Cours VI : Electromagnétisme

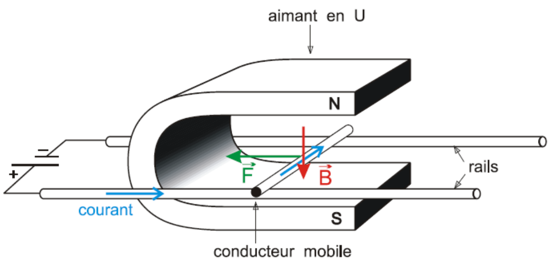
3 Action d'un champ magnétique sur un courant

Dans le cadre de la force de Lorentz, nous avons étudié l'action d'un champ magnétique sur une particule en mouvement. Nous avons vu dans le chapitre précédent que les porteurs en mouvement étaient à l'origine de l'existence d'un courant électrique et que ce courant était la source du champ magnétique. Mais les courants peuvent aussi subir l'action d'un champ magnétique extérieur, c'est l'objet de ce chapitre.

3.1 Force de Laplace

3.1.1 Mise en évidence : Rails de Laplace

Dispositif :
Le dispositif représenté ci-dessous comporte les éléments suivants :
- un aimant en U créant, entre ses pôles, un champ magnétique uniforme vertical dirigé vers le bas
- un générateur de courant continu I
- un conducteur mobile pouvant se déplacer librement, entre les pôles de l'aimant.



Observations :
Lors de la fermeture de l'interrupteur K, la tige se déplace de gauche à droite sur les rails.
Lors d'un autre essai, la tige se déplace dans l'autre sens dans les deux cas suivants :
- retournement de l'aimant (inversion du champ) sans changer le sens du courant
- inversion du sens du courant sans retourner l'aimant.

Conclusions :
Une portion de circuit, placée dans un champ magnétique, parcourue par un courant, est soumise à des forces magnétiques, appelées forces de Laplace. Ses caractéristiques sont les suivantes :
- direction : perpendiculaire au champ magnétique et au sens du courant dans le conducteur
- sens : donné par la règle de la main droite.

Ce sont les caractéristiques d'un produit vectoriel.

3.1.2 Expression

3.1.2.1 Densité volumique

Reprenons l'expression de la densité volumique de force de Lorentz dans le cas où l'on a seulement un champ magnétique : $d\vec{F} = \vec{j} \wedge \vec{B} d\tau$

Cette force est appliquée sur les porteurs de charge. Mais, du fait des collisions incessantes entre le réseau cristallin et les porteurs, cette force est appliquée sur le conducteur lui-même.

Définition :
La force de Laplace est répartie volumiquement avec une densité :

$$\vec{f} = \frac{d\vec{F}}{d\tau} = \vec{j} \wedge \vec{B} \qquad (1)$$

3.1.2.2 Cas d'un circuit filiforme

On considère maintenant un courant de charges électriques à l'intérieur d'un conducteur filiforme. Le vecteur vitesse de déplacement des charges de même que le vecteur densité de courant sont alors toujours tangents au conducteur filiforme.
Soit S la section droite de ce conducteur. Le conducteur est parcouru par un courant électrique d'intensité I et est plongé dans un champ magnétique extérieur $\vec{B}$. On suppose que la présence du conducteur et l'existence de I ne modifie pas la valeur de $\vec{B}$ dont la valeur dépend uniquement d'une source externe annexe. I et $\vec{B}$ sont indépendants.
Si on isole un tronçon de ce conducteur de longueur dl selon Ox. Les charges en mouvement contenues dans ce petit volume $d\tau$ sont alors soumises à une force de la part de $\vec{B}$:

$$d\vec{F} = \vec{j}d\tau \wedge \vec{B}$$

Or, l'intensité dI traversant la surface S est : $dI = \vec{j} \cdot \overrightarrow{dS} \quad ou \quad \vec{j} = \frac{I}{S}\overrightarrow{u_x}$

On peut donc transformer l'expression précédente en : $d\vec{F} = \frac{I}{S} d\tau \overrightarrow{u_x} \wedge \vec{B} = I\overrightarrow{dl} \wedge \vec{B}$

Définition :
Un tronçon de longueur dl d'un conducteur filiforme parcouru par un courant électrique d'intensité I et plongé dans un champ magnétique $\vec{B}$ est soumis à une force d'origine magnétique appelée **force de Laplace** qui vaut :

$$d\vec{F} = I\overrightarrow{dl} \wedge \vec{B} \qquad (2)$$

Propriété :
Contrairement à la partie magnétique de la force de Lorentz, la force de Laplace possède un travail non nul.

Exercice : 3.3.1, 3.3.2

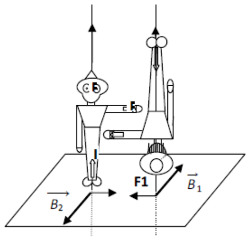
3.1.3 Applications

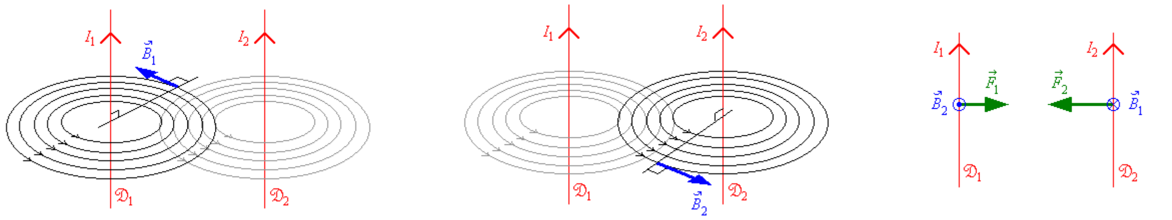
3.1.3.1 Définition de l'Ampère

C'est une définition basée sur l'interaction entre deux fils conducteurs rectilignes et parallèles, D_1 et D_2. I_1 et I_2 sont de même sens et de même valeur I. Les fils sont distants de la distance $d = 1m$. L'Ampère est l'intensité qu'il faut faire passer dans les fils pour avoir une force F égale à $2.10^{-7} N$ par mètre de fil.
Le champ magnétostatique créé par un fil conducteur infini est caractérisé par des lignes de champ circulaires, contenues dans un plan perpendiculaire au fil. En appliquant ce résultat aux 2 fils successivement, on constate que $\overrightarrow{B_1}$ est perpendiculaire à D_2 et dirigé vers l'arrière, tandis que $\overrightarrow{B_2}$ est perpendiculaire à D_1 et dirigé vers l'avant. On obtient ainsi deux forces attractives, $\overrightarrow{F_1}$ et $\overrightarrow{F_2}$:

$$\overrightarrow{B_1} = -\frac{\mu_0 I_1}{2\pi d}\overrightarrow{e_x} \quad \Rightarrow \quad \overrightarrow{dF_2} = I_2 dz\overrightarrow{e_z} \wedge B_1\overrightarrow{e_x} \quad \Rightarrow \quad \overrightarrow{F_2} = -\frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}\overrightarrow{e_y}$$

Si $I_1 = I_2 = I = 1A$, $d = 1m$ et $l = 1m$, alors : $\overrightarrow{F_2} = -\frac{\mu_0}{2\pi}\overrightarrow{e_y} = -2.10^7\,N$

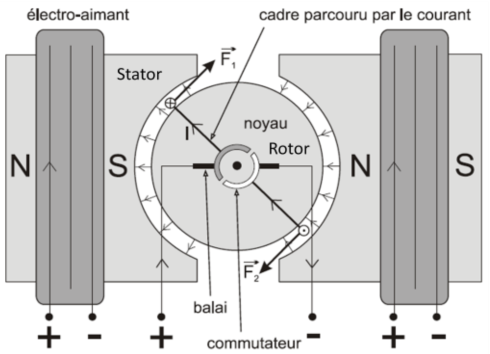


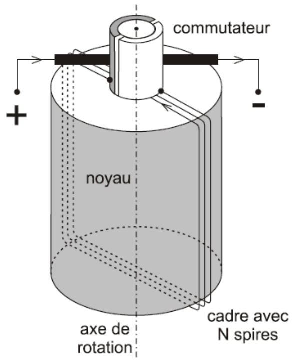


3.1.3.2 Moteur à courant continu

Un moteur à courant continu est constitué des éléments suivants :

- le stator dans lequel un aimant permanent ou un électroaimant produit un champ magnétique uniforme et radial
- le rotor constitué d'un cylindre autour duquel sont enroulées des spires parcourues par un courant
- le collecteur ou balai (charbons frottant sur des pistes) réalisant le contact électrique du rotor en rotation, mais aussi, assurant l'orthogonalité entre le champ du rotor et le champ inducteur du stator.





Dans l'entrefer, c'est-à-dire dans l'espace entre les électro-aimants fixes (stator) et la partie mobile (rotor), existe un champ magnétique radial. Placé dans ce champ, le cadre est soumis à un couple de forces de Laplace qui provoquent sa rotation. A chaque demi-tour, le sens du courant dans le cadre est inversé grâce au commutateur. Ainsi le couple agit toujours dans le même sens, et la continuité du mouvement de rotation est assurée !

<u>Exercice</u> : 3.3.3

3.2 Moment dipolaire magnétique d'un circuit plan filiforme indéformable

3.2.1 Cas particulier d'une spire rectangulaire

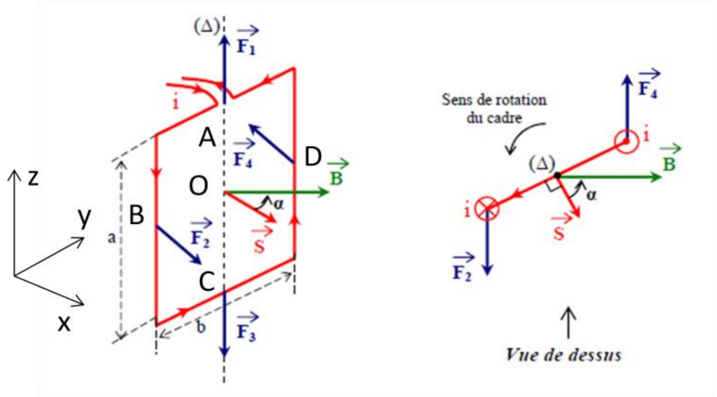
Considérons une spire de forme rectangulaire, parcourue par un courant i et capable de tourner autour d'un axe vertical Δ. Cette spire est placée dans un champ magnétique uniforme :

$$\vec{B} = B_x\overrightarrow{e_x} + B_y\overrightarrow{e_y}$$

Chacun des côtés du cadre est soumis à une force de Laplace appliquée en son milieu. Ces forces ont les propriétés suivantes :

$\overrightarrow{F_1} = -\overrightarrow{F_3}$ *et* $\overrightarrow{F_2} = -\overrightarrow{F_4}$: pas de mouvement de translation de cadre.

$\overrightarrow{F_2}$ et $\overrightarrow{F_4}$ ont un effet de rotation du cadre autour de l'axe Δ.



3.2.1.1 Résultante

On a sur chaque côté de la spire :

$$\begin{cases} \overrightarrow{dF_1} = -idy\overrightarrow{e_y} \wedge \left(B_x\overrightarrow{e_x} + B_y\overrightarrow{e_y}\right) = B_x idy\overrightarrow{e_z} \\ \overrightarrow{dF_2} = -idz\overrightarrow{e_z} \wedge \left(B_x\overrightarrow{e_x} + B_y\overrightarrow{e_y}\right) = -B_x idz\overrightarrow{e_y} + B_y idz\overrightarrow{e_x} \\ \overrightarrow{dF_3} = idy\overrightarrow{e_y} \wedge \left(B_x\overrightarrow{e_x} + B_y\overrightarrow{e_y}\right) = -B_x idy\overrightarrow{e_z} \\ \overrightarrow{dF_4} = idz\overrightarrow{e_z} \wedge \left(B_x\overrightarrow{e_x} + B_y\overrightarrow{e_y}\right) = B_x idz\overrightarrow{e_y} - B_y idz\overrightarrow{e_x} \end{cases}$$

D'où la résultante des forces de Laplace est nulle.

Propriété :
Dans un champ magnétique uniforme, la résultante de forces de Laplace appliquées à un circuit fermé est nulle.

3.2.1.2 Moment

On peut supposer que chaque force de Laplace est appliquée au centre de chacun des côtés, alors :

$$\begin{cases} \overrightarrow{M_O}\left(\overrightarrow{F_1}\right) = \overrightarrow{OA} \wedge \overrightarrow{F_1} = \int_0^b \frac{a}{2}\overrightarrow{e_z} \wedge \left(B_x i\overrightarrow{e_z}\right)dy = \vec{0} \\ \overrightarrow{M_O}\left(\overrightarrow{F_2}\right) = \overrightarrow{OB} \wedge \overrightarrow{F_2} = \int_0^a -\frac{b}{2}\overrightarrow{e_y} \wedge \left(-B_x i\overrightarrow{e_y} + B_y i\overrightarrow{e_x}\right)dz = \frac{b}{2}B_y ia\overrightarrow{e_z} \\ \overrightarrow{M_O}\left(\overrightarrow{F_3}\right) = \overrightarrow{OC} \wedge \overrightarrow{F_3} = \int_0^b -\frac{a}{2}\overrightarrow{e_z} \wedge \left(-B_x i\overrightarrow{e_z}\right)dy = \vec{0} \\ \overrightarrow{M_O}\left(\overrightarrow{F_4}\right) = \overrightarrow{OD} \wedge \overrightarrow{F_4} = \int_0^a \frac{b}{2}\overrightarrow{e_y} \wedge \left(B_x i\overrightarrow{e_y} - B_y i\overrightarrow{e_x}\right)dz = \frac{b}{2}B_y ia\overrightarrow{e_z} \end{cases}$$

La somme des moments vaut donc : $\vec{\Gamma} = \overrightarrow{M_O}\left(\overrightarrow{F_2}\right) + \overrightarrow{M_O}\left(\overrightarrow{F_4}\right) = B_y iab\overrightarrow{e_z}$

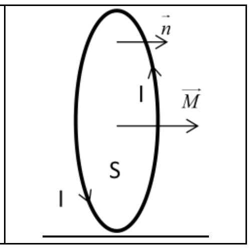
Ce résultat peut s'écrire sous une autre forme en faisant intervenir le vecteur S, de norme la surface de la spire et orienté selon la normale à la surface : $\vec{\Gamma} = i\vec{S} \wedge \vec{B}$

Propriété :
Dans un champ magnétique uniforme, le système des forces de Laplace appliquées à un circuit fermé est un couple.

3.2.1.3 *Moment dipolaire magnétique d'un circuit plan filiforme indéformable*

<u>Définition</u> :
On désigne par <u>moment dipolaire magnétique</u> (unité : A.m²) le vecteur de norme M égale au produit du courant I parcourant le circuit filiforme et de la surface S ouverte délimité par son contour C du circuit. Il est orienté selon la normale à la surface S.

$$\overrightarrow{M} = I\overrightarrow{S} \quad (3)$$



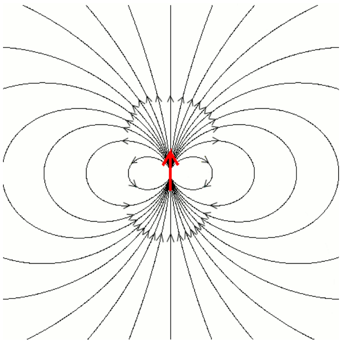
<u>Propriété :</u>
Pour un circuit placé entièrement dans un champ uniforme, les actions de Laplace se réduisent à un couple de moment $\vec{\Gamma}$:

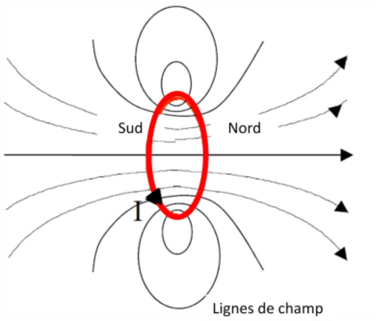
$$\vec{\Gamma} = \overrightarrow{M} \wedge \vec{B} \quad (4)$$

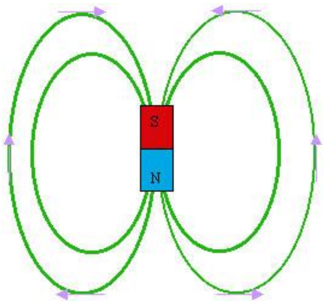
3.2.2 Dipôle magnétique

<u>Définition</u> :
On appelle **dipôle magnétique** toute distribution de courants localisés, de moment magnétique non nul, dont les dimensions sont petites vis-à-vis de la distance à laquelle on étudie le champ ainsi créé.

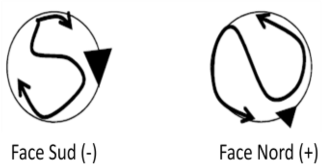
<u>Remarque</u> :
A grande distance, quelque soit la source de champ magnétique, le dipôle magnétique présente une carte de champ analogue. C'est le cas d'une spire ou d'un aimant permanent.

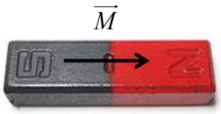


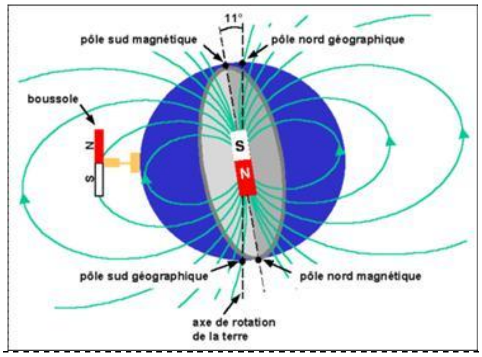




Le moment magnétique permet de définir une « face NORD » et une « face SUD » d'un circuit.
Le moment magnétique M d'un circuit est dirigé de la face SUD de ce circuit vers la face NORD.
On peut donc aussi définir un moment magnétique pour un aimant.
Le vecteur moment dipolaire magnétique permet donc de caractériser la source.







<u>Exemple</u> :
La Terre elle-même possède un moment magnétique, dû à des mouvements de convections internes. Attention, cependant le sens du dipôle n'est pas conforme à la terminologie géographique : le pôle sud magnétique est voisin du pôle nord géographique et vice versa.

3.2.3 Actions subies par un dipôle magnétique placé dans un champ extérieur

Le champ extérieur est uniforme et on se place dans l'approximation dipolaire. Par analogie, avec le circuit plan filiforme indéformable, le dipôle magnétique subira de la part du champ un couple de moment égal à : $\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}_{ext}$

Le dipôle s'il est libre de tourner autour d'un axe orthogonal au champ magnétique extérieur appliqué, tournera autour de cet axe jusqu'à annuler le couple des forces de Laplace.

Soit θ l'angle entre $\vec{M}$ et $\vec{B}_{ext}$. L'équilibre sera atteint pour : $\sin\theta = 0$.

Deux positions conviennent a priori :
- $\theta = 0$: moment et champ sont alignés de même sens
- $\theta = \pi$: moment et champ sont de sens opposés.

En observant la stabilité des deux positions, on comprend bien que seul $\theta = 0$ est une position d'équilibre stable.

Propriété :
L'action du champ extérieur sur les courants du dipôle se réduit alors à un couple de moment:

$$\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}_{ext}$$

Ce couple tend à aligner le dipôle suivant la direction et le sens du champ appliqué.

A retenir et savoir faire :
- Savoir exprimer, calculer et donner le sens de la force de Laplace.
- Savoir qu'elle travaille, au contraire de la composante magnétique de la force de Lorentz.
- Connaître les expressions du couple subi par un dipôle magnétique dans un champ extérieur magnétique.
- Connaître l'expression du moment dipolaire magnétique.