

CHAPITRE XI : Le magnétisme

Les physiciens n'ont découvert qu'au 19^{ème} siècle le lien qui existe entre le magnétisme et l'électricité. Pourtant le magnétisme était connu depuis fort longtemps. Son observation remonte aux anciennes civilisations d'Asie mineure : comme le rapporte Thalès de Milet dès 600 avant J.C., certaines roches¹, provenant de Magnésie (aujourd'hui Manisa, près d'Izmir), en Asie mineure (Anatolie actuelle), ont la propriété surprenante de pouvoir agir à distance sur des matériaux contenant du fer, d'où l'origine du nom donné à ce phénomène, le magnétisme.

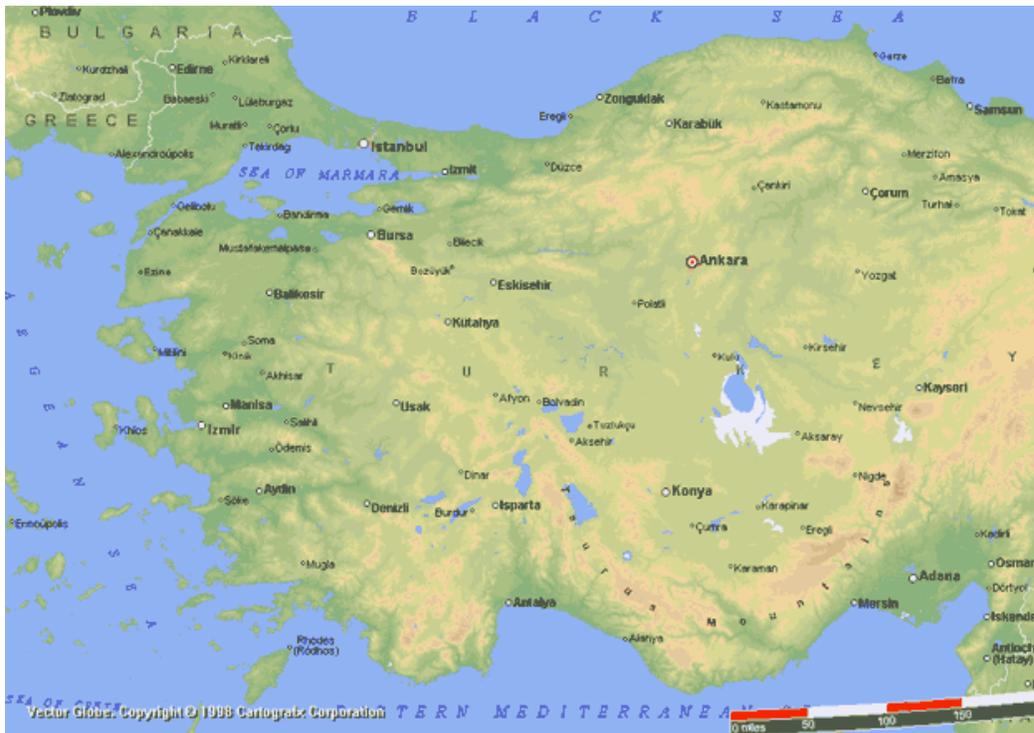


Figure.
Localisation
de Manisa
(Magnésie
dans
l'Antiquité),
à proximité
d'Izmir, sur
la côte
occidentale
de
l'Anatolie,
face à la Mer
Egée.

Dès le XI^{ème} siècle, les marins chinois utilisaient des aimants naturels comme boussoles pour s'orienter. Lorsqu'on déplace une aiguille aimantée autour d'une pierre magnétisée sphérique, cette aiguille dessine des lignes de forces qui convergent en deux points diamétralement opposés de la pierre, comme les lignes de longitude de la terre (voir figure XI.1). Cette observation, faite en 1269 par Pierre de Maricourt, l'a conduit à appeler ces deux régions d'un aimant des pôles magnétiques. Lorsqu'une aiguille aimantée est suspendue, libre de s'orienter, l'une de ses

¹ Il est instructif de réaliser que les roches originaires de Magnésie contiennent aussi bien du carbonate de magnésium et de l'oxyde de magnésium que de l'oxyde de fer Fe_3O_4 (la "magnétite")! Le terme « magnésie » est en principe réservé à l'oxyde de magnésium, même si certains milieux sportifs utilisent ce terme pour désigner le carbonate de magnésium.

extrémités pointe approximativement vers le pôle nord géographique de la terre, c'est pourquoi cette extrémité, est appelée pôle nord de l'aiguille, l'autre extrémité étant appelée pôle sud.



Figure. Cristaux octaédriques de magnétite montrant des faces striées.

Crédit:

<http://www.groupes.polymtl.ca/glq1100/mineraux/magnetite/>

magnetite.html

PierreBedard.ca

Cette observation fit suggérer à William Gilbert, en 1600, que la terre est elle-même un gigantesque aimant. Le pôle nord d'un aimant attire le pôle sud d'un autre aimant. C'est donc un pôle magnétique sud qui se trouve situé près du pôle nord géographique de la terre (voir figure XI.2).

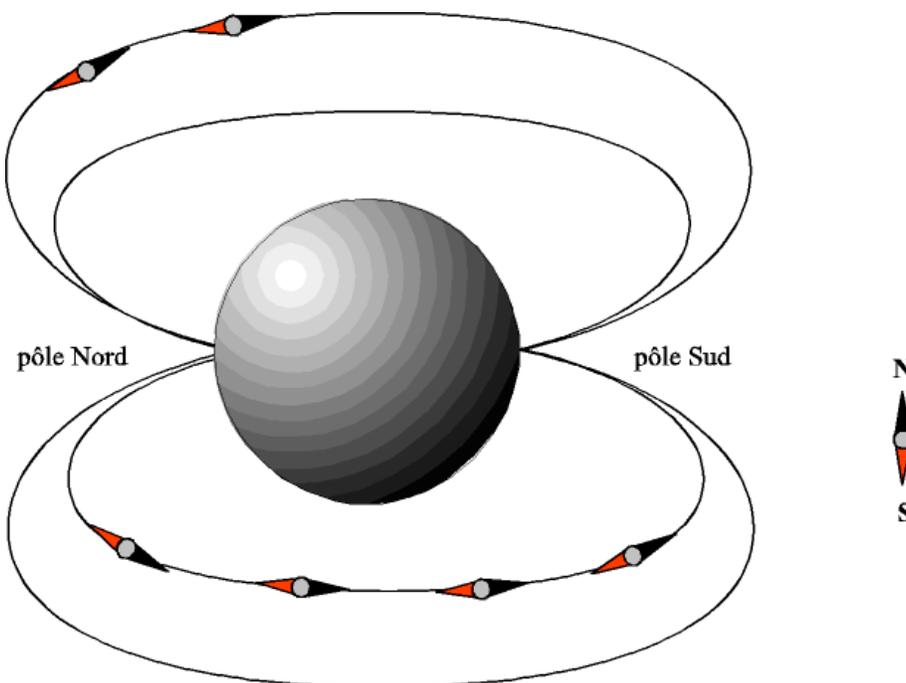


Figure XI.1.

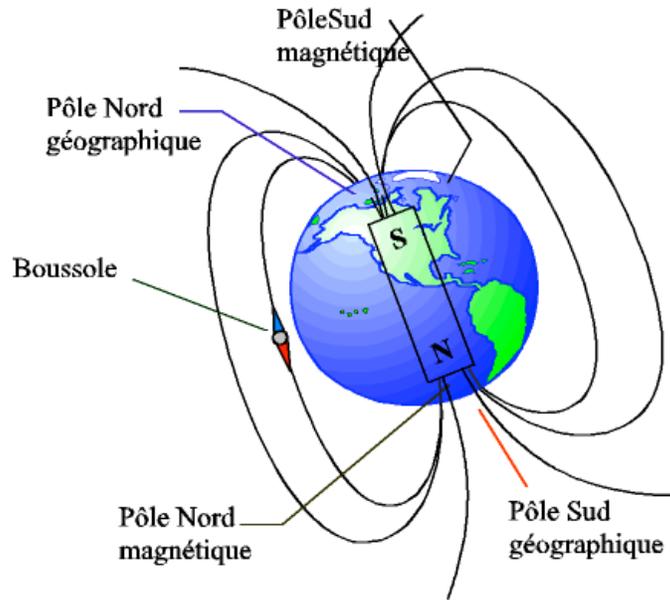


Figure XI.2.

XI.1 : Le champ magnétique

Deux aimants rapprochés exercent une force l'un sur l'autre, sans même avoir à se toucher. Cette force est répulsive entre pôles de même nom, attractive entre un pôle nord et un pôle sud (voir figure XI.3).

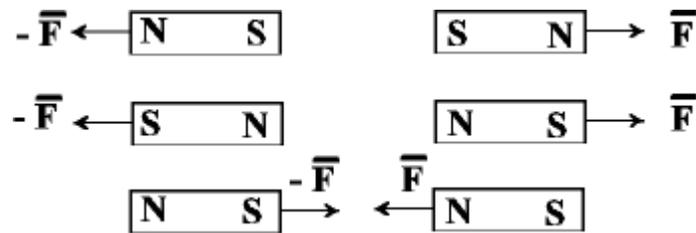


Figure XI.3.

Bien qu'il semble y avoir une certaine analogie avec la force électrique discutée au chapitre IV, il s'agit de quelque chose de différent : **un aimant n'exerce aucune attraction sur un morceau d'isolant électrisé**. Seuls le fer et dans une moindre mesure, le cobalt, le nickel, le gadolinium et le néodyme peuvent montrer des propriétés magnétiques significatives. On qualifie ces matériaux de ferromagnétiques. D'autre part, il n'est pas possible d'isoler un monopôle magnétique : si l'on

brise une barre aimantée en deux, on ne séparera jamais le pôle nord et le pôle sud magnétique ; au contraire, il se reforme **deux** barres aimantées !



Au voisinage d'un barreau aimanté, la limaille de fer forme une configuration caractéristique (voir figure XI.4) qui montre l'influence de l'aimant sur le milieu environnant. C'est à partir de l'observation de ces configurations que Michael Faraday a eu l'idée d'appliquer la notion de champ au magnétisme, comme il l'avait fait pour l'électricité : les aimants produisent dans l'espace environnant un champ magnétique \vec{B} . Il est alors possible de décrire la force qu'un aimant exerce sur un autre par l'interaction qui existe entre lui et le champ magnétique de l'autre aimant. Toutefois, le champ magnétique est un peu plus difficile à définir. Dans cette section nous nous contenterons de définir sa direction et son sens. Sa direction est celle prise par l'aiguille aimantée de la boussole au point considéré. Le sens est celui qu'indique le pôle nord de l'aiguille aimantée. Nous définirons son intensité à la section XI.3.

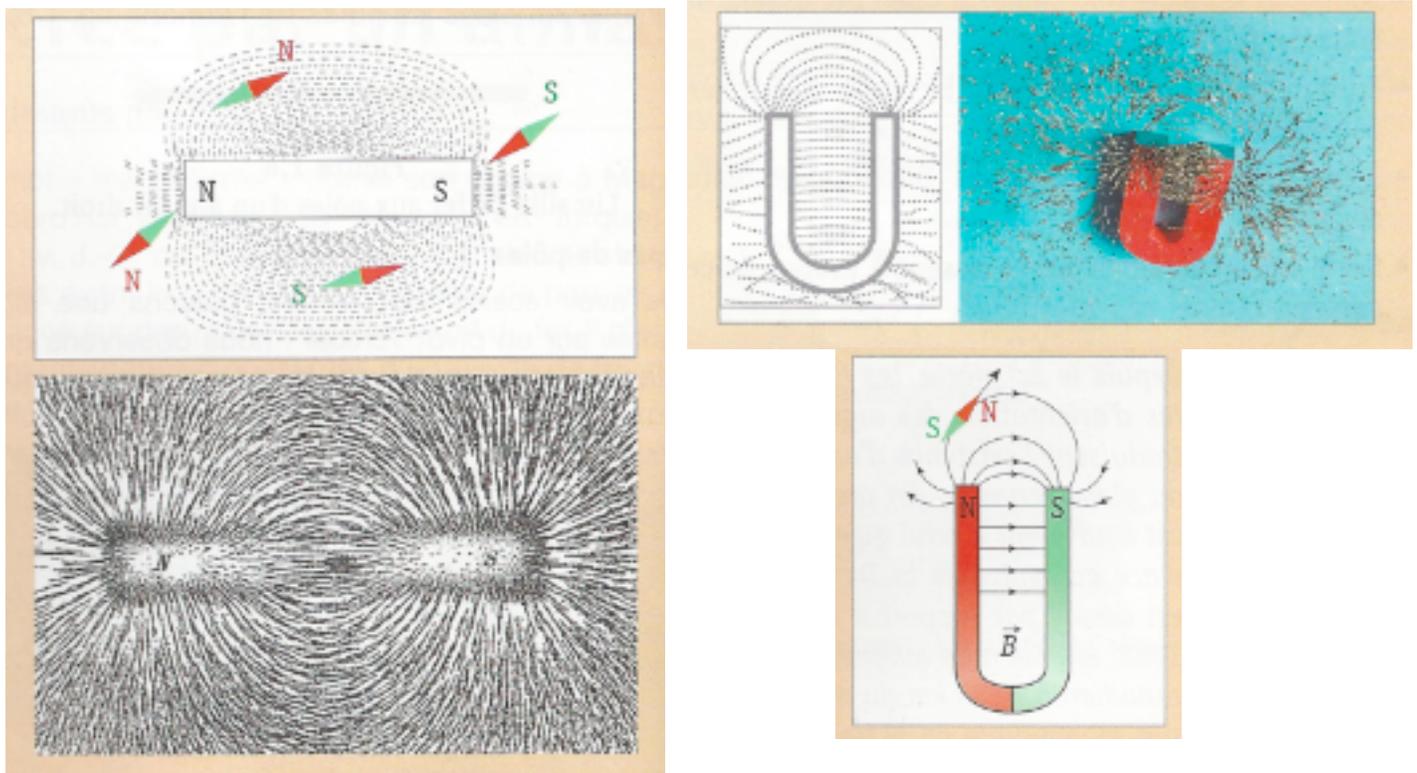


Figure XI.4.

XI.2 : La production d'un champ magnétique par un courant

Au cours du XVIII^{ème} siècle, un grand nombre de physiciens ont cherché à établir un lien entre électricité et magnétisme, mais ce n'est qu'en 1820 que Hans Christian Oersted s'est aperçu qu'une aiguille aimantée placée à proximité d'un fil électrique parcouru par un courant est déviée. A proximité d'un segment de fil rectiligne, l'aiguille se place de façon à être tangente à une circonférence tracée autour de lui, dans un plan perpendiculaire (voir figure XI.5.a).

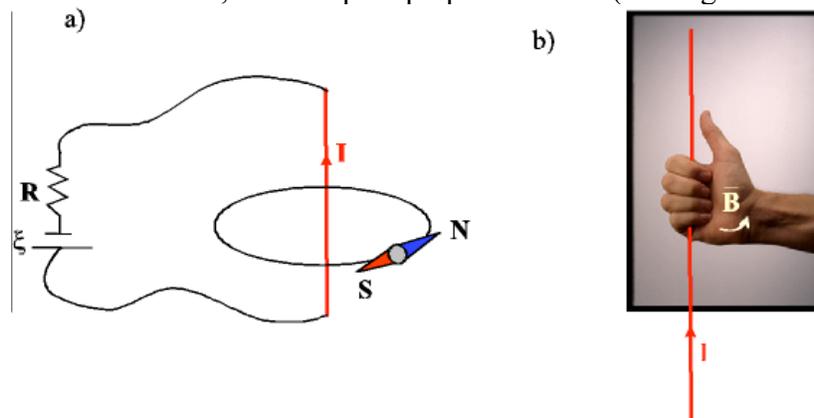


Figure XI.5.

Ceci veut dire que le courant qui circule dans le fil, produit un champ magnétique dans l'espace qui l'entoure, tout comme un aimant, et que ce champ magnétique a la direction de l'aiguille aimantée. Pour se souvenir du sens de \mathbf{B} , on applique la règle de la main droite : on prend le fil dans sa main droite, pouce pointé dans le sens du courant conventionnel, les doigts entourent alors le fil, dans le sens du champ magnétique (voir figure XI.5.b).

XI.3 : La force magnétique s'exerçant sur un courant

Nous venons de voir qu'un courant électrique peut faire dévier un aimant. Il exerce donc une force sur celui-ci. En vertu du principe de l'action et de la réaction, on s'attend à ce qu'un aimant exerce en retour une force égale et opposée sur le fil porteur de courant. C'est exactement ce qu'on peut observer. Supposons qu'un fil rectiligne passe entre les pôles d'un aimant, comme le montre la figure XI.6. Lorsqu'il est parcouru par un courant, il subit une force qui agit à angle droit par rapport à la direction du champ magnétique et par rapport à celle du courant. Si on inverse le sens du courant ou si on inverse les pôles de l'aimant, la force change de sens.

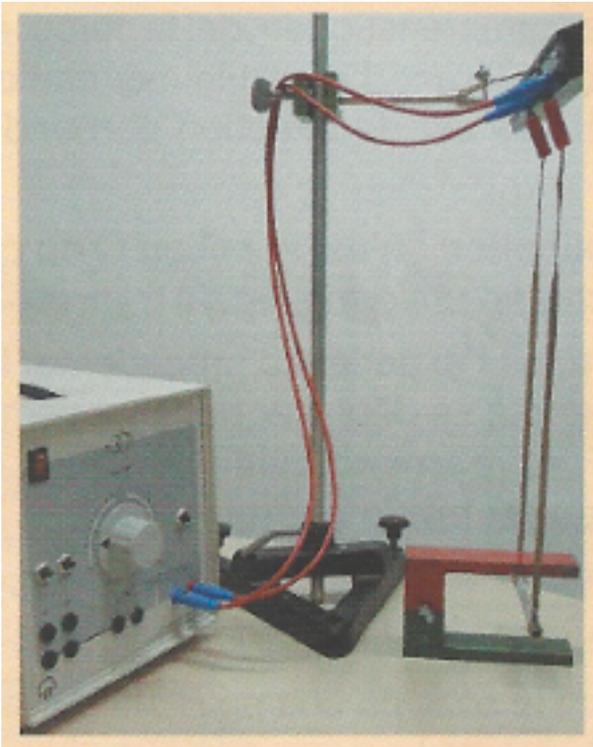
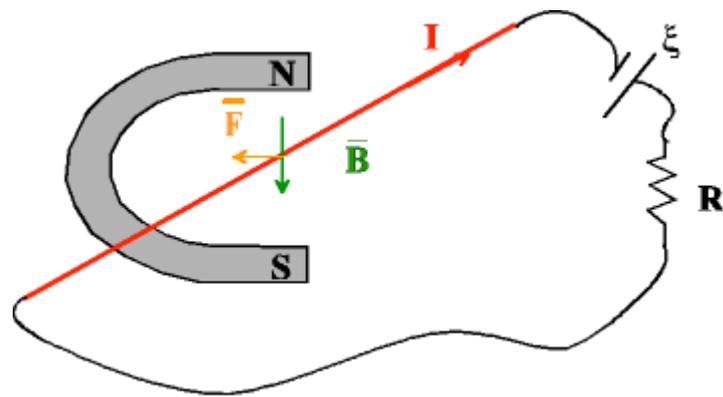


Figure XI.6.

Pour se rappeler le sens de cette force magnétique, on utilise la règle de la main droite illustrée sur la figure XI.7.

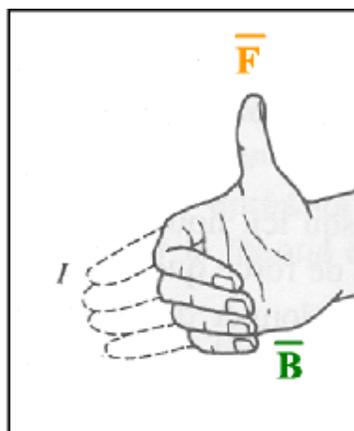


Figure XI.7.

On oriente d'abord son avant-bras le long du fil conducteur, les doigts dépliés pointant dans le sens conventionnel du courant. Ensuite on fait tourner le bras sur lui-même jusqu'à ce que les doigts, repliés cette fois, pointent dans la direction du champ magnétique. Le pouce tendu indique alors le sens de la force.

Des expériences ont montré que l'intensité de la force ci-dessus est proportionnelle à l'intensité du courant qui parcourt le fil, à la longueur L de celui-ci, située dans le champ magnétique supposé uniforme. Si le fil fait un angle θ avec le champ magnétique (voir figure XI.8), l'intensité de la force est proportionnelle au sinus de cet angle :

$$F \propto I L \sin \theta.$$

Il va de soi que la force doit également dépendre du champ magnétique B et croître avec celui-ci :

$$F = f(B) I L \sin \theta.$$

En fait on se sert de la relation ci-dessus pour définir l'intensité du champ magnétique que nous n'avons pas encore définie, en posant $f(B) \equiv B$. Dès lors :

$$B \equiv \frac{F}{I L \sin \theta} \quad (\text{XI.1})$$

L'unité SI de champ magnétique est le tesla (T). D'après la relation (XI.1), on voit que $1 \text{ T} \equiv 1 \text{ (N.s)/(C.m)}$. Il existe une autre unité d'intensité pour le champ magnétique, à savoir le Gauss, représentant $100 \mu\text{T} = 10^{-4} \text{ T}$. Le Gauss ne fait pas partie du système d'unités internationales S.I. Il fut introduit car l'ordre de grandeur qu'il représente est celui de l'intensité du champ magnétique terrestre, soit $70 \mu\text{T}$ ou 0.7 Gauss mesuré au pôle magnétique terrestre.

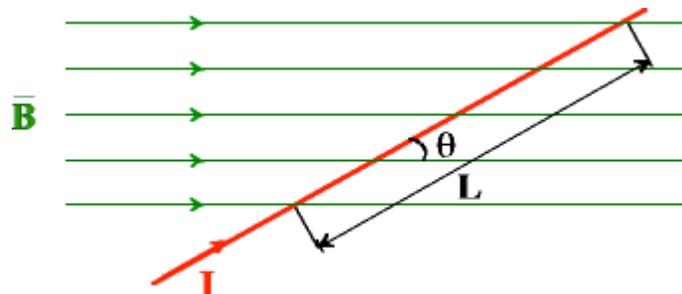


Figure XI.8.

Rappelons que le produit vectoriel de deux vecteurs \vec{A} et \vec{B} , faisant entre eux un angle θ , a pour norme :

$$|\vec{A} \times \vec{B}| = AB \sin \theta \tag{XI.2}$$

Dès lors si on définit un vecteur \vec{L} qui a pour norme L et a le sens du courant I , la norme du produit vectoriel de \vec{L} par \vec{B} , vaut (voir XI.1) :

$$|\vec{L} \times \vec{B}| = LB \sin \theta = \frac{F}{I},$$

ce qui donne :

$$\mathbf{F} = I |\vec{L} \times \vec{B}|.$$

Dès lors le vecteur force magnétique peut s'écrire :

$\vec{F} = I \vec{L} \times \vec{B}$, pour un courant rectiligne et un champ uniforme	(XI.3)
--	--------

En utilisant les règles du produit vectoriel, on vérifie aisément que le deuxième membre de la relation (XI.3) donne bien un vecteur force qui satisfait à la règle de la main droite illustrée sur la figure XI.7.

Lorsque le champ magnétique n'est pas uniforme ou lorsque le fil n'est pas rectiligne, il faut faire appel au calcul différentiel pour calculer la force magnétique qui s'exerce sur ce dernier. La force infinitésimale \overline{dF} qui agit sur un segment de fil infinitésimal \overline{dl} , parcouru par un courant I et plongé dans un champ magnétique \vec{B} est donné, d'après (XI.3), par :

$\overline{dF} = I \overline{dl} \times \vec{B}$	(XI.4)
--	--------

La force totale s'exerçant sur le fil, \vec{F} , est donnée par l'intégrale des forces infinitésimales \overline{dF} :

$$\vec{F} = \int \overline{dF} \tag{XI.5}$$

le long du fil

XI.4 : Application au galvanomètre et au moteur électrique

Le galvanomètre (voir section IX.4) et le moteur électrique fonctionnent tous deux grâce aux forces magnétiques qui s'exercent sur une boucle de courant plongée dans un champ magnétique, c'est pourquoi nous allons tout d'abord calculer celles-ci.

XI.4.1 : Les forces agissant sur une boucle de courant

Considérons une boucle de courant rectangulaire, de côtés a et b , parcourue par un courant I , placée de telle sorte à pouvoir pivoter autour d'un axe vertical passant par son centre (voir figure XI.9).

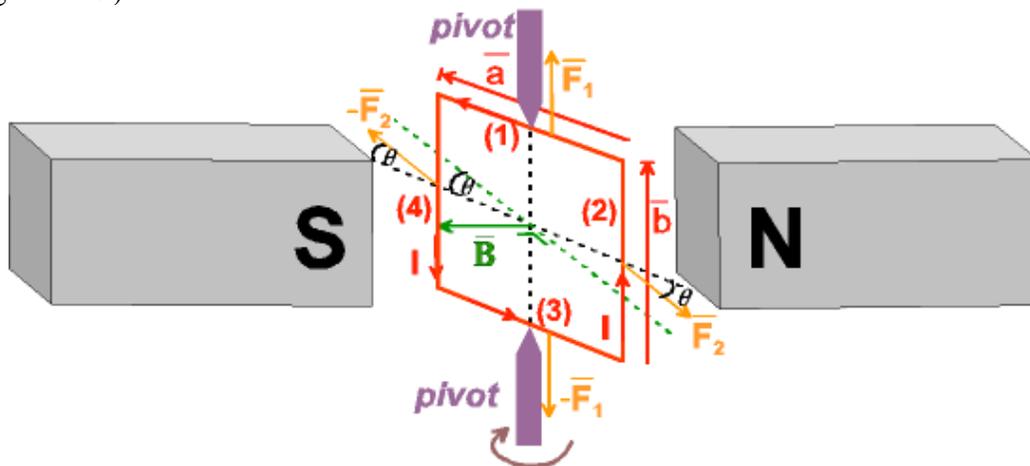


Figure XI.9.

Elle est plongée dans le champ magnétique \vec{B} d'un aimant, horizontal, de droite à gauche sur la figure XI.9. Supposons qu'au lieu d'être parallèle aux faces de l'aimant, c'est-à-dire perpendiculaire au champ magnétique, la boucle ait tourné d'un angle θ par rapport à cette position de référence. Calculons la force magnétique qui s'exerce sur chacun des côtés de la boucle, à l'aide de la relation (XI.3) :

côté 1 :	$\vec{F}_1 = I \vec{a} \times \vec{B}$	\vec{a} : de droite à gauche (sens du courant)
côté 2 :	$\vec{F}_2 = I \vec{b} \times \vec{B}$	\vec{b} : de bas en haut (sens du courant)
côté 3 :	$\vec{F}_3 = I (-\vec{a}) \times \vec{B} = -\vec{F}_1$	
côté 4 :	$\vec{F}_4 = I (-\vec{b}) \times \vec{B} = -\vec{F}_2$	

Les vecteurs \vec{F}_1 et \vec{F}_3 sont tous deux verticaux, de même intensité $[I a B \sin (90 - \theta)]$, de sens opposé, et sont situés dans le plan de la boucle ; leurs effets s'annulent mutuellement. Les vecteurs \vec{F}_2 et \vec{F}_4 , aussi égaux et opposés, font un angle θ avec le plan de la boucle car ils sont perpendiculaires à \vec{B} : \vec{F}_2 tire le côté droit de la boucle vers l'avant, \vec{F}_4 tire le côté gauche de la boucle vers l'arrière. Ces deux forces forment ce qu'on appelle un couple ou un moment de force et font tourner la boucle autour des pivots. L'intensité des deux forces qui font tourner la boucle est :

$$F_2 = I b B, \text{ car } \vec{B} \perp \vec{b} \tag{XI.6}$$

\vec{F}_2 tire sur la boucle à un angle θ ; l'effet est donc maximum lorsque la boucle est parallèle au champ magnétique et que $\theta = 90^\circ$. Lorsque la boucle est perpendiculaire au champ magnétique et que $\theta = 0^\circ$, les forces opposées \vec{F}_2 et \vec{F}_4 sont dans le plan de la boucle et ne peuvent plus la faire tourner ; le couple de forces s'annule. Lorsque la boucle dépasse cette position et est inclinée de l'autre côté, les forces qui gardent le même sens tendent à ramener la boucle dans cette position et font donc tourner la boucle en sens inverse.

XI.4.2 : Le galvanomètre d'Arsonval

La relation XI.6 montre que les forces qui font tourner une boucle de courant dans un champ magnétique sont proportionnelles à l'intensité du courant I qui parcourt la boucle. C'est cette propriété qui est utilisée dans le galvanomètre d'Arsonval schématisé sur la figure XI.10.

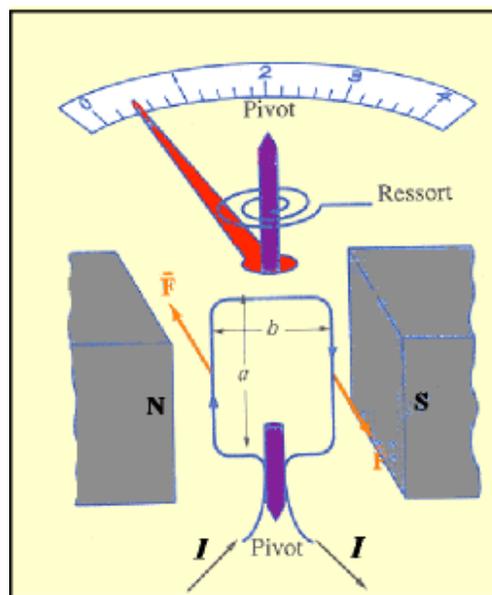


Figure XI.10.

On fait passer le courant, dont on désire mesurer l'intensité, dans la boucle. Une aiguille, fixée au pivot se déplace devant une échelle graduée lorsque la boucle tourne sous l'effet du courant. Le ressort exerce une force de rappel qui permet de stabiliser la boucle dans une position donnée lorsque cette force de rappel compense les forces magnétiques dues au courant qui passe dans la boucle.

XI.4.3 : Le moteur électrique

Le schéma de principe du moteur électrique est illustré à la figure XI.11.

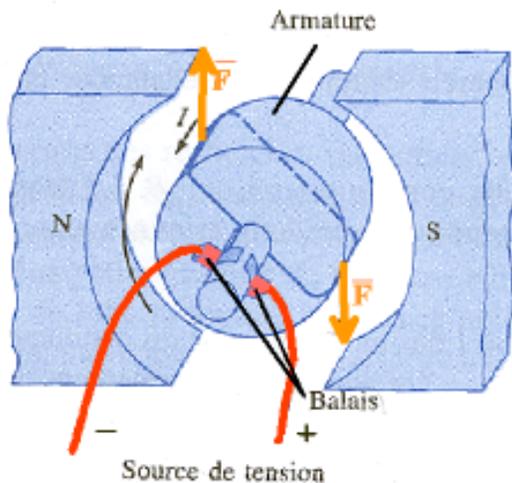
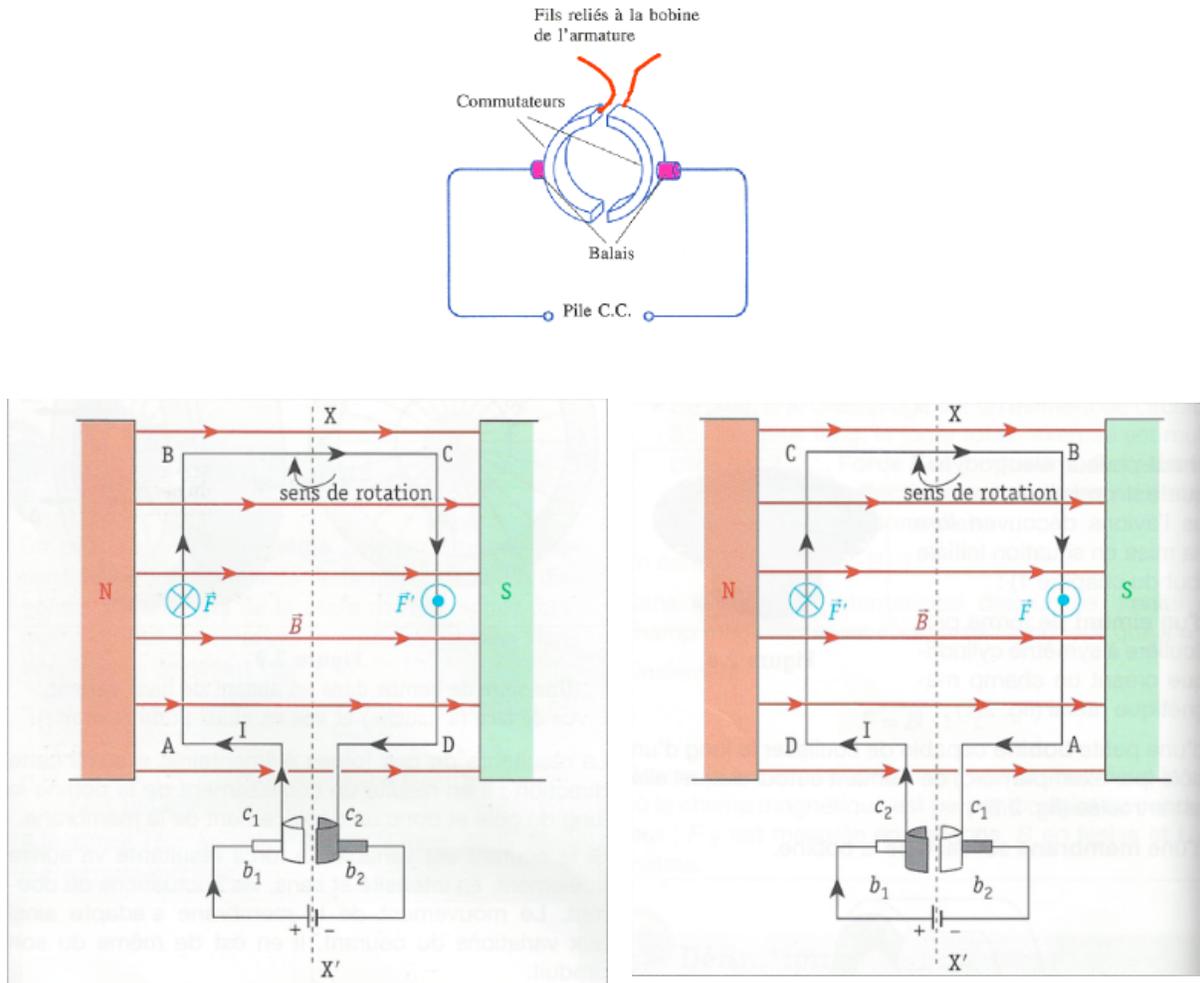


Figure XI.11.

Sous l'effet du champ magnétique créé par un aimant, le courant qui alimente le moteur fait tourner la boucle et entraîne l'axe du moteur dans sa rotation. Normalement les forces devraient changer de sens à chaque passage de la boucle à la position perpendiculaire au champ magnétique (voir section XI.4.1), ce qui aurait pour effet d'inverser continuellement le sens de rotation du moteur. Pour éviter cela, on utilise des balais qui inversent la polarité du courant à chaque demi-tour, au moment où la boucle passe par la position perpendiculaire au champ magnétique, ce qui empêche l'inversion du sens des forces qui font tourner le moteur (voir figure XI.12).



Les extrémités A et D sont solidaires de deux demi-anneaux en cuivre c_1 et c_2 appelés commutateurs et isolés l'un de l'autre. Des balais de carbone, fixes, b_1 et b_2 , frottent sur ces commutateurs et sont connectés aux bornes d'un générateur. Sur le schéma de gauche, le plan ABCD est parallèle aux lignes de champ et le courant entre par le commutateur c_1 relié à la borne positive du générateur par l'intermédiaire du balai b_1 . Le courant circule donc dans le sens ABCD. Les côtés AB et CD sont parcourus par des courants d'intensité égale et de sens contraires : les forces électromagnétiques \vec{F} et \vec{F}' qui leur sont appliquées sont donc d'intensité égale et de sens contraires. Ce couple de forces provoque une rotation de la spire dans le sens indiqué. Après une rotation d'un peu plus d'un quart de tour, le commutateur c_1 est mis en contact avec le balai b_2 : le courant change ainsi de sens **dans la spire** et circule alors dans le sens DCBA (panneau de droite). Analysons à nouveau la situation lorsque la spire a fait un demi-tour et se retrouve dans la position parallèle aux lignes de champ. Le côté DC est alors à gauche et le côté AB à droite. Les forces \vec{F} et \vec{F}' agissant respectivement sur le côté droit et le côté gauche de la spire n'ont pas été modifiées et maintiennent le même sens de rotation. Après un demi-tour encore, on se retrouve dans la situation de départ (panneau de gauche). Le système de balais et de commutateurs est donc nécessaire pour assurer une rotation continue de la spire.

Figure XI.12. [Crédit : Physique, De Boeck]

Remarque : dans la pratique, à la fois pour le galvanomètre et pour le moteur électrique, les choses se présentent de manière un peu plus compliquée. Afin de renforcer les effets, il n'y a pas qu'une seule boucle mais un grand nombre de boucles, formant un bobinage. Pour maintenir le champ magnétique parallèle aux boucles, même lorsque celles-ci ont tourné (effet maximum, $\theta = 90^\circ$), le fil est bobiné sur un noyau de fer doux (voir figure XI.13).

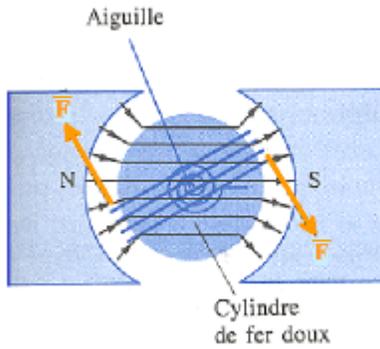


Figure XI.13.

XI.5 : La force de Lorentz

Nous avons vu qu'un fil parcouru par un courant, c'est-à-dire des charges électriques en mouvement, subit une force lorsqu'il se trouve dans un champ magnétique. On peut donc s'attendre à ce que des particules chargées qui se déplacent librement soient elles aussi soumises à une force magnétique et il en est bien ainsi. Nous allons calculer cette force à partir de la relation (XI.3). Supposons des particules de charge q ayant une vitesse \vec{v} ; elles parcourent en ligne droite une distance \vec{L} dans un champ magnétique uniforme \vec{B} , en une durée t . Par conséquent ces particules constituent un courant. Si n d'entre elles traversent la section du fil conducteur durant la durée t , ce courant vaut :

$$\mathbf{I} = \frac{nq}{t},$$

d'après la définition (VII. 2). D'après XI.3, la force qui s'exerce sur ce courant vaut :

$$\vec{F}_I = \mathbf{I} \vec{L} \times \vec{B} = \frac{nq}{t} \vec{L} \times \vec{B} = nq \vec{v} \times \vec{B},$$

puisque $\vec{v} = \vec{L}/t$. Cette force est en fait la force qui s'exerce sur les n particules de charge q . Par conséquent la force qui s'exerce sur une seule d'entre elle vaut :

$$\boxed{\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}} \quad (\text{XI.7})$$

Cette force est appelée force de Lorentz.

XI.6 : Le mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique

Dès qu'une particule chargée pénètre dans une zone où règne un champ magnétique, avec une vitesse initiale, elle est soumise à la force de Lorentz (XI.7). Toutefois, vu la forme de cette force qui s'exprime sous forme d'un produit vectoriel, celle-ci sera nulle si cette vitesse est parallèle au champ magnétique même si la vitesse et le champ magnétique sont non nuls. En effet, d'après (XI.7), l'intensité de la force de Lorentz est :

$$\mathbf{F} = q \mathbf{v} \mathbf{B} \sin \theta, \quad (\text{XI.8})$$

où θ est l'angle entre la vitesse et le champ magnétique ; elle s'annule donc pour $\theta = 0^\circ$. Pour v et B fixés, elle sera maximum pour $\theta = 90^\circ$:

$$\mathbf{F} = q \mathbf{v} \mathbf{B}, \quad \text{lorsque } \bar{\mathbf{v}} \perp \bar{\mathbf{B}} \quad (\text{XI.9})$$

D'après (XI.7), la force de Lorentz est perpendiculaire à la fois à $\bar{\mathbf{v}}$ et à $\bar{\mathbf{B}}$. Pour connaître le sens de la force de Lorentz, on applique la règle de la main droite : on place sa main droite, doigts dépliés dans le sens de déplacement de la particule, c'est-à-dire celui de $\bar{\mathbf{v}}$. On fait tourner la main sur elle-même de sorte que les doigts une fois pliés indiquent la direction de $\bar{\mathbf{B}}$. Le pouce tendu indique alors le sens de $\bar{\mathbf{F}}$. Attention, cette règle donne le sens de $\bar{\mathbf{F}}$ pour une charge q positive. Lorsque la charge est négative, le sens de la force est opposé.

Exemple :

Un électron se déplace verticalement vers le haut avec une vitesse de $2,0 \times 10^6$ m/s lorsqu'il pénètre dans un champ magnétique. Il subit alors une force de $4,0 \times 10^{-14}$ N vers l'ouest. Sachant que cette force s'annule lorsque l'électron se déplace horizontalement vers le nord, déterminer l'intensité et le sens de ce champ magnétique .

Puisque la force s'annule lorsque l'électron se dirige horizontalement vers le nord, c'est qu'il a, à ce moment, un parcours parallèle ou antiparallèle à $\bar{\mathbf{B}}$. Donc $\bar{\mathbf{B}}$ est horizontal avec une direction nord-sud ou sud-nord. Lorsque l'électron se dirige vers le haut, on a :

$$\bar{\mathbf{F}}_0 = (-e) \bar{\mathbf{v}}_{\text{haut}} \times \mathbf{B}_{\text{N-S}(?)}$$

Si $\bar{\mathbf{B}}$ était dirigé vers le nord (voir figure XI.14.a), en appliquant la règle de la main droite et en inversant le résultat pour tenir compte de la charge négative de l'électron, la force $\bar{\mathbf{F}}$ serait dirigée vers l'est. C'est donc vers le sud que $\bar{\mathbf{B}}$ est dirigé (voir figure XI.4.b).

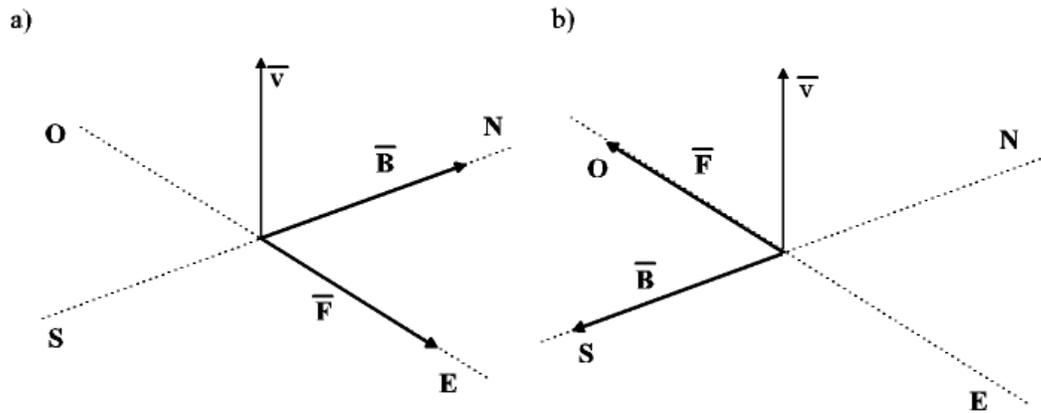


Figure XI.14.

Quant à l'intensité de B, puisque \vec{v} est perpendiculaire à \vec{B} elle est donnée par :

$$|\vec{F}| = e v B,$$

d'où

$$B = \frac{|\vec{F}|}{e v} = \frac{4,0 \times 10^{-14} \text{ N}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 2,0 \times 10^6 \text{ m/s}}$$

$$= 1,25 \times 10^{-1} = 0,125 \text{ T.}$$

XI.7 : Le champ magnétique dû à des courants

A la section XI.2, nous avons vu qu'un courant créait un champ magnétique dans l'espace qui l'entoure. L'intensité, la direction et le sens de ce champ magnétique dépendent de la forme et de l'intensité du courant mais aussi, bien sûr, de la distance à laquelle il se trouve. Par conséquent, dans la grande majorité des cas, les champs magnétiques ne sont pas uniformes. Pour calculer le champ magnétique qui correspond à une configuration de courants donnés on utilise le théorème d'Ampère que nous n'avons pas le temps d'étudier dans ce cours. Toutefois, nous allons passer en revue quelques résultats auxquels il conduit pour des situations courantes. Ces résultats peuvent aussi être obtenus expérimentalement.

XI.7.1 : Le champ magnétique dû à un fil rectiligne

Dans le cas d'un conducteur rectiligne, nous avons déjà vu à la section XI.2 que le champ magnétique était perpendiculaire au fil dans un plan qui lui est perpendiculaire. On s'attend à ce que l'intensité de ce champ magnétique augmente avec l'intensité du courant électrique et diminue avec la distance r à laquelle on se trouve par rapport au fil. Effectivement, on constate que :

$$\mathbf{B} \propto \frac{\mathbf{I}}{r},$$

à condition que r soit petit par rapport à la distance à laquelle on se trouve des extrémités du fil rectiligne (ce rapport serait exact pour un fil infini). La constante de proportionnalité s'exprime par $\mu_0/2\pi$, de sorte que :

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mathbf{I}}{2\pi r}, \text{ pour un fil rectiligne} \tag{XI.10}$$

La constante μ_0 est appelée perméabilité magnétique du vide et vaut :

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A} \tag{XI.11}$$

XI.7.2 : Le champ magnétique dû à une boucle de courant

Le champ magnétique causé par une boucle de courant s'obtient en décomposant par la pensée cette boucle en petits éléments (quasi-)rectilignes auxquels on peut appliquer la règle du pouce de la main droite pour déterminer le sens du champ magnétique autour du conducteur, comme expliqué aux Sects.XI.2 et XI.7.1 (Fig. XI .5). Le champ magnétique est à proximité du conducteur symbolisé par \odot (champ sortant du plan de la feuille) et \otimes (champ entrant dans la feuille), de la même couleur que le segment de conducteur qui l'engendre. On notera que l'intensité du champ magnétique diminue avec la distance au conducteur (Eq. XI.10), ce qui est représenté par les symboles de plus en plus petits, à mesure qu'ils s'éloignent de leur segment générateur. On notera que cette évolution est dessinée pour les seuls symboles \otimes , car ceux-ci viennent, en vertu du principe de superposition, perturber les champs causés par les segments opposés. Les champs sortant de la feuille (\odot) à grande distance du conducteur ne sont pas de nature à modifier le champ total, comme on pourra s'en convaincre en examinant attentivement la Fig. XI.15. En effet, ces champs sortants ne pénètrent jamais à l'intérieur de la boucle ; ils n'affectent que la région externe, au contraire des champs entrants. On constatera finalement que tous les segments de courants contribuent à renforcer le champ magnétique intérieur, entrant dans la feuille, tandis qu'à l'extérieur de la boucle de courant, des champs magnétiques de sens opposés co-existent, et il en résulte un champ sortant final beaucoup moins intense que le champ entrant intérieur à la boucle de courant. On notera pour finir que si l'on voulait définir une règle mnémotechnique permettant de prévoir le sens du champ magnétique, on peut appliquer la

« règle² du pouce de la main droite », mais elle ne s'applique qu'à la région intérieure à la boucle de courant, le champ externe étant beaucoup plus faible. Nous verrons à la section suivante que, dans la situation limite d'un solénoïde constitué d'une multitude de boucles empilées, le champ externe est en fait nul, et le champ interne est orienté selon l'axe du solénoïde.

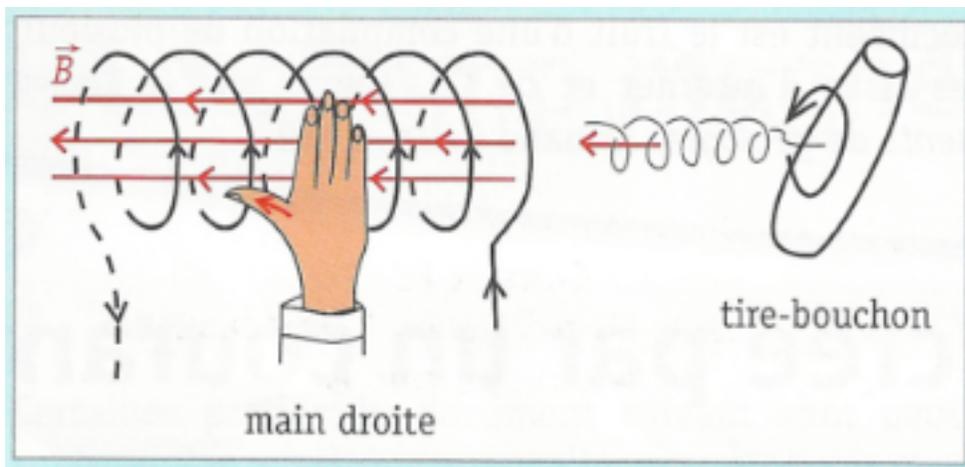
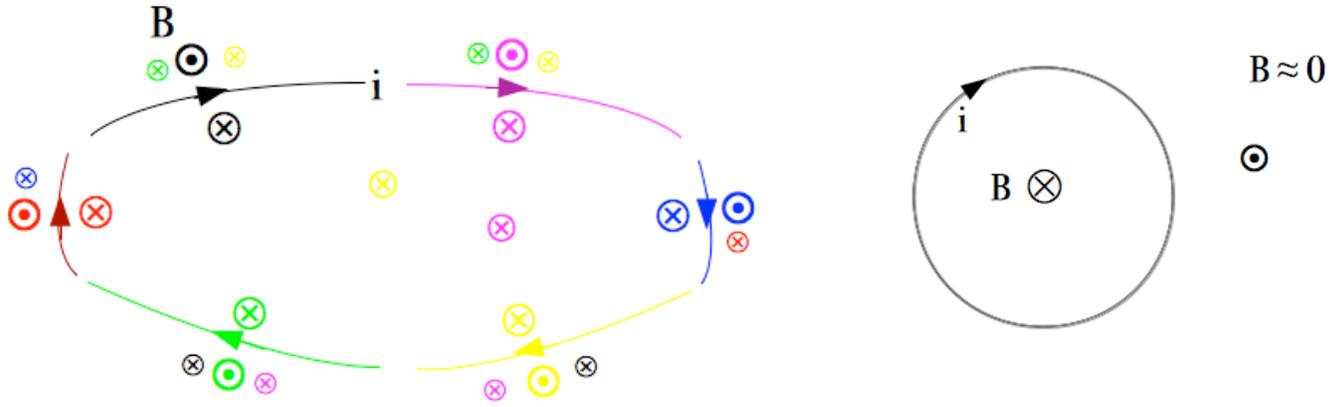


Fig.XI.15

XI.7.3 : Le champ magnétique dû à un solénoïde

Dans les circuits électriques, on trouve souvent des solénoïdes. Un solénoïde est un fil conducteur enroulé plusieurs fois sur une surface cylindrique ; de cette manière, il forme plusieurs boucles appelées spires (voir figure XI.16).

² Mais les doigts courbés représentent maintenant la boucle de courant, et le pouce tendu le sens du champ magnétique, à l'inverse de la situation représentée par la Fig. XI.5 pour un courant rectiligne. Ceci constitue donc un exemple supplémentaire des symétries omniprésentes en électromagnétisme!



Figure XI.16.

Celles-ci sont le plus souvent serrées l'une contre l'autre, mais pas nécessairement.

L'intérêt du solénoïde réside en ce qu'il permet de créer un champ magnétique à peu près uniforme dans une région de l'espace, à l'intérieur de ses spires. En effet, on peut montrer que pour un solénoïde de longueur infinie, le champ magnétique est nul à l'extérieur et constant à l'intérieur, dirigé suivant l'axe du solénoïde. La figure XI.17 montre une coupe dans un tel solénoïde ; les cercles avec un point indiquent une section du fil avec le courant qui sort de la page, tandis que les cercles avec une croix indiquent un courant entrant.

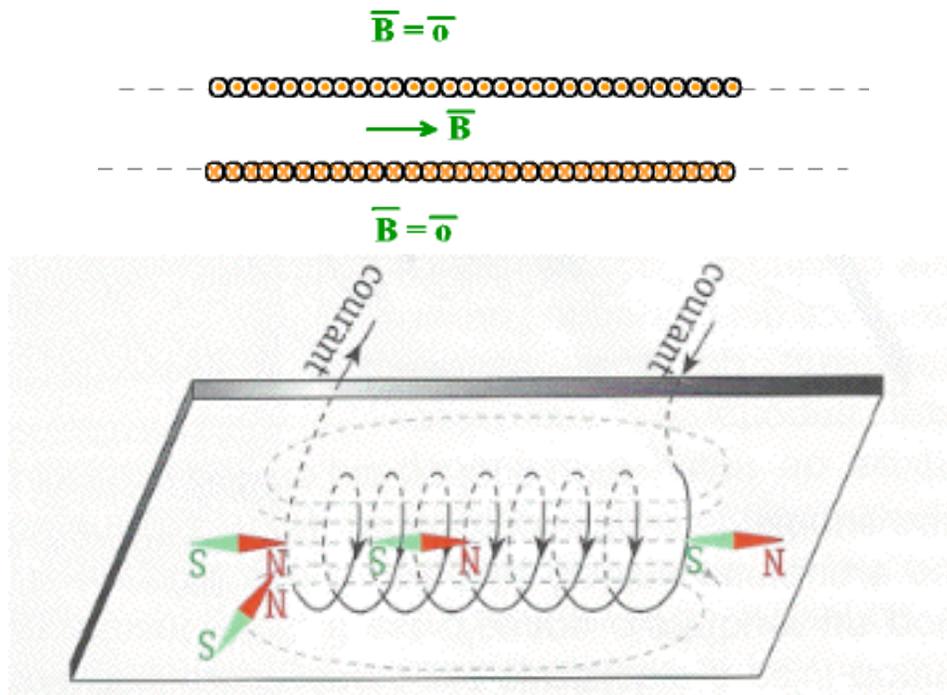


Figure XI.17.

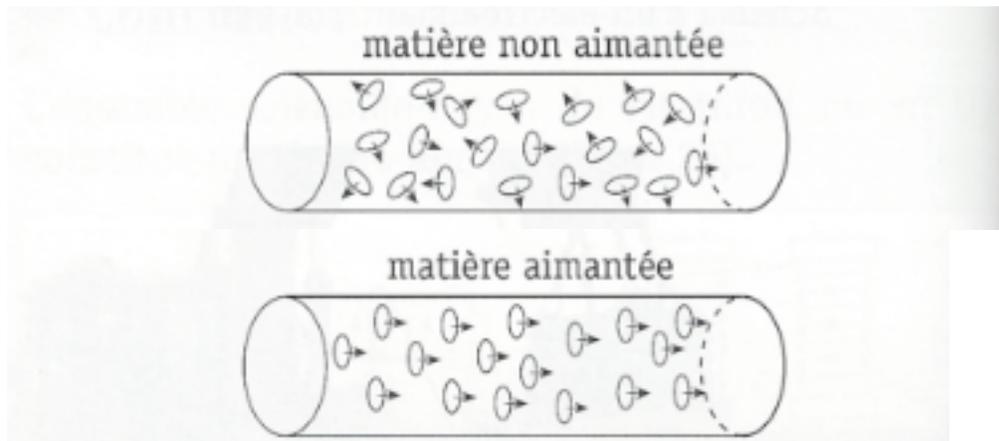
C'est en appliquant la règle de la main droite à un segment de spire quelconque, comme on l'avait fait à la section XI.2 pour un fil rectiligne infini, qu'on trouve le sens de \vec{B} dans le solénoïde. Son intensité est donnée par :

$$B = \mu_0 n I, \text{ pour un solénoïde infini.} \tag{XI.12}$$

où $n = N/L$ est le nombre N de spires sur une longueur L du solénoïde.

Dans la pratique les solénoïdes ont une longueur finie et les résultats ci-dessus restent valables, à condition de se trouver loin des extrémités du solénoïde.

Notons enfin que c'est la présence de boucles de courant dues au mouvement des électrons autour des noyaux atomiques qui est responsable du caractère ferromagnétique de certains matériaux, lorsque ces boucles sont **alignées**.



XI.8. : La définition de l'ampère et du coulomb

Si la constante μ_0 vaut exactement $4 \pi \times 10^{-7}$ T.m/A, c'est parce que cette valeur a été posée et qu'on a déduit la définition de l'ampère à partir du champ magnétique produit par un courant d'un ampère. Pour cela, considérons deux longs conducteurs parallèles, séparés par une distance r (voir figure XI.18) et parcourus par des courants respectifs I_1 et I_2 . Le conducteur 1 crée autour de lui un champ magnétique \vec{B}_1 , dont l'intensité vaut, à l'endroit où se trouve le conducteur 2 :

$$\mathbf{B}_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} \quad (\text{XI.13})$$

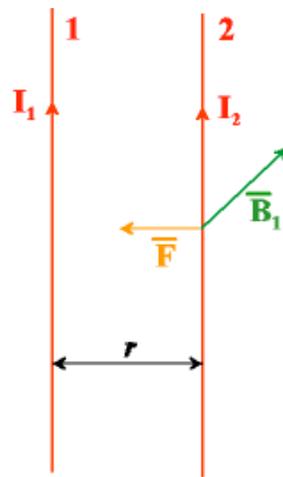


Figure XI.18.

Par conséquent le conducteur 2 plongé dans le champ magnétique \vec{B}_1 , dû au conducteur 1, subit de la part de ce dernier une force. Pour une longueur L de fil, cette force est donnée par la relation (XI.3) : $F = I_2 L B_1$. En remplaçant B_1 par son expression donnée en (XI.13) et en divisant par L , on obtient la force par unité de longueur :

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{r} \quad (\text{XI.14})$$

En utilisant la règle de la main droite, on peut vérifier que la force est attractive si les deux courants circulent dans le même sens (cf. figure XI.17) ; elle est répulsive si les courants circulent en sens opposé.

On peut vérifier aisément que la force exercée par le conducteur 2 sur le conducteur 1 a la même intensité et est de sens opposé, ce qui satisfait bien au principe de l'action et de la réaction.

La relation (XI.14) est utilisée pour définir l'ampère. Si $I_1 = I_2 = 1 \text{ A}$ et que les deux fils se trouvent à 1 m l'un de l'autre, alors :

$$\frac{F}{L} = \frac{4\pi}{2\pi} \frac{10^{-7} \text{ Tm/A}}{1 \text{ m}} 1\text{A} \times 1\text{A} = 2 \times 10^{-7} \text{ N/m}$$

Ainsi :

un ampère se définit comme le courant circulant dans deux longs conducteurs parallèles, séparés par une distance de 1 m et produisant l'un sur l'autre une force de $2 \times 10^{-7} \text{ N}$ par mètre de longueur.

Le coulomb quant à lui est défini par rapport à l'ampère :

Le coulomb est la charge qui traverse une section d'un conducteur parcouru par un courant d'un ampère pendant une seconde $1 \text{ C} \equiv 1 \text{ A} \cdot \text{s}$.

XI.9. : Exercices

1. Indiquer par une flèche la direction du champ magnétique \vec{B} aux points P dans les différentes situations ci-dessous. Si $\vec{B} = 0$, faites un cercle autour du point P

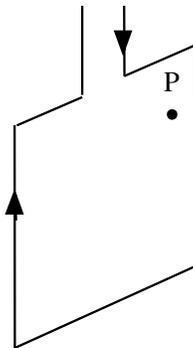
a) au voisinage d'un conducteur rectiligne infini parcouru par un courant I, sortant perpendiculairement de la feuille :



b) entre deux conducteurs rectilignes infinis, parallèles et parcourus par un courant I de même intensité et de même sens. P se trouve à égale distance des deux conducteurs :

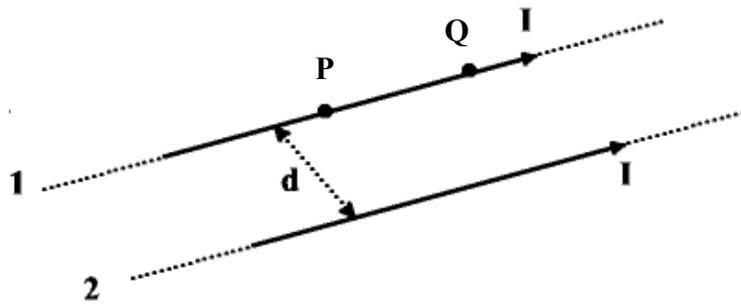


c) à l'intérieur d'un circuit constitué d'un fil conducteur en forme de rectangle, parcouru par un courant I :



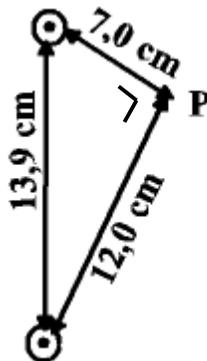
2. Déterminez l'intensité d'un champ magnétique à 2,0 cm d'un long fil rectiligne portant un courant de 3,8 A.

3. Deux fils conducteurs rectilignes infinis sont parallèles et parcourus tous deux par un courant I de même sens. Ils sont placés à une distance d l'un de l'autre.



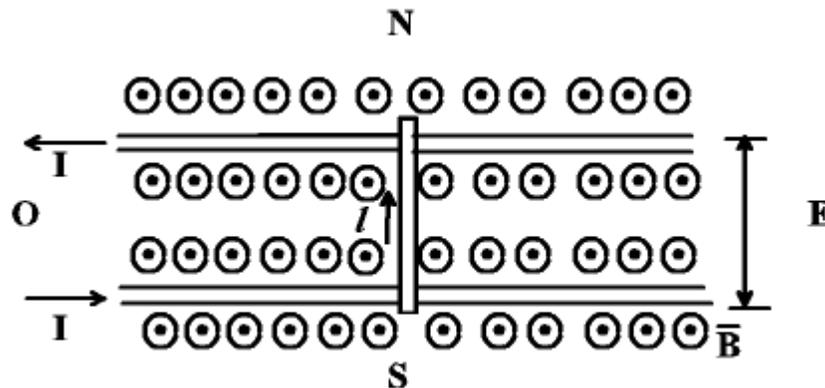
Donnez l'expression de la force exercée par le conducteur 2 sur la portion PQ, de longueur L , du conducteur 1. Préciser sa direction et son sens. Représenter cette force par une flèche sur le schéma ci-dessus.

4. Calculez la force magnétique qui s'exerce sur les 240 m de fil rattachés à deux pylônes et portant un courant de 150 A si le champ magnétique de la Terre, d'une intensité de 5.0×10^{-5} T, forme un angle de 60° avec ce fil.
5. Deux longs fils minces parallèles séparés par une distance de 13,9 cm sont parcourus dans le même sens par un courant de 25 A. Calculez l'intensité du champ magnétique en un point situé à 12,0 cm d'un des fils et à 7,0 cm de l'autre ; remarquer que les trois distances citées forment les côtés d'un triangle rectangle.



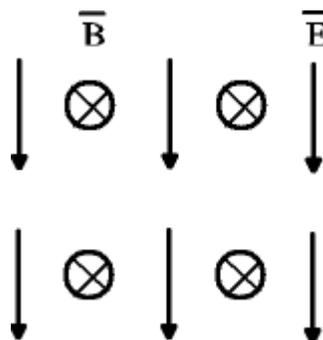
6. Un solénoïde mesurant 32 cm de longueur et 1,2 cm de diamètre doit produire un champ magnétique de 0,20 T en son centre. Combien de spires doit-il comporter s'il est parcouru par un courant maximal de 3,7 A ?
7. Deux fils rigides parallèles séparés par une distance l dans un plan horizontal servent de rails à une légère tige métallique de masse m (perpendiculaire à chaque rail), comme dans

la figure. Un champ magnétique B , qui s'oriente verticalement vers le haut, agit en tout point de ce système. A $t = 0$, on branche les fils reliés aux rails à une source de courant continu et le système se trouve parcouru par un courant d'intensité I . Déterminez la vitesse de la tige en fonction du temps en supposant qu'il n'y a aucun frottement entre la tige et les rails. Si le courant qui parcourt la tige s'oriente vers le nord, dans quelle direction se déplace-t-elle, est ou ouest ?



Vue de haut d'une tige qui glisse sur des rails.

8. Un électron pénètre dans une région de l'espace où règne un champ électrique de $9,5 \times 10^3$ V/m et un champ magnétique de $4,0 \times 10^{-3}$ T ; leurs directions respectives sont perpendiculaires :



- Quelles doivent être la direction et la vitesse de l'électron pour qu'il traverse cette région sans être dévié ?
- Y a-t-il une ou plusieurs solutions possibles ?
- Quel serait le rayon de l'orbite décrit par ce même électron si on supprimait le champ électrique ?

9. Examen juin 2018

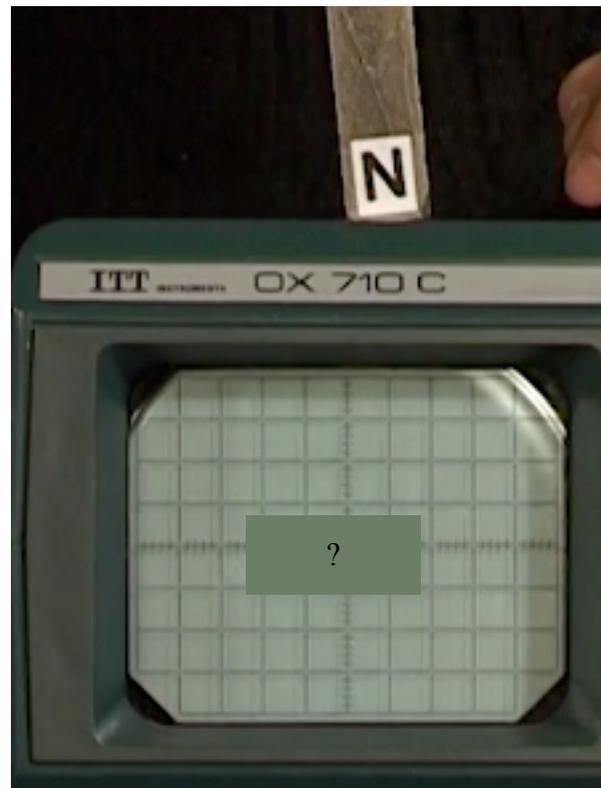
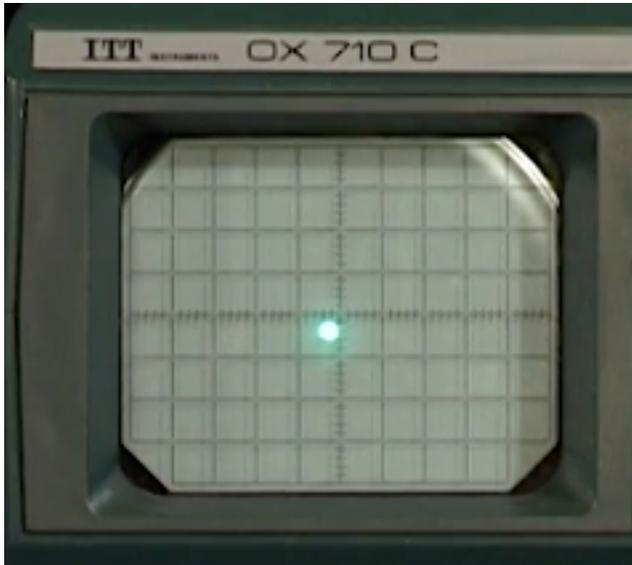


On considère une lampe à incandescence dont le filament possède la forme d'un solénoïde. L'ampoule est alimentée en courant alternatif. On place un aimant permanent immobile à côté du filament, de sorte que l'axe N-S de cet aimant soit orienté selon l'axe du solénoïde. Expliquez de manière détaillée et en vous aidant d'un schéma, pourquoi le filament se met à osciller de manière longitudinale (c-à-d. les spires s'éloignent et se rapprochent alternativement de l'aimant permanent). Mentionnez la ou les loi(s) physique(s) impliquée(s).

10. Examen juin 2018

La figure de gauche ci-dessous présente le faisceau d'électrons généré par un canon à électrons avec une vitesse de 10^7 m/s, perpendiculaire à l'écran. Le faisceau est stationnaire sur l'écran de l'oscilloscope. On place le pôle nord d'un aimant permanent en haut de l'écran, au-dessus de la position occupée par le faisceau précédemment, comme indiqué sur la figure de droite.

1. Le spot se déplace-t-il et si oui, dans quelle direction ? Faites un schéma indiquant la force en présence, et donnez son expression en fonction de la vitesse du faisceau d'électrons.
2. On suppose que le champ magnétique est constant et possède une valeur de 10^{-2} T le long d'une distance $\Delta x = 1$ cm en-deçà de l'écran de l'oscilloscope (c-à-d. avant que le faisceau d'électrons n'atteigne l'écran). L'axe Ox est donc dirigé selon la trajectoire des électrons (lorsqu'ils ne sont pas encore déviés par le champ magnétique), perpendiculaire à l'écran de l'oscilloscope. Leur vitesse selon Ox s'élève à 10^7 m/s à l'entrée de la zone où le champ magnétique homogène est présent. Une fois que les électrons pénètrent dans cette zone, montrer que leur trajectoire correspond à un mouvement circulaire uniforme.
3. Calculer le rayon de ce cercle après avoir calculé la valeur de l'accélération centripète correspondante.
4. Le faisceau touchera-t-il l'écran ? Si oui, à quelle position (sachant que l'espace entre deux graduations sur l'écran s'élève à 1 cm) ?



Réponses:

2. $3,8 \cdot 10^{-5} \text{ T}$

4. $1,56 \text{ N}$

5. $8,3 \cdot 10^{-5} \text{ T}$

6. $1,38 \cdot 10^4$

7. $v(t) = I / B t / m$, est

8. a) horizontale de gauche à droite ; $v = 2,4 \times 10^6 \text{ m/s}$ si l'angle θ entre \underline{v} et \underline{B} vaut 90° .

b) la vitesse \underline{v} peut occuper tout le demi-cercle de droite dans le plan horizontal ($0^\circ < \theta < 180^\circ$).

c) $R = 3,38 \times 10^{-3} \text{ m}$ si $\theta = 90^\circ$.

9. 1. Oui, horizontalement vers la gauche (car $q = -|e| < 0$) en faisant face à l'écran; 3 : $R = 6.25 \text{ mm}$; 4 : non, car $R < 1 \text{ cm}$