Lois Physiques

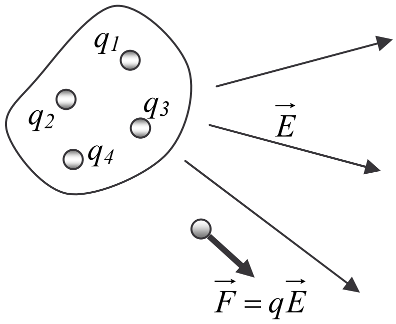
Chapitre 10
Electromagnétisme

G. MALEJACQ

1- Introduction au champ magnétique

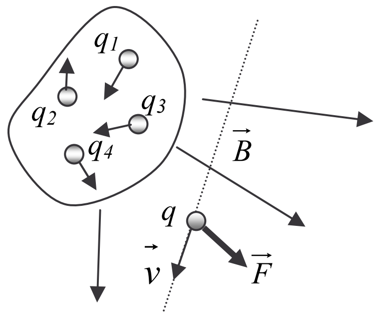
1.1 Naissance d'un champ magnétique

Pour introduire la notion de champ magnétique, nous reprenons le concept de champ électrique. Nous avions procédé en 2 phases :



a) Une distribution de charges électriques q_i au repos crée un champ électrique $\vec{E}$.
b) Le champ électrique $\vec{E}$ exerce sur une charge électrique extérieure q une force déterminée par $\vec{F} = q\vec{E}$

Par analogie, on introduit le concept d'interaction magnétique de la façon suivante :



a) Une charge ou une distribution de charges électriques en mouvement crée dans son espace avoisinant un champ $\vec{B}$ dit «magnétique ».
b) Ce champ magnétique exerce sur une charge électrique extérieure ***q* en mouvement** une force $\vec{F}$ ***ou sur un courant puisqu'un courant n'est qu'un ensemble de charges en mouvement.***

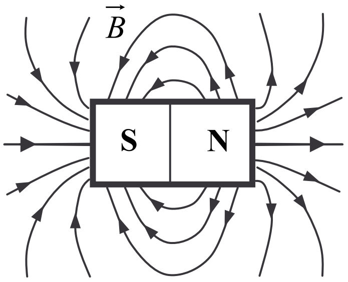
Tout comme le champ électrique $\vec{E}$, le champ magnétique est aussi un champ vectoriel. Ce champ vectoriel est symbolisé par la lettre $\vec{B}$ et appelé plus précisément : champ d'induction magnétique L'unité du champ magnétique $\vec{B}$ est le Tesla (T). **Le champ magnétique est créé par des charges en mouvement et agit sur des charges en mouvement**.

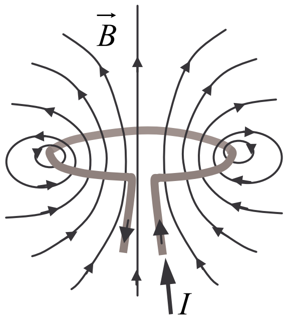
L'intensité du champ magnétique terrestre est voisine de 47 µT. Les petits aimants permanents donnent des champs de quelques centièmes à quelques dixièmes de tesla.

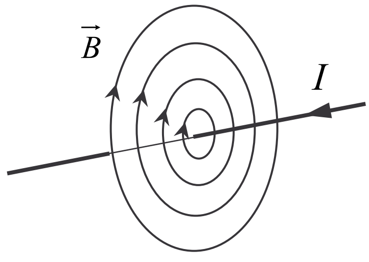
1.2 Lignes de champ magnétique

La combinaison du champ électrique et du champ d'induction magnétique permet de définir un champ appelé champ électromagnétique. Les lignes de champ sont des courbes dans l'espace dessinées de telle sorte qu'en chaque point de l'espace, la courbe soit tangente au vecteur champ magnétique $\vec{B}$.

Les figures ci-dessous présentent les lignes de champ définies pour un aimant, une spire et un conducteur parcouru par un courant d'intensité I.







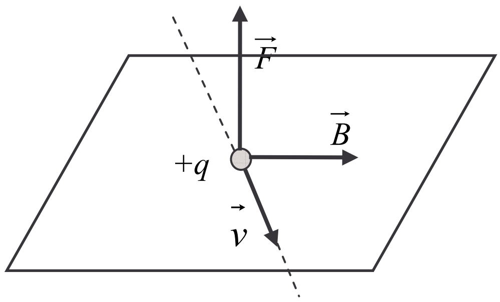
2- Champ d'induction magnétique

2.1 Définition du champ magnétique, force de Laplace

2.1.1 Cas d'une charge ponctuelle en mouvement.

Soit une charge ou une distribution de charges électriques en mouvement. En plus du champ électrique $\vec{E}$, un champ d'induction magnétique $\vec{B}$ est créé par ces charges en mouvement.
Une charge électrique q va subir de la part de $\vec{B}$ une force magnétique :

$$\boxed{\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}}$$ *(produit vectoriel)*



$\vec{F}$ est une force en newton (N)
q est exprimée en Coulomb (C)
$\vec{v}$ vitesse de déplacement ($m.s^{-1}$)
$\vec{B}$ Champ magnétique en tesla (T)

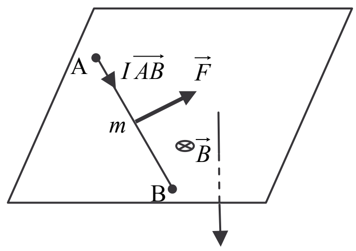
On en déduit l'unité du champ magnétique : $T = \dfrac{N}{C.m.s^{-1}} = \dfrac{kg.m.s^{-2}}{A.m}$

2.1.2 Cas d'un conducteur parcouru par un courant.

Puisque le courant électrique n'est qu'un ensemble de charges en mouvement, nous pouvons en déduire que pour une portion linéaire de circuit de longueur dl parcouru par un courant $I\vec{dl}$, la force exercée est :

$$\boxed{\vec{F} = I\vec{dl} \wedge \vec{B}}$$

Pour le cas particulier d'un conducteur rectiligne placé dans un champ magnétique uniforme il vient la formule $\boxed{\vec{F} = I\,\overrightarrow{AB} \wedge \vec{B}}$



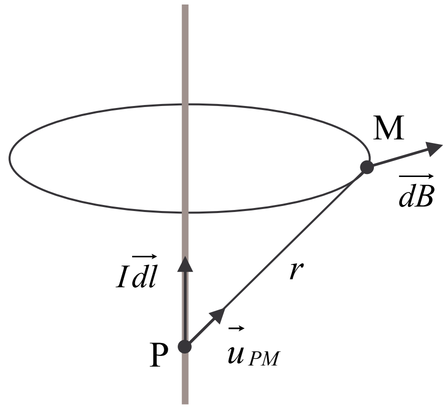
Le module de la force est : $\left|\vec{F}\right| = I\left|\overrightarrow{AB}\right|\left|\vec{B}\right|\sin(\overrightarrow{AB},\vec{B}) = I\left|l\right|\left|\vec{B}\right|\sin(\overrightarrow{AB},\vec{B})$ (l = AB)

Point d'application : Le milieu de AB.

Direction : $\vec{F} \perp \overrightarrow{AB}$ et $\vec{F} \perp \vec{B}$

Le sens : Défini par la règle des 3 doigts de la main droite.
Pouce : Sens du courant.
Index : Sens du champ $\vec{B}$
Majeur (perpendiculaire aux deux autres), sens de $\vec{F}$

2.3- Loi de Biot et Savart



2.3.1 Enoncé

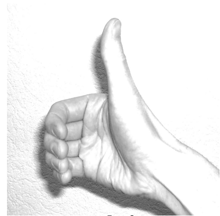
Considérons en un point P un éléments de fil $\overrightarrow{dl}$ parcouru par un courant d'intensité *I* constante, mesurée positivement dans le sens du vecteur $\overrightarrow{dl}$. Le champ d'induction magnétique élémentaire $\overrightarrow{dB}$ crée dans le vide en un point M par l'élément de courant $I\overrightarrow{dl}$ a pour expression :

$$\boxed{\overrightarrow{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I\overrightarrow{dl} \wedge \vec{u}_{PM}}{r^2}}$$

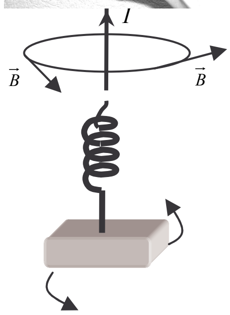
I intensité du courant (A)
r est la distance PM (m)
μ_0** est la **perméabilité** du vide **($\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$)
$\vec{u}_{PM} = \dfrac{\overrightarrow{PM}}{PM}$ *est le vecteur unitaire pointant de P vers M*

Dans un circuit filiforme parcouru par un courant *I* on peut écrire $\boxed{\vec{B} = \int \overrightarrow{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I\overrightarrow{dl} \wedge \vec{u}_{PM}}{r^2}}$

2.3.2 Orientation de l'induction.



La règle de la main droite. Le pouce tendu représente le conducteur il vise la direction de l'intensité du courant, les autres doigts sont joints et désignent le sens du champ autour du conducteur.

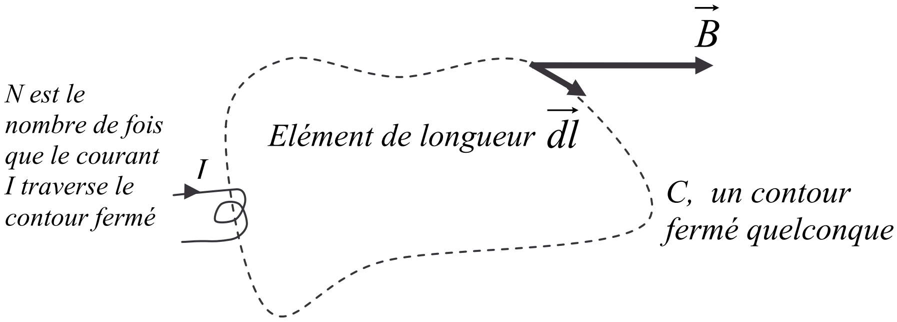


La règle du tire-bouchon : On visse de façon imaginaire un tire-bouchon le long du fil de telle sorte qu'il progresse dans le sens du courant. Le sens de rotation de la poignée donne le sens du champ d'induction.

2.4 – Théorème d'Ampère

Le théorème d'Ampère montre que la circulation sur une courbe fermée du champ magnétique engendré par une distribution de courant est égale à la somme algébrique des courants qui traversent la surface définie par la courbe multipliée par μ_0

La circulation de $\vec{B}$ autour d'un contour fermé est $\boxed{\oint_C \vec{B}.\overrightarrow{dl} = \mu_0 NI}$

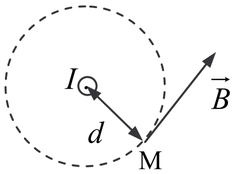


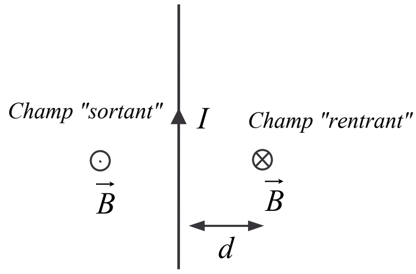
3- Cas particuliers, définitions

Les expressions données ici sont celles du module du champ $\vec{B}$

3.1 Champ magnétique créé par un fil rectiligne "infiniment long" parcouru par un courant I

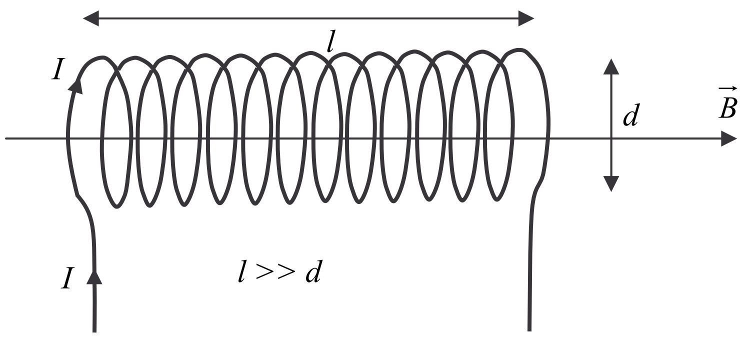
Un tel courant crée, autour de lui**,** un champ magnétique dont les lignes de champ sont des cercles concentriques. Si le fil est suffisamment long par rapport à la distance *d* du point *M* au fil, l'intensité du champ magnétique en ce point est sensiblement égale à : $\boxed{B_M = \dfrac{\mu_o I}{2\pi\, d}}$





3.2 Champ magnétique créé par une bobine "infiniment longue" parcourue par un courant I

Le champ est pratiquement uniforme à l'intérieur du solénoïde, les lignes de champ sont parallèles son axe. Leur orientation est donnée par la règle de la main droite (doigts courbes) ou toute autre règle.



Si la bobine est suffisamment longue par rapport à son diamètre l'intensité du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde est sensiblement égale à :

$\boxed{B = \mu_o n\, I}$ où n est le nombre de spires par mètre.

Si le solénoïde est réellement infiniment long, le champ magnétique est nul à l'extérieur.

3.3 Champ magnétique créé par une bobine de longueur *l* parcourue par un courant *I*

Si le solénoïde comporte N spires régulièrement espacées sur une longueur *l* alors on a:

$$\boxed{B_M = \frac{\mu_o NI}{l} \quad \text{car } n = \frac{N}{l}}$$

Notion d'ampèretour

L'intensité d'un champ magnétique est proportionnelle au produit **N.I**

On appelle ce produit les ***Ampères-tours*** (At) crées par la bobine.

3.5 Excitation magnétique

Si on place dans une bobine un noyau. La norme du champ **B** est multiplié par une quantité μ_r appellée perméabilité relative du matériau utilisé.

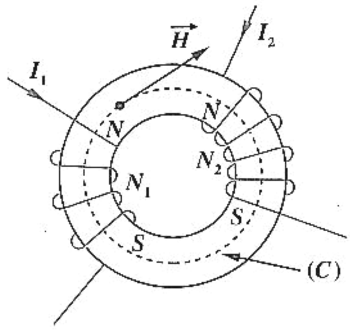
On a $\boxed{B = \mu_o \mu_r \frac{NI}{l}}$

On définit l'excitation magnétique par $\boxed{H = \frac{B}{\mu_o \mu_r} = \frac{B}{\mu}}$ H *en* $A.m^{-1}$

Pour une bobine $\boxed{H = \frac{N.I}{l} \quad \vec{B} = \mu.\vec{H}}$

Application du théorème d'Ampère.

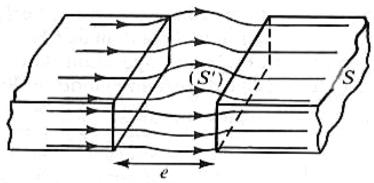
Le théorème d'ampère énonce que la circulation de l'excitation magnétique $\vec{H}$ le long d'un contour fermé (C) est égale à la somme algébrique des ampères-tours enlacés par (C) : $\sum \vec{H}.\Delta\vec{L} = \sum N.I$

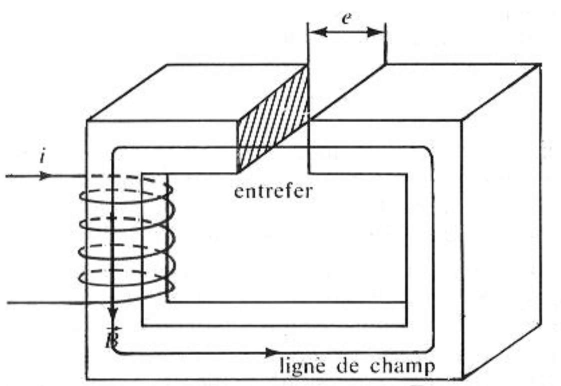


Dans l'exemple ci-contre les ampères-tours sont de signe contraire car l'induction créée par le courant I_1 est opposée à celle du courant I_2. Nous écrivons donc : $H\,L = N_1I_1 - N_2I_2$ avec L la longueur du contour C.

Cas d'un entrefer dans un circuit magnétique.

Considérons un élément ferromagnétique de section constante **S**, dans lequel il existe une fente d'épaisseur **e** (appelée entrefer). Si un champ magnétique est créé dans cet élément, par exemple grâce à une bobine qui l'entoure, les lignes de champ se trouveront canalisées et "franchiront" l'entrefer. On traduit cette propriété en ***énonçant que le flux du vecteur magnétique est*** **conservatif**. Il en résulte que les champs magnétiques dans le fer, $\vec{B}_f$ et dans l'entrefer, $\vec{B}_e$, sont égaux. En supposant que les surface S et S' sont égales, nous pouvons écrire :





$\Phi = B_e.S' = B_f.S$ d'où $B_e = B_f$

Cependant l'excitation magnétique prend une valeur différente dans le fer et l'entrefer :

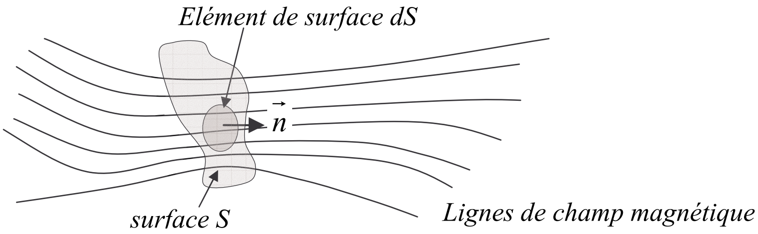
$$H_f = \frac{B}{\mu_o \mu_r} \quad \text{et} \quad H_e = \frac{B}{\mu_o} \quad \text{d'où} \quad \boxed{H_e = \mu_r H_f}$$

L'intérêt de ménager un entrefer dans un circuit ferromagnétique est la possibilité d'obtenir des valeurs très élevées de l'excitation magnétique.

4- Induction électromagnétique.

4.1 Flux du champ magnétique quelconque, cas général.

C'est la définition de surface que nous avions vue dans l'étude du champ électrostatique que nous retrouvons ici. Le flux ϕ du champ magnétique $\vec{B}$ à travers une surface S est la somme de tous les flux élémentaires $d\phi$ à travers les éléments de surface dS constituant S.



La formule du flux magnétique est ainsi : $\phi = \iint_S d\phi = \iint_S \vec{B}.d\vec{S} = \iint_S \vec{B}.\vec{n}\, dS$

Avec $\vec{n}$ le vecteur unitaire normal à l'élément de surface dS

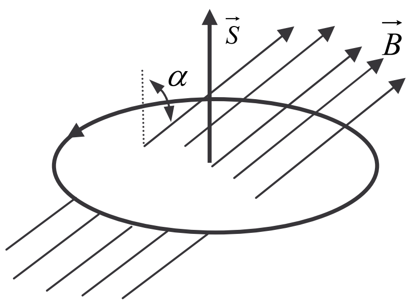
L'unité de flux est le **Weber (W)**

4.2 Flux d'un champ magnétique uniforme à travers un circuit fermé plan

4.2.1 Vecteur surface

A toute surface orientée, on peut associer un vecteur surface $\vec{S}$ qui aura les caractéristiques suivantes :

- **direction :** perpendiculaire au plan de la surface
- **sens :** lié au sens choisi pour orienter la surface (doigts courbes)
- **norme :** égale à l'aire de la surface



4.2.2 Flux magnétique ϕ à travers un circuit fermé plan

On oriente ce circuit de manière arbitraire (s'il est parcouru par un courant on se servira de la flèche du courant). On peut alors lui associer un vecteur surface $\vec{S}$.

Si ce circuit est situé dans un champ magnétique, il est traversé par un flux ϕ :

$$\boxed{\Phi = \vec{B}.\vec{S} = B.S.\cos\left(\vec{B},\vec{S}\right) = B.S.\cos(\alpha)} \quad \text{(W)}$$

Pour une bobine de N spires $\Phi = N.\vec{B}.\vec{S} = N.B.S.\cos\left(\vec{B},\vec{S}\right)$

4.3 Force électromotrice (tension) induite

Toute variation de flux à travers un circuit est à l'origine d'une force électromotrice induite. Si le circuit est fermé, électriquement, il y a un courant induit.

4.3.1 Loi de Faraday

La f.e.m induite est l'opposée de la dérivée du flux par rapport au temps.

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

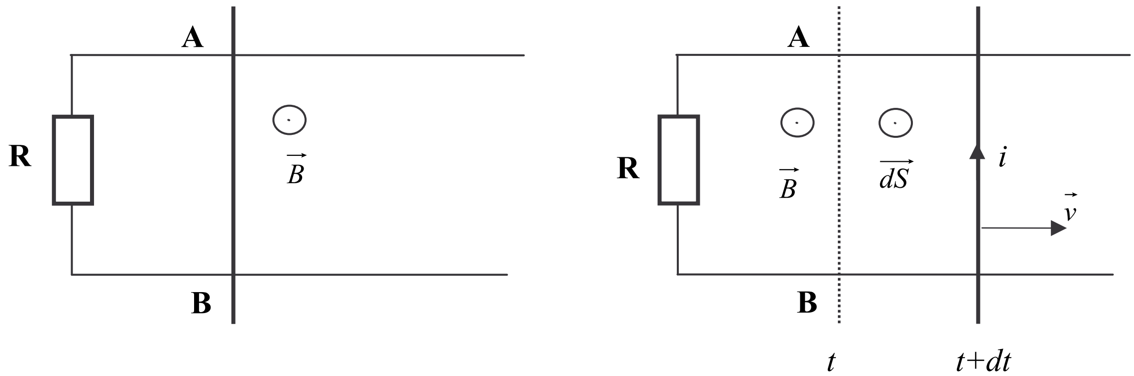
$$\boxed{e_{moy} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}} \quad \Delta\Phi = \Phi_{final} - \Phi_{initial}$$

4.3.2 Loi de Lenz

Le sens du courant induit est tel que, par ses effets, il s'oppose à la cause qui lui donne naissance.

Exemple

Dans le circuit ci-dessous, Il apparaît un courant induit *i* quand on déplace la barre métallique AB, mobile sur deux rails conducteurs situés dans un champ magnétique.



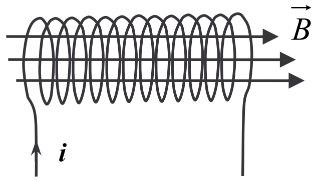
Interprétation quand la barre de longueur $l=AB$ se déplace dans le champ magnétique, il y a variation de surface et donc variation de flux.

$$\Phi = \vec{B}.\vec{S} \qquad d\Phi = \vec{B}.\vec{dS} = B.dS = Blv\,dt \qquad e = -\frac{d\phi}{dt} = -Blv$$

La distance parcourue sous une vitesse v pendant une durée dt est v.dt. La surface couverte est l.v.dt

Pendant le déplacement il apparaît une f.e.m induite et donc une tension aux "bornes" de cette barre. La barre se comporte alors comme une source de tension, Le circuit étant fermé, il apparaît un courant induit *i*.

4.4 Flux propre et inductance propre



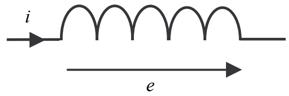
Ce phénomène ne concerne pratiquement que les bobines. La source du champ qui est à l'origine du flux dans la bobine est la bobine elle-même, d'où le nom de flux propre. On montre que, dans le vide, ce flux propre est proportionnel au courant *i* qui circule dans la bobine est $\boxed{\phi_p = L.i}$

Le coefficient L est appelé inductance propre de la bobine. L s'exprime en **Henry** (H)

L est appelé aussi coefficient d'auto-induction, auto-inductance ou encore self inductance.

4.5 Auto-induction

Si le courant varie dans un circuit comportant une bobine, il apparaît une tension induite *e* tel que : $\boxed{e = -\frac{d\phi_p}{dt} = -L\frac{di}{dt}}$



La convention récepteur (i et e de sens opposé) donne $e = \frac{d\phi_p}{dt} = L\frac{di}{dt}$