CELLULE BILINGUE

PHYSIQUE

Niveau : L3

Année scolaire 2017-2018

Traducteur : Dr. Bounseng BOUNTHONG

Mobile : 02029822860
Email : bounsengbo@gmail.com

Table des matières

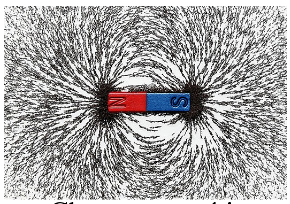
Chapitre V : Électromagnétiques

Leçon 12 : Champs magnétiques

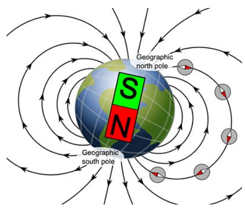
1. Champ magnétique

Depuis des siècles on connaît l'existence de substances capables d'attirer des petits morceaux de fer ou de la limaille : ces substances sont des oxydes de fer, en particulier l'oxyde magnétique ou magnétite (Fe_3O_4) ce sont les aimants naturels.

Remarque : La magnétite était une pierre provenant de la région de Magnésie en Grèce d'où l'origine des mots magnétique et magnétisme. Les quelques substances attirées par l'aimant sont dites « magnétiques ». On trouve principalement le fer, le cobalt, le nickel et certains de leurs composés et alliages. Convenablement traités, ces corps magnétiques peuvent donner naissance à des aimants artificiels.



Champ magnétique



Aimant s'oriente toujours dans la direction géographique Nord-Sud

FIGURE 12.1 – Champ magnétique

Les Chinois ont été les premiers à constater qu'une fine aiguille aimantée suspendue par un fil, loin de tout aimant, prenait toujours une direction fixe correspondant à la direction Sud-Nord des pôles géographiques. Cette aiguille aimantée libre de s'orienter constitue la boussole. Les deux extrémités de l'aiguille ne jouent pas un rôle identique puisque c'est toujours la même pointe qui se dirige soit vers le pôle Nord soit vers le pôle Sud. De là vient la définition des deux pôles d'un aimant. L'extrémité de l'aimant se dirigeant vers le nord est appelée le pôle nord de l'aimant, l'autre le pôle sud.

Les pôles magnétiques apparaissent toujours par paires ; il n'existe pas de monopôle magnétique. En découpant une barre aimantée en deux, on obtient deux couples de pôles nord et sud.

Si on approche deux aiguilles aimantées libres de s'orienter on constate que :

- Deux pôles de même nature se repoussent ;

- Deux pôles de nature différente s'attirent

La Terre agissant sur l'aiguille d'une boussole se comporte comme un aimant. Le nord de l'aiguille aimanté se dirige vers un point appelé par le géographe le pôle Nord magnétique terrestre. Pour le physicien, ce pôle Nord correspond en réalité au pôle sud magnétique de l'aimant équivalent à la Terre voir la figure 12.1 (à droite ci-dessus).

En 1819, au cours d'une expérience sur le courant électrique, le physicien Œrsted constate par hasard la déviation d'une boussole placée près d'un fil parcouru par un courant électrique. Cette découverte importante sera à l'origine de nombreux travaux sur le magnétisme.
Des charges électriques en mouvement (ou courant électrique) sont sources d'un champ magnétique.

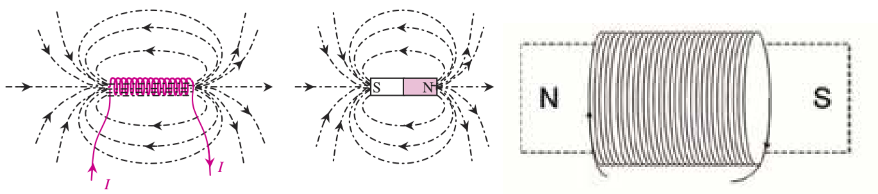


FIGURE 12.2 – Les lignes de champ magnétique créé par une bobine parcouru par un courant I sont semblables à celles qui apparaissent autour d'un aimant en forme de barreau. Les faces de la bobine se comportent comme les pôles de l'aimant

Le champ magnétique est une grandeur ayant le caractère d'un champ vectoriel, c'est-à-dire caractérisée par la donnée d'une norme, d'une direction et d'un sens, définie en tout point de l'espace et on désigne par $\vec{B}$, permettant de modéliser et quantifier les effets magnétiques du courant électrique ou des matériaux magnétiques comme les aimants permanents.

Dans le Système International d'Unités, le champ magnétique s'exprime en Tesla (T) : 1T=1Wb/m^2. L'intensité du champ magnétique Terrestre est de l'ordre 10^{-5} T et champ magnétique artificiel est 10 T.
La présence du champ magnétique se traduit par l'existence d'une force agissant sur les charges électriques en mouvement (dite force de Lorentz).

2. Force magnétique sur une particule chargée

En électrostatique, une charge q placée dans un champ électrique (électrostatique) $\vec{E}$ subit une force

$$\vec{F} = q\vec{E} \tag{12.1}$$

Si cette charge est mobile, dans un repère où sa vitesse est $\vec{v}$, elle subit une force de la forme :

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B} \qquad \Rightarrow F = qvB\sin\theta \tag{12.2}$$

Où F est la force magnétique, exprime en Newton (N), v est la vitesse de particule, exprime en mètre par seconde (m/s) ; q est la charge, exprime en Coulomb (C) et B est le champ magnétique (ou induction magnétique) exprime en Tesla (T) : 1 T=1 N.s/C.m ou 1 T=1 kg/s.C.
Considérons maintenant l'angle θ :

1) Si $\theta = 0$ ou π, la vitesse $\vec{v}$ et $\vec{B}$ sont colinéaires de même sens ou de sens contraire dans ce cas $F = 0$ ($\sin\theta = 0$) ;
2) Si $\theta = \frac{\pi}{2}$ ou $-\frac{\pi}{2}$, la vitesse $\vec{v}$ et $\vec{B}$ sont perpendicualires, on a : $\sin\frac{\pi}{2} = 1 \Rightarrow F = qvB$ ou $\sin(-\frac{\pi}{2}) = -1 \Rightarrow F = -qvB$;
3) Si θ est un angle, différente de deux premiers cas, la force est perpendiculaire au plan former par $(\vec{v}, \vec{B})$ et $F = qvB\sin\theta$ voir la figure 12.3.

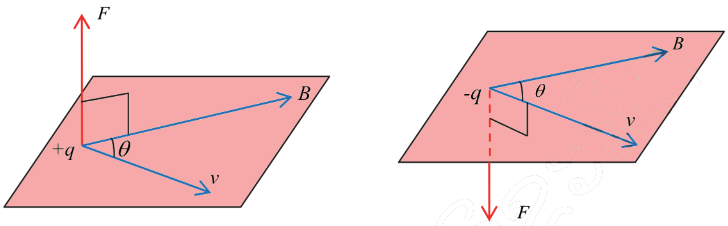


FIGURE 12.3 – Direction de force magnétique

La force totale, électrique et magnétique (on dit électromagnétique) subie par une particule de charge q et de vitesse $\vec{v}$ mesurée dans un référentiel galiléen est

$$\vec{F} = q\vec{E} + (q\vec{v} \wedge \vec{B}) \tag{12.3}$$

On appelle cette force **la force de Lorentz**. On peut la mettre sous la forme

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m \Leftrightarrow \begin{cases} \vec{F}_e = q\vec{E} \\ \vec{F}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B} \end{cases}$$

où $\vec{F}_e$ est la composante électrique et $\vec{F}_m$ la composante magnétique. La composante magnétique de la force de Lorentz (parfois appelée force magnétique) possède un ensemble de propriétés remarquables et sera discuter plus tard.

Exemple 1 : Soit un proton qui se déplace sur un champ magnétique dans la direction perpendiculaire à ce champ et il se déplace à une vitesse de 10^7 m/s, l'intensité du champ magnétique terrestre est de 10^{-5} T. Déterminer la force appliquée sur ce proton et comparer avec sa force gravitation (ou son poids).

Solution : Les données : $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C, $v = 10^7$ m/s, $B = 10^{-5}$ T, $\theta = \frac{\pi}{2}$, $m_p = 1.6 \times 10^{-27}$ kg et $g = 10\, m/s^2$. La force appliquée sur le proton est :

$$\begin{aligned} F &= qvB\sin\theta \\ &= qvB\sin\frac{\pi}{2} \\ &= (1.6 \times 10^{-19})(10^7)(10^{-5})(1) \\ &= 1.6 \times 10^{-17}\ \text{N} \end{aligned}$$

La force gravitation est calculée par :

$$\begin{aligned} P &= mg \\ &= (1.6 \times 10^{-27})(10) \\ &= 1.6 \times 10^{-26}\ \text{N} \end{aligned}$$

On a $\frac{F}{P} = \frac{1.6\times10^{-17}}{1.6\times10^{-26}} = 10^9$. Donc, la force magnétique est environ 10^9 de la force gravitation.

3. Ligne du champ

Par définition, les lignes de champ du champ magnétique sont l'ensemble des courbes « en tout point » tangentes à B. Ces lignes relient les pôles magnétiques, et par convention on les oriente de sorte que les lignes du champ d'un aimant entrent par le sud (S) et ressortent par le nord (N), voir la figure 12.4.

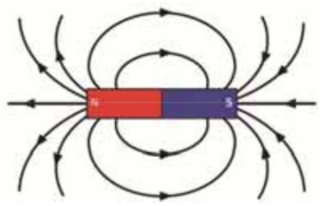


FIGURE 12.4 – Les lignes de champ sont orientées du Nord vers le Sud à l'extérieur de l'aimant.

Le champ magnétique créé par un fil infini parcouru par un courant I : Les lignes du champ sont des cercles. Contrairement au champ électrique, les lignes du champ magnétique se referment sur elle même. On peut noter que le champ magnétique tourne autour du fil dans un sens imposé par la règle du tire-bouchon : un tire bouchon tournant dans le sens du champ magnétique progresse dans le sens du courant.

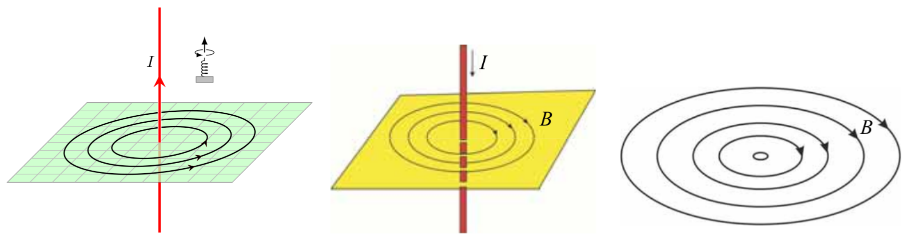


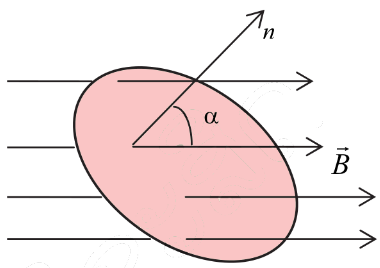
FIGURE 12.5 – Direction du courant et champ magnétique créé par un fil infini

4. Flux du champ

Le flux magnétique (ou flux d'induction magnétique), souvent noté Φ, est une grandeur physique mesurable caractérisant l'intensité et la répartition spatiale du champ magnétique. Cette grandeur est égale au flux du champ magnétique $\vec{B}$ à travers une surface orientée $\vec{A}$. Ce flux est par définition le produit scalaire de ces deux vecteurs. Son unité d'expression dans le Système international d'unités est le weber (wb)

$$\Phi = BA \tag{12.4}$$

où B en teslas (T), A en m^2 et Φ le flux magnétique en weber (Wb).
Une surface oblique doit être remplacée par sa projection sur un plan perpendiculaire aux lignes du champ. Soit α l'angle de la surface et de sa projection, cet angle est aussi celui de $\vec{B}$ et de la normale $\vec{n}$ à la surface. Le flux est alors :



$$\Phi = BA\cos\alpha \tag{12.5}$$

Exemple 2 : Un cadre du fil rectangulaire de côtés de 4 cm et 5 cm. Lorsqu'un champ d'intensité de 0.25 T passe de direction perpendiculaire à la section. Déterminer le flux magnétique qui passe le fil.

Solution : Les données : $x = 4$ cm, $y = 5$ cm, $B = 0.25$ T. On utilise la relation $\Phi = BA$ avec $A = xy = 0.04(0.05) = 2 \times 10^{-3}\ m^2$. Donc,

$$\begin{aligned}\Phi &= 0.25(2 \times 10^{-3}) \\ &= 5 \times 10^{-4} \text{ Wb}\end{aligned}$$

5. **Densité de flux magnétique**

Deux champs vectoriels apparentés servent en physique à décrire les phénomènes magnétiques, et peuvent de ce fait prétendre au nom générique de « champ magnétique » :

- l'un, noté $\vec{B}$, décrit la « **densité de flux magnétique** » dans l'espace, qui est à l'origine des effets à distance du magnétisme, et notamment de l'« induction électromagnétique » . Il s'exprime en teslas (T) ;
- l'autre, noté $\vec{H}$, qui est en pratique plutôt utilisé dans l'étude de l'électromagnétisme des milieux continus, décrit au niveau local l'« **aimantation** » propre de la matière, sous l'effet d'un champ électromagnétique externe. Il s'exprime en ampères par mètre (A/m).

Lorsqu'il est nécessaire de faire la différence entre les deux, le champ $\vec{B}$ peut être qualifié de « **champ d'induction magnétique** », et le champ $\vec{H}$ de « **champ d'aimantation** ». Bien que les normes internationales de terminologie prescrivent de réserver l'appellation de « **champ magnétique** » au seul champ vectoriel $\vec{H}$, en physique fondamentale, le terme champ magnétique pris absolument désigne le plus souvent le champ vectoriel $\vec{B}$.
Dans un milieu non vide, on a la relation :

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \tag{12.6}$$

où μ est la constante magnétique ou **perméabilité** magnétique du milieu. Dans le vide, la relation devient :

$$\vec{B}_0 = \mu_0\vec{H} \tag{12.7}$$

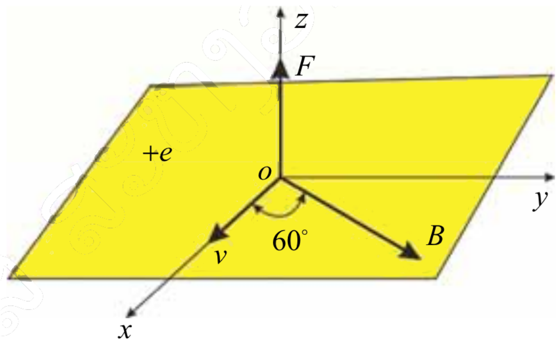
où le coefficient μ_0, appelé **perméabilité du vide** avec $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

Exercices

1. Expliquer le champ magnétique dans la nature
2. Un électron dans la télévision se déplace dans l'axe (ox) à une vitesse de 8×10^6 m/s. Si dans le plan (xoy), a une intensité du champ magnétique de 0.025 T, sa direction est 60° avec l'axe (ox). Déterminer la force appliquée sur l'électron.
3. Comparer l'intensitée de force réagit et de force gravitation d'un électron si sa masse est 9.11×10^{-31} kg.
4. Un cadre du fil carré de côté 5 cm, un champ magnétique d'intensité de 40×10^{-2} T passe la surface du cadre avec un angle 30°. Déterminer le flux magnétique qui passe cette surface.
5. Un fil de long 100 m, parcouru par un courant d'intensité 5 A et plaçons dans un champ magnétique, on constate qu'une force maximale applique sur le fil d'intensité 2×10^{-4} N. Déterminer son intensité du champ magnétique.

6. On envoie un électron dans la direction perpendiculaire du champ d'intensité de 10 T, à une vitesse de 3×10^7 m/s. Déterminer la force réagit sur l'électron et si on veut conserver la direction de déplacement de l'électron, quelle est l'intensité du champ doit-on appliquer et dans sens ?

7. Un proton se déplace à une vitesse 8×10^6 m/s sur l'axe (ox), vers un champ magnétique d'intensité 2.5 T, ce champ est placé dans le plan (xoy) et dans la direction de 60° avec l'axe (ox) (voir la figure ci-dessous). Déterminer
   a) la force applique sur le proton
   b) l'accélération du proton



Leçon 13 : Champ magnétique créé par un courant

1. Champ magnétique créé par un courant

L'effet magnétique du courant électrique fut découvert par Christian Œrsted. Une aiguille placée au voisinage immédiat d'un fil conducteur parcouru par un courant électrique subit une déviation.

Un mois après avoir pris connaissance des expériences d'Œrsted sur le magnétisme, les deux physiciens français Jean-Baptiste Biot et Félix Savart furent en mesure de déterminer une expression mathématique décrivant le module et l'orientation du champ magnétique $\vec{B}$ généré par un long fil rectiligne parcouru par un courant électrique I.

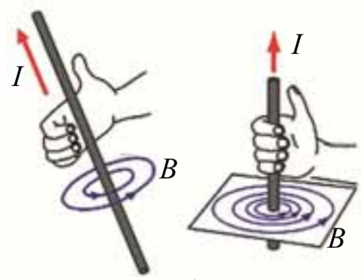


FIGURE 13.1 – Sens du champ magnétique selon la règle de la main droite

Les lignes de champ magnétique d'un courant électrique rectiligne sont des cercles ayant pour axe le fil transportant le courant. Le sens du champ magnétique peut être déterminé à l'aide de la règle de la main droite voir la figure 13.1

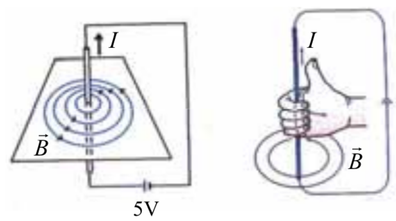
Le pouce est le sens du courant et les doigts sont le sens du champ magnétique.

Le sens et l'intensité du champ magnétique peut-être déterminer par la loi de Biot-Savart.

2. Champ magnétique créé par un courant circulant dans un fil rectiligne

Le module du champ magnétique $\vec{B}$ était proportionnel au courant électrique I et inversement proportionnel à la distance r entre le fil et l'endroit P où est évalué le champ magétique

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \tag{13.1}$$



Où B : Le champ magnétique en tesla (T)
I : Courant électrique en ampère (A)
r : Distance entre le point P et le fil en mètre (m)
μ_0 : Constante magnétique, $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

Exemple 1 : Un long fil rectiligne est parcouru par un courant de 2 A. Déterminer l'intensité du champ magnétique généré par ce fil à une distance de 5 cm.

Solution : Les données : $I = 2$ A, $r = 5$ cm. On utilise la relation :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \Rightarrow B = \frac{4\pi \times 10^{-7}(2)}{2\pi(5 \times 10^{-2})}$$
$$= \frac{4}{5} \times 10^{-5}$$
$$= 8 \times 10^{-6} T$$

Exemple 2 : Un long fil rectiligne est parcouru par un courant de 5 A. Déterminer l'intensité du champ magnétique généré par ce fil à une distance de 4 mm.

Solution : Les données : $I = 5$ A, $r = 4$ mm. On utilise la relation :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \Rightarrow B = \frac{4\pi \times 10^{-7}(5)}{2\pi(4 \times 10^{-3})}$$
$$= \frac{5}{2} \times 10^{-4}$$
$$= 2.5 \times 10^{-4} \text{ T}$$

3. Champ magnétique créé par un courant circulant dans un fil circulaire (ou bobine plate)

Si l'on courbe notre ligne de courant en forme d'un cercle, on peut définir l'orientation du champ magnétique à l'aide de la règle de la main droite.

Une bobine plate est constitué d'un fil conducteur enroulé de façon à former une bobine dont la longueur est petite par rapport à son rayon.

Une bobine plate parcouru par un courant électrique crée un champ magnétique dont la direction est l'axe de la bobine.

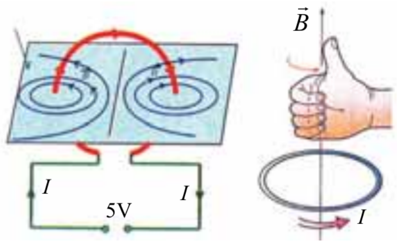


FIGURE 13.2 – Sens du champ magnétique créé par un conducteur circulaire parcourue par le courant

Le sens du champ magnétique peut être déterminé à l'aide de la règle de la main droite.
Le module du champ magnétique produit au centre d'une bobine plate parcourue par un courant I est défini à l'aide de l'équation suivante :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r} \tag{13.2}$$

Si l'on étudie le champ magnétique dans un plan perpendiculaire à la spire, on retrouve la situation de deux courants parallèles de sens contraire.

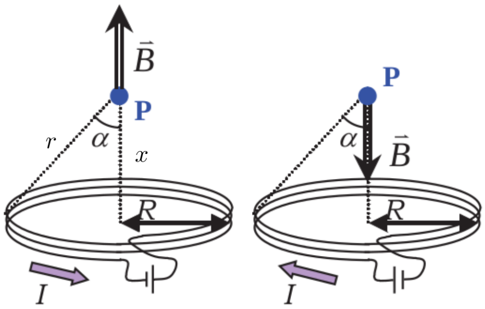
Si une bobine plate comporte de N spires identiques, le module du champ magnétique est calculé par :

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2r} \Leftrightarrow B = (2\pi \times 10^{-7})\frac{NI}{r} \tag{13.3}$$

Champ magnétique sur l'axe central d'une bobine :
Le module du champ magnétique B généré le long d'un axe passant par le central de la bobine et étant perpendiculaire au plan de la bobine dépend du courant I circulant dans la bobine, du nombre de spires N, du rayon R de la bobine et de

la distance x entre le point P où le champ magnétique est évalué et le centre de la bobine exprimée sous la forme d'un angle α :

$$B_P = N\frac{\mu_0 I}{2R}\sin^3\alpha \tag{13.4}$$



Comme $\sin\alpha = \frac{R}{r}$ et $r = \sqrt{x^2+R^2}$, on a :

$$B_P = N\frac{\mu_0 I}{2R}\sin^3\alpha \Leftrightarrow B_P = \frac{\mu_0 NIR^2}{2(x^2+R^2)^{3/2}} \tag{13.5}$$

Exemple 3 : Une bobine comporte de 10 spires de diamètre 150 cm et est parcourue par un courant d'intensité de 2.5 A. Déterminer l'intensité du champ magnétique

a) au centre de la bobine;
b) au point P de 35 cm du centre de la bobine.

Solution : Les données : $R = \frac{d}{2} = \frac{150}{2} = 75$ cm, $I = 2.5$ A, $N = 10$ et $x = 25$ cm.

a) on utilise la relation : $B = (2\pi\times10^{-7})\frac{NI}{r}$, on a : $B = (2\pi\times10^{-7})\frac{10(2.5)}{0.75} = 2\times10^{-5}$ T
b) on utilise la relation : $B_P = \frac{\mu_0 INR^2}{2(x^2+R^2)^{3/2}}$, on a :

$$\begin{aligned}
B_P &= \frac{(4\pi\times10^{-7})(2.5)(10)(0.75)^2}{2(0.25^2+0.75^2)^{3/2}} \\
&= \frac{2\pi\times10^{-7}(25)(0.75)^2}{(0.625)^{3/2}} \\
&= \frac{5\pi\times10^{-10}(75)^2}{0.494} \\
&= 1.78\times10^{-5}\text{ T}
\end{aligned}$$

4. Champ magnétique créé par une bobine longue (ou solénoïde)

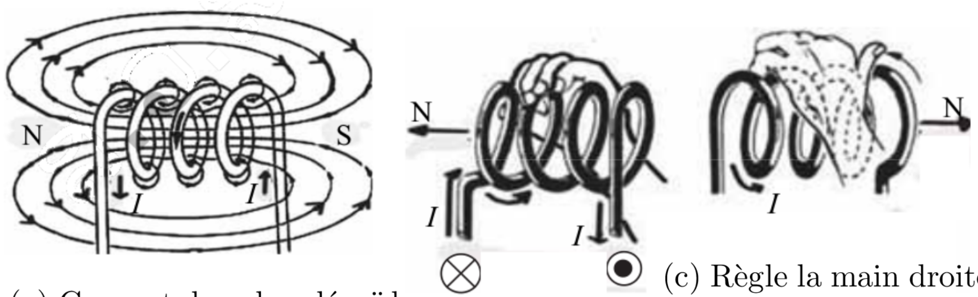
Dès que l'épaisseur d'une bobine n'est plus faible devant le rayon des spires cette bobine est dite longue. Il n'est plus possible de considérer les spires confondues : le champ magnétique en un point M de l'axe sera obtenu en additionnant tous les champs créés par les spires identiques mais décalées les unes par rapport aux autres sur leur axe commun.

Un solénoïde est une bobine longue constituée d'un fil conducteur enroulé sur un cylindre isolant. La bobine comporte alors N spires identiques, jointives, réparties régulièrement sur une longueur l. Le nombre de spires par unité de longueur s'écrit :

$$n = \frac{N}{l}$$

L'intensité du champ magnétique (ou le spectre magnétique) à l'extérieur du solénoïde a la même allure que celui d'un aimant droit. À l'intérieur du solénoïde et suffisamment loin des extrémités, les lignes de champ sont parallèles à l'axe du solénoïde. L'orientation des aiguilles aimantées s'inverse lorsque nous changeons le sens du courant.

Un solénoïde parcouru par un courant électrique crée un champ magnétique uniforme et de même direction que l'axe du solénoïde. Le sens du champ magnétique peut être déterminé à l'aide de la règle de la main droite.



(a) Courant dans le solénoïde

(b) Règle la main gauche

(c) Règle la main droite

FIGURE 13.3 – Sens du courant et sens du champ magnétique dans le solénoïde. $\odot$ Le sens du courant est dirigé vers l'avant du plan ; $\otimes$ Le sens du courant est dirigé vers l'arrière du plan.

L'intensité du champ magnétique B au centre d'une bobine longue de N spires identiques, de longueur l parcourue par un courant I vaut :

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I \quad \Leftrightarrow \quad B = \mu_0 n I \tag{13.6}$$

Exemple 4 : Une bobine de longueur 35 cm, comportant 350 spires identiques et parcourue par un courant d'intensité 0.5 A. Déterminer l'intensité du champ magnétique à l'intérieure de la bobine.

Solution : Les données : $l = 35$ cm, $N = 350$, $I = 0.5$ A, $B = ?$ On utilise la relation :

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 \frac{N}{l} I \\ &= (4\pi \times 10^{-7})(\frac{350}{0.35})0.5 \\ &= 6.28 \times 10^{-4} \text{ T} \end{aligned}$$

Exemple 5 : Une bobine de longueur 50 cm, parcourue par un courant d'intensité 150 mA et lorsqu'on utilise le magnétomètre, il indique l'intensité du champ magnétique de 2.5×10^{-3} T. Déterminer le nombre de spires de la bobine.

Solution : Les données : $l = 50$ cm $= 0.5$ m, $I = 150$ mA $= 0.15$ A, $B = 2.5 \times 10^{-3}$ T, déterminer N.
Selon la relation : $B = \mu_0 \frac{N}{l} I \Rightarrow N = \frac{Bl}{\mu_0 I}$

$$\begin{aligned} N &= \frac{Bl}{\mu_0 I} \\ &= \frac{2.5 \times 10^{-3}(0.5)}{4\pi \times 10^{-7}(0.15)} \\ &= \frac{2.5(0.5)}{4\pi \times 10^{-4}(0.15)} \\ &= 6631 \text{ Spires} \end{aligned}$$

Exercices

1. Un long fil rectiligne est parcouru par un courant de 5 A. Déterminer l'intensité du champ magnétique généré par ce fil à une distance de 10 cm.
2. Un long fil rectiligne crée un champ magnétique d'intensité 5 μT à un point M distance du fil 25 cm. Déterminer l'intensité du courant qui parcourt le fil.
3. Plaçons deux fils conducteurs en parallèles et la distance entre deux fils est 8 cm, les intensités du courant circulant dans des fils sont respectivement 10 A et 20 A. Déterminer le module du champ magnétique généré par deux fils au milieu des deux fils.
4. Une bobine de rayon 60 cm, comporte de 150 spires identiques, parcourue par un courant d'intensité 10 A. Déterminer le module du champ magnétique au centre de la bobine.
5. Un solénoïde de longueur 1 m, constitue de 400 spires identiques, a un rayon moyen de 3 cm, parcourue par un courant d'intensité 5 A. Déterminer
   a) le module du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde
   b) le module du flux magnétique circulant à l'intérieur du solénoïde
6. Une bobine de longueur 45 cm, comporte de 2500 spires identiques crée un champ magnétique d'intensité de 5 T. Déterminer l'intensité du courant circulant dans la bobine.

Leçon 14 : Force magnétique exercée sur le fil

1. Aimant induite

Lorsqu'un morceau de fer (ou nickel) est placé dans un champ magnétique, il s'aimante ; ses dipôles magnétiques s'orientent sous l'influence du champ et produisent un induction magnétique importante B_1. L'induction magnétique en un point de l'espace résulte maintenant de l'induction magnétique B_0 qui existe sans le fer (ou le nickel) et de l'induction magnétique B_1 produite par le fer. Le plus souvent l'induction magnétique due au fer est tellement grande par rapport à B_0 que cette dernière peut-être négligée. L'aimant du fer placé dans un champ magnétique est dite « **aimant induite** ».

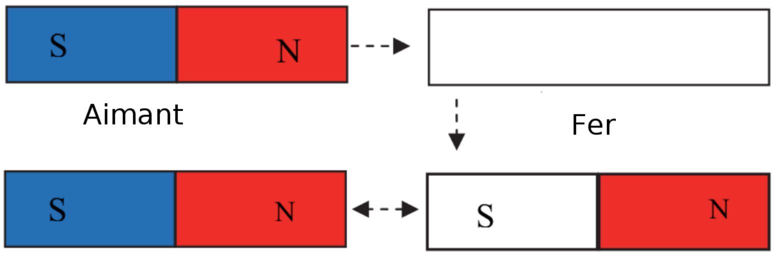


FIGURE 14.1 – Aimant induite du fer (ou nickel)

Aux extrémités du morceau de fer, l'aimentation induite a créé des pôles nord (N) et sud (S). À l'extérieur du fer ce sont ces pôles qui créent l'induction magnétique B_1 et modifient la distribution des lignes de champ. À l'intérieur du fer l'induction magnétique résulte du champ magnétique H_0 produit par la source de champ, de l'aimantation qui existerait si le noyau était infiniment long (donc, pas de pôles) et du champ démagnétisant produit par les pôles.

Les pôles N et S apparus aux extrémités du noyau produissent à l'intérieur de celui-ci un champ H_d de champ opposé au champ H_0 dû à la source de champ. Ce champ est appelé « **champ démagnétisant** », il contribue à diminuer l'induction magnétique que l'on obtiendrait à l'interieur du fer si les pôles étaient infiniment éloignés pour un aimant très long, si induction magnétique au centre est B, l'induction magnétique au voisinage des faces n'est que $\frac{B}{2}$.

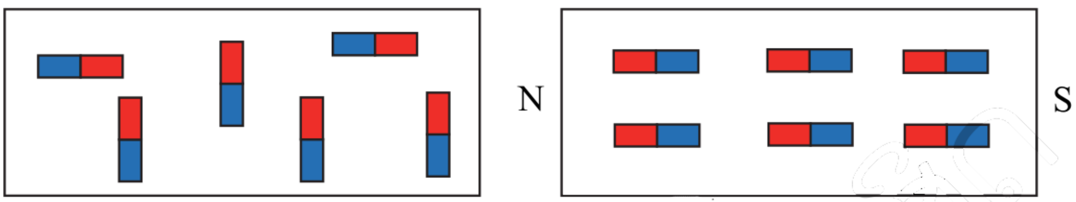


FIGURE 14.2 – Morceau de fer (ou nickel) avant et après placé dans un champ magnétique

Mais ces effets ne sont pas observables avec le cuivre, l'aluminium ou l'argent, ... parce que ces matériaux sont non magnétiques.

2. La force sur un conducteur parcouru par un courant

Si l'on place un fil dans un champ magnétique, il n'est soumis à aucune force. Lorsque le fil est parcouru par un courant, les électrons acquièrent une faible vitesse de dérive v et sont donc soumis à une force magnétique qui est ensuite transmise au fil (on a déjà étudié ce phénomène dans la leçon 12, ce qu'on appelle **force Lorentz**, et sa expression est : $F = qvB\sin\theta$)

Considérons un segment rectiligne de fil de longueur l et de section A parcouru par un courant I perpendiculaire à un champ magnétique uniforme. Si n est le nombre d'électrons de conduction par unité de volume, le nombre de charges dans ce segment de fil est nAl. Chaque électron est soumis à une force qdB et la force totale exercée sur les électrons dans ce segment est :

$$F = (nAl)qvB \tag{14.1}$$

L'après l'équation $I = nAqv$ et l'expression précédente devient :

$$F = IlB \tag{14.2}$$

Si le conducteur parcouru par un courant n'est pas perpendiculaire au champ, la force exercée sur le fil est donnée par l'expression vectorielle :

$$\vec{F} = I\vec{l} \wedge \vec{B} \tag{14.3}$$

où le vecteur $\vec{l}$ est par définition de même sens que le courant (la force dans l'équation (14.3) est appelée **force de Laplace**). Comme le montre la figure 14.3, la force est toujours normale au fil et aux lignes de champ. L'intensité de la force est :

$$F = IlB\sin\theta \tag{14.4}$$

où θ est l'angle entre le vecteur $\vec{l}$ et le champ $\vec{B}$.

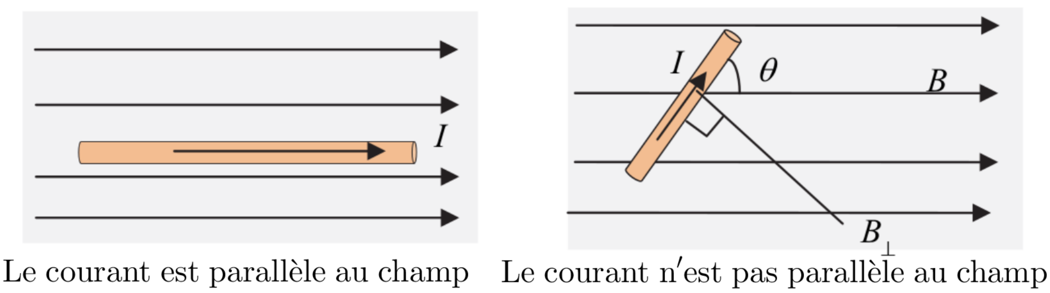


FIGURE 14.3 – Courant parallèle et non parallèle au champ

Dans cas où le courant est parallèle au champ magnétique

$$\theta = 0;\ \sin\theta = 0; \Rightarrow F = 0$$

La direction de la force électromagnétique $\vec{F}$ est perpendiculaire à $\vec{l}$ et à $\vec{B}$, son sens peut-être déterminé à l'aide de la règle de la main droite voir la figure 14.4 : le pouce est le sens du courant I, l'index est le sens du champ magnétique $\vec{B}$ et le majeur est le sens de la force $\vec{F}$.
Ou à l'aide de la règle de la main gauche voir la figure 14.5 : le pouce est le sens de la force $\vec{F}$, l'index est le sens du courant I et le majeur est le sens du champ magnétique $\vec{B}$.

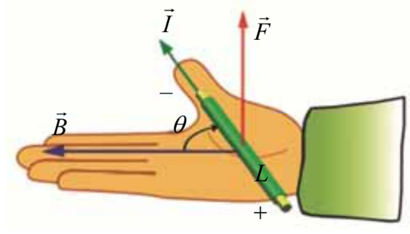


FIGURE 14.4 – Règle de la main droite

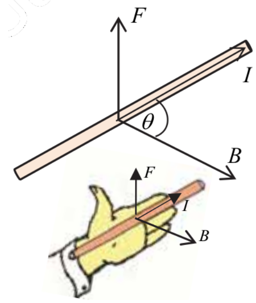


FIGURE 14.5 – Règle de la main gauche

Exemple 1 : Un morceau du fil conducteur a une longueur de 25 cm, parcourue par un courant d'intensité de 2 A et place dans un champ magnétique de module 2 T dans une direction de 30° du champ. Déterminer la force magnétique réagit sur le fil.

Solution : Les données : $l = 25$ cm, $I = 2$ A, $B = 2$ T et $\theta = 30°$, déterminer l'intensité de la force magnétique $F = ?$ En appliquant la relation :

$$\begin{aligned} F &= IlB\sin\theta \\ &= 0.25(2)(2)\sin 30° \\ &= 0.5(2)(0.5) \\ &= 0.5 \text{ N} \end{aligned}$$

Exemple 2 : Un fil conducteur rectiligne de long 45 cm, place dans un champ magnétique d'intensité 10 T dans une direction de 45° du champ, lorsque le fil est parcourue par un courant, il réagit par une force d'intensitée de 7 N. Déterminer l'intensité du courant dans le fil.

Solution : Les données : $l = 45$ cm, $B = 10$ T, $F = 7$ N et $\theta = 45°$. Déterminer $I = ?$ En appliquant la relation

$$\begin{aligned} F = IlB\sin\theta \Rightarrow I &= \frac{F}{lB\sin\theta} \\ &= \frac{7}{0.45(10)(\sin 45°)} \\ &= \frac{7}{4.5(\frac{\sqrt{2}}{2})} \\ &= 2.2 \text{ A} \end{aligned}$$

3. Quelques application des électroaimants

Lorsqu'on place une charge dans un champs magnétique, l'expérience nous montre que si cette charge est immobile alors qu'il y a aucune force réagir sur la charge. Si la charge est en mouvement alors qu'il y a une force magétique réagir sur la charge. L'intensité de la force est importante (maximale) si la direction du mouvement est perpendiculaire à direction du champs magnétique, au contraire, elle est minimale si les direction du mouvement et du champ magnétqiue sont parallèles.

Dans un fil conducteur constitue de plusieurs électrons, plaçons dans un champ magnétique, lorsque le fil est parcouru par un courant, les électrons sont en mouvement et sont soumis à une force magnétique qui est transmise au fil. Dans le cas où le fil est une bobine, quand la bobine est parcourue par un courant, la force électromagnétique applique sur la bobine entraine à la bobine tour autour d'un axe fixe, c'est le principe géneéral d'un moteurélectrique : ce principe est appliqué dans une ventilateur, moteur d'un train, un aspirateur, ...
En général, un électroaimant est un aimant pour lequel le champ magnétique est produit à partir d'un courant électrique. La manière la plus simple de réaliser un électroaimant est d'enrouler un fil conducteur autour d'un matériau ferromagnétique et l'alimenter. Ainsi le champ magnétique créé par le courant circulant dans le bobinage est porté par le cœur magnétique.

L'électroaimant fait souvent partie d'un ensemble électrique (moteur électrique, générateur, radio, télévision, magnétophone, magnétoscope, disque dur, microscope électronique, machines diverses).

Dans la reproduction sonore, l'électroaimant est le moteur des haut-parleurs : une membrane est mise en mouvement par une bobine plongée dans le champ magnétique d'un aimant permanent. La membrane vibre au rythme du signal alimentant la bobine.

Si l'on veut utiliser un solénoïde comme aimant, on introduit souvent un « noyau en fer doux » à l'intérieur du solénoïde pour amplifier le champ magnétique. On choisit le fer doux, car celui-ci n'est plus aimanté lorsque le courant dans la bobine (solénoïde) est coupé. Cette initiative peut amplifier jusqu'à 5000 fois le champ initial.
Avec cette amplification, on peut construire des électro-aimants capables d'attirer le fer lorsque le courant circule dans la bobine et ces électroaimants sont désactivés presque instantanément dès l'arrêt du courant électrique.

4. Force applique sur les fils conducteurs en parallèles

Soient deux conducteurs infiniment longs parcourus par des courants de même sens I_1 et I_2. Appelons A et B les points où ces fils traversent au plan P qui leur est perpendiculaire avec $r = AB$.

Lorsque deux fils rectilignes parallèles sont parcourus par des courants continus (de même sens ou de sens contraires), ils exercent l'un sur l'autre des forces d'attraction ou de répulsion. Ainsi, si les fils 1 et 2 sont parcourus respectivement par des courants de même sens et d'intensité I_1 et I_2, on a la situation suivante :

Le fil 1, parcouru par un courant d'intensité I_1, engendre dans l'espace un champ magnétique. On appelle $\vec{B}_1$ le champ magnétique au point B du fil 2. Puisque ce dernier est parcouru par un courant d'intensité I_2, il est soumis à une force $\vec{F}_1$ (loi de Laplace) telle que $\vec{F}_1 = I_2\vec{L} \wedge \vec{B}_1$ (où L est la longueur du conducteur 2 placée dans le champ magnétique dû au passage du courant dans le conducteur 1).

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} \Rightarrow F_1 = \frac{\mu_0 I_2 I_1 L}{2\pi r} \tag{14.5}$$

Le fil 2, parcouru par un courant d'intensité I_2, engendre dans l'espace un champ magnétique. On appelle $\vec{B}_2$ le champ magnétique au point A du fil 1. Puisque ce dernier est parcouru par un courant d'intensité I_1, il est soumis à une force $\vec{F}_2$ telle que $\vec{F}_2 = I_1\vec{L} \wedge \vec{B}_2$ (où L est la longueur du conducteur 1 placée dans le champ magnétique dû au passage du courant dans le conducteur 2). Les forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ attirent les conducteurs l'un vers l'autre.

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r} \Rightarrow F_2 = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi r} \tag{14.6}$$

Et on constate que le module de la force est la même : $F_1 = F_2$ et que les forces sont de sens contraires et attractives voir la figure 14.6 (à gauche). Leur module commun s'écrit :

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi r} \tag{14.7}$$

Si les courants sont de sens contraires, dans ce cas, les forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ ont même module et sont répulsives voir la figure 14.6 (à droite).

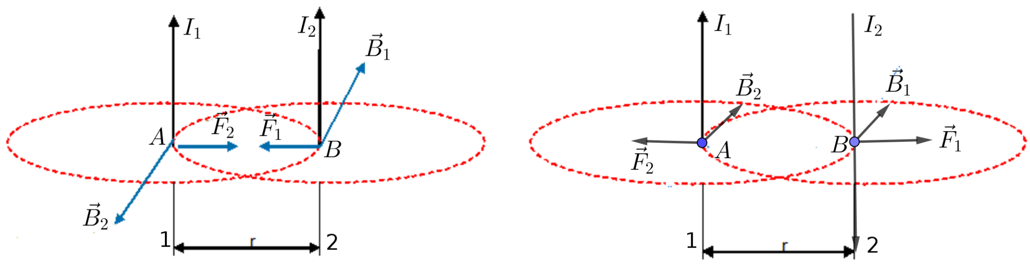


FIGURE 14.6 – Forces entre courants parallèles

Exemple 3 : Si deux fils de conducteurs rectilignes parallèles ont la même longueurs 60 cm, sont parcourues par des courants de même intensités 20 A mais de sens contraires, et ces deux fils placent à une distance de 4 cm. Déterminer la force magnétique réagit d'un sur l'autre fil et quels sont leur sens des forces ?

Solution : Les données : $L = 60$ cm, $I_1 = I_2 = 20$ A, $r = 4$ cm et $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m. Déterminer $F = ?$ On utilise la relation :

$$\begin{aligned} F &= \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi r} \\ &= \frac{4\pi \times 10^{-7}(20)(20)(0.6)}{2\pi(0.04)} \\ &= 1.2 \times 10^{-3} \text{ N} \end{aligned}$$

Donc, les forces ont même module mais de sens contraires (elles sont répulsives).

Exemple 4 : Si deux fils de conducteurs rectilignes parallèles ont la même longueurs 20 cm, placent à une distance de 3 cm, elles sont attractives par une force commune de 20 N. Déterminer l'intensité du courant parcourue de chaque fil.

Solution : Les données : $L = 20$ cm, $r = 3$ cm, $F = 20$ N, Déterminer $I_1 = ?$ et

$I_2 = ?$ On utilise la relation :

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi r} \Rightarrow F_1 = F_2$$

$$20 = \frac{4\pi \times 10^{-7} I_1 I_2 (0.2)}{2\pi(0.03)} \Rightarrow I_1 I_2 = 15 \times 10^6 \text{ A}$$

Si $I_1 = I_2 \Rightarrow I = \sqrt{15 \times 10^6} = 3872$ A.

Exercices

1. Quelle est la force Lorentz ?
2. Donner la règle de la main gauche pour déterminer la force Lorentz.
3. Soient deux fils de conducteurs, si l'intensité du courant du fil 1 est trois fois plus petite que l'intensité du courant qui passe dans le fil 2. Quelle est la relation d'intensité de force réagit sur le fil 1 (F_1) et sur le fil 2 (F_2) ?

   $\square$ $F_1 = 3F_2$ $\square$ $F_1 = F_2$ $\square$ $F_1 = \frac{F_2}{3}$

4. Un fil de conducteur de longueur 5 m, parcourue par un courant d'intensité 20 A, et place dans un champ magnétique de module 0.8 T à une direction de 30° avec le sens du champ magnétique. Déterminer la force magnétique réagir sur le fil.
5. Un fil de conducteur parcouru par un courant d'intensité 20 A, et place dans un champ magnétique d'intensité de 5 T à une direction de 30° avec le sens du champ magnétique. Si la force magétique réagit sur le fil est 0.5 N, déterminer la longueur du fil.
6. Si deux fils de conducteurs rectilignes parallèles ont la même longueurs 60 cm, placent à une distance de 30 cm, elles sont attractives par une force commune de 200 N. Déterminer l'intensité du courant parcourue de chaque fil.
7. Si deux fils de conducteurs rectilignes parallèles ont la même longueurs 100 cm, sont parcourues par des courants de même intensités 10 A mais de sens contraires, et ces deux fils placent à une distance de 5 cm. Déterminer la force magnétique réagit sur chaque fils.

Leçon 15 : Induction électromagnétique

1. La loi de Faraday

En 1831, le physicien et chimiste anglais Michael Faraday a découvert expérimentalement le phénomène de l'induction électromagnétique. Il réalisa qu'une variation du flux magnétique dans le temps, évaluez sur une surface A induit une électromotrice (ce phénomène est observé aussi par le physicien américain Joseph Henry).

L'expérience de Faraday est indiquée sur la figure 15.1 ci-dessous, cette expérience pour étudier l'intensité de la force électromotrice induite qui crée par la variation du flux magnétique traversant la surface d'une bobine.

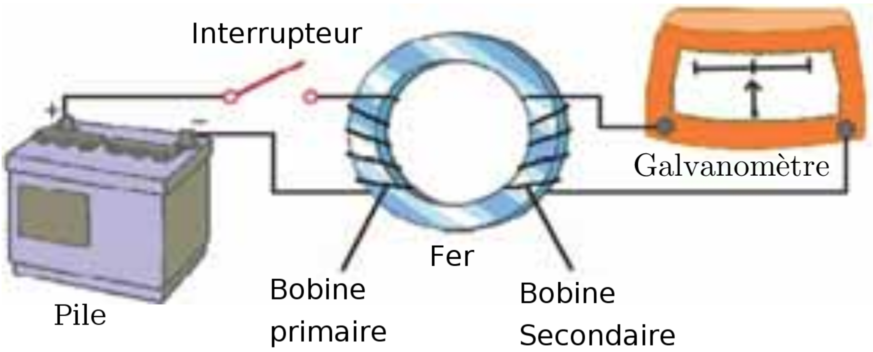


FIGURE 15.1 – Schéma d'expérience de Faraday

La force électromotrice induite dans un circuit fermé est proportionnelle au taux de variation du flux du champ magnétique traversant la surface délimitée par le circuit par rapport au temps

$$e = |\frac{d\Phi_B}{dt}| \tag{15.1}$$

où Φ_B est le flux magnétique sur la surface délimité par le circuit fermé et exprime en (Wb). Si une bobine a une surface A, place dans un champ magnétique $\vec{B}$, le flux magnétique est calculé par

$$\Phi_B = \int \vec{B}d\vec{A} \tag{15.2}$$

lorsque $d\vec{A}$ est un vecteur perpendiculaire à une section, sa intensité est dA. Si le champ magnétique est perpendiculaire à la section :

$$\Phi_B = \int BdA\cos 0 = B\int dA = BA \tag{15.3}$$

Si la boucle est remplacée par une bobine de N spires, la force électromotrice induite est :

$$e = |N\frac{d\Phi_B}{dt}| \tag{15.4}$$

Le flux magnétique Φ_B varie en fonction de

1) l'aire de la surface et le sens du plan (A) varie ;

2) l'intensité ou la direction du champ magnétique à travers ce circuit varie ;

Lorqu'un flux magnétique qui circule dans une bobine est varié, on obtient un potentiel induite, ce potentiel induite est obtenu en approchant ou en éloignant un aimant d'une boucle de fil.

Quand on approche l'aimant avec le pôle nord en premier, il y a un courant dans un sens voir figure 15.2 (a). Si on éloigne l'aimant, le courant dans la bobine est dans l'autre sens voir figure 15.2 (b). Si on approche la bobine en fixant l'aimant (ou si on approche l'aimant avec le pôle sud en premier), le courant sera inversé par rapport aux courants de ces figures. Le courant obtenu par approché ou éloigné de l'aimant à une bobine est appelé **courant induite**.

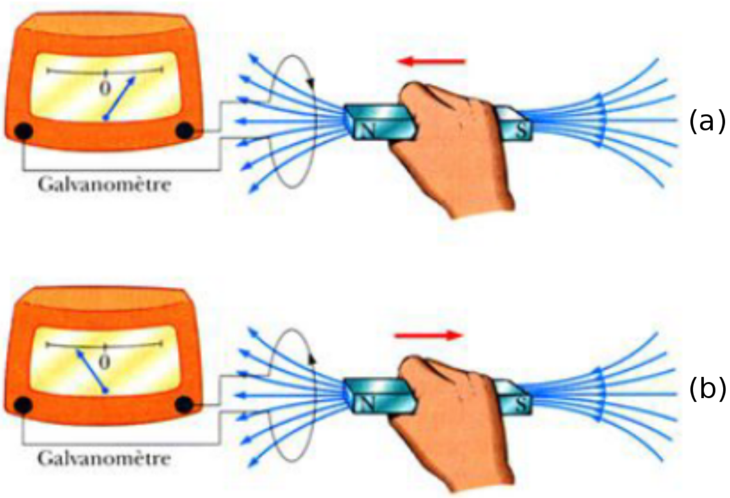
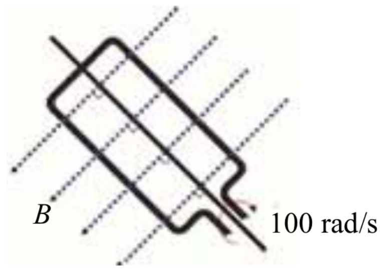


FIGURE 15.2 – Variation du courant lorsqu'on varie le sens du champ magnétique

Exemple 1 : Une bobine rectangulaire de dimension (5 cm × 10 cm), comporte de 10 spires identiques tourne autour l'axe central à une vitesse angulaire 100 rad/s, si la résistance de la bobine est 50 Ω et le champ magnétique d'intensité de 0.02 T perpendiculaire à l'axe central. Déterminer



a) l'intensité maximale du courant dans la bobine
b) l'angle de rotation de la bobine quand l'intensité du courant est maximale.

Solution : Les données : l'aire de la surface $A = 5 \times 10^{-3}$ m^2, $\omega = 100$ rad/s, $B = 0.02$ T, $R = 50\ \Omega$ et $N = 10$.
Soit θ l'angle du champ magnétique et le plan $\vec{A}$, le flux magnétique :

$$\begin{aligned}\Phi_B &= \int Bd\vec{A} \\ &= BA\cos\theta\end{aligned}$$

le flux passe une bobine de N spires

$$\Phi_B = NBA\cos\theta$$

Comme

$$\begin{aligned} e &= \frac{d\Phi_B}{dt} \\ &= NBA\sin\theta\frac{d\theta}{dt} \\ &= NBA\omega\sin\theta \end{aligned}$$

et $\omega = \frac{d\theta}{dt}$. Donc, l'intensité du courant dans la bobine est :

$$\begin{aligned} I &= \frac{e}{R} \\ &= \frac{NBA\omega\sin\theta}{R} \end{aligned}$$

a) Le courant est maximal si $\sin\theta = 1$ donc, l'intensité maximale du courant est :

$$\begin{aligned} I &= \frac{NBA\omega}{R} \\ &= \frac{10(0.02)(5\times10^{-3})(100)}{50} \\ &= 2\times10^{-3}\text{ A} \end{aligned}$$

b) L'intensité du courant $I = \frac{NBA\omega\sin\theta}{R}$ est maximale si $\sin\theta = 1 \Rightarrow \theta = \frac{\pi}{2}$, signifie que le plan $\vec{A}$ et le champ magnétique $\vec{B}$ sont parallèles.

2. La loi de Lenz

En 1834, le physicien allemand Heinrich Lenz énonce la règle suivante dictant l'orientation du courant induit par la variation temporelle du champ magnétique : Le courant induit dans un cadre est tel que le champ magnétique induit généré par ce courant dans la région à l'intérieur du cadre s'oppose à la variation du flux magnétique (champ magnétique qui traverse une surface) externe qui travers le cadre.

Lorsque la surface fermée est délimité par un circuit électrique fermé, l'électromotance induite affect l'électromotrice totale du circuit ce qui modifie la circulation des courants électriques. C'est la loi de Lenz (1834) qui déterminera le sens de l'électromotrice induite

$$e = -\frac{d\Phi_B}{dt} \tag{15.5}$$

Si la boucle est remplacée par une bobine de N spires identiques, la force électromotrice induite est :

$$e = -N\frac{d\Phi_B}{dt} \tag{15.6}$$

Le signe (-) dans l'expression de e signifie que le champ magnétique induit associé au courant induit est dans la direction opposée du champ magnétique extérieur.

Supposons qu'on approche un aimant (pôle nord en premier) d'un anneau métallique tel qu'illustré sur l'image. Dans ce cas, le flux dans la boucle augmente et le champ qui fait le flux est vers la droite.

La loi de Lenz nous dit que si le flux augmente, le courant induit va faire un champ magnétique induit dans le sens contraire du champ qui fait le flux. Comme le champ qui fait le flux dans l'anneau est vers la droite, le champ induit est vers la gauche. Ainsi, pour que le champ soit vers la gauche, il faut que le courant soit dans la direction indiquée sur la figure 15.3 (a).

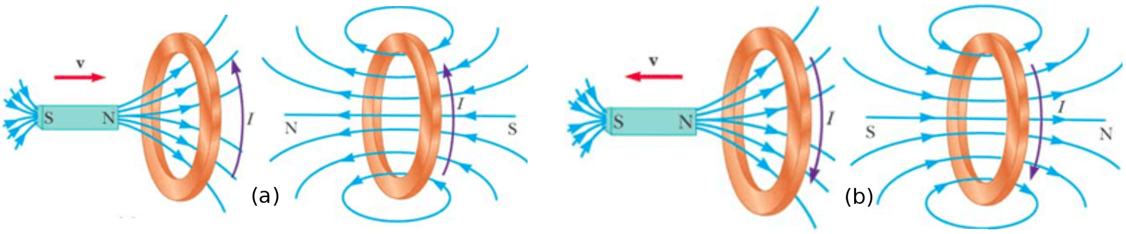


FIGURE 15.3 – Le sens du courant induite

Si on éloigne l'aimant, le flux diminue et le champ est toujours vers la droite. La loi de Lenz nous dit que si le flux diminue, le courant induit va faire un champ magnétique induit dans le même sens que le champ qui fait le flux. Comme le champ qui fait le flux dans l'anneau est vers la droite, le champ induit est vers la droite. Ainsi, pour que le champ soit vers la droite, il faut que le courant soit dans la direction indiquée sur la figure 15.3 (b).

Si on reprend le cas de l'aimant qui approche de l'anneau, on se rend compte qu'il doit avoir une force entre l'anneau et l'aimant parce que l'anneau parcouru par un courant agit comme un aimant. On remarque alors qu'il y a une force de répulsion entre l'anneau et l'aimant. Si l'aimant s'éloigne de l'anneau, le courant est dans l'autre sens et les pôles de l'anneau sont inversés.

Exemple 2 : Une bobine carré de côté 20 cm, constitue de 200 spires identiques, si un champ magnétique augmente de 1.25 T à 1.75 T durant 0.5 s dans une direction perpendiculaire à la surface de la bobine.

a) Quelle est l'intensité du potentiel induite (ou de force électromotrice induite) ?

b) Si le circuit a une résistance de 2 Ω, quelle est l'intensité du courant dans la bobine ?

Solution : Les données : $l = 20$ cm, $N = 200$, $B_1 = 1.25$ T, $B_2 = 1.75$ T, $\Delta t = 0.5$ s et $R = 2\ \Omega$. Calculer $e =?$ et $I =?$

a) En utilisant la loi de Lenz

$$\begin{aligned} e &= N\left|\frac{d\Phi_B}{dt}\right| \\ &= N\left|\frac{(\Delta B)A}{\Delta t}\right| \\ &= 200\left(\frac{(1.75-1.25)(0.2^2)}{0.5}\right) \\ &= 8 \text{ V} \end{aligned}$$

b) l'intensité du courant dans la bobine est :

$$\begin{aligned} I &= \frac{e}{R} \\ &= \frac{8}{2} \\ &= 4 \text{ A} \end{aligned}$$

3. Force électromotrice induite

On peut se demander si on a affaire à un nouveau phénomène ou si on peut expliquer l'induction électromagnétique à partir de ce qu'on sait déjà. S'il y a un courant, c'est qu'il y a une force qui met les charges en mouvements et il n'y a que des façons de faire une force sur une charge : avec un champ électrique ou avec un champ magnétique.

Le déplacement de la tige fait en sorte que les charges dans la tige se déplacent dans le champ magnétique. Il y aura alors une force sur les électrons libres de la tige. La figure 15.4 vous montre la direction de la force sur les électrons sur une tige se déplaçant vers la droite dans un champ magnétique qui entre dans la page. Les électrons s'accumulent dans le bas de la tige alors qu'il y aura un manque d'électrons dans le haut de la tige. Or, cette séparation de charge amène la formation d'un champ électrique dans la tige allant de haut en bas. Ce champ va donc exercer une force vers le haut sur les électrons.

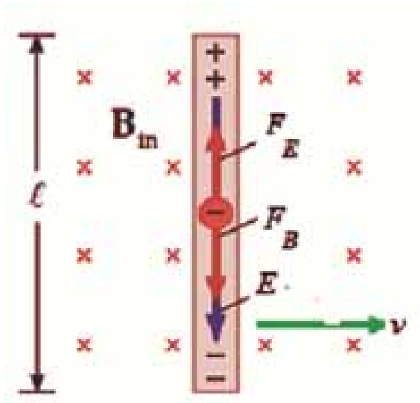


FIGURE 15.4 – Force électromotrice dans un conducteur

On atteindra l'équilibre quand cette force électrique vers le haut sera égale à la force magnétique vers le bas. On aura alors :

$$\begin{aligned} F_e &= F_m \\ qE &= qvB \\ E &= vB \end{aligned} \tag{15.7}$$

La différence de potentiel d'un côté à l'autre de la tige est donc

$$\Delta V = U = El = vBl \tag{15.8}$$

Ce qui nous donne la différence de potentiel dans un conducteur en mouvement dans un champ magnétique

$$e = vBl \tag{15.9}$$

où la longueur l est mesurée dans la direction perpendiculaire à v et B.

Or ce résultat est exactement le même que celui obtenu avec la tige en mouvement sur les rails en prenant la formule de l'induction. Construisons le montage portant le nom de générateur linéaire :

Un générateur linéaire est constitué d'un rail conducteur en forme de U couché qui comporte un résisteur de résistance R dans sa partie centrale, et d'une tige conductrice dont les extrémités glissent sur les côtés parallèles du U, qui sont à une distance l l'un de l'autre. Des aimant génèrent un champ magnétique uniforme de module B qui entre dans le plan du schéma. Un expérimentateur agrippe la tige et lui imprime une vitesse constante (orientée vers la droite sur le schéma) de module v. On peut déterminer la force électromotrice induite, figure 15.5.

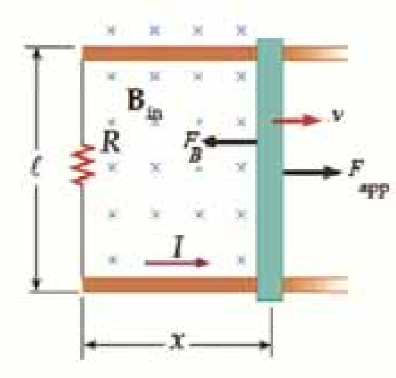


FIGURE 15.5 – Tige conductrice se déplace sur un rail, crée un potentiel électrique

Ici, le cadre conducteur est composé de la tige et de la portion du U qui se trouve à sa gauche : comme la tige se déplace, l'aire du cadre varie. Afin de pouvoir calculer le flux magnétique qui traverse le cadre, nous avons défini un paramètre x qui repésente la largeur du cadre. Par conséquent, l'aire du cadre est

$$A = lx$$

Le champ magnétique est perpendiculaire au plan du circuit. Ainsi,

$$\Phi_B = BA = Blx \tag{15.10}$$

Donc, la force électromotrice induite dans le cadre, d'après la loi de Faraday,

$$\begin{aligned} e &= \frac{d\Phi}{dt} \\ &= \frac{d}{dt}(Blx) \end{aligned}$$

Comme B et l sont constantes, on peut les mettre en évidence devant la dérivée ce qui donne

$$e = Bl\frac{dx}{dt}$$

Or $\frac{dx}{dt}$ correspond à la vitesse v de la tige. Ainsi, on peut écrire

$$e = Blv \tag{15.11}$$

Exemple 3 : Un solénoïde comporte de 100 spires, de section 4 cm^2, se déplace d'une position initialement pas de champ magnétique vers un champ magnétique d'intensité 0.5 T dans la dircetion de l'axe central du solénoïde, durant 0.02 s. Déterminer la force électromotrice induite du solénoïde.

Solution : Les données : $N = 100$, $A = 4\text{ cm}^2 = 4 \times 10^{-4}\text{ m}^2$, $B_1 = 0\ T$, $B_2 = 0.5\ T$, $\Delta t = 0.02$ s. $e = ?$

On utilise la relation $e = N\frac{d\Phi_B}{dt}$ avec $d\Phi_B = \Phi_2 - \Phi_1$, où $\Phi_1 = 0$, $\Phi_2 = BA$. Donc, on écrit

$$\begin{aligned} e &= N\frac{\Phi_2}{dt} \\ &= N\frac{BA}{\Delta t} \\ &= 100\left(\frac{0.5(4\times 10^{-4})}{0.02}\right) \\ &= 1 \text{ V} \end{aligned}$$

Donc, la force électromotrice induite dans le solénoïde est 1 V.

4. Les courants de Foucault

On appelle courants de Foucault les courants électriques créés dans une masse conductrice, soit par la variation au cours du temps d'un champ magnétique extérieur traversant ce milieu (le flux du champ à travers le milieu), soit par un déplacement de cette masse dans un champ magnétique constant. Ils sont une conséquence de l'induction magnétique (ce phénomène a été découvert par le physicien français Léon Foucault en 1851).

Le champ magnétique variable au cours du temps est responsable de l'apparition d'une force électromotrice à l'intérieur du milieu conducteur. Cette force électromotrice induit des courants dans la masse. Ces courants ont deux effets :

- ils provoquent un échauffement par effet Joule de la masse conductrice ;
- ils créent un champ magnétique qui s'oppose à la cause de la variation du champ extérieur (loi de Lenz).

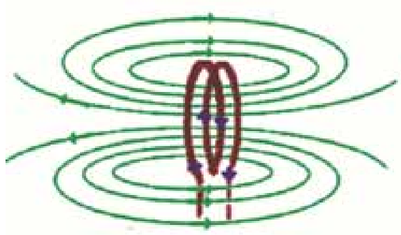
Lorsque la variation de flux est due à un déplacement du milieu devant un champ magnétique constant, les courants de Foucault sont responsables de l'apparition de forces de Laplace qui s'opposent au déplacement, d'où l'effet de freinage observé sur les systèmes utilisant ce genre de dispositif.

Le chauffage par induction est produit par les courants de Foucault induits dans la pièce à chauffer. Ce type de chauffage est donc réservé aux matériaux conducteurs d'électricité. Il est par exemple utilisé dans les plaques de cuisson à induction, et également en métallurgie avec les fours à induction qui peuvent chauffer les lingots de métal jusqu'à leurs température de fusion. On utilise les courants de Foucault pour comptabiliser la consommation électrique dans les anciens compteurs ; afficher la vitesse d'un véhicule grâce à un aimant relié à la sortie de la boite de vitesses, ...

Les courants de Foucault sont responsables d'une partie des pertes (dites pertes par courants de Foucault) dans les circuits magnétiques des machines électriques alternatives et des transformateurs. C'est la raison pour laquelle les circuits magnétiques sont constitués de tôles feuilletées afin de limiter ces courants et les pertes par effet Joule qui en découlent, ce qui améliore le rendement global des transformateurs.

5. Phénomène d'auto-induction

Lorsqu'un courant variable circule dans un circuit comportant une bobine, il crée un champ magnétique variable, le module du champ magnétique est proportionnel à l'intensité I du courant qui parcourt dans la bobine. Cette variation s'accompagne de la production d'une force électromotrice induite appelée force électromotrice d'auto-induction.



Le flux magnétique propre Φ_B embrassé par une bobine est proportionnel à l'intensité I du courant qui parcourt cette bobine.

$$\Phi_B = LI \tag{15.12}$$

où L est le coefficient d'auto-induction, exprimé en Henry (H). Il ne dépend que des propriétés géométriques du circuit. (1 H=1 WA ; 1mH $= 10^{-3}$ H ; 1μH $=$ 10^{-6} H)

6. Force électromotrice d'auto-induction

Un solénoïde comporte de N spires identiques, a une longueur l et la surface d'une spire est A, le volume est $V = Al$ et le nombre de spire par unité de longueur : $n = \frac{N}{l}$, le coefficient d'auto-induction d'un solénoïde est

$$L = N\frac{\Phi_B}{I} \tag{15.13}$$

où

$$\Phi_B = BA, \quad B = \frac{\mu_0 NI}{l}$$

on obtient :

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l} = \mu_0 n^2 A l = \mu_0 n^2 V \tag{15.14}$$

Le coefficient d'auto-induction peut varier en fonction de constante magnétique μ.

6.1. Force électromotrice d'auto-induction

La force électromotrice d'auto-induction e est proportionnelle à la dérivée de l'intensité du courant dans le circuit. Ainsi :

$$e = -N\frac{d\Phi_B}{dt} \tag{15.15}$$

ou

$$e = -L\frac{dI}{dt} \tag{15.16}$$

Le signe moins traduit la loi de Lenz (l'opposition du courant induit à la variation de courant). Si le courant diminue, on verra donc apparaître une force électromotrice induite positive engendrant un courant induit qui va s'opposer à la décroissance du courant dans le circuit.

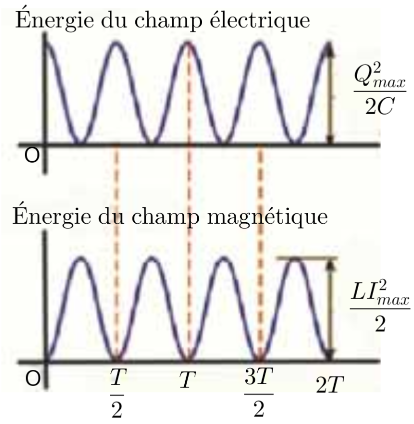
Une bobine est constituée de fil conducteur donc elle constitue une résistance. Cette résistance est important dans un circuit électrique internatif, parce que la force électromotrice varie tout le temps.

6.2. L'énergie magnétique des circuits

Lorsqu'une bobine est traversée par un courant I, elle emmagasine de l'énergie. L'énergie emmagasinée est donnée par la relation :

$$W = \frac{1}{2}LI^2 \tag{15.17}$$

En comparant l'énergie magnétique des circuits et l'énergie du champ électrique en fonction du temps et on constate que l'énergie du champ magnétique et l'énergie du champ électrique sont internatifs d'un de l'autre.



Exemple 4 : Un solénoïde comporte de 400 spires identiques, parcourue par un courant d'intensité 4 A, crée un flux magnétique d'intensité 10^{-4} Wb. Déterminer

a) la force électromotrice induite dans le solénoïde durant 0.08 s ;

b) le coefficient d'auto-induite du solénoïde ;

c) l'énergie emmagasinée dans le solénoïde.

Solution : Les données : $N = 400$, $I = 4$ A, $\Phi_B = 10^{-4}$ Wb et $\Delta t = 0.08$ s. Déterminer $e = ?$, $L = ?$, $W = ?$

a) On utilise la relation

$$\begin{aligned} e &= |-N\frac{d\Phi_B}{dt}| \\ &= 400(\frac{10^{-4}}{0.08}) \\ &= 0.5 \text{ V} \end{aligned}$$

b) D'après la relation

$$\begin{aligned} e = |-L\frac{dI}{dt}| \Rightarrow L &= \frac{edt}{dI} \\ L &= \frac{e\Delta t}{\Delta I} \\ &= \frac{0.5(0.08)}{4-0} \\ &= 0.01 \text{ H} \end{aligned}$$

c) En utilisant la relation

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2}LI^2 \\ &= \frac{1}{2}(0.01)(4^2) \\ &= 0.08 \text{ J} \end{aligned}$$

Exercices

1. Un solénoïde comporte de 1000 spires, a une surface 4 cm^2, se déplace dans un champ magnétique d'intensité 0.5 T. Déterminer la force électromotrice induite, si le courant diminue pendant 0.1 s.
2. Un solénoïde de rayon 2.5 cm, comporte de 400 spires et a une longueur de 20 cm.
   a) Déterminer le coefficient d'auto-induite du solénoïde ;
   b) Quelle est la variation du courant pour que la force électromotrice induite soit 75 mV ;
   c) Si la force électromotrice induite est 75 mV. Déterminer la variation du flux magnétique traverse la surface du solénoïde.
3. Un solénoïde de rayon 3 cm, comporte de 50 spires, place dans la direction perpendiculaire à un champ magnétique qui varie de 0.1 T à 0.35 T durant 2×10^{-3} s. Déterminer la force électromotrice induite du solénoïde.
4. Un courant électrique de 2 A circule dans un solénoïde de 40 spires, le flux magnétique d'intensité 10^{-4} Wb travers la surface du solénoïde. Déterminer
   a) la force électromotrice induite du solénoïde, si le courant diminue à 0 A durant 0.08 s.
   b) le coefficient d'auto-induition du solénoïde et l'énergie ammagasiée dans le solénoïde.