.

Calcul de la force de Laplace :

Les N électrons se déplaçant à vitesse constante et subissent la même force de Lorentz pour chacun.

⇒ la force de Laplace sera : $F = N F_L = N q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$.

$(q = -e)$

* $\vec{F}_L$ est nulle si $\left\{ \begin{array}{l} v = 0 \text{ (la charge n'est pas en mouvement).} \\ \text{ou} \\ \vec{v} \parallel \vec{B}. \end{array} \right.$

* Notation : un vecteur est perpendiculaire au plan d'étude sera conventionnellement représenté par :

⊙ lorsque le vecteur dirigé vers l'avant du plan

⊗ " " " " l'arrière " .

* Au cours d'un mouvement d'une particule ~~charge~~ chargée dans un champ magnétique, la puissance de la force de Lorentz est :

$$P = \frac{dW(F_L)}{dt} = \vec{F} \cdot \frac{d\vec{\ell}}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v} = 0. \quad (\vec{F} \perp \vec{v})$$

⇒ puissance nulle ⇒ travail nul ⇒ force de Lorentz ne travaille pas. ⇒ le théorème de l'énergie cinétique permet de conclure que l'intensité de la vitesse est constante

$$\Delta E_c = W(F_L) = 0 \Rightarrow E_c = cte \Rightarrow V = cte.$$

⇒ le mvt de particule est uniforme.

* En prend le cas où $\vec{v} \perp \vec{B}$: $F = q\,v.B.$

comme $\vec{F} \perp \vec{v}$. elle a pour effet de changer sa direction sans en changer la grandeur. ⇒ le mouvement devient circulaire uniforme.

En mécanique, la force responsable du mouvement circulaire uniforme est ~~...~~ centripète : $F = m\frac{v^2}{r}$, r : le rayon du cercle

m : la masse de particule

$$\Rightarrow \frac{mv^2}{r} = q.v.B \Rightarrow \boxed{r = \frac{mv}{q.B}}$$: rayon du cercle décrit par la particule.

la vitesse angulaire $\boxed{\omega = \frac{v}{r} = \frac{v}{mv} \cdot q.B = \frac{q}{m} B}$

d'autre part, on a : $I = \frac{|Q|}{\Delta t}$; Q : la charge totale traversant une section quelconque du conducteur pendant Δt.

si $Q = N q_e$
$\Delta t = \frac{l}{v}$ $\Rightarrow I = \frac{Nqv}{l} \Rightarrow Il = Nq.v.$

$$\Rightarrow \boxed{\vec{F} = Nq\vec{v} \wedge \vec{B} = I\vec{l} \wedge \vec{B}}$$ force de Laplace.

pour une portion dl d'un circuit réel :

$$\boxed{d\vec{F} = I.d\vec{l} \wedge \vec{B}}$$

Caractéristiques :

1/ $\vec{F}$ est perpendiculaire au plan formé par le conducteur et $\vec{B}$

2/ le sens de $\vec{F}$ est déterminé par la règle de la main droite.

3/ Module $F = I l . B . \sin\alpha$.

si $\alpha = 0 \Rightarrow F = 0$.

si $\alpha = \frac{\pi}{2} \Rightarrow F = IB.l$. (force maximale)

Loi de Faraday : comment produire un courant électrique à partir d'un champ magnétique ?

expérience : prenons un aimant permanent et plaçons le à proximité d'une boucle constituée d'un fil conducteur relié à un galvanomètre.

* lorsque l'aimant est immobile, il n'y a pas de courant dans la boucle.
* lorsqu'on déplace l'aimant, on voit apparaître un courant dont le signe varie selon qu'on approche ou qu'on éloigne l'aimant. De plus, ce courant est d'autant plus important que le déplacement est rapide.

⇒ "Quand le flux du champ magnétique à travers un circuit fermé change, il apparaît un courant électrique".

Si on ~~change~~ change la resistance "R" du circuit, le courant I apparaissant est également modifié, de telle sorte que $e = RI$ reste constante

Loi de Faraday "La variation temporelle du flux magnétique à travers un circuit fermé y engendre une force électro-motrice induite.

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Flux de champ magnétique.