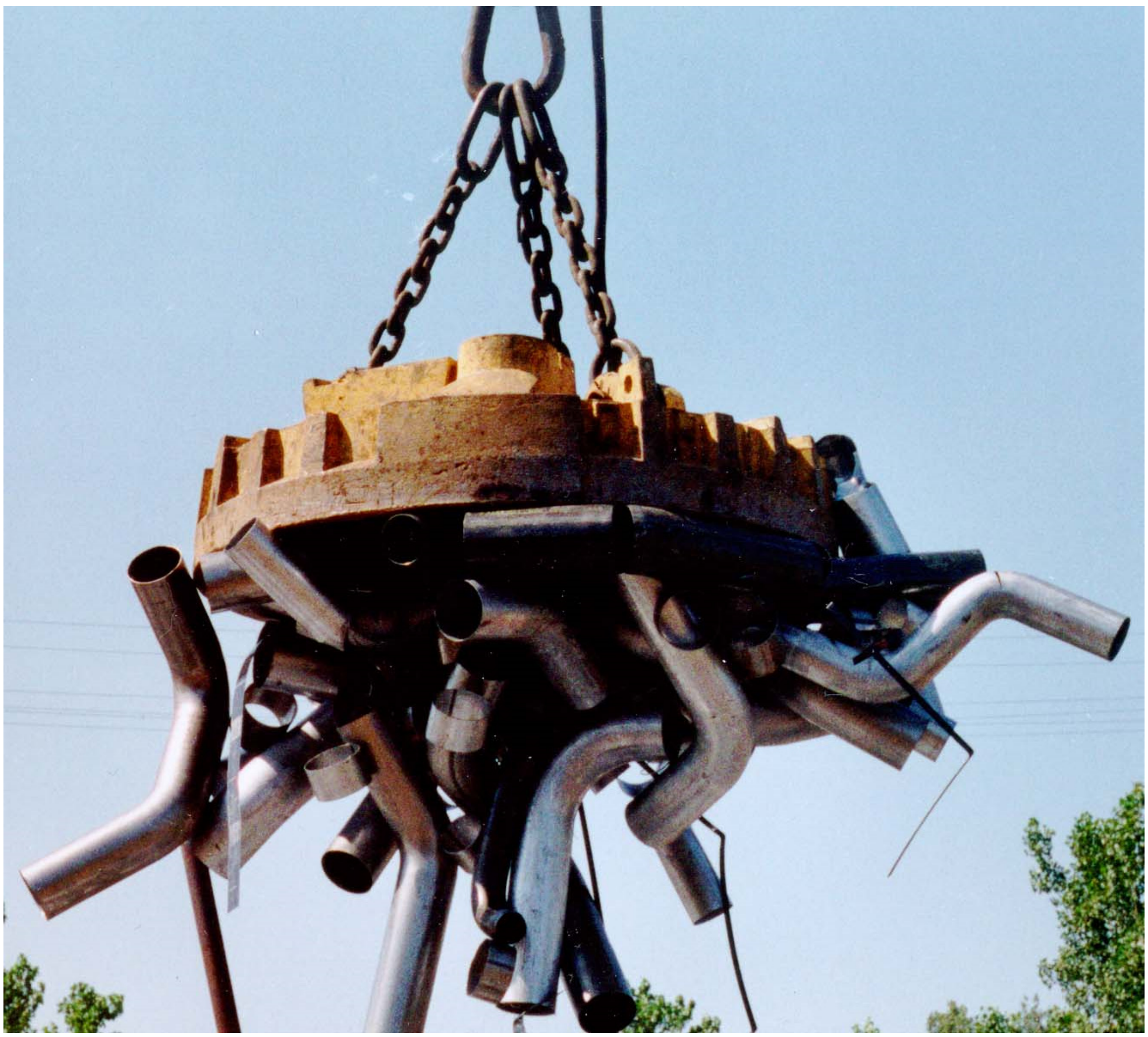
9 LES SOURCES DE CHAMP MAGNÉTIQUE

Comment peut-on fabriquer un aimant qui fonctionne uniquement quand on le désire ?



bikesnobnyc.blogspot.ca/2012_02_01_archive.html

Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre.

9.1 LE CHAMP MAGNÉTIQUE D'UN FIL RECTILIGNE INFINI PARCOURU PAR UN COURANT

Quand Ørsted a trouvé qu'un courant dévie une boussole, il a découvert qu'un courant crée un champ magnétique autour de lui. En effet, si la boussole est déviée, c'est qu'il y a une force sur les pôles de la boussole et donc qu'il y a un champ magnétique.

La grandeur du champ magnétique fait par un fil rectiligne infini parcouru par un courant I est donnée par cette formule.

Grandeur du champ magnétique fait par un fil rectiligne infini

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

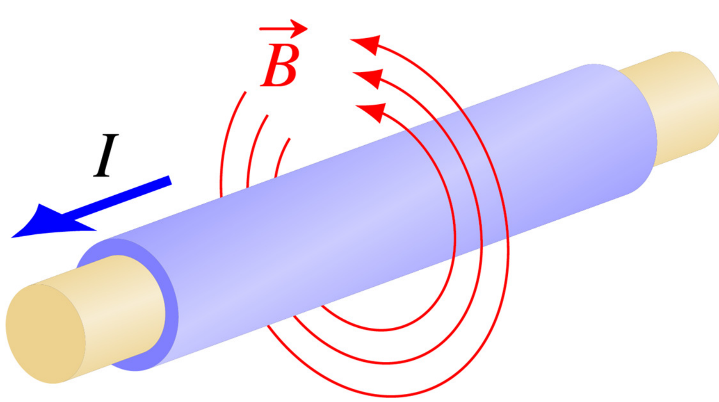
Nous démontrerons cette formule un peu plus loin. Dans cette formule, r est la distance entre l'endroit où on veut savoir le champ et le centre du fil.

μ_0 est une constante qu'on appellera *constante magnétique* (elle est aussi appelée perméabilité du vide) qui vaut

Constante magnétique μ_0 (perméabilité du vide)

$$\mu_0 = 12,566\,37 \times 10^{-7} \, \tfrac{Tm}{A}$$
$$\mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7} \, \tfrac{Tm}{A}$$

Les lignes de champ forment des cercles autour du fil.



On peut d'ailleurs voir sur cette image que les boussoles s'alignent dans une direction tangente à un cercle entourant le fil sur cette image quand il y a un courant.

Pas de courant dans le fil

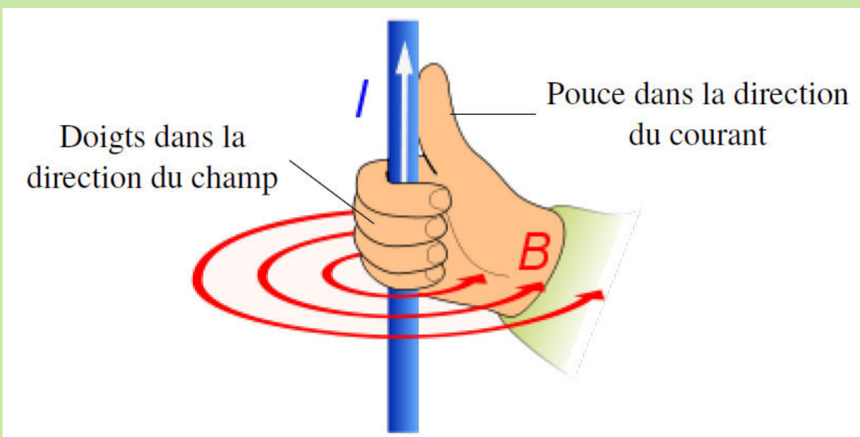
Avec un courant dans le fil

www.trincoll.edu/~cgeiss/stuff/the%20rocky%20road/ch_1/ch1_p1.htm

(Le courant dans le fil sur cette image est vers le bas.)

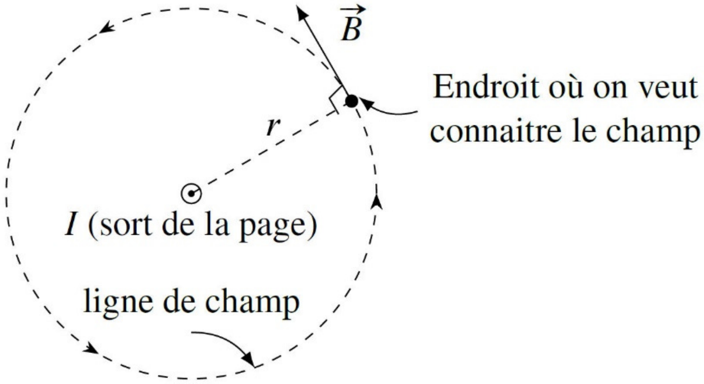
Pour trouver la direction du champ magnétique, on utilise une règle de la main droite (la troisième !). On place notre pouce dans la direction du courant et nos doigts pointent alors dans la direction du champ magnétique.

Direction du champ magnétique d'un fil rectiligne infini



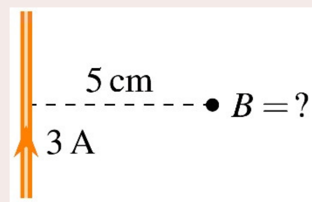
C'est ce que vous montre l'animation suivante.
http://www.youtube.com/watch?v=Z927bDX1l04
et le vidéo suivant.
http://www.youtube.com/watch?v=CfUCOlMoQvE

Notez que le champ est toujours tangent aux lignes de champ. Comme les lignes de champ forment des cercles autour des fils, le champ sera toujours tangent au cercle et perpendiculaire au rayon, donc à une ligne allant du fil jusqu'au point où on veut connaitre le champ (ligne r sur la figure).



Il y a deux possibilités de vecteur tangent au cercle à l'endroit où on veut trouver le champ. On trouve la bonne direction avec la main droite. On place notre pouce dans le sens du courant (ici en sortant de la page) et nos doigts dans le sens de *r*. Le champ est du côté vers où nos doigts peuvent plier.

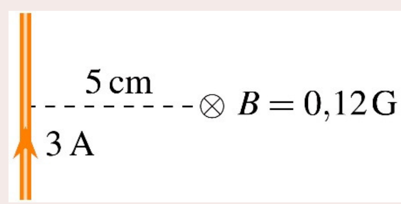
Exemple 9.1.1



Quel est le champ magnétique à 5 cm du centre d'un fil rectiligne infini parcouru par un courant de 3 A ?

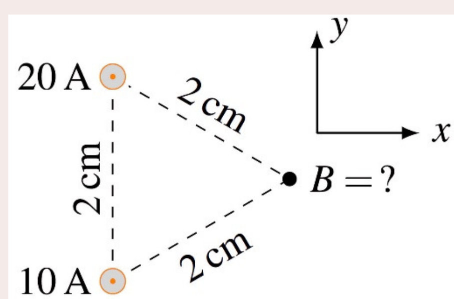
La grandeur du champ est

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \\ &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \frac{Tm}{A} \cdot 3A}{2\pi \cdot 0,05m} \\ &= 1,2 \times 10^{-5} T = 0,12G \end{aligned}$$



Pour trouver la direction du champ, on place notre pouce dans la direction du courant (vers le haut) et nos doigts dans la direction de la ligne pointillée (ligne allant du fil jusqu'à l'endroit où on veut savoir le champ). Nos doigts plient alors en entrant dans la feuille. C'est la direction du champ.

Exemple 9.1.2



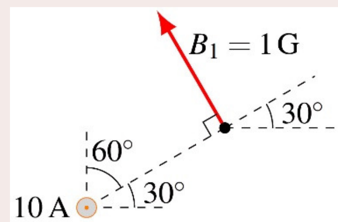
Deux fils parallèles sont distants de 2 cm. Les courants dans les fils sont dans la même direction (en sortant de la page sur l'image). Il y a un courant de 10 A dans le fil 1 et un courant de 20 A dans le fil 2. Quel est le champ magnétique à l'endroit indiqué sur la figure ?

Comme il y a deux fils, on va calculer le champ fait par chacun des fils, pour ensuite les additionner (vectoriellement).

Pour le fil 1 (celui avec un courant de 10 A), la grandeur du champ est

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \\ &= \frac{4\pi\times 10^{-7}\,\frac{Tm}{A}\cdot 10A}{2\pi\cdot 0,02m} \\ &= 1\times 10^{-4}T = 1G \end{aligned}$$

Pour trouver la direction du champ, on place notre pouce dans la direction du courant (en sortant de la feuille) et nos doigts dans la direction de la ligne pointillée (ligne allant du fil jusqu'à l'endroit où on veut savoir le champ). Nos doigts plient alors dans la direction indiquée sur la figure.



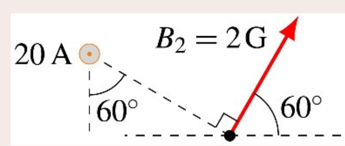
Les composantes du champ sont donc

$$\begin{aligned} B_{1x} &= 1G\cdot\cos 120° \\ &= -0,5G \end{aligned} \qquad \begin{aligned} B_{1y} &= 1G\cdot\sin 120° \\ &= 0,866G \end{aligned}$$

Pour le fil 2 (celui avec un courant de 20 A), la grandeur du champ est

$$\begin{aligned} B_2 &= \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \\ &= \frac{4\pi\times 10^{-7}\,\frac{Tm}{A}\cdot 20A}{2\pi\cdot 0,02m} \\ &= 2\times 10^{-4}T = 2G \end{aligned}$$

Pour trouver la direction du champ, on place notre pouce dans la direction du courant (en sortant de la feuille) et nos doigts dans la direction de la ligne pointillée (ligne allant du fil jusqu'à l'endroit où on veut savoir le champ). Nos doigts plient alors dans la direction indiquée sur la figure.



Les composantes du champ sont donc

$$\begin{aligned} B_{2x} &= 2G\cdot\cos 60° \\ &= 1G \end{aligned} \qquad \begin{aligned} B_{2y} &= 2G\cdot\sin 60° \\ &= 1,732G \end{aligned}$$

Ainsi, les composantes du champ total sont

$$\begin{aligned} B_x &= B_{1x} + B_{2x} = -0,5G + 1G = 0,5G \\ B_y &= B_{1y} + B_{2y} = 0,866G + 1,732G = 2,598G \end{aligned}$$

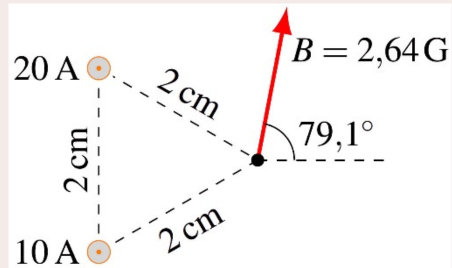
et le champ résultant est

$$\vec{B} = \left(0,5\vec{i} + 2,598\vec{j}\right)G$$

Cela répond déjà à la question, mais on pourrait aussi trouver la grandeur du champ ainsi que sa direction.

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$$
$$= 2,646G$$

$$\theta = \arctan\frac{B_y}{B_x}$$
$$= 79,1°$$



Ce qui donne un champ tel qu'illustré sur la figure.

9.2 LA FORCE MAGNÉTIQUE FAITE PAR DES FILS RECTILIGNES INFINIS

On calcule le champ puis la force

On peut maintenant combiner ce qu'on vient d'apprendre à la section 9.1 avec ce qu'on a appris au chapitre 8.

On applique ici l'idée derrière le principe du champ : séparer le calcul en deux parties.

1) On calcule le champ fait par le fil infini.

   Les fils infinis font un champ magnétique dont la grandeur est

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

2) On calcule la force sur l'objet dans le champ.

   Si une charge se déplace dans ce champ, elle subira une force valant

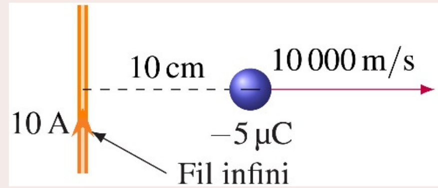
$$F = |q| vB\sin\theta$$

   et s'il y a un fil parcouru par un courant dans ce champ, il subira la force

$$F = I\ell B\sin\theta$$

Exemple 9.2.1

Quelle est la force sur la charge dans cette situation ?



La force sur la charge est

$$F = |q| vB \sin\theta$$

Pour calculer cette force sur la charge, il nous faut premièrement trouver le champ fait par le fil.

Le champ fait par le fil à une distance de 10 cm du fil est

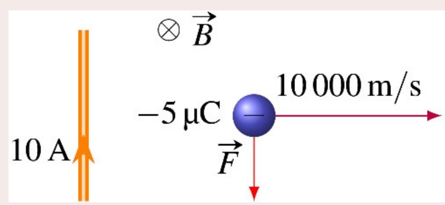
$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \\ &= \frac{4\pi\times10^{-7}\frac{Tm}{A}\cdot 10A}{2\pi\cdot 0{,}1m} \\ &= 2\times10^{-5}T \end{aligned}$$

Ce champ entre dans la feuille selon la règle de la main droite.

La force sur la charge est donc

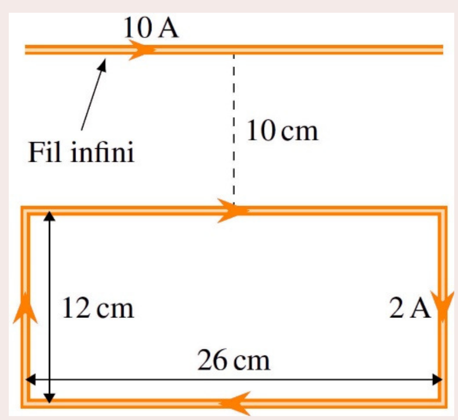
$$\begin{aligned} F &= |q| vB \sin\theta \\ &= \left|5\times10^{-6}C\right|\cdot 10\,000\tfrac{m}{s}\cdot 2\times10^{-5}T\cdot\sin 90° \\ &= 10^{-6}N \end{aligned}$$

Cette force est vers le bas selon la règle de la main droite. (N'oubliez pas que c'est une charge négative et que la direction de la force est à l'opposé de ce que nous donne la règle de la main droite.)



Exemple 9.2.2

Une boucle de courant rectangulaire est près d'un fil rectiligne infini parcouru par un courant de 10 A.



a) Quelle est la force magnétique résultante sur le cadre métallique ?

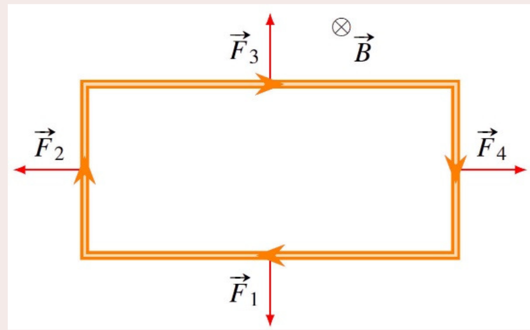
On va calculer la force avec la formule suivante.

$$F = I\ell B \sin\theta$$

On ne peut pas calculer la force en une seule formule, on doit séparer ce cadre en 4 morceaux : le fil de droite, le fil du bas et le fil de gauche et le fil du haut.

Pour calculer la force sur chaque bout de fil, on trouve premièrement la direction du champ fait par le fil infini : il s'agit d'un champ qui entre dans la page.

Puisque le champ entre dans la page, la figure de droite nous montre la direction des forces sur chacun des fils.



Les forces F_2 et F_4 s'annulent mutuellement, car les fils sont parcourus par des courants identiques et sont dans des champs magnétiques identiques puisqu'ils sont à la même distance du fil infini. Cependant, la force F_3 est plus grande que la force F_1, car le fil 3 est dans un champ magnétique plus grand puisqu'il est plus près du fil infini (rappelez-vous, le champ diminue d'intensité à mesure qu'on s'éloigne du fil infini). On doit donc calculer la grandeur de ces deux forces.

Calcul de la grandeur de F_3

Le champ fait par le fil infini à cette distance est

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \\ &= \frac{4\pi\times 10^{-7}\,\frac{Tm}{A}\cdot 10A}{2\pi\cdot 0,1m} \\ &= 2\times 10^{-5}T \end{aligned}$$

La force sur le fil est donc

$$\begin{aligned} F_3 &= I\ell B\sin\theta \\ &= 2A\cdot 0,26m\cdot 2\times 10^{-5}T\cdot\sin 90° \\ &= 1,04\times 10^{-5}N \end{aligned}$$

Calcul de la grandeur de F_1

Le champ fait par le fil infini à cette distance est

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \\ &= \frac{4\pi\times 10^{-7}\,\frac{Tm}{A}\cdot 10A}{2\pi\cdot 0,22m} \end{aligned}$$

$$= 9,091\times10^{-6} T$$

La force sur le fil est donc

$$\begin{aligned} F_1 &= I\ell B \sin\theta \\ &= 2A\cdot 0,26m\cdot 9,091\times10^{-6}T\cdot\sin 90° \\ &= 4,727\times10^{-6}N \end{aligned}$$

Force résultante

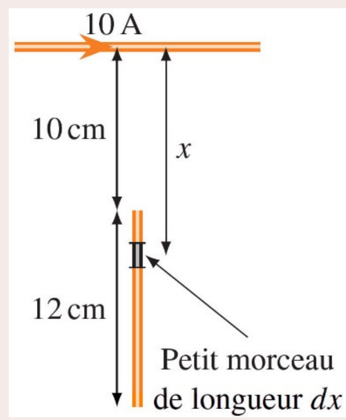
La force résultante est donc la soustraction de ces deux forces.

$$\begin{aligned} F &= F_3 - F_1 \\ &= 1,04\times10^{-5}N - 4,727\times10^{-6}N \\ &= 5,673\times10^{-6}N \end{aligned}$$

Cette force est vers le haut. Le cadre est donc attiré par le fil infini.

b) Quelle est la force sur le fil de droite dans le cadre ?

Pour calculer la force F_4, on doit séparer le fil en petits morceaux puisque le champ magnétique n'est pas uniforme (il est plus fort en haut du fil qu'en bas).



La force sur un petit morceau de fil est

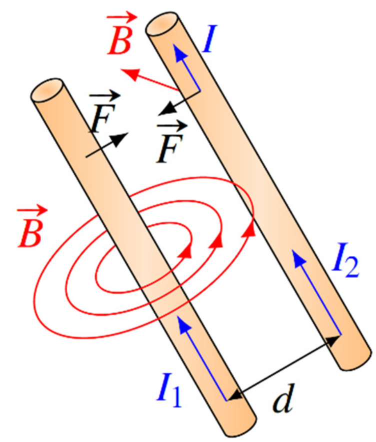
$$\begin{aligned} dF &= IBdx\sin 90° \\ &= I\frac{\mu_0 I_{\text{fil infini}}}{2\pi x}dx \end{aligned}$$

Si on somme les forces sur tous les petits morceaux, on a

$$\begin{aligned} F &= \int_{0,10m}^{0,22m} I\frac{\mu_0 I_{\text{fil infini}}}{2\pi x}dx \\ &= I\frac{\mu_0 I_{\text{fil infini}}}{2\pi}\int_{0,10m}^{0,22m}\frac{1}{x}dx \\ &= I\frac{\mu_0 I_{\text{fil infini}}}{2\pi}\left[\ln x\right]_{0,1m}^{0,22m} \\ &= 2A\cdot\frac{4\pi\times10^{-7}\frac{Tm}{A}\cdot 10A}{2\pi}\cdot\ln\frac{0,22}{0,1} \\ &= 3,152\times10^{-6}N \end{aligned}$$

Force entre des fils parallèles

Les fils parallèles parcourus par des courants vont s'attirer mutuellement ou se repousser mutuellement, un phénomène découvert par André-Marie Ampère en 1822. Prenons le cas de deux courants allant dans la même direction pour comprendre pourquoi.



Le courant dans le fil 1 (fil de gauche) va faire un champ magnétique. Dans la situation montrée sur la figure, ce champ entre dans la feuille à l'endroit où est situé le fil 2.

Le courant I_2 sera donc dans un champ magnétique (fait par le fil 1) et il y aura une force magnétique sur le fil 2. Avec la règle de la main droite, on trouve que le fil 2 sera attiré par le fil 1. Évidemment, selon la troisième loi de Newton, l'attraction sera mutuelle, ce qui veut dire que les fils s'attireront l'un et l'autre.

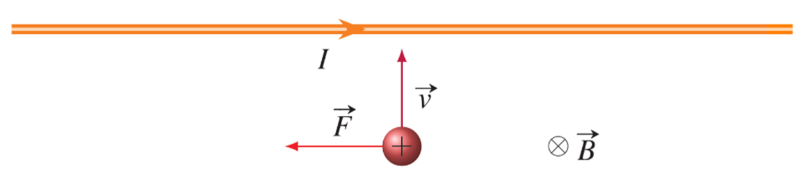
Si les courants avaient été dans des directions opposées l'un par rapport à l'autre, les deux fils se seraient repoussés mutuellement.

Les films suivants vous montrent ces forces entre des fils.
http://www.youtube.com/watch?v=43AeuDvWc0k
http://www.youtube.com/watch?v=kapi6ZDvoRs

Avant 2019, on se basait sur ce phénomène pour définir l'ampère.

9.3 LA FORCE DANS LE REPÈRE DE LA PARTICULE

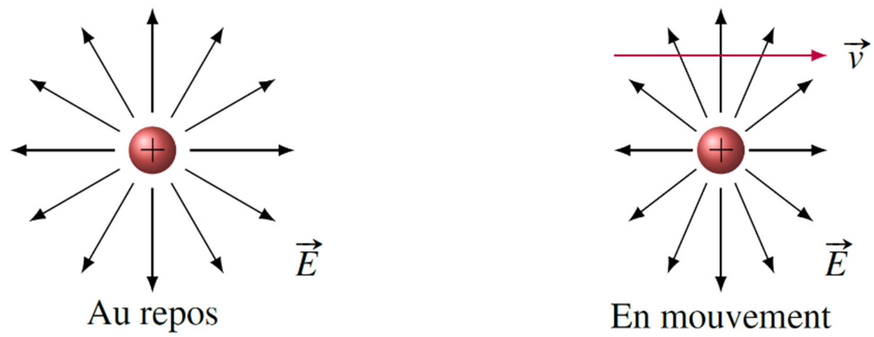
Prenons le cas d'une charge qui se dirige vers un fil rectiligne dans lequel circule un courant.



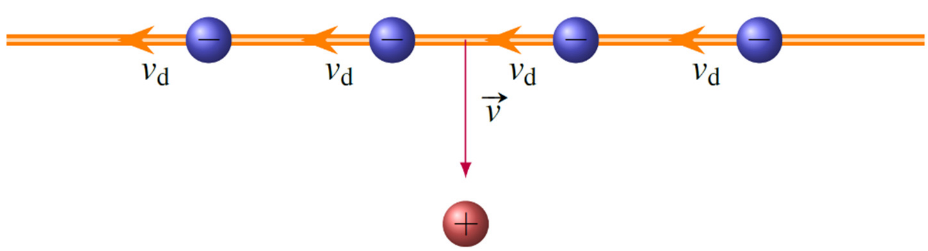
La charge est dans le champ magnétique fait par le fil. Selon la règle de la main droite donnant la direction du champ magnétique, ce champ entre dans la feuille à l'endroit où est la charge. Comme la charge se déplace dans un champ magnétique, elle subit une force vers la gauche selon la règle de la main droite donnant la direction de la force.

Prenons maintenant le point de vue d'un observateur pour qui la charge est au repos et le fil se déplace vers le bas. Comme la charge est immobile dans ce repère, la force magnétique est nulle. La force perpendiculaire à la vitesse doit donc être une force électrique dans ce repère. Il doit donc y avoir un champ électrique vers la gauche à l'endroit où est la charge. On sait déjà qu'une force magnétique peut devenir une force électrique pour un autre observateur, mais on peut se demander pourquoi il y a un champ électrique pour cet observateur.

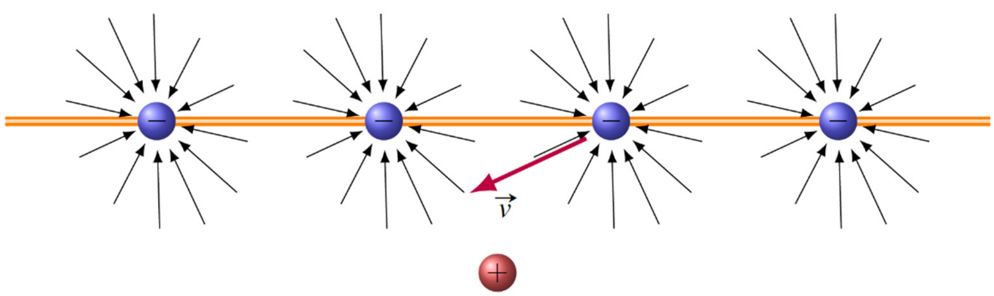
Selon la relativité, quand une charge se déplace, les lignes de champ s'approchent les unes des autres telles qu'illustrées sur la figure à cause de la contraction des longueurs.



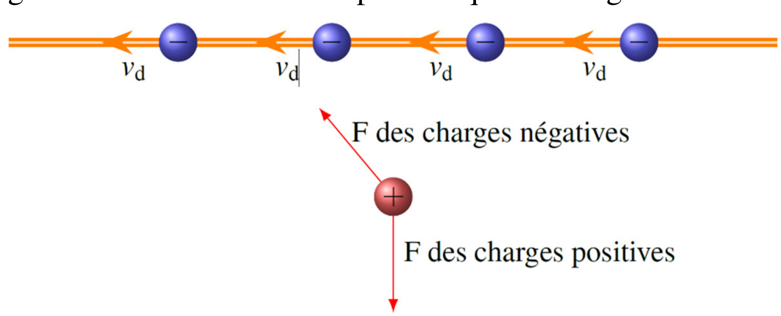
Cliquez ici si vous voulez voir la preuve :
http://physique.merici.ca/electricite/Echargemouvement.pdf
Regardons maintenant ce qu'on obtient dans le repère de la charge. Pour cette charge, le fil s'approche de la charge avec la vitesse v. En même temps, les électrons qui font le courant se déplacent vers la gauche avec la vitesse de dérive.



On combine alors ces deux vitesses et on ajoute les lignes de champ électrique des charges négatives pour obtenir la situation suivante.

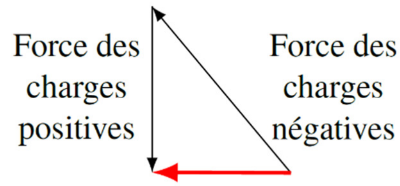


On voit que les charges de droite feront une force d'attraction un peu moins grande que celles de gauche, car les charges de droite font un champ électrique moins grand dans la direction de la charge positive que les charges de gauche. On aura donc une force d'attraction sur la charge positive faite par les charges négatives qui sera un peu décalée vers la



gauche. N'oublions pas que les atomes positifs du fil font aussi une force de répulsion sur la charge.

Quand on additionne ces deux forces pour obtenir la force résultante, on obtient une force vers la gauche. On voit donc d'où vient cette force dans le repère de la particule.

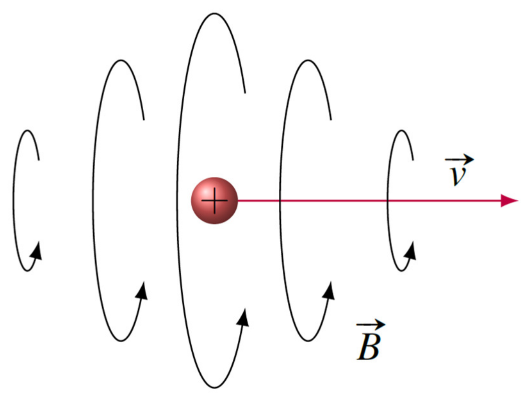


9.4 LE CHAMP MAGNÉTIQUE D'UN FIL PARCOURU PAR UN COURANT

La loi de Biot-Savart

Il n'y a pas que les fils infinis rectilignes qui font un champ magnétique quand ils sont parcourus par un courant. Tous les fils, peu importe leur forme, font un champ magnétique quand ils sont parcourus par un courant. Il est maintenant possible de trouver la formule permettant de trouver le champ magnétique dans ces cas.

Pour trouver le champ, il faut savoir le champ magnétique fait par une charge en mouvement. Ce champ a la configuration montrée sur la figure.



Les lignes de champ sont des cercles autour de la direction de la vitesse. On trouve la direction des lignes avec la main droite : en plaçant notre pouce dans la direction de la vitesse, nos doigts nous indiquent la direction des lignes de champ.

L'animation suivante montre bien le champ créé par le passage d'une charge.
http://www.youtube.com/watch?v=wyFFrVJfS54

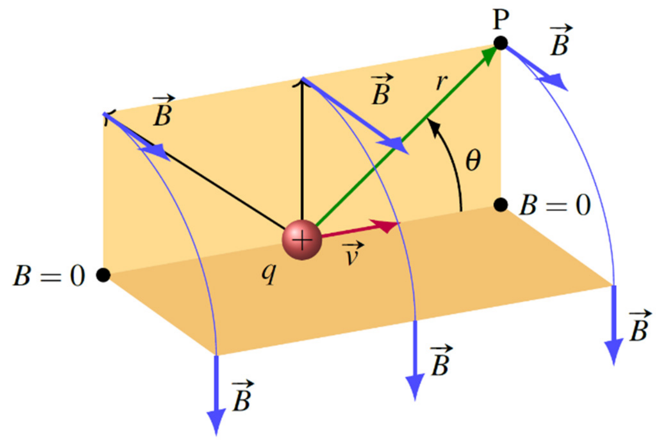
Selon la relativité d'Einstein, la grandeur du champ est donnée par la formule suivante.

Champ magnétique fait par une charge en mouvement

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi r^2} qv\sin\theta$$

Cliquez ici si vous voulez voir la preuve de cette formule à partir de la relativité :
http://physique.merici.ca/electricite/Bchargemouvement.pdf

Dans cette formule, θ est l'angle entre la vitesse de la charge et la direction de la ligne allant de la charge à l'endroit où on veut savoir le champ. C'est donc l'angle représenté sur la figure si on cherche la valeur du champ au point P.



On peut alors appliquer ce résultat pour trouver le champ fait par un petit bout de fil de longueur s et dont l'aire du bout est A.

Dans ce petit bout de fil, il y a N électrons de charge -e en mouvement avec la vitesse de dérive. La grandeur de champ est simplement la somme de tous les champs faits par chaque électron.

$$B = N\frac{\mu_0}{4\pi r^2}ev_d \sin\theta$$

Puisque le courant est

$$I = nev_d A$$

$$I = \frac{N}{Volume}ev_d A$$

$$I = \frac{N}{As}ev_d A$$

$$I = \frac{N}{s}ev_d$$

on a

$$N = \frac{Is}{ev_d}$$

et donc que

$$B = \frac{Is}{ev_d}\frac{\mu_0}{4\pi r^2}ev_d \sin\theta$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi r^2}Is\sin\theta$$

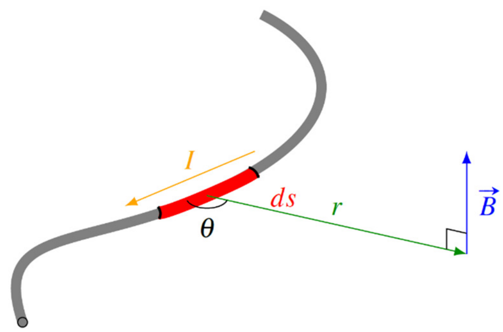
On va maintenant faire tendre la longueur du fil pour obtenir le champ fait par un très petit bout de fil. On a alors

Grandeur du champ magnétique fait par un petit bout de fil de longueur infinitésimale.

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi r^2} I ds \sin\theta$$

Le champ est toujours perpendiculaire à la ligne qui va du fil à l'endroit où on veut connaitre le champ (ligne *r* sur la figure). Pour connaitre la direction, on place notre pouce dans le sens du courant dans le fil et nos doigts dans le sens de *r*. Quand on plie nos doigts de 90°, ils pointent dans la direction du champ magnétique. C'est exactement la même règle que pour un fil infini.

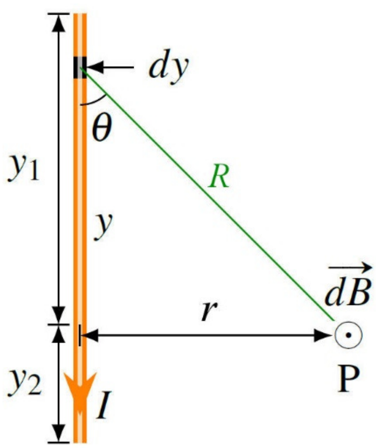
Cette loi est la loi de Biot-Savart, faite par Jean-Baptiste Biot et Félix Savart en 1820, donc très peu de temps après la découverte de Ørsted.



Donc si on voulait trouver le champ fait par un fil, on devrait séparer le fil en petits morceaux infinitésimaux et trouver le champ fait par chacun des petits morceaux. On devrait ensuite sommer tous ces champs à l'aide d'intégrales (une pour chaque composante) pour trouver le champ total.

Le champ magnétique fait par un bout de fil rectiligne

On va séparer le fil en petit bout de longueur *dy*. Le champ fait par un des petits morceaux, qui est à la distance *R* du point *P*, est



$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi R^2} I dy \sin\theta$$

et ce champ sort de la page. (C'est d'ailleurs le cas pour tous les morceaux du fil.) Quand on change de morceau, *R* et θ change. On doit donc donner la valeur de *R* et θ en fonction de *y* avant de pouvoir intégrer. Sur la figure, on peut voir que

$$\sin\theta = \frac{r}{R}$$

On a donc

$$dB = \frac{\mu_0 r}{4\pi R^3} I dy$$

Ensuite, on a que

$$R = \sqrt{r^2 + y^2}$$

ce qui nous amène à

$$dB = \frac{\mu_0 r}{4\pi\left(r^2+y^2\right)^{\frac{3}{2}}} Idy$$

On peut maintenant intégrer pour obtenir le champ total

$$B = \int_{-y_2}^{y_1} \frac{\mu_0 r}{4\pi\left(r^2+y^2\right)^{\frac{3}{2}}} Idy$$

Après quelques manipulations mathématiques, on arrive à la grandeur du champ fait par un fil rectiligne. (On ajoute des valeurs absolues, car c'est la grandeur du champ.)

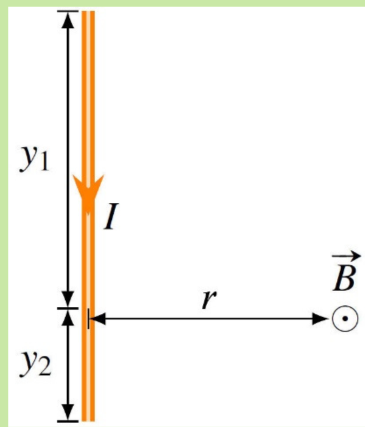
Champ magnétique fait par un fil rectiligne

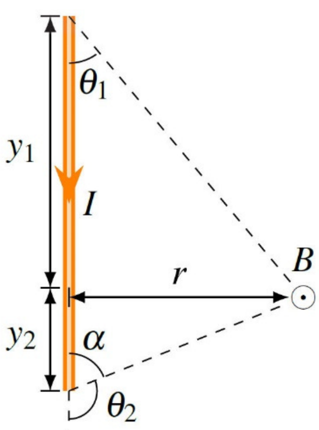
Grandeur :

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r}\left|\frac{y_1}{\sqrt{y_1^2+r^2}} + \frac{y_2}{\sqrt{y_2^2+r^2}}\right|$$

Direction : perpendiculaire à la ligne *r*.

On place notre pouce de la main droite dans le sens du courant et nos doigts dans le sens de *r*. Le champ est dans la direction vers laquelle nos doigts plient.





On peut aussi écrire cette formule en fonction des angles entre le courant et la direction du point où on veut savoir le champ aux deux extrémités du fil (θ_1 et θ_2 sur la figure).

Dans ce cas, on a

$$\cos\theta_1 = \frac{y_1}{\sqrt{y_1^2+r^2}}$$

$$\cos\theta_2 = \cos\left(180° - \alpha\right) = -\cos\alpha$$

$$= -\frac{y_2}{\sqrt{y_2^2+r^2}}$$

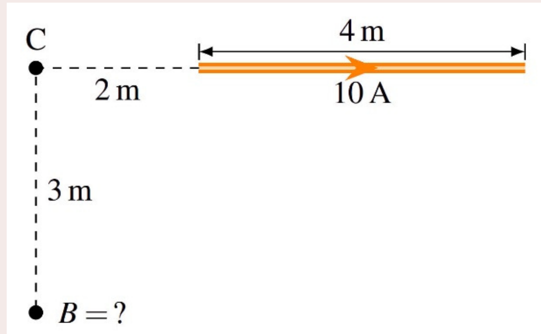
Ainsi, la grandeur du champ est

Grandeur du champ magnétique fait par un fil rectiligne

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r}\left|\cos\theta_1 - \cos\theta_2\right|$$

Notez qu'on peut appliquer ces formules même si on cherche le champ à un endroit qui n'est pas directement à côté du fil. L'exemple suivant vous montre comment utiliser la formule dans ce cas.

Exemple 9.4.1



Quel est le champ magnétique à l'endroit indiqué sur la figure ?

On trouve le champ avec

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r}\left|\frac{y_1}{\sqrt{y_1^2 + r^2}} + \frac{y_2}{\sqrt{y_2^2 + r^2}}\right|$$

Pour trouver r, on doit toujours prendre une ligne perpendiculaire au fil et qui va à l'endroit où on veut savoir le champ. Toutefois ici, c'est impossible parce que le fil n'est pas assez long. Dans ce cas, on prolonge le fil avec une ligne droite et on trace une ligne perpendiculaire au prolongement du fil et qui va à l'endroit où on veut savoir le champ. La longueur de cette ligne perpendiculaire est r, qui vaut donc 3 m ici. Le point C est le point du fil (ou du prolongement du fil) d'où part cette ligne perpendiculaire.

Quand on a fait la formule, le point C était entre les deux extrémités du fil. Quand c'est le cas, les valeurs de y_1 et y_2 sont toutes les 2 positives. Quand le point C est sur le prolongement du fil, une des valeurs de y est négative.

y_1 est la distance entre le bout du fil où arrive le courant (le bout à gauche ici) et le point C. Normalement, ce point devrait être à gauche du point C pour que le point C soit entre les 2 bouts, mais il est à droite. C'est donc ce bout qui est du mauvais côté du point C et c'est pourquoi y_1 est négatif. y_1 est donc -2 m ici.

y_2 est la distance entre le bout du fil où sort le courant et le point C. y_2 est donc 6 m ici.

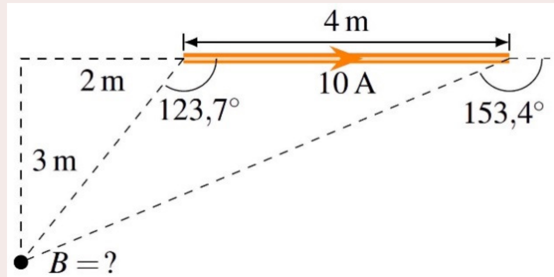
Le champ est donc

$$\begin{aligned}B &= \frac{\mu_0 I}{4\pi r}\left|\frac{y_1}{\sqrt{y_1^2 + r^2}} + \frac{y_2}{\sqrt{y_2^2 + r^2}}\right| \\ &= \frac{4\pi\times 10^{-7}\frac{Tm}{A}\times 10A}{4\pi\cdot 3m}\cdot\left|\frac{-2m}{\sqrt{(-2m)^2+(3m)^2}} + \frac{6m}{\sqrt{(6m)^2+(3m)^2}}\right| \\ &= 1{,}132\times 10^{-7}T\end{aligned}$$

Si on avait voulu le faire avec la formule

$$B=\frac{\mu_0 I}{4\pi r}\left|\cos\theta_1-\cos\theta_2\right|$$

on aurait trouvé, par trigonométrie, les angles montrés sur cette figure.



N'oubliez pas que ce sont les angles entre le courant, vers le haut ici, et les lignes pointillées partant des extrémités et allant au point où on veut connaitre le champ. Le champ aurait alors été

$$\begin{aligned}B&=\frac{\mu_0 I}{4\pi r}\left|\cos\theta_1-\cos\theta_2\right|\\&=\frac{4\pi\times10^{-7}\frac{Tm}{A}\cdot10A}{4\pi\cdot3m}\cdot\left|\cos123,7°-\cos153,4°\right|\\&=1,132\times10^{-7}T\end{aligned}$$

On trouve ensuite la direction avec la règle de la main droite. Notre pouce est vers la droite et nos doigts suivent *r*. Comme nos doigts plient alors vers la page, le champ magnétique entre dans la page.

Il reste un cas un peu particulier à faire : quand on est vis-à-vis le bout du fil.

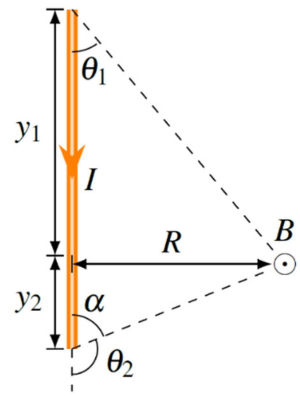
Dans ce cas, nos formules pour le fil rectiligne s'appliquent difficilement, car r = 0. Toutefois, on peut trouver le champ assez rapidement en retournant à la formule du champ fait par un petit morceau de fil.

$$dB=\frac{\mu_0}{4\pi r^2}Ids\sin\theta$$

Mais comme l'endroit où on veut savoir le champ est directement dans la direction du courant, on a que $\theta = 0°$ et donc que sin $\theta = 0$. On obtient le même résultat si on inverse le sens du courant, car l'angle est alors 180°, ce qui donne encore que sin $\theta = 0$. On a donc $dB = 0$. En sommant tous les champs faits par tous les morceaux, on additionnera plein de 0, pour obtenir les résultats suivants.

Champ magnétique fait par un fil rectiligne infini

On peut maintenant prouver la formule du champ d'un fil infini en faisant tendre y_1 et y_2 vers l'infini ou, ce qui revient au même, en faisant tendre θ_1 vers 0° et θ_2 vers 180° dans la formule du fil rectiligne. On a alors



$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r}\left|\lim_{\theta_1 \to 0^\circ}\cos\theta_1 - \lim_{\theta_2 \to 180^\circ}\cos\theta_2\right|$$

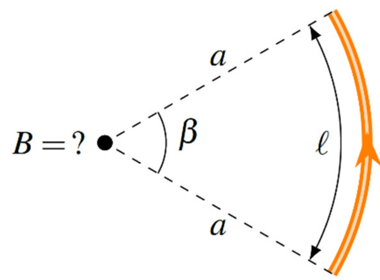
$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r}\left|1 - -1\right|$$

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

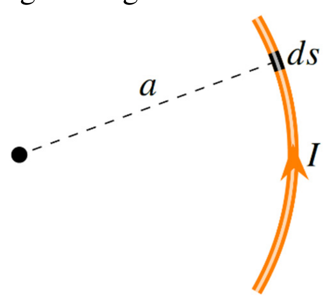
C'est la formule qu'on avait pour le fil rectiligne infini.

Champ magnétique au centre de courbure d'un arc de cercle

On va maintenant chercher le champ magnétique à l'endroit montré sur la figure de droite.



Pour y arriver, on va séparer l'arc en petits morceaux (la figure de gauche montre un de ces petits morceaux).



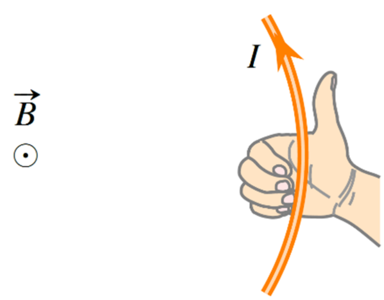
Le champ fait par un petit morceau est

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi r^2} I ds \sin\theta$$

L'angle entre la direction du courant et la ligne pointillée allant à l'endroit où on veut savoir le champ (θ dans la formule) est toujours 90°, peu importe la position du morceau. La distance entre le petit morceau de fil et l'endroit où on peut savoir le champ (r dans la formule) est toujours égale au rayon de courbure de l'arc, qui est a, peu importe la position du morceau. On a donc

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi a^2} I ds \sin 90^\circ$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi a^2} I ds$$



De plus, le champ est toujours dans la même direction (ici en sortant de la page), peu importe la position du morceau selon la règle de la main droite.

Comme tous les champs dB sont dans la même direction, on trouve le champ total en sommant simplement tous les champs. On a alors

$$B = \int \frac{\mu_0}{4\pi a^2} Ids$$

En sortant les constantes on a

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a^2} \int ds$$

Évidemment, la somme des longueurs de tous les petits morceaux nous donne la longueur de l'arc.

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a^2} \ell$$

qui est notre formule pour la grandeur du champ. On peut aussi donner la formule en utilisant l'angle (en radians) que fait l'arc, car

$$\beta = \frac{\ell}{a}$$

On a donc

Champ magnétique au centre de courbure d'un arc de cercle

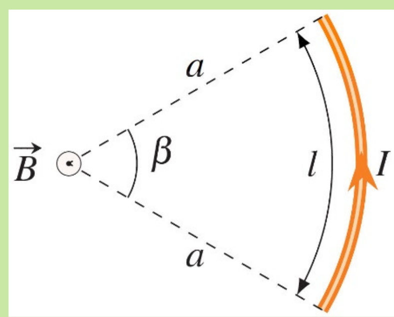
Grandeur :

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a^2} \ell$$

ou

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \beta$$

Attention : β est en radians dans cette formule.

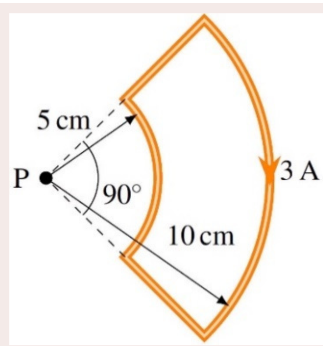


Direction : perpendiculaire à la ligne *a.*

On place notre pouce de la main droite dans le sens du courant et nos doigts vers le centre de courbure. Le champ est dans la direction vers laquelle nos doigts plient.

Exemple 9.4.2

Quel est le champ magnétique au point indiqué sur la figure ?



Dans ce cas, on va séparer ce circuit en 4 morceaux : 2 arcs de cercle et deux fils rectilignes. On va trouver le champ fait par chacun de ces morceaux pour ensuite les additionner.

Le champ des fils rectilignes est nul, car ils sont directement en ligne avec l'endroit où on veut connaitre le champ.

Le champ du grand arc est

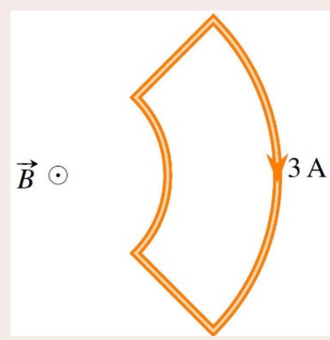
$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{4\pi a}\beta \\ &= \frac{4\pi\times 10^{-7}\,\frac{Tm}{A}\cdot 3A}{4\pi\cdot 0{,}1m}\cdot\frac{\pi}{2} \\ &= 4{,}7124\times 10^{-6}T \end{aligned}$$

Ce champ entre dans la page (pouce vers le bas et doigts vers la gauche : les doigts plient vers l'intérieur de la page).

Le champ du petit arc est

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{4\pi a}\beta \\ &= \frac{4\pi\times 10^{-7}\,\frac{Tm}{A}\cdot 3A}{4\pi\cdot 0{,}05m}\cdot\frac{\pi}{2} \\ &= 9{,}4248\times 10^{-6}T \end{aligned}$$

Ce champ sort de la page (pouce vers le haut et doigts vers la gauche : les doigts plient en sortant de la page).



Le champ total est donc (en mettant le positif en sortant de la page)

$$\begin{aligned} B &= B_{\text{fils rectilignes}} + B_{\text{grand arc}} + B_{\text{petit arc}} \\ &= 0T + -4{,}7124\times 10^{-6}T + 9{,}4248\times 10^{-6}T \\ &= 4{,}7124\times 10^{-6}T \end{aligned}$$

Comme le résultat est positif, le champ sort de la page.

Champ magnétique au centre d'une boucle (ou anneau) circulaire avec *N* tours de fils

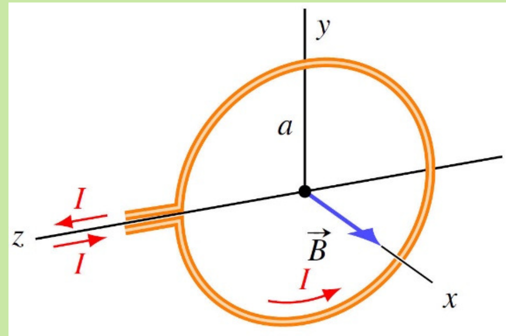
Pour trouver ce champ, on n'a qu'à appliquer la formule de l'arc de cercle. Avec N tours de fil, l'angle fait par l'arc est

$$\beta = N\cdot 2\pi$$

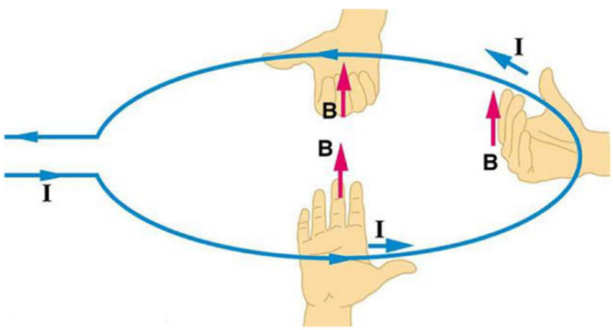
On a donc que

Grandeur du champ magnétique au centre d'une boucle circulaire avec *N* tours de fil

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2a}$$



Pour la direction, on peut trouver la direction du champ avec la règle de la main droite qu'on connait déjà. On place notre pouce dans le sens du courant à un endroit sur l'anneau et nos doigts vers le centre de l'anneau (endroit où on veut connaitre le champ). La direction du champ est donnée par la direction vers laquelle nos doigts plient.



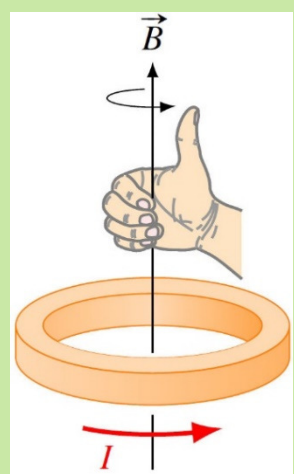
cnx.org/content/m42382/latest/?collection=col11406/latest

En fait, le champ doit absolument être perpendiculaire au plan de la boucle. Il ne reste donc que deux possibilités pour la direction du champ : d'un côté du plan de la boucle, ou de l'autre côté.

On peut aussi trouver la direction du champ avec une autre règle de la main droite pour déterminer la direction du champ au centre de la boucle. (C'est notre 4[e] règle de la main droite.)

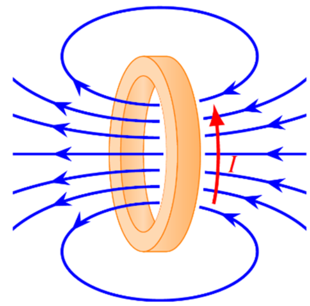
Direction du champ magnétique au centre d'une boucle circulaire avec *N* tours de fil

On place nos doigts dans le sens du courant dans la boucle. Notre pouce donne alors la direction du champ magnétique au centre de la boucle.



On pourrait calculer le champ n'importe où autour de l'anneau, mais les calculs sont beaucoup plus longs que ce qu'on vient de faire.

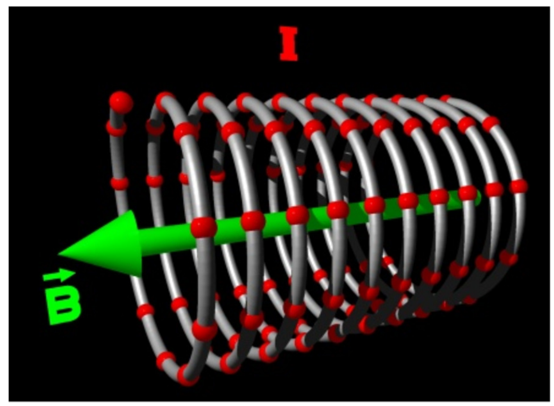
Voici l'allure du champ qu'on obtient dans le cas d'un anneau parcouru par un courant.



Champ dans un solénoïde

Un solénoïde ressemble beaucoup à un ressort. On veut connaitre le champ dans le solénoïde quand on fait passer un courant dans le fil.

On peut trouver ce champ en sommant le champ de chaque petit bout de fil formant le solénoïde. On ne fera pas ce calcul ici et, de toute façon, on aura une façon beaucoup plus simple plus tard pour trouver ce champ.



web.ncf.ca/ch865/englishdescr/Solenoid.html

Le résultat est remarquable : le champ est uniforme à l'intérieur du solénoïde (à condition que les anneaux du solénoïde soient assez près les uns des autres et qu'on ne soit pas trop près des bouts du solénoïde).

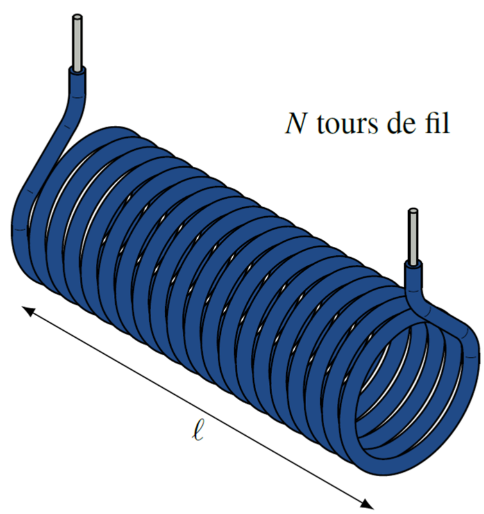
Les calculs montrent que la grandeur du champ dans le solénoïde est

$$B = \frac{\mu_0 N I}{\ell}$$

On utilise parfois la densité de tour de fil du solénoïde, qui est

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

On a alors le champ suivant.

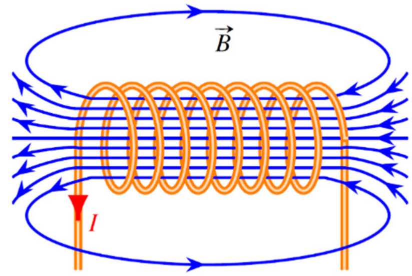


commons.wikimedia.org/wiki/File:Solenoid,_air_core,_insulated,_20_turns,_(shaded).svg

Grandeur du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde.

$$B = \frac{\mu_0 N I}{\ell} = \mu_0 n I$$

Les lignes de champs sont parallèles à l'axe du solénoïde.

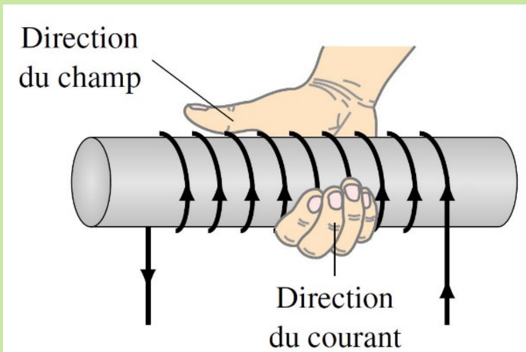


Cette figure montre les lignes de champ du solénoïde. On voit bien que le champ est uniforme à l'intérieur du solénoïde puisque les lignes de champ sont équidistantes.

Pour savoir dans quelle direction ces lignes suivent l'axe, on prend le même truc qu'avec l'anneau (c'est la même règle parce que le solénoïde est en fait une série d'anneaux).

Direction du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde.

Les lignes de champ sont parallèles à l'axe du solénoïde.



On trouve la direction avec la règle de la main droite : on place nos doigts dans le sens de la rotation du courant dans les anneaux du solénoïde, notre pouce pointe alors dans la direction du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde.

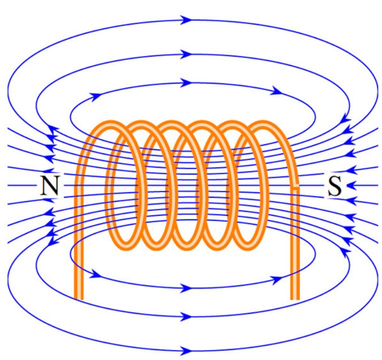
Les solénoïdes occupent une place très importante en magnétisme pour deux raisons.

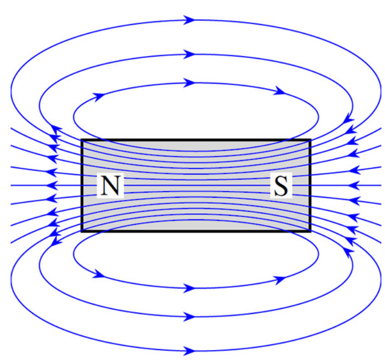
1) Ils permettent de créer un champ magnétique uniforme.
2) Les solénoïdes agissent exactement comme un aimant.

Nous allons explorer un peu plus cette 2^e possibilité dans la prochaine section.

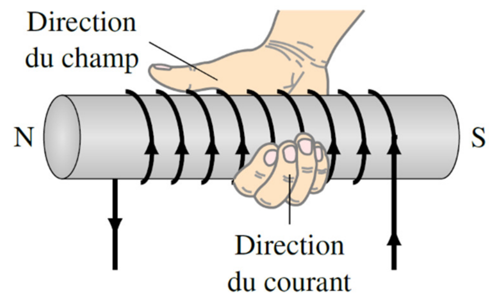
9.5 LES ÉLECTROAIMANTS ET LES RELAIS

Voici à quoi ressemblent les champs d'un barreau aimanté et d'un solénoïde.

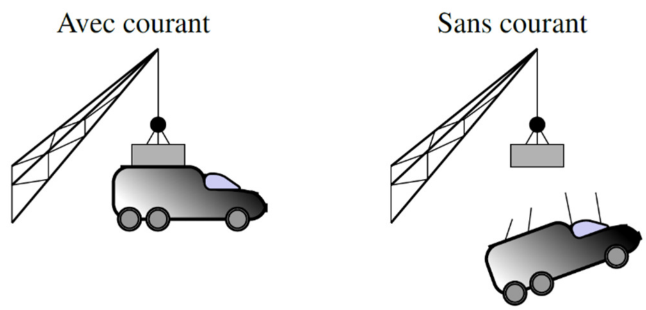




Si les champs sont identiques, alors l'effet que le solénoïde a autour de lui doit être exactement le même que l'effet que l'aimant a autour de lui. Le solénoïde va donc agir exactement comme un aimant. On parle alors d'*électroaimant* (inventé en 1823) puisque c'est un aimant uniquement quand il y a un courant électrique qui circule dans le fil du solénoïde. Le côté nord de l'aimant est du côté où les lignes de champ sortent. On peut donc trouver le côté nord de l'électroaimant avec la règle de la main droite qui nous permet de trouver la direction du champ. On met nos doigts dans le sens de la rotation du courant et notre pouce pointe alors dans la direction du champ, donc vers le côté nord de l'électroaimant.

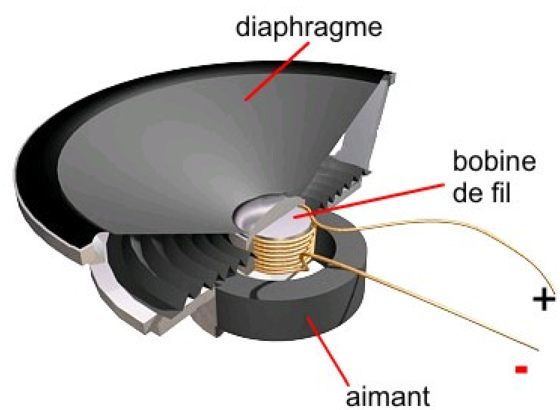


L'avantage de l'électroaimant, c'est qu'on peut avoir ou non un aimant en faisant passer un courant ou non dans le solénoïde. C'est donc un aimant qui peut être en marche ou non, ce qu'on ne peut pas faire avec un aimant permanent.



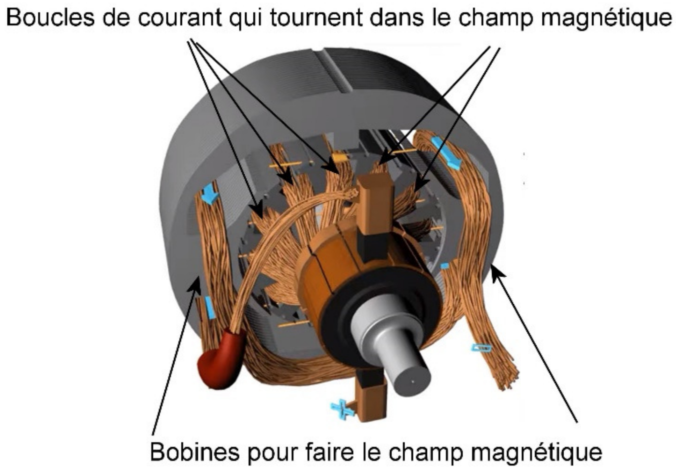
On peut voir un électroaimant en action dans ce clip.
http://www.youtube.com/watch?v=lSmuqLtmuwg

C'est en utilisant ces propriétés du solénoïde qu'on fabrique un hautparleur. Dans un hautparleur, il y a un aimant permanent et un solénoïde. Selon le courant qui passe dans le solénoïde, ce dernier sera attiré ou repoussé par l'aimant. Si on veut faire un son de 500 Hz, on va inverser le courant rapidement pour que le solénoïde soit repoussé et attiré alternativement de sorte qu'il fasse un mouvement d'oscillation avec une période de 500 Hz. Le solénoïde étant fixé à un diaphragme, ce dernier vibrera aussi à 500 Hz si le solénoïde vibre à 500 Hz. C'est la vibration du diaphragme qui fait le son à 500 Hz.

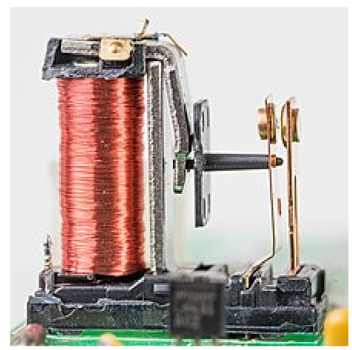


escplantagenet.org/informatique/robotique/microSon1.html

On peut utiliser des électroaimants dans les moteurs électriques plutôt que des aimants permanents. Avec de tels électroaimants, le moteur est beaucoup plus puissant. On peut maintenant écouter une autre partie (de 2:31 à 3:21) de notre vidéo.
https://www.youtube.com/watch?v=A3b3Km5KVXs
En fin de compte, il y a beaucoup de bobines de fil dans un moteur. Il y a plusieurs bobines qui forment les boucles de courant et il y a les bobines qui génèrent le champ magnétique.

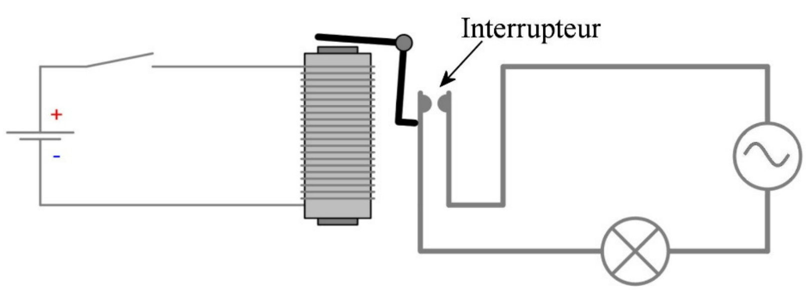


On utilise aussi les électroaimants dans les relais. Un relai est une composante d'un circuit qui permet l'ouverture ou la fermeture d'un circuit. C'est donc un interrupteur, mais c'est un interrupteur contrôlé par un courant.

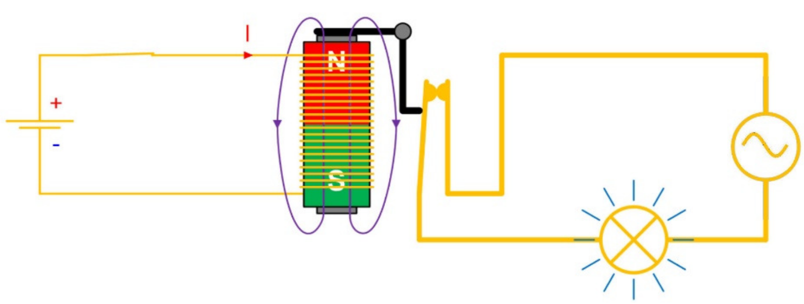


Le relai est composé d'une bobine de fil qui va jouer le rôle d'un électroaimant. Quand il n'y a pas de courant dans la bobine, l'interrupteur est ouvert.

en.wikipedia.org/wiki/Relay



Quand on envoie un courant dans la bobine, elle devient un électroaimant et elle attire la petite plaque métallique au-dessus de la bobine. Cette attraction fait tourner le petit morceau de métal au bout de la bobine, ce qui pousse sur un des côtés de l'interrupteur. Cette poussée fait en sorte que les deux côtés de l'interrupteur entrent en contact. L'interrupteur est alors fermé et le courant peut maintenant circuler dans le 2e circuit.



Quand on coupe le courant dans la bobine, l'interrupteur du 2e circuit s'ouvre à nouveau et le courant ne circule plus dans le 2e circuit. On a alors affaire à un relai monostable. Dans les relais bistables, le courant continue de circuler dans le 2e circuit quand on coupe l'alimentation de la bobine parce qu'on mécanisme garde l'interrupteur fermé. Pour rouvrir l'interrupteur du 2e circuit, il fait alimenter à nouveau la bobine pour débloquer le mécanisme.

Les relais font un petit son quand ils s'actionnent. On entend ces petits bruits quand on fait fonctionner un four. Les cliquetis entendus proviennent de relais qui contrôlent le courant dans les éléments (ils allument et ferment des éléments pour que le chauffage se fasse uniformément).

9.6 LE THÉORÈME D'AMPÈRE

Avec le théorème d'Ampère, découvert en 1822, on utilise la symétrie de certaines situations pour calculer le champ magnétique, un peu comme on a fait avec le théorème de Gauss pour trouver le champ électrique dans certaines situations symétriques.

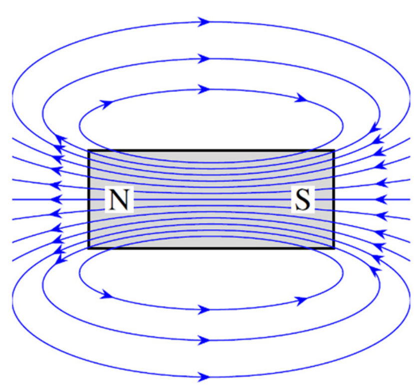
Le théorème de Gauss avec le champ magnétique

On pourrait penser que le théorème de Gauss nous permettra de trouver le champ dans certaines situations en calculant le flux magnétique

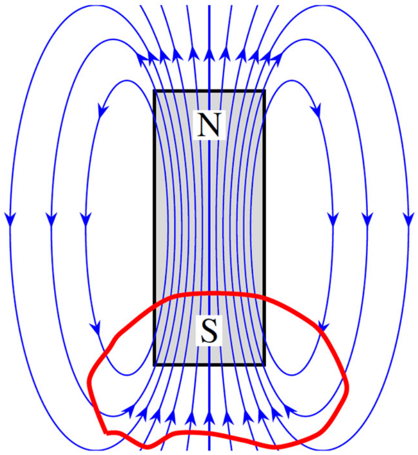
$$\phi_B = \sum BA\cos\theta$$

La définition du flux magnétique est la même qu'avec le flux électrique, mais on utilise le champ magnétique plutôt que le champ électrique. Ainsi, le flux magnétique est proportionnel au nombre de lignes de champ magnétique qui traversent une surface.

Toutefois, le calcul du flux à travers une surface fermée ne mène pas très loin avec le champ magnétique. En effet, les lignes de champ ne sont pas des lignes qui commencent quelque part et qui se terminent quelque part, ce sont des lignes qui se referment sur elles-mêmes. On pourrait penser qu'avec un aimant permanent, les lignes partent du pôle nord et vont au pôle sud, mais, en réalité, elles se prolongent dans l'aimant pour se refermer sur elles-mêmes (figure de droite).



Ainsi, si on veut calculer le flux traversant une surface fermée, on obtiendra toujours un résultat nul, car il y aura toujours le même nombre de lignes de champ qui entre dans la surface qu'il y en a qui sortent puisqu'elles doivent se refermer sur elles-mêmes.



Par exemple, sur la figure, on a fait une surface de Gauss entourant le pôle sud d'un aimant. On voit qu'il y a autant de lignes de champ qui entrent dans la surface qu'il y en a qui sortent de la surface.

Le théorème de Gauss en magnétisme devient donc

Théorème de Gauss avec le champ magnétique = 3^e équation de Maxwell

$$\sum BA\cos\theta = 0 \quad \text{(sur une surface fermée)}$$

ou (équivalent)

$$\oint \vec{B} \cdot \overrightarrow{dA} = 0$$

C'est essentiellement une loi qui dit qu'il n'y a pas de monopôles magnétiques.

Reste que si le flux est toujours nul, on ne peut pas utiliser cette équation pour trouver le champ magnétique même dans la situation symétrique.

L'intégrale de ligne du champ magnétique : le théorème d'Ampère

Au chapitre sur le potentiel, on calculait la différence de potentiel entre deux positions en calculant

$$\sum E\Delta s\cos\theta$$

ou

$$\int \vec{E} \cdot \overrightarrow{ds}$$

(On utilise la deuxième formule si le champ change de façon continue.) En faisant ce calcul, on suivait une trajectoire entre les deux positions et c'est pour ça qu'on l'appelle l'intégrale de ligne du champ électrique.

Ici, on va faire la même chose, mais avec le champ magnétique. On obtiendra alors l'intégrale de ligne du champ magnétique.

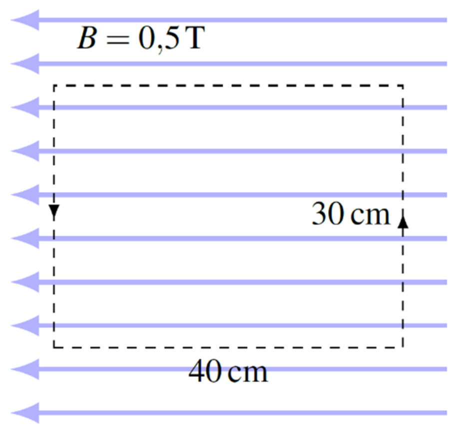
$$\sum B\Delta s\cos\theta$$

ou

$$\int \vec{B}\cdot\overrightarrow{ds}$$

Regardons ce qu'on obtient si on calcule cette intégrale de ligne sur une trajectoire fermée. On se rappelle que cette intégrale sur une trajectoire fermée donnait toujours 0 avec le champ électrique (c'était notre deuxième équation de Maxwell et notre loi des mailles de Kirchhoff).

Commençons par voir ce que ça donne dans un champ magnétique uniforme. Prenons la trajectoire montrée à droite.



Il faut séparer le trajet en 4 morceaux, car l'angle θ (qui est l'angle entre la trajectoire et le champ) change quand la trajectoire change de direction.

Côté 1 (côté droit)

$$B\Delta s\cos\theta = 0,5T\cdot 0,3m\cdot\cos 90° = 0$$

Côté 2 (haut)

$$B\Delta s\cos\theta = 0,5T\cdot 0,4m\cdot\cos 0° = 0,2Tm$$

Côté 3 (côté gauche)

$$B\Delta s\cos\theta = 0,5T\cdot 0,3m\cdot\cos 90° = 0$$

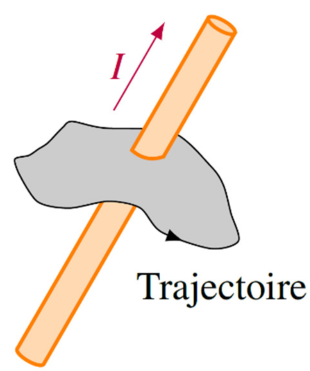
Côté 4 (bas)

$$B\Delta s\cos\theta = 0,5T\cdot 0,4m\cdot\cos 180° = -0,2Tm$$

La somme sur toute la trajectoire est donc

$$\sum B\Delta s\cos\theta = 0 + 0,2Tm + 0 + -0,2Tm = 0$$

On obtient un résultat nul, et on voit assez facilement que c'est ce qu'on aurait obtenu, peu importe la valeur de B et des dimensions de la trajectoire.

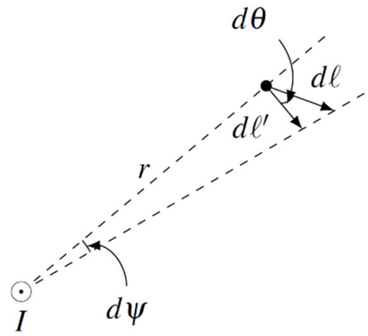


On pourrait alors penser qu'on aura toujours un résultat nul comme c'était le cas avec le champ électrique. Ce n'est toutefois pas le cas, car voici ce qu'on obtient quand on fait le calcul sur une trajectoire entourant un fil parcouru par un courant I.

Premièrement, on va définir dC sur une petite partie de cette trajectoire par

$$dC = Bdl\cos\theta$$

Or, comme on peut le voir sur la figure de gauche, on a, sur une partie de trajectoire,



$$dl' = dl\cos\theta$$

Ainsi, dC est

$$dC = Bdl'$$

L'angle en radians fait par ce bout de fil, mesuré à partir de fil, est

$$d\psi = \frac{dl'}{r}$$

Cela signifie que dC est

$$dC = Brd\psi$$

Comme le champ magnétique du fil est

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r}$$

on a, pour un fil passant à l'intérieur de la trajectoire,

$$\begin{aligned} dC_{\text{int}} &= \frac{\mu_0 I_{\text{int}}}{2\pi r} r d\psi \\ &= \frac{\mu_0 I_{\text{int}}}{2\pi} d\psi \end{aligned}$$

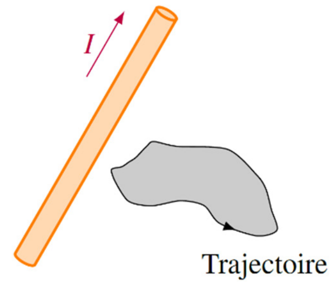
Si on additionne maintenant tous les dC_{int} de tous les petits bouts de fils qui composent la trajectoire entourant le fil, on arrive à

$$\begin{aligned} C_{\text{int}} &= \int \frac{\mu_0 I_{\text{int}}}{2\pi} d\psi \\ &= \frac{\mu_0 I_{\text{int}}}{2\pi} \int d\psi \\ &= \frac{\mu_0 I_{\text{int}}}{2\pi} \psi_{tot} \end{aligned}$$

Comme l'angle total pour une trajectoire qui entoure le fil est 2π, on a

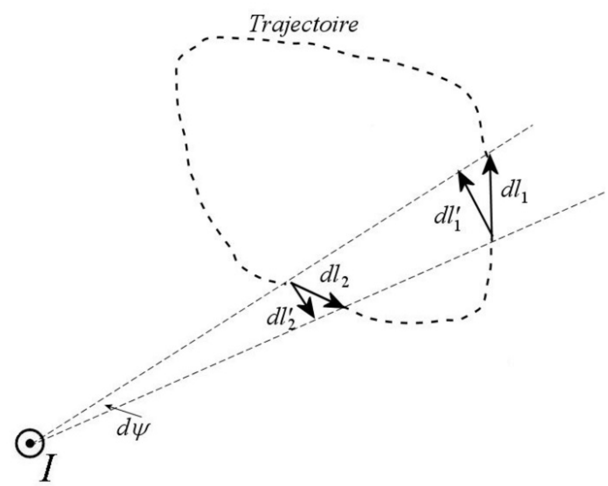
$$\begin{aligned} C_{\text{int}} &= \frac{\mu_0 I_{\text{int}}}{2\pi} 2\pi \\ &= \mu_0 I_{\text{int}} \end{aligned}$$

On voit que maintenant, le résultat n'est pas nul. Il semble donc que la présence du fil a fait que l'intégrale de ligne n'est pas nulle. Est-ce simplement la présence d'un courant qui fait qu'elle n'est pas nulle ou faut-il que la trajectoire entoure nécessairement le fil ? Pour répondre à cette question, examinons ce qui se passe si la trajectoire n'entoure pas le fil (figure de droite).



Pour la partie de trajectoire du côté opposé de la trajectoire (trajectoire dl_1), dC est

$$dC_1 = B_1 \cos\theta_1 dl_1$$



Encore une fois, on peut travailler avec la longueur dl' pour obtenir

$$dC_1 = B_1 dl_1'$$

Vue du fil, cette petite trajectoire fait un angle $d\psi$ et la longueur de la trajectoire est

$$dl_1' = r_1 d\psi$$

dC_1 est donc

$$dC_1 = B_1 r_1 d\psi$$

Avec la valeur du champ magnétique fait par le fil, on obtient

$$\begin{aligned} dC_1 &= \frac{\mu_0 I}{2\pi r_1} r_1 d\psi \\ &= \frac{\mu_0 I}{2\pi} d\psi \end{aligned}$$

Examinons maintenant la trajectoire dl_2. Pour cette trajectoire, dC est

$$dC_2 = B_2 \cos\theta_2 dl_2$$

Encore une fois, on peut travailler avec la longueur dl' pour obtenir

$$dC_2 = B_2 dl_2'$$

Vue du fil, cette petite trajectoire fait un angle $d\psi$ et la longueur de la trajectoire est

$$dl_2' = r_2 d\psi$$

dC_2 est donc

$$dC_2 = B_2 r_2 d\psi$$

Avec la valeur du champ, on obtient

$$\begin{aligned} dC_2 &= -\frac{\mu_0 I}{2\pi r_2} r_2 d\psi \\ &= -\frac{\mu_0 I}{2\pi} d\psi \end{aligned}$$

Cette valeur est négative puisque le vecteur trajectoire est nécessairement dans le sens opposé à ce qu'on avait pour la trajectoire dl_1, ce qui inverse le signe.

Si on additionne maintenant les deux dC du fil dans cette direction, on arrive à

$$\begin{aligned} C_{\text{ext}} &= C_1 + C_2 \\ &= \frac{\mu_0 I_{ext}}{2\pi} d\psi + -\frac{\mu_0 I_{ext}}{2\pi} d\psi \\ &= 0 \end{aligned}$$

En additionnant les dC_{ext} dans toutes les directions, on somme donc une suite de zéro. On a donc

$$C_{\text{ext}} = 0$$

Ainsi, l'intégrale de ligne est nulle si le fil parcouru par le courant n'est pas à l'intérieur de la trajectoire. On en conclut que l'intégrale de ligne ne donne pas 0 uniquement s'il y a un courant qui passe à l'intérieur de la surface délimitée par la trajectoire. On arrive donc à

Théorème d'Ampère = 4^e^ équation de Maxwell (incomplète)

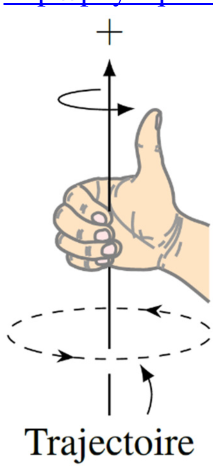
$$\sum B\Delta s\cos\theta = \mu_0 I_{\text{int}} \quad \text{(sur une trajectoire fermée)}$$

ou (équivalent)

$$\oint \vec{B}\cdot\overrightarrow{ds} = \mu_0 I_{\text{int}}$$

où I_{int} est le courant traversant la surface délimitée par la trajectoire

(Vous pouvez voir une preuve plus formelle, mais pas du tout de niveau collégial ici : http://physique.merici.ca/electricite/Ampere.pdf.)

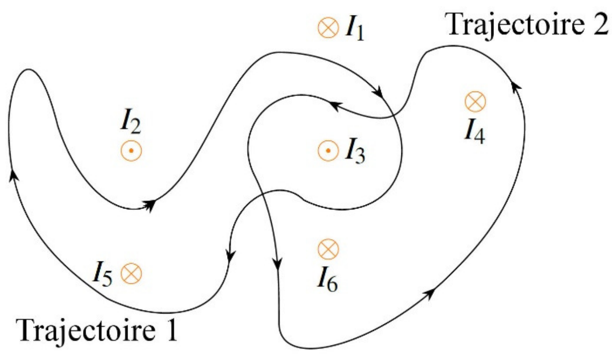


On verra au dernier chapitre qu'il manque un terme à cette équation pour obtenir la 4^e^ équation de Maxwell.

Il y a une règle pour déterminer le signe du courant dans la formule en utilisant une 5^e^ règle de la main droite. Pour déterminer le signe du courant, placer vos doigts dans le sens de la trajectoire (que vous avez vous-même décidé). Votre pouce pointe alors dans la direction positive.

Si le courant traverse la surface délimitée par la trajectoire dans cette direction, il est positif et si le courant traverse la surface délimitée par la trajectoire dans l'autre direction, il est négatif.

On peut donc déterminer facilement la valeur de l'intégrale de ligne avec les courants traversant la surface délimitée par la trajectoire. Prenons un exemple pour illustrer. Dans cet exemple, tous les fils transportent des courants de 10 A.



Pour calculer la valeur de l'intégrale de ligne pour la trajectoire 1, on regarde quels sont les courants qui passent dans la surface délimitée par la trajectoire. Il n'y a que deux courants : I_5 qui est de +10 A et I_3 qui vaut -10 A. Le théorème d'Ampère nous donne donc

$$\begin{aligned}\sum B\Delta s\cos\theta &= \mu_0 I_{\text{int}} \\ &= \mu_0\left(10A+-10A\right) \\ &= 0\end{aligned}$$

L'intégrale de ligne est donc nulle sur cette trajectoire.

Pour calculer la valeur de l'intégrale de ligne pour la trajectoire 2, on regarde quels sont les courants qui passent dans la surface délimitée par la trajectoire : il y en a trois : I_6 qui est de -10 A, I_3 qui est de +10 A et I_4 qui vaut -10 A. Le théorème d'Ampère nous donne donc

$$\begin{aligned}\sum B\Delta s\cos\theta &= \mu_0 I_{\text{int}} \\ &= 4\pi\times10^{-7}\,\tfrac{Tm}{A}\cdot\left(-10A+10A+-10A\right) \\ &= 4\pi\times10^{-7}\,\tfrac{Tm}{A}\cdot\left(-10A\right) \\ &= -1,2566\times10^{-5}\,Tm\end{aligned}$$

C'est la valeur de l'intégrale de ligne sur cette trajectoire.

Il n'y a pas de potentiel magnétique

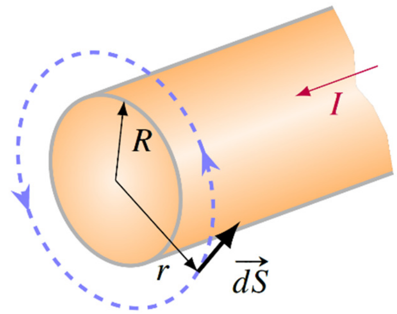
Il sera impossible d'utiliser le concept de potentiel avec le champ magnétique ni même d'énergie magnétique puisque l'intégrale de ligne sur une trajectoire n'est pas toujours nulle.

En effet, pour utiliser le concept d'énergie potentielle, il faut que la force soit conservatrice. Or, pour qu'une force soit conservatrice, il faut que l'intégrale de ligne de cette force soit toujours nulle, ce qui n'est pas le cas ici.

Sachez qu'il existe cependant un *vecteur potentiel* ($\vec{A}$) en électromagnétisme, mais il ne sert pas à déterminer l'énergie potentielle magnétique.

Application du théorème d'Ampère à des situations où il y a une symétrie cylindrique pour trouver le champ magnétique

Quand il y a symétrie cylindrique, on va utiliser une trajectoire circulaire autour de l'objet cylindrique.

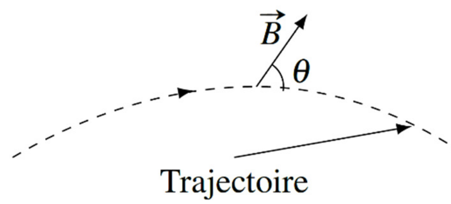


Le champ doit avoir la même grandeur partout parce qu'il n'y a pas de raison pour qu'il soit plus fort à un endroit qu'un autre quand il y a symétrie cylindrique.

De plus, l'angle doit être toujours le même parce qu'il n'y a pas de raison pour qu'il soit plus fort à un endroit qu'un autre quand il y a symétrie cylindrique.

On pourra donc calculer l'intégrale de ligne d'un seul coup. La trajectoire ayant une longueur de 2π*r,* on a

$$\sum B\Delta s\cos\theta = B(2\pi r)\cos\theta$$



En réalité, le champ et la trajectoire doivent être parallèles l'un à l'autre. Si on avait la situation suivante cela voudrait dire que les lignes de champ traversent toujours la trajectoire en allant vers l'extérieur puisque l'angle doit être le même partout. On aurait alors uniquement des lignes de champ allant vers l'extérieur, ce qui est impossible, car les lignes de champ doivent se refermer sur elles-mêmes. Les lignes de champ doivent donc former des cercles entourant l'objet et l'angle ne peut qu'avoir les valeurs suivantes : 0° ou 180°.

Comme on cherche le champ, on ne sait pas encore dans quelle direction il va. On va donc supposer qu'il va dans le même sens que la trajectoire. L'angle sera alors de 0°, et on a alors

Théorème d'Ampère avec symétrie cylindrique

$$B2\pi r = \mu_0 I_{\text{int}}$$

Si on obtient une réponse positive, cela voudra dire que notre supposition était correcte et que le champ est effectivement dans la direction de la trajectoire. Si on obtient une réponse négative, cela voudra dire que notre supposition était incorrecte et que le champ est dans la direction opposée à la trajectoire.

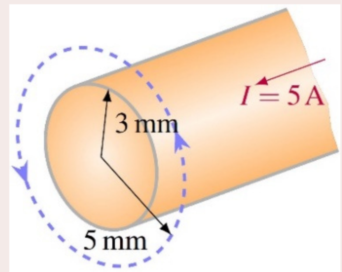
Cette formule nous permettra de déterminer le champ magnétique dans les situations où il y a symétrie cylindrique.

Exemple 9.6.1

Un fil cylindrique rectiligne ayant un rayon de 3 mm est parcouru par un courant de 5 A (réparti uniformément dans le fil).

a) Quel est le champ magnétique à 5 mm du centre du fil ?

Pour trouver le champ à 5 mm du centre du fil, on va faire une trajectoire circulaire à 5 mm du centre du fil.

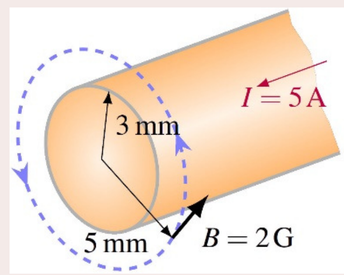


Avec le sens de la trajectoire indiquée sur la figure, le courant qui traverse la zone délimitée par la trajectoire est positif.

Le théorème d'Ampère nous donne donc

$$B2\pi r = \mu_0 I_{\text{int}}$$
$$B \cdot 2\pi \cdot 0,005m = 4\pi \times 10^{-7} \tfrac{Tm}{A} \cdot 5A$$
$$B = 2\times 10^{-4} T = 2G$$

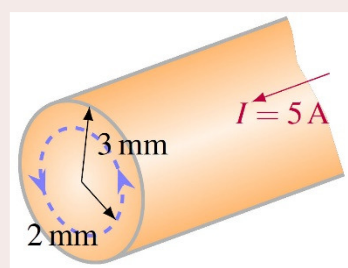
Comme la réponse est positive, la ligne de champ est dans le même sens que la trajectoire. Ça donne un champ comme celui montré sur la figure. (Le champ est toujours tangent à la trajectoire.)



Remarquez que c'est exactement ce qu'on aurait obtenu avec la formule du champ par un fil infini. Cette formule donnera le bon résultat tant qu'on cherche le champ à l'extérieur du fil et qu'on prend la distance entre le point où on veut savoir le champ et le centre du fil.

b) Quel est le champ magnétique à 2 mm de centre du fil ?

Pour trouver le champ à 2 mm du centre du fil, on va faire une trajectoire circulaire à 2 mm du centre du fil.



Avec le sens de la trajectoire indiquée sur la figure, le courant qui traverse la zone délimitée par la trajectoire est positif.

Toutefois, dans cette situation, ce n'est pas tout le courant qui traverse la surface délimitée par la trajectoire. Il y a une partie du courant qui passe à l'extérieur de la trajectoire. Pour trouver le courant passant à l'intérieur de la trajectoire, on trouve la densité de courant dans le fil.

$$J = \frac{I}{\text{aire du fil}}$$

$$
\begin{aligned}
&= \frac{I}{\pi R^2} \\
&= \frac{5A}{\pi \cdot (0,003m)^2} \\
&= 1,7684 \times 10^5 \tfrac{A}{m^2}
\end{aligned}
$$

On trouve ensuite le courant à l'intérieur avec cette densité

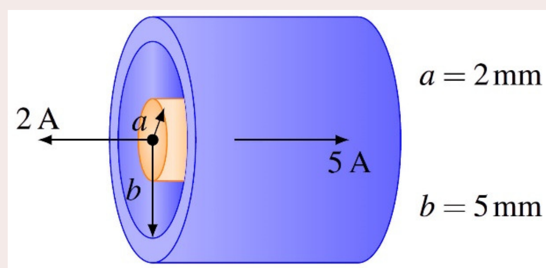
$$
\begin{aligned}
I_{int} &= JA_{int} \\
&= J\left(\pi r^2\right) \\
&= 1,7684 \times 10^5 \tfrac{A}{m^2} \cdot \pi \cdot (0,002m)^2 \\
&= 2,222A
\end{aligned}
$$

Le théorème d'Ampère nous donne donc

$$B 2\pi r = \mu_0 I_{int}$$
$$B \cdot 2\pi \cdot 0,002m = 4\pi \times 10^{-7} \tfrac{Tm}{A} \cdot 2,222A$$
$$B = 2,222 \times 10^{-4} T = 2,222G$$

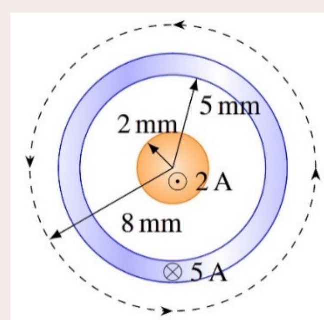
Comme la réponse est positive, la ligne de champ est dans le même sens que la trajectoire.

Exemple 9.6.2



Voici un câble coaxial.

a) Quel est le champ magnétique à 8 mm du centre du fil ?



Pour trouver le champ à 8 mm du centre du fil, on va faire une trajectoire circulaire à 8 mm du centre du fil.

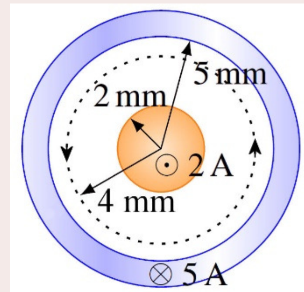
Avec le sens de la trajectoire indiquée sur la figure, le courant de 5 A est négatif et le courant de 2 A est positif.

Le théorème d'Ampère nous donne donc

$$B 2\pi r = \mu_0 I_{int}$$
$$B \cdot 2\pi \cdot 0,008m = 4\pi \times 10^{-7} \tfrac{Tm}{A} \cdot (-5A + 2A)$$
$$B = -7,5 \times 10^{-5} T = -0,75G$$

Comme la réponse est négative, le champ a une grandeur de 0,75 G et la ligne de champ à 8 mm du centre du fil est dans le sens contraire de la trajectoire.

b) Quel est le champ à 4 mm du centre du fil ?



Pour trouver le champ à 4 mm du centre du fil, on va faire une trajectoire circulaire à 4 mm du centre du fil.

Le courant de 5 A ne traverse plus la surface délimitée par la trajectoire. Seul le courant de 2 A traverse la surface.

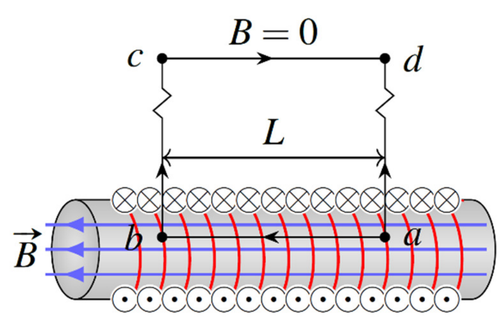
Le théorème d'Ampère nous donne donc

$$B 2\pi r = \mu_0 I_{\text{int}}$$
$$B \cdot 2\pi \cdot 0{,}004m = 4\pi \times 10^{-7} \tfrac{Tm}{A} \cdot 2A$$
$$B = 1 \times 10^{-4} T = 1G$$

Comme la réponse est positive, la ligne de champ à 4 mm du centre du fil est dans le sens de la trajectoire.

Formule du champ magnétique dans un solénoïde à partir du théorème d'Ampère

On peut utiliser le théorème d'Ampère pour démontrer la formule du champ dans un solénoïde. Ce n'est pas un cas de symétrie cylindrique, mais on peut quand même trouver le champ dans ce cas. Pour y arriver, on prend la trajectoire illustrée sur cette figure.



Évidemment, on va séparer cette trajectoire en partie. On suppose que le solénoïde est infini.

Trajectoire de a à b

La trajectoire est dans le même sens que le champ et on a donc

$$B\Delta s \cos\theta = BL\cos 0° = BL$$

Trajectoire de b à c

Le petit zigzag dans la trajectoire est là pour nous indiquer que cette ligne est très longue et que le point *c* est très loin du solénoïde.

Ce n'est pas indiqué sur la figure, mais il y a un champ à l'extérieur du solénoïde. Ce champ est vers la droite, car les lignes de champ qui passent dans le solénoïde vers la gauche doivent retourner vers la droite pour se refermer sur elles-mêmes. Ces lignes sont toutefois beaucoup plus espacées à l'extérieur du solénoïde qu'à l'intérieur, car il y a beaucoup plus d'espace à l'extérieur qu'à l'intérieur du solénoïde. Le champ est donc beaucoup moins intense (car les lignes sont plus espacées les unes des autres) à l'extérieur qu'à l'intérieur du solénoïde.

On a donc des lignes de champ vers la gauche dans le solénoïde et des lignes de champ vers la droite à l'extérieur, alors que la trajectoire est vers le haut. Il y a donc toujours 90° entre les lignes de champ et la trajectoire. On a donc

$$B\Delta s\cos\theta = 0$$

puisque cos 90° = 0.

Trajectoire de c à d

Ici, la trajectoire *cd* est très loin du solénoïde. On peut imaginer qu'elle est tellement loin, qu'on peut considérer que le champ fait par le solénoïde est nul. On a donc

$$B\Delta s\cos\theta = 0$$

puisque $B = 0$.

Trajectoire de d à a

On a des lignes de champ vers la gauche dans le solénoïde et des lignes de champ vers la droite à l'extérieur, alors que la trajectoire est vers le bas. Il y a donc toujours 90° entre les lignes de champ et la trajectoire. On a donc

$$B\Delta s\cos\theta = 0$$

puisque cos 90° = 0.

Somme de toutes les trajectoires

Le résultat pour l'intégrale de ligne est

$$\sum B\Delta s\cos\theta = BL + 0 + 0 + 0 = BL$$

Si on applique maintenant le théorème d'Ampère, on a

$$\sum B\Delta s\cos\theta = \mu_0 I_{\text{int}}$$
$$BL = \mu_0 I_{\text{int}}$$

Ici, le fil du solénoïde traverse N fois la trajectoire (8 fois sur la figure, mais on va mettre N pour faire plus général). Ce courant est également positif selon la règle de la main droite. On a donc

$$BL = \mu_0 I_{\text{int}}$$
$$BL = \mu_0 NI$$
$$B = \mu_0 \frac{N}{L} I$$

En divisant le nombre de tours de fil (N) par la longueur du solénoïde nécessaire pour faire ce nombre de tours de fil (L), on obtient la densité de tour de fil du solénoïde (n). On a alors

$$B = \mu_0 nI$$

Bingo, c'était notre formule du champ dans le solénoïde.

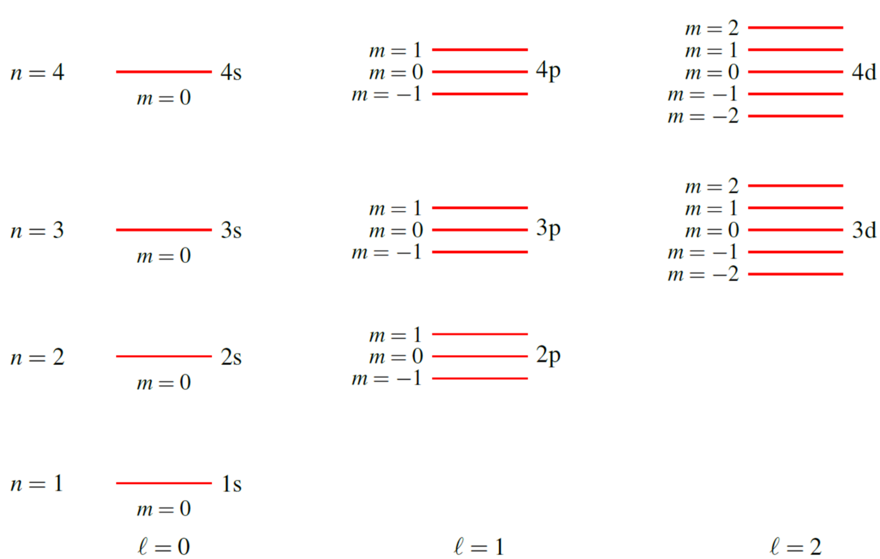
9.7 LE CHAMP MAGNÉTIQUE FAIT PAR LA MATIÈRE

Il n'existe que deux façons de créer un champ magnétique : avec un courant ou avec de la matière. On a vu les champs magnétiques faits par les courants, examinons maintenant comment la matière peut aussi faire un champ magnétique.

La matière peut créer un champ magnétique parce qu'elle peut avoir un moment dipolaire.

Le moment magnétique d'un atome

Pour comprendre comment un atome peut avoir un moment dipolaire magnétique, on va placer les électrons dans les différentes orbitales. Voici les orbitales.



Avec ces niveaux d'énergie, on peut trouver le moment magnétique de l'atome. (En réalité, le calcul est un peu plus complexe que ce qu'on va montrer ici, mais l'idée générale reste la même. Ce qu'on calcule en fait ici n'est que la composante en z du moment magnétique)

On peut premièrement avoir un champ magnétique fait par un électron dans une orbitale, ce qu'on appellera le moment magnétique orbital. La valeur du chiffre quantique m nous donne la valeur de la composante en z du moment magnétique fait par l'électron sur l'orbitale. Cette valeur est

$$\mu_m = m \cdot 9,2740 \times 10^{-24} Am^2$$

(La constante de 9,2740 x 10^{-24} Am² dans cette formule s'appelle *le magnéton de Bohr* et est notée μ_B.) On remarque que certains électrons auront des valeurs positives de m alors que d'autres auront des m négatifs. Il est donc possible que le moment magnétique fait par un électron soit annulé par le moment magnétique fait par un autre électron.

L'électron lui-même est aussi une source de moment magnétique, ce qu'on appellera le moment magnétique de spin ou le moment magnétique intrinsèque de l'électron. Ce moment magnétique a une composante qui vaut

$$\mu_s = 9,2848 \times 10^{-24} Am^2$$

L'électron est donc un petit aimant permanent. Il n'y a aucune explication à cela dans la physique actuelle. C'est comme ça, c'est tout.

Évidemment, deux électrons avec des spins opposés feront des moments magnétiques qui s'annulent mutuellement.

On va maintenant placer les électrons sur les orbitales pour voir comment un atome peut avoir un moment magnétique. Rappelons-nous quelques règles pour placer les électrons.

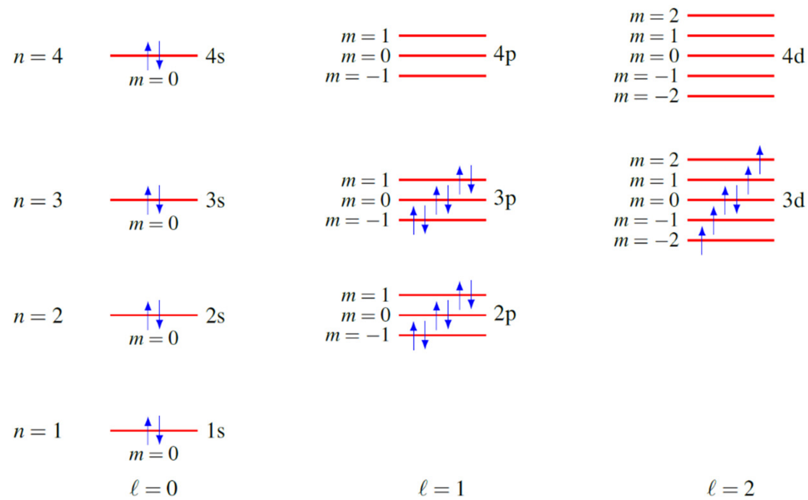
1) La règle de Hund ; on remplit les couches en ordre croissant de $n+\ell$. En cas d'égalité, on remplit celle avec le plus petit n en premier. L'ordre est donc 1 s, 2 s, 2 p, 3 s, 3 p, 4 s, 3 d, 4 p,…

2) Sur un niveau qui se subdivise en plusieurs valeurs de m (qu'on va appeler les sous-niveaux), on place un électron par sous-niveau avant de mettre le deuxième électron avec le spin opposé sur le sous-niveau.

3) Les électrons seuls sur un sous niveau d'un niveau ont tous des spins alignés dans la même direction.

Ceci correspond à la configuration d'énergie la plus basse, car les électrons ayant des spins de même sens doivent être plus loin les uns des autres (à cause du principe d'exclusion de Pauli), ce qui diminue l'énergie potentielle électrique.

Si on prend le fer comme exemple (26 électrons), on a alors la configuration suivante.



On remarque que le moment magnétique orbital s'annule très souvent. En fait, comme les niveaux avec les différents *m* ont tous la même énergie, les électrons sont dans toutes les orbitales en même temps et les valeurs de *m* s'annulent donc. Par exemple, dans notre figure, il y a 5 électrons dans l'orbitale 3d. On pourrait se demander sur quel niveau exactement on doit placer l'électron qui a un spin vers le bas. Selon le niveau choisi, il y peut y avoir une valeur de *m*. Toutefois, peu importe le niveau choisi, cet électron est en fait sur les 5 niveaux m = 2, 1, 0, -1 et -2 en même temps et la valeur du *m* est nulle. Ainsi, les moments orbitaux vont s'annuler.

Cependant, la troisième règle donnée pour placer les électrons fait en sorte que les moments magnétiques intrinsèques de l'électron ont tendance à s'additionner, car on doit placer, au départ, tous les électrons avec des spins dans la même direction. Dans le cas du fer, les moments magnétiques de 4 électrons s'additionnent pour donner un moment magnétique important au fer.

C'est d'ailleurs ce qui se produit très souvent :

Moment magnétique des atomes

Le moment magnétique des atomes provient en grande partie du moment magnétique du spin de l'électron.

Cette addition des spins sera particulièrement importante pour les éléments ayant beaucoup d'électrons ayant des spins dans le même sens sur le dernier niveau. C'est le cas des éléments au milieu des éléments de transition (comme le fer) ou, ce qui est encore mieux puisqu'on pourrait avoir les spins de 7 électrons ayant des spins dans le même sens, des éléments au milieu des terres rares (partie en bas du tableau périodique).

Le moment magnétique d'une substance

Il ne suffit pas que l'atome ait un moment magnétique pour qu'une substance fasse un champ magnétique. Il est possible que les atomes aient un moment magnétique, mais que les moments magnétiques des atomes s’annulent selon la façon dont les atomes s’organisent dans la substance.

Le diamagnétisme

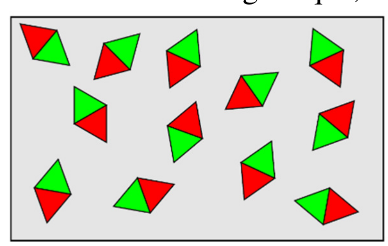
Les substances diamagnétiques sont celles pour lesquelles le moment magnétique est nul. Cela peut être dû au fait que chaque atome a un moment magnétique nul parce que tous les moments magnétiques orbitaux et tous les moments magnétiques de spins se sont annulés. C’est le cas entre autres, des gaz inertes (hélium, néon, argon, krypton, xénon et radon).

Il se peut aussi que l’atome seul ait un moment magnétique, mais qu’il perde ce moment magnétique quand il est avec d’autres atomes. Cela peut se produire, par exemple, si le moment magnétique d’un atome de métal est fait par un seul électron et que quand on met ces atomes ensemble, ils partagent ces électrons. Lors d’un tel partage, les spins vont alors s’orienter de sorte que les moments magnétiques de spin s’annulent. Ainsi, il ne reste plus de moment magnétique. C’est ce genre de chose qui se produit avec le cuivre, l’or, l’argent, le zinc, le cadmium, le mercure, le bismuth, le carbone et le plomb.

N’essayez donc pas d’attirer un morceau de cuivre avec un aimant. Il ne se passera rien, car la substance n’a pas de moment magnétique et elle ne subira aucune force dans un champ magnétique.

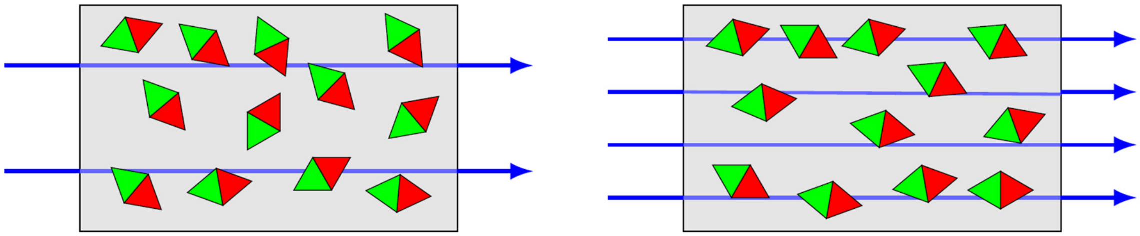
Le paramagnétisme

Dans une substance diamagnétique, les atomes ont un moment magnétique quand ils sont dans la substance. Toutefois, cela ne veut pas nécessairement dire que la substance possèdera un moment magnétique. Pour que la substance ait un moment magnétique, il faudrait que les moments magnétiques de tous les atomes s’alignent pour s’additionner. Ce n’est cependant pas toujours ce qui se passe. Aux températures ambiantes, l’agitation thermique est suffisamment grande pour que les moments magnétiques pointent dans des directions aléatoires (voir la figure).



Dans ce cas, la substance n’a pas de moment magnétique, car la somme de tous les moments magnétiques est nulle.

Cela ne signifie pas nécessairement que ces substances ne seront pas attirées par un aimant. Si on place une substance paramagnétique dans un champ magnétique (qu’on va appeler le champ magnétique externe), alors le champ magnétique externe va exercer un moment de force sur chacun de ces petits dipôles pour tenter de les aligner avec les lignes de champ. On aura alors un combat entre le champ magnétique qui cherche à aligner les dipôles et l’agitation thermique qui cherche à les désaligner.



Champ faible Champ fort

Ainsi, en plaçant la substance dans un champ magnétique externe, l'alignement des dipôles fera en sorte que la somme des dipôles ne sera plus nulle. La substance aura alors un moment dipolaire et agira comme un aimant. Elle produira donc un champ magnétique et elle sera attirée dans la direction où le champ magnétique est le plus fort.

Plus le champ externe est fort, plus l'alignement des dipôles est bon, et plus le moment dipolaire de la substance est grand. Et plus le moment dipolaire de la substance est grand, plus le champ magnétique fait par la substance est grand.

Le moment magnétique par unité de volume de la substance (noté *M*) est donné par la loi de Curie.

$$M = C\frac{B}{T}$$

où B est le champ magnétique, T est la température et C est la constante de Curie qui dépend de la substance. On voit que le moment dipolaire résultant est plus grand quand le champ est plus fort (meilleur alignement) et diminue si la température augmente (moins d'agitation thermique).

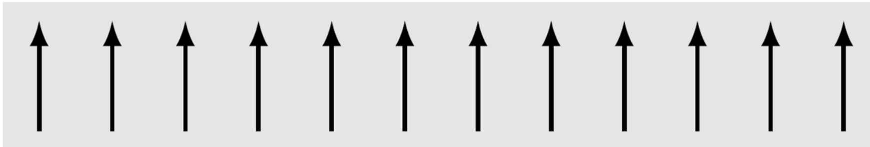
Le moment magnétique qui apparait quand on place la substance dans un champ magnétique n'est toutefois pas très grand. Le champ magnétique fait par la substance sera typiquement 100 000 fois moins grand que le champ magnétique externe. On observera donc une très légère force d'attraction entre la substance paramagnétique et un aimant. Cette force est si petite, qu'il est très difficile de voir cette attraction en pratique.

L'oxygène, le magnésium, l'aluminium, le titane, le palladium et l'étain sont tous des substances paramagnétiques. En les approchant des aimants, il y a une très légère attraction.

Le moment magnétique pourrait devenir assez important si la température est très basse. C'est ce qui se produit ici avec l'oxygène liquide.
http://www.youtube.com/watch?v=Lt4P6ctf06Q

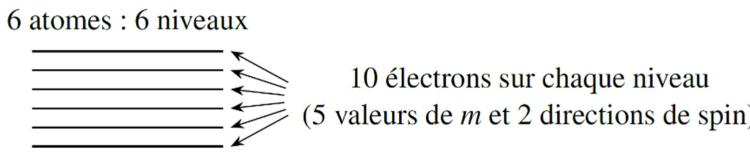
Le ferromagnétisme

Dans certaines substances, les atomes se lient de sorte que les moments magnétiques de chaque atome doivent avoir une orientation particulière. Par exemple, il arrive que les moments dipolaires s'orientent dans la même direction.

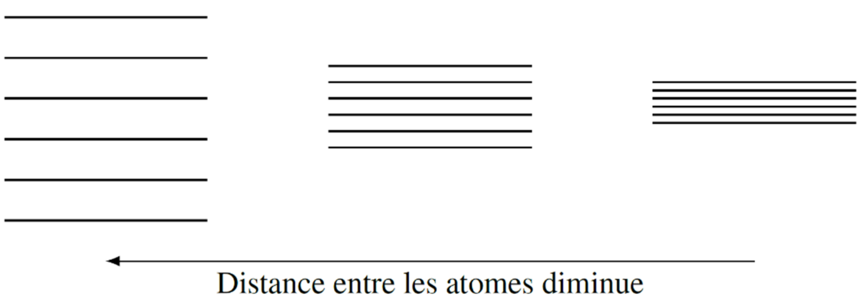


Dans ce cas, les moments magnétiques vont tous s'additionner et la substance aura un moment magnétique très important. Ce sont les substances ferromagnétiques. Il n'y a que cinq éléments ferromagnétiques : le fer, le nickel, le cobalt, le gadolinium et le dysprosium.

Cet alignement a une cause vraiment particulière. Ce n'est pas le champ fait par les atomes voisins qui force les atomes à s'orienter ainsi, car sinon, cet alignement se produirait pour tous les éléments paramagnétiques. Pour comprendre pourquoi il y a cet alignement, il faut savoir ce qui se passe quand des atomes partagent des électrons. Dans le cas des éléments de transitions, ce sont les orbitales 3d de tous les atomes qui fusionnent pour former une nouvelle orbitale. Dans cette nouvelle orbitale, il y a de nombreux niveaux atomiques. En fait, le nombre du niveau d'énergie est égal au nombre d'atomes. S'il y a 6 atomes, il y a 6 niveaux d'énergie dans l'orbitale et chacun de ces niveaux peut contenir 10 électrons (puisqu'il y a 5 valeurs de *m* et 2 valeurs de *s* par niveau).



De plus, l'écart d'énergie entre les niveaux augmente à mesure qu'on approche les atomes les uns des autres. Voici donc les niveaux d'énergie avec 6 atomes.

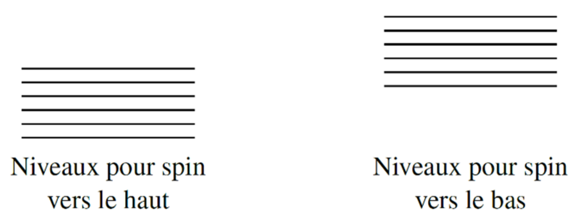


On va séparer ces niveaux en deux parties : les niveaux d'énergie quand le spin est vers le haut et les niveaux quand le spin est vers le bas. Chaque niveau pourra alors contenir 5 électrons. Quand les atomes sont loin les uns des autres, il n'y a pas beaucoup de différence d'énergie selon la direction du spin.

Si on examine bien, les niveaux du spin vers le haut sont un peu plus bas que ceux du spin vers le bas. (J'ai choisi arbitrairement ceux des spins vers le haut. En fait, ce pourrait être n'importe lequel des deux.) Les énergies diffèrent à cause du principe d'exclusion de Pauli. Les électrons ayant des spins dans la même direction doivent être plus éloignés les uns des autres, ce qui diminue l'énergie potentielle électrique. Quand ils ont des spins dans des directions opposées, ils peuvent être plus près et donc avoir une plus grande énergie potentielle. Il est donc avantageux de mettre initialement des électrons avec des spins tous dans la même direction avant d'en mettre avec des spins opposés.

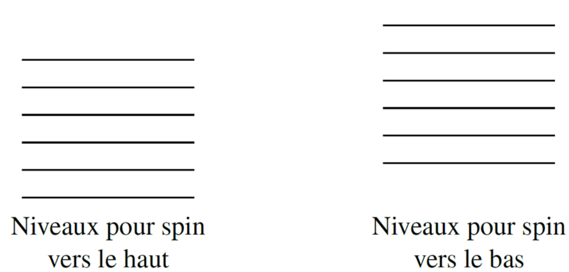
Comme les électrons occupent toujours les niveaux d'énergie les plus bas, ils vont remplir le 1er niveau des spins vers le haut, puis ensuite le 1er niveau des spins vers le bas, puis le 2^{e} niveau des spins vers le haut, puis le 2^{e} niveau des spins vers le bas, et ainsi de suite. En alternant ainsi entre les niveaux de spins vers le haut et vers le bas, les moments magnétiques de spins vont s'annuler et il n'y aura pas de moment magnétique très important pour une telle substance.

Si les atomes sont un peu plus près les uns des autres, les énergies des niveaux changent. On pourrait alors avoir la situation suivante.



L'écart entre les niveaux augmente et les niveaux du spin vers le haut décalent davantage vers le bas par rapport à ceux des spins vers le bas. Ce décalage augmente parce que la densité d'électrons augmente en approchant les atomes. Il est alors très avantageux de garder les électrons plus loin les uns des autres en leur donnant des spins dans la même direction (ils doivent rester loin en vertu du principe d'exclusion de Pauli).

On va donc remplir plusieurs niveaux avec des spins dans la même direction avant de commencer à annuler ces spins avec des électrons ayant des spins dans l'autre direction. Il y a donc beaucoup d'électrons avec des spins dans la même direction, ce qui donne un moment magnétique important à la substance. Elle est alors ferromagnétique.
Si les atomes sont encore plus près, on aura la situation montrée à droite.

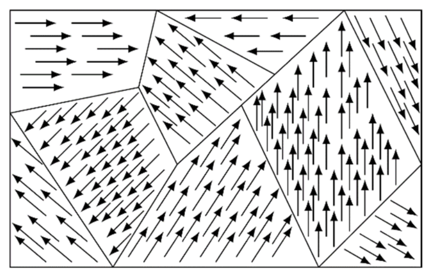


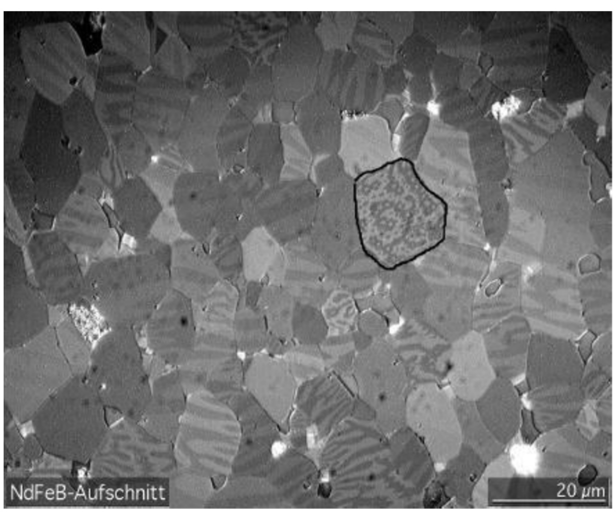
Il y a encore cette différence d'énergie à cause du principe d'exclusion de Pauli, mais elle devient moins importante par rapport à la séparation des niveaux d'énergie qu'il y a parce que les atomes sont près les uns des autres. En remplissant les niveaux d'énergie en choisissant toujours les plus bas possible, on va remplir peu de niveaux avec un spin dans une direction avant d'en ajouter avec spins dans l'autre direction. Les moments magnétiques de spin pourront alors s'annuler et la substance n'aura pas un moment magnétique important.

On voit ainsi que pour qu'une substance soit ferromagnétique, il faut que la distance entre les atomes soit correcte et il faut qu'il y ait suffisamment d'électrons pour bien remplir les niveaux d'énergie avec le spin vers le haut, mais pas trop pour ne pas les annuler avec des électrons ayant des spins vers le bas. Ce sont des conditions un peu particulières qui ne sont remplies que pour quelques éléments, dont le fer et le nickel.

On pourrait ainsi penser que les substances ferromagnétiques auront des moments magnétiques importants, mais ce n'est pas nécessairement le cas. Si c'était vrai, n'importe quel morceau de fer serait un aimant alors qu'on sait que les morceaux de fer n'agissent pas toujours comme des aimants. Par exemple, votre couteau et votre fourchette ne s'attirent pas, même s'ils sont en fer.

C'est que la plupart du temps, l'orientation des moments dipolaires dans la substance n'est pas la même partout dans la substance. La substance est séparée en régions appelées *domaines* (plus précisément, ce sont les *domaines de Weiss*). Dans chacun de ces domaines, l'orientation de tous les moments dipolaires des atomes est la même. Toutefois, l'orientation change quand on passe d'un domaine à l'autre.

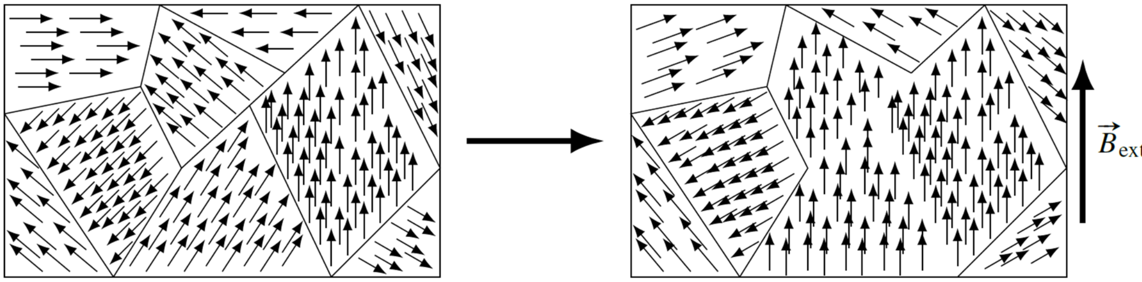




en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_domain

Comme l'orientation de chaque domaine est aléatoire, la somme des moments magnétiques est nulle et la substance n'a pas de moment magnétique. Vous pouvez voir sur cette figure les domaines d'un cristal de NdFeB. Typiquement, ces domaines ont des dimensions des quelques dizaines de micromètres.

Si on place une substance ferromagnétique dans un champ magnétique externe, il y aura un moment de force qui cherche à aligner les dipôles avec le champ. En fait, cela provoquera un agrandissement des domaines qui ont déjà la bonne orientation aux dépens des domaines où l'alignement n'est pas dans la bonne direction, en plus de provoquer d'une légère rotation des dipôles dans les domaines où les dipôles ne sont pas alignés dans la bonne direction.



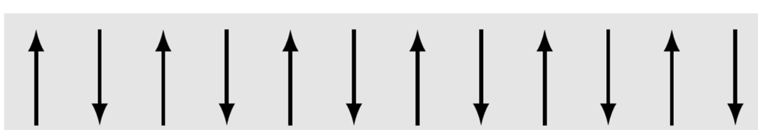
Maintenant, la somme des moments magnétiques n'est plus nulle et la substance agira comme un aimant. Cette fois, le moment magnétique résultant est très important, tellement que le champ fait par cet alignement de dipôles peut être jusqu'à près de 10 000 fois plus fort que le champ magnétique externe.

Cela signifie qu'on peut grandement augmenter le champ magnétique fait par un solénoïde en plaçant une tige de fer (ou autre substance ferromagnétique ou ferrimagnétique) dans le solénoïde. Le champ fait par le morceau de fer s'ajoutera ainsi au champ fait par le solénoïde et on aura beaucoup plus de champ. Avec une tige de fer, le champ pourra être jusqu'à près de 1000 fois plus grand !

Ainsi, si on approche un aimant d'un morceau de fer, le champ magnétique de l'aimant va provoquer les changements indiqués ci-dessus dans les domaines et la substance va acquérir un moment dipolaire. Le morceau de fer deviendra un aimant et il sera attiré par l'aimant qu'on a approché du morceau de fer.

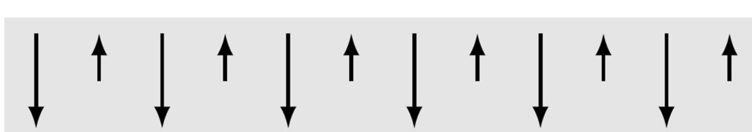
L'antiferromagnétisme et le ferrimagnétisme

Dans certaines substances, l'interaction entre les atomes fait que les moments dipolaires doivent plutôt alterner d'un atome à l'autre.



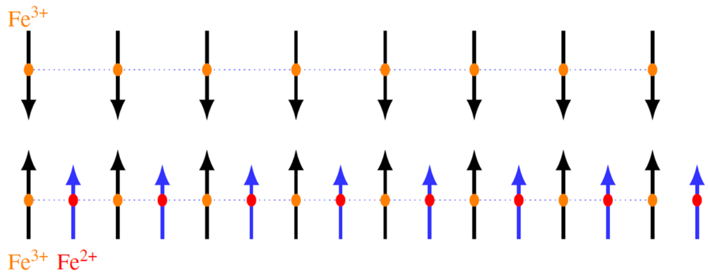
De toute évidence, cette substance ne pourra pas avoir de moment magnétique, même si chaque atome a un moment magnétique important. Ce sont les substances antiferromagnétiques. Le chrome est une substance antiferromagnétique.

Parfois, on peut avoir des atomes ayant des moments magnétiques qui alternent, mais avec des moments magnétiques de grandeurs différentes.



Dans ce cas, il y aura aussi un moment magnétique. Les substances qui ont un moment magnétique net parce qu'une telle annulation incomplète se produit sont appelées *ferrimagnétiques*.

C'est le cas de la magnétite (Fe_3O_4), dans laquelle les ions ferreux Fe^{2+} s'alignent dans la même direction et des ions ferriques Fe^{3+} alternent et s'annulent.



Les atomes dans une substance ferrimagnétique forment aussi des domaines qui se modifient en présence de champ magnétique externe.

Les aimants permanents

Les aimants permanents sont simplement des substances ferromagnétiques ou ferrimagnétiques pour lesquelles il y a un moment magnétique résultant. Voici comment on peut y arriver.

On place la substance ferromagnétique ou ferrimagnétique dans un champ magnétique et on enlève ensuite ce champ. Deux choses peuvent alors se produire.

1) L'agitation thermique peut recréer rapidement l'orientation aléatoire des domaines et le moment magnétique de la substance disparait. La substance n'est alors plus un aimant. On appelle *fer doux* le fer qui agit de cette façon.

2) Les domaines peuvent aussi rester bloqués dans la configuration qu'ils avaient près de l'autre aimant. Dans cette configuration, la substance a un moment magnétique, ce qui veut dire que la substance continue à agir comme un aimant. Il pourra à son tour attirer d'autres morceaux de fer, de nickel ou de cobalt. On appelle *fer dur* le fer qui agit de cette façon.

(En passant, il peut se produire un peu la même chose avec les dipôles électriques. En plaçant une substance faite de molécules ayant un moment dipolaire électrique dans un champ électrique externe, on force les dipôles à s'aligner avec le champ. Parfois, il arrive que l'alignement perdure même si on enlève le champ externe. La substance garde alors son moment dipolaire électrique. Ces substances sont des *électrets*.)

Aujourd'hui, on retrouve parmi les aimants permanents les plus forts des aimants au néodyme, fait d'un alliage de fer, de bore et de néodyme ($Nd_2Fe_{14}B$). Vous pouvez les voir en action dans ce vidéo.

http://www.youtube.com/watch?v=ClkP-QwIOAQ

L’aimant ainsi obtenu n’est pas vraiment permanent puisqu’on peut détruire les domaines. Parfois, un choc important va détruire les domaines et de nouveaux domaines apparaitront aussitôt. On peut aussi chauffer la substance. En chauffant, l’agitation thermique peut devenir tellement grande qu’elle modifie la façon dont les électrons s’organisent dans la substance de sorte que les moments magnétiques des électrons vont maintenant se soustraire plutôt que s’additionner et la substance devient paramagnétique. Ainsi, à partir d’une certaine température, appelée *température de Curie*, la substance ne sera plus ferromagnétique. Pour le fer, cette température est de 1043 K, alors qu’elle est de 627 K pour le nickel. Quand la substance se refroidira, elle redeviendra ferromagnétique et de nouveaux domaines vont se former. On peut voir dans ce vidéo un morceau de fer qui est chauffé. Quand il passe la température de Curie, il passe de l’état ferromagnétique (très attiré par l’aimant) à l’état paramagnétique (peu attiré par l’aimant). Il se passe le contraire quand il refroidit.
http://www.youtube.com/watch?v=SIFcXfoF5i0

Les aimants naturels proviennent de substances initialement très chaudes et contenant quelque chose de ferromagnétique ou de ferrimagnétique (comme de la magnétite). En se refroidissant en dessous de la température de Curie, les domaines se sont formés. Toutefois, cette substance s’est formée dans le champ magnétique terrestre et les domaines alignés dans le sens du champ magnétique terrestre ont été favorisés. Le moment magnétique net de la substance n’est donc pas nul, car les domaines ne sont pas tous de même taille. On obtient donc une substance naturelle qui agit comme un aimant.

Retour sur le diamagnétisme

En réalité, les substances diamagnétiques (celles dont les atomes ont un moment magnétique nul) réagissent un peu quand on les place dans un champ magnétique. Le champ magnétique vient modifier légèrement les moments magnétiques orbitaux, de sorte qu’ils ne s’annulent plus exactement. Il y aura donc un très petit moment magnétique qui va apparaitre. Ce qui est un peu spécial, c’est que ce moment magnétique qui apparait est dans la direction opposée au champ magnétique. Cela veut dire que la substance subira une force dans la direction où le champ est le plus faible. Ainsi, si on approche un aimant d’une substance diamagnétique, il y aura une très faible force de répulsion.

En utilisant cette répulsion, on a réussi à faire flotter dans les airs différentes substances diamagnétiques telles que de l’eau ou des grenouilles à l’aide de champ magnétique variant beaucoup d’un endroit à l’autre.
http://www.youtube.com/watch?v=A1vyB-O5i6E

En fait, cette modification des orbitales se produit dans toutes les substances, mais elle est souvent imperceptible si l’atome a un moment magnétique, car le paramagnétisme sera plus important que le diamagnétisme. Ce n’est cependant pas toujours le cas. Ainsi, le cuivre est diamagnétique parce que l’effet du champ sur les orbitales (spécialement sur les 10 électrons de l’orbitale 3d) crée un moment magnétique opposé au champ (diamagnétisme) un peu plus grand que celui fait par l'alignement des moments dipolaires de spin de quelques électrons libres (paramagnétisme). Pour certains autres métaux, l'alignement des spins a un effet plus grand que la modification des orbitales, et le métal est paramagnétique.

Rappel important

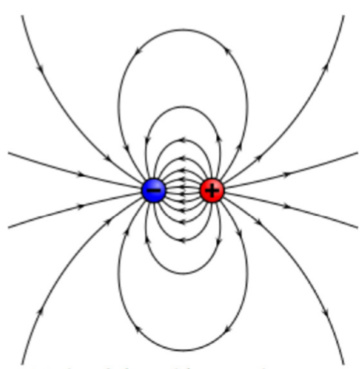
Erreur fréquente : Penser que tous les métaux sont attirés par les aimants.

La plupart des métaux sont paramagnétiques (très faible attraction par un aimant) ou diamagnétiques (très faible répulsion par un aimant) et, dans ces deux cas, cette force sera imperceptible. Il y aura une force importante seulement si le métal est ferromagnétique. Cela signifie que, dans votre vie de tous les jours, seuls le fer et le nickel seront attirés par un aimant. (Il y aurait aussi le cobalt, le gadolinium et le dysprosium, mais c'est rare qu'on ait ces substances à la maison.)

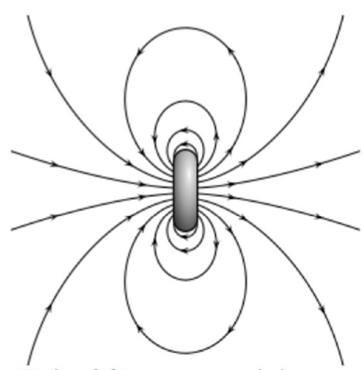
Une différence importante entre les dipôles électriques et les dipôles magnétiques

Lorsqu'on avait parlé des diélectriques, on avait mentionné que l'alignement des dipôles électriques dans un champ électrique entrainait une baisse de champ électrique. Dans la présente section, on vient voir que l'alignement des dipôles magnétiques dans un champ magnétique entraine une augmentation du champ magnétique. Pourquoi y a-t-il cette différence ? La situation semble tout à fait similaire et l'effet devrait donc être le même.

La différence vient de la nature des dipôles. Voici une figure montrant un dipôle électrique et un dipôle magnétique.



Dipôle électrique



Dipôle magnétique

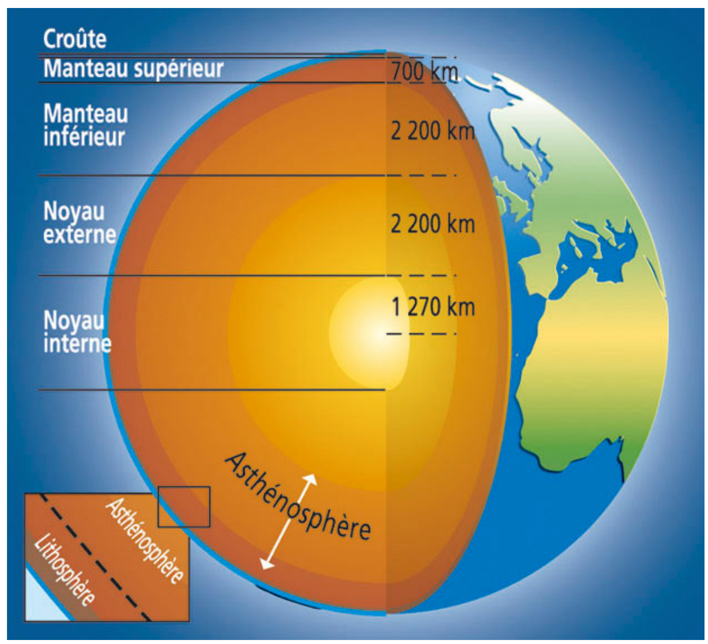
Le dipôle électrique est fait de deux charges opposées et le dipôle magnétique est une boucle de courant. Dans les deux cas, ces dipôles sont alignés avec un champ allant vers la droite.

On remarque que les champs sont identiques loin des dipôles. Évidemment, pour le dipôle électrique c'est un champ électrique alors que pour le dipôle magnétique, c'est un champ magnétique.

On remarque toutefois que la situation est bien différente très près du dipôle. Dans le cas du dipôle électrique, le champ électrique du dipôle est vers la gauche, donc dans une direction opposée au champ électrique externe (celui qui fait aligner le dipôle). Pour le dipôle magnétique, le champ magnétique au centre du dipôle est vers la droite, donc dans la même direction que le champ magnétique qui fait aligner le dipôle. Cela explique donc la différence. Le dipôle électrique fait un champ électrique dans la direction opposée, ce qui fait diminuer le champ électrique alors que le dipôle magnétique fait un champ magnétique dans la même direction, ce qui fait augmenter le champ magnétique.

9.8 LE CHAMP MAGNÉTIQUE DE LA TERRE

Les champs ne peuvent être que produits par des courants ou des substances ferromagnétiques ou ferrimagnétiques. On peut donc se demander lequel de ces mécanismes est responsable du champ magnétique terrestre. Pour le découvrir, examinons la structure interne de la Terre.



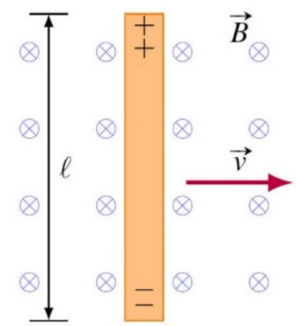
fr.fotolia.com/id/24614965

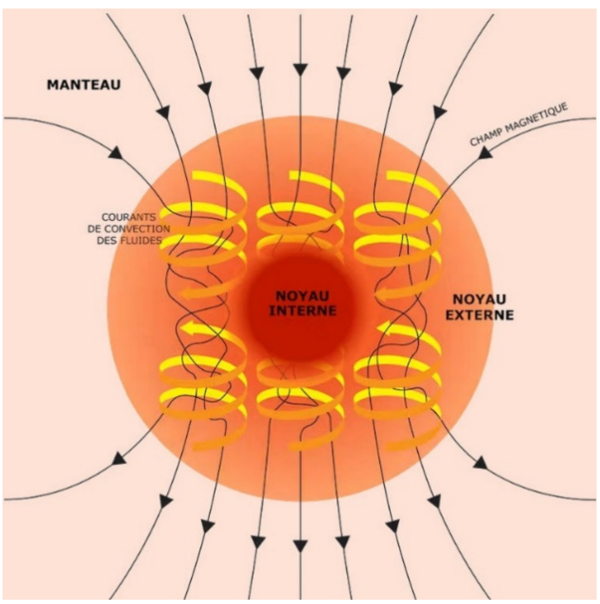
La croute et le manteau sont faits de roches, mais il y a très peu de substances ferromagnétiques ou ferrimagnétiques. De plus, ces roches ne sont pas conductrices et il ne peut donc pas y avoir de courants. Il n'y a aucune chance que le champ magnétique soit créé dans la croute ou le manteau.

Le noyau est surtout composé de fer et de nickel. Le noyau interne est solide et le noyau externe est liquide. On pourrait penser que le champ magnétique provient de ces substances qui sont normalement ferromagnétiques, mais ce n'est pas vraiment possible dans le cas de la Terre. En effet, la température du noyau est de 3700 °C sur les bords du noyau externe et d'un peu plus de 5000 °C au centre du noyau interne. (Malgré une température plus grande, le noyau interne est solide parce que la pression est plus grande à mesure qu'on s'approche du centre de la Terre.) À ces températures, on a largement dépassé la température de Curie du fer et du nickel et ils ne sont plus ferromagnétiques. Notez que le cœur de fer et de nickel de certaines planètes est plus froid (et solide) et que dans ce cas le fer et le nickel sont ferromagnétiques. Le ferromagnétisme de ces métaux peut alors créer un champ magnétique, mais ce champ n'est pas très grand. On pense que c'est ce qui serait à l'origine des faibles champs magnétiques de la Lune et de Mars. C'est toutefois hors de question pour la Terre.

Il ne reste donc qu'une seule possibilité : le champ magnétique de la Terre doit être fait par des courants dans ce noyau de fer et de nickel. Les courants sont possibles, car ces substances sont conductrices. Mais alors, quelle peut bien être la source de ces courants ?

Quand un conducteur se déplace dans un champ magnétique, une différence de potentiel apparait dans le conducteur. Cette différence de potentiel est générée par la force magnétique qui agit sur les particules chargées dans la matière et qui entraine une séparation de charge. La différence de potentiel qui apparait peut alors créer des courants dans la matière environnante et ces courants génèrent des champs magnétiques. Évidemment, le champ qui apparait pour s'ajouter ou se soustraire au champ magnétique déjà présent. Pour obtenir un champ qui persiste dans le temps, il faut, en moyenne, générer un peu plus de champ qui s'ajoute au champ déjà présent que de champ opposé au champ déjà présent.

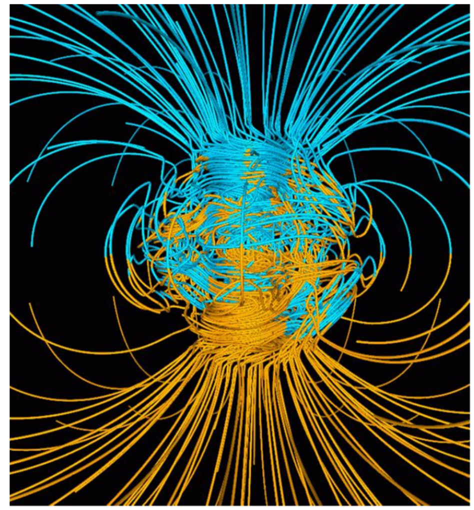




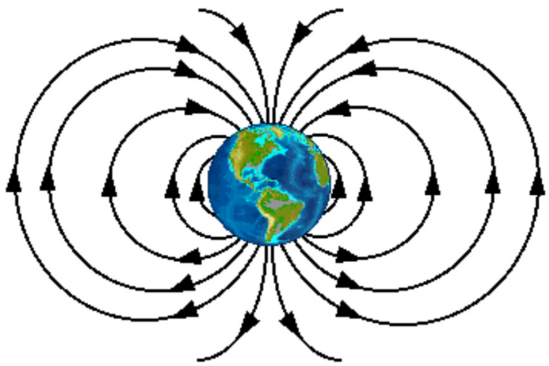
Dans la Terre, on peut donc générer un champ grâce à ce mécanisme dans la partie liquide du noyau. Comme le noyau est composé de fer et de nickel, c'est de la matière conductrice. Cette matière est aussi en mouvement puisque la chaleur qui traverse le noyau liquide fait apparaitre de la convection, c'est-à-dire de grands tourbillons de matière. Notez que la rotation de la Terre force ces tourbillons à s'aligner avec l'axe de rotation de la Terre. Les mouvements de matière ne sont pas très rapides puisqu'il faut environ 500 ans pour que la matière fasse un tour dans la cellule de convection, mais c'est suffisant.

en.wikipedia.org/wiki/Dynamo_theory

Il reste à calculer le champ total fait par tous ces courants générés par les mouvements de convection. Ce calcul est en fait extrêmement complexe parce que la convection est turbulente (il y a beaucoup de petits tourbillons qui apparaissent et disparaissent), parce que le champ créé influence à son tour les différences de potentiel, les courants et les champs créés, parce qu'on ne sait pas exactement comment se fait la convection et parce qu'il y a beaucoup d'autres éléments incertains. On y arrive en formulant plusieurs hypothèses et en simulant le tout sur ordinateur. L'image de droite montre ce qu'on peut obtenir comme résultat de simulation.



stardate.org/astro-guide/gallery/twist-and-flip



En fin de compte, ces mouvements font en sorte que la Terre a un champ magnétique ayant la configuration montrée sur la figure de gauche. Notez qu'on a un sud magnétique en Arctique et un nord magnétique en Antarctique.

www.unc.edu/depts/oceanweb/turtles/geomag.html

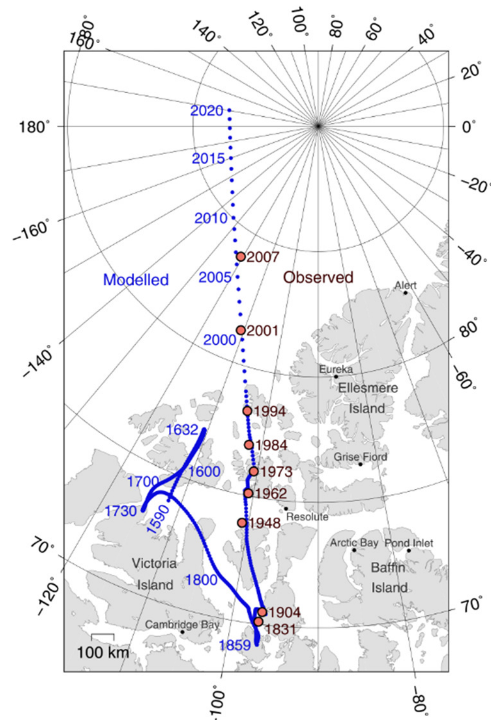
C'est donc ainsi que le champ magnétique de la Terre (ou de n'importe quelle planète ou étoile) est généré :

1- Il y a de la matière conductrice qui fait des tourbillons dans un champ magnétique.
2- Ce mouvement de matière amène la création d'une différence de potentiel dans la matière en rotation.
3- Cette différence de potentiel amène la formation de courant dans la matière environnante.
4- Les courants dans la matière environnante génèrent un champ magnétique.

C'est ce qu'on appelle l'*effet dynamo*. Pour que cet effet fonctionne, il y a une condition essentielle : il doit y avoir de la convection de matière conductrice quelque part dans l'astre.

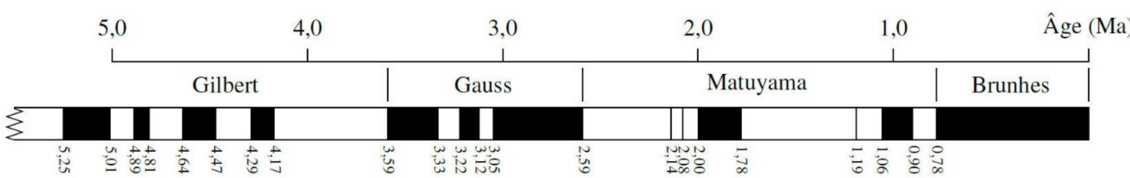
Pour que le tout commence, il faut qu'il y ait initialement un champ magnétique. Ce champ peut être relativement petit et le champ s'amplifiera ensuite avec l'effet dynamo. On ne sait pas encore très clairement d'où venait ce champ initial, mais il y a plusieurs hypothèses.

Le champ de la Terre n'est pas toujours le même. La convection étant turbulente, il y a des variations continuelles du champ magnétique. Les variations sont telles que la position des pôles magnétiques ne cesse de varier. Entre 2020 et 2021, le pôle magnétique de l'Arctique s’est déplacé de 44 km (et celui de l’Antarctique de 9 km). La figure de droite montre le mouvement du pôle situé dans l’Arctique depuis 1590.

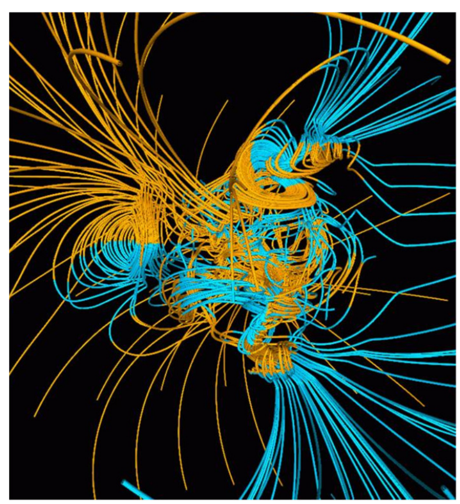


commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=46888403

Il y a même des variations encore plus grandes à l’occasion. En étudiant l’orientation de l’aimantation des roches faites de matière ferromagnétique, on peut déterminer la direction du champ magnétique quand la roche s’est solidifiée. On s’est rapidement rendu compte que le champ magnétique de la Terre s’inversait parfois. La figure suivante vous montre l’orientation de champ magnétique de la Terre selon les époques. Les périodes en noir correspondent aux époques durant lesquelles le champ magnétique de la Terre a la même orientation que le champ actuel. (Les boussoles pointent vers le nord.) Les périodes en blanc correspondent aux époques où le champ magnétique de la Terre est inversé par rapport au champ actuel. (Les boussoles pointeraient alors vers le sud.)



Les pôles ne se sont pas inversés depuis 780 000 ans, ce qui est la plus longue période de stabilité des 5 derniers millions d’années.

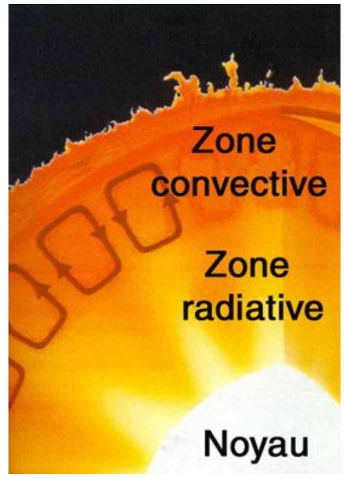


Durant les périodes d’inversion (qui durent typiquement 1000 ans), le champ ne disparait pas, mais il prend une configuration très complexe. Les simulations arrivent à ce genre de configuration du champ lors des inversions (image de droite).

Lors des inversions, il y a souvent plusieurs pôles à la surface de la Terre. Les boussoles seront alors totalement inutiles.

Pour l’instant, il est tout à fait impossible de prévoir quand se produira la prochaine inversion des pôles magnétiques. Même si le champ baisse en ce moment et que le mouvement des pôles s’est accéléré récemment, cela ne signifie pas nécessairement qu’une inversion de pôles magnétiques commence, et ce, même si le champ ne s’est pas inversé depuis longtemps. Sachez qu'il y a eu des moments dans l'histoire de la Terre où les pôles ne se sont pas inversés pendant plusieurs dizaines de millions d'années.

Le champ magnétique du Soleil est aussi créé par effet dynamo. Dans ce cas, le conducteur est plutôt un plasma chaud (gaz ionisé) et la convection se fait dans les couches du Soleil près de la surface (zone convective sur la figure). Le champ solaire s'inverse aussi, mais beaucoup plus régulièrement et fréquemment que celui de la Terre. L'inversion se fait en moyenne tous les 11 ans.



www.astrosurf.com/toussaint/dossiers/soleil_lestaches/taches5.htm

RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

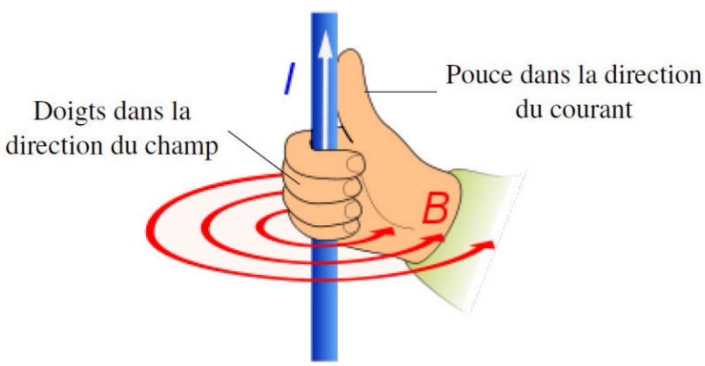
Grandeur du champ magnétique fait par un fil rectiligne infini

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

Constante magnétique μ_0 (perméabilité du vide)

$$\mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7} \tfrac{Tm}{A}$$

Direction du champ magnétique d'un fil rectiligne infini



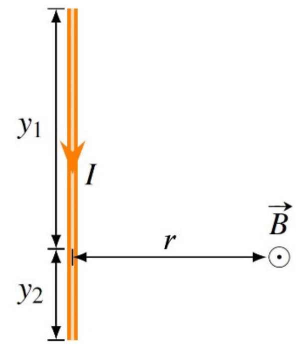
Champ magnétique fait par une charge en mouvement

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi r^2} qv \sin\theta$$

Grandeur du champ magnétique fait par un petit bout de fil de longueur infinitésimale (loi de Biot-Savart)

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi r^2} Ids \sin\theta$$

Champ magnétique fait par un fil rectiligne



Grandeur :

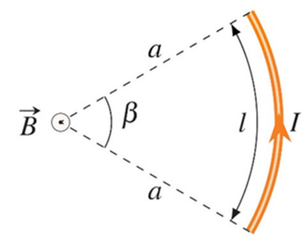
$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r}\left|\frac{y_2}{\sqrt{y_2^2 + r^2}} + \frac{y_1}{\sqrt{y_1^2 + r^2}}\right|$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r}\left|\cos\theta_1 - \cos\theta_2\right|$$

Direction : perpendiculaire à la ligne *r*.

On place notre pouce de la main droite dans le sens du courant et nos doigts dans le sens de *r*. Le champ est dans la direction vers laquelle nos doigts plient.

Champ magnétique au centre de courbure d'un arc de cercle



Grandeur :

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a^2}\ell$$

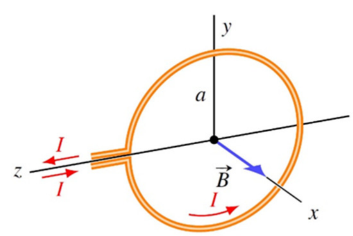
$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a}\beta$$

Attention : β est en radians dans cette formule.

Direction : perpendiculaire à la ligne *a*.

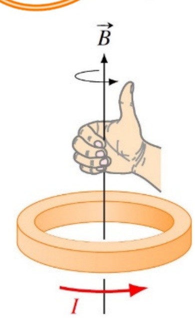
On place notre pouce de la main droite dans le sens du courant et nos doigts vers le centre de courbure. Le champ est dans la direction vers laquelle nos doigts plient.

Grandeur du champ magnétique au centre d'une boucle circulaire avec *N* tours de fil



$$B = \frac{\mu_0 NI}{2a}$$

Direction du champ magnétique au centre d'une boucle circulaire avec *N* tours de fil



On place nos doigts dans le sens du courant dans la boucle. Notre pouce donne alors la direction du champ magnétique au centre de la boucle.

(C'est notre 4e règle de la main droite.)

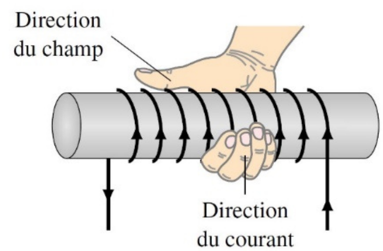
Grandeur du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde.

$$B = \frac{\mu_0 N I}{\ell} = \mu_0 n I$$

Direction du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde.

Les lignes de champ sont parallèles à l'axe du solénoïde.

On trouve la direction avec la règle de la main droite : on place nos doigts dans le sens de la rotation du courant dans les anneaux du solénoïde, notre pouce pointe alors dans la direction du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde.



Théorème de Gauss avec le champ magnétique = 3e équation de Maxwell

$$\sum BA\cos\theta = 0 \quad \text{(sur une surface fermée)}$$

ou (équivalent)

$$\oint \vec{B}\cdot\overrightarrow{dA} = 0$$

Théorème d'Ampère = 4e équation de Maxwell (incomplète)

$$\sum B\Delta s\cos\theta = \mu_0 I_{\text{int}} \quad \text{(sur une trajectoire fermée)}$$

ou (équivalent)

$$\oint \vec{B}\cdot\overrightarrow{ds} = \mu_0 I_{\text{int}}$$

où I_{int} est le courant traversant la surface délimitée par la trajectoire.

Théorème d'Ampère avec symétrie cylindrique

$$B 2\pi r = \mu_0 I_{\text{int}}$$

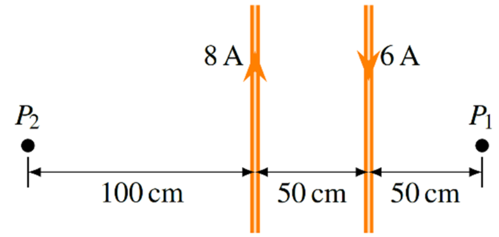
Moment magnétique des atomes

Le moment magnétique des atomes provient en grande partie du moment magnétique du spin de l'électron.

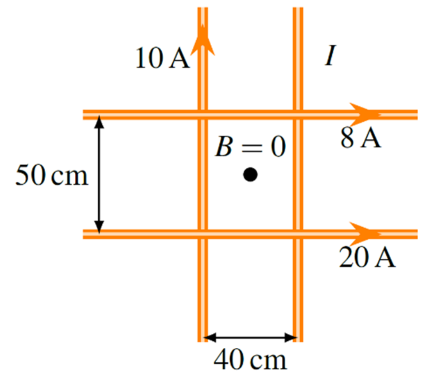
EXERCICES

9.1 Le champ magnétique d'un fil infini parcouru par un courant

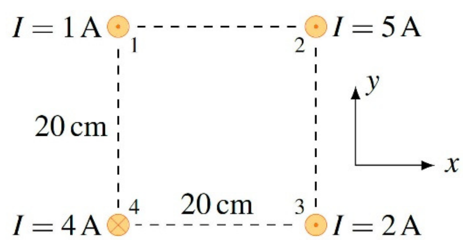
1. Dans la situation montrée sur la figure, trouvez le champ magnétique (grandeur et direction) aux points P_1 et P_2.



2. 4 fils infinis se croisent tels qu'illustrés sur la figure. Quel doit être le courant (grandeur et direction) pour que le champ soit nul au centre du rectangle délimité par les 4 fils ?



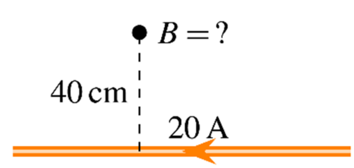
3. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au centre de ce carré délimité par 4 fils infinis ?



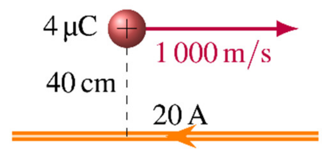
4. Thomas est situé à un endroit où le champ magnétique terrestre a une intensité de 0,5 G et est dirigé directement vers le nord. Thomas sort sa boussole pour s'orienter, sans remarquer qu'il est directement à 20 m en dessous d'une ligne à haute tension transportant un courant de 500 A vers le sud. Comme le champ magnétique du fil va perturber la boussole, celle-ci ne pointera pas directement vers le nord. Dans quelle direction pointe la boussole de Thomas ? (Donnez l'angle entre le nord et la direction vers laquelle pointe la boussole. Dites aussi si la déviation est vers l'est ou vers l'ouest.)

9.2 La force magnétique faite par des fils rectilignes infinis

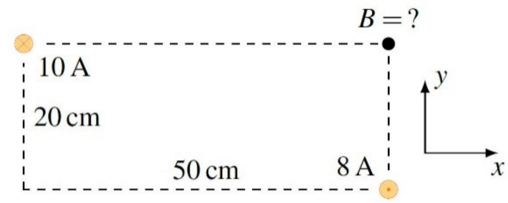
5. a) Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) à l'endroit montré à 40 cm de ce fil infini ?



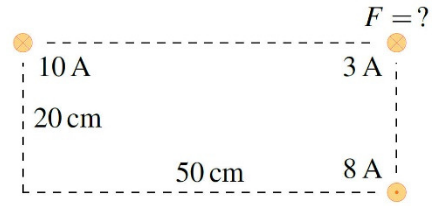
b) Quelle est la force magnétique (grandeur et direction) sur la charge de 4 μC dans la situation suivante ?



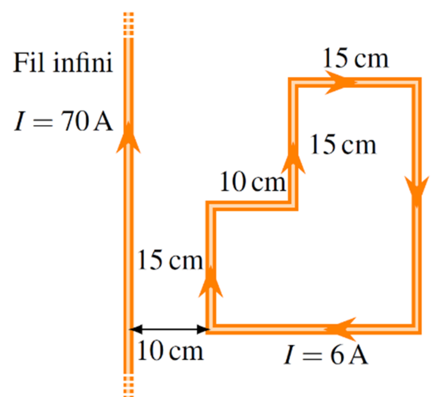
6. a) Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) fait par les deux fils infinis à l'endroit montré sur la figure ?



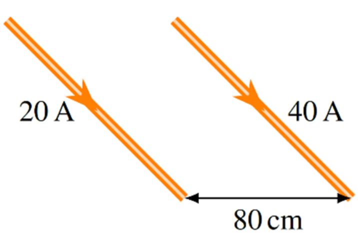
b) Quelle est la force (grandeur et direction) sur le fil de 5 m de long et transportant un courant de 3 A ?



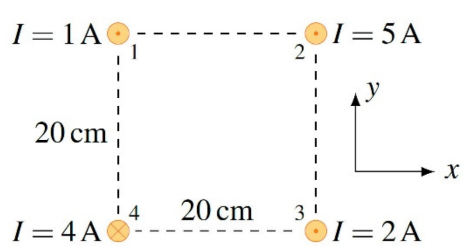
7. Quelle est la force magnétique nette sur le cadre montré sur la figure ?



8. Quelle est la force entre ces deux fils ? Le fil parcouru par un courant de 20 A a une longueur infinie et le fil parcouru par un courant de 40 A a une longueur de 5 m. Spécifiez si la force est attractive ou répulsive.

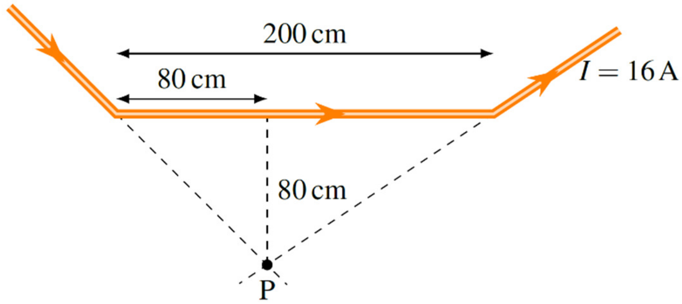


9. Quatre fils parallèles sont disposés tel qu'illustré sur la figure. Les fils 1,2 et 3 ont une longueur infinie et le fil 4 a une longueur de 10 m. Quelle est la force (grandeur et direction) sur le fil n° 4 ?

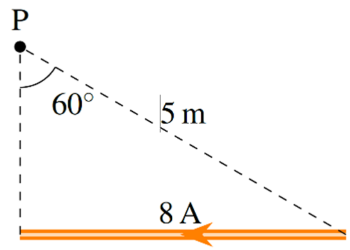


9.4 Le champ magnétique d'un fil parcouru par un courant

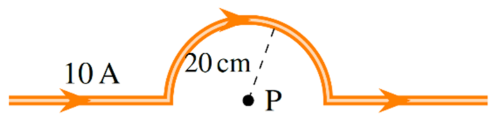
10. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au point P ?



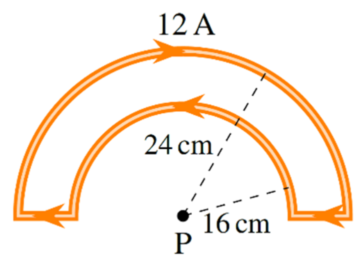
11. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au point P ?



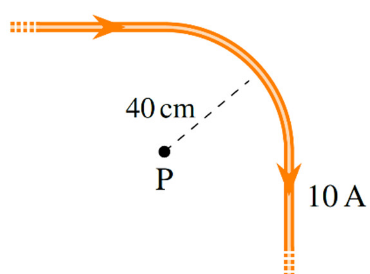
12. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au point P ?



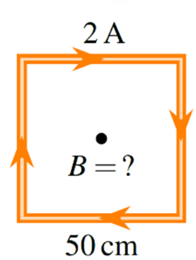
13. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au point P ?



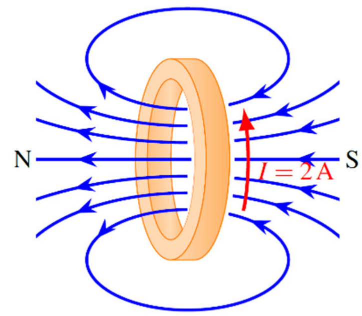
14. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au point *P* ? (Les deux fils rectilignes sont infinis.)



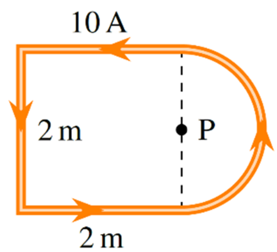
15. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au centre du carré ?



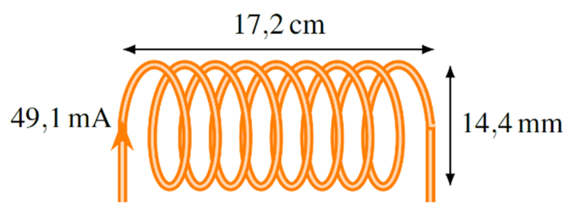
16. Cet anneau a un diamètre de 24 cm. Il est formé d'un fil qui fait plusieurs tours et qui est parcouru par un courant de 2 A. Combien doit-il y avoir de tours de fil pour que le champ magnétique au centre de l'anneau ait une grandeur de 0,002 T ?



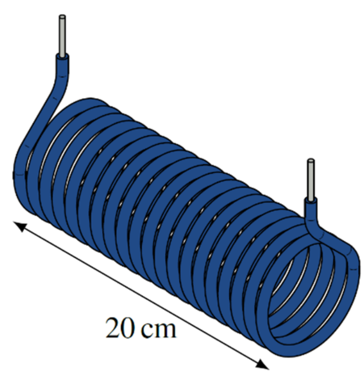
17. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au point P ?



18. Quelle est la grandeur du champ magnétique à l'intérieur de ce solénoïde (pas trop près des bouts du solénoïde) s'il y a 684 tours de fil ?

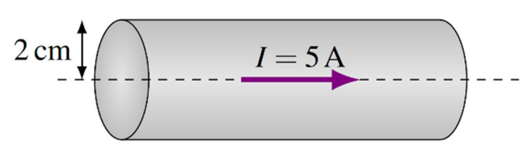


19. Quel courant doit-on faire passer dans ce solénoïde pour qu'il y ait un champ magnétique de 0,08 T à l'intérieur (pas trop près des bouts du solénoïde) ? Le nombre de tours de fil sur la figure correspond au véritable nombre de tours de fil.



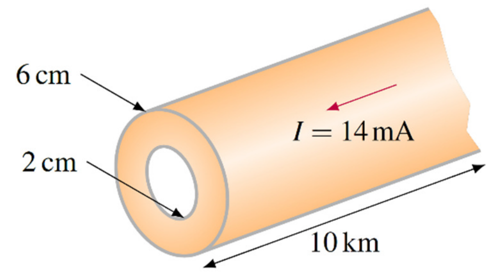
9.6 Le théorème d'Ampère

20. Un courant de 5 A passe dans un fil tel qu'illustré sur la figure. On va supposer que le courant est réparti uniformément dans tout le fil.



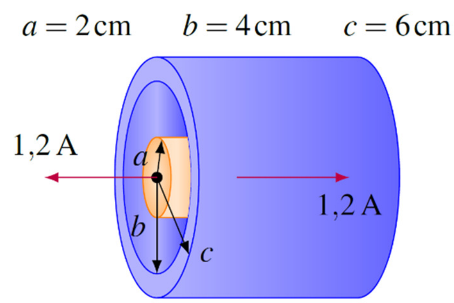
a) Quelle est la grandeur du champ magnétique à 1 cm du centre du fil ?
b) Quelle est la grandeur du champ magnétique à 10 cm du centre du fil ?

21. Un courant de 14 mA passe dans un tuyau tel qu'illustré sur la figure. On va supposer que le courant est réparti uniformément dans la paroi du tuyau.



a) Quelle est la grandeur du champ magnétique à 1 cm du centre du tuyau ?
b) Quelle est la grandeur du champ magnétique à 4 cm du centre du tuyau ?
c) Quelle est la grandeur du champ magnétique à 10 cm du centre du tuyau ?

22. Un courant de 1,2 A passe dans un câble coaxial tel qu'illustré sur la figure. On va supposer que le courant est réparti uniformément dans les cylindres formant le câble coaxial.

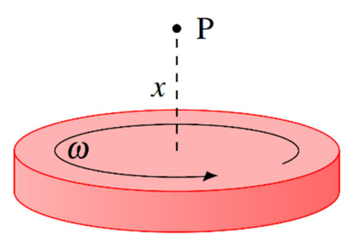


a) Quelle est la grandeur du champ magnétique à 1 cm du centre du fil ?
b) Quelle est la grandeur du champ magnétique à 3 cm du centre du fil ?
c) Quelle est la grandeur du champ magnétique à 5 cm du centre du fil ?
d) Quelle est la grandeur du champ magnétique à 8 cm du centre du fil ?

Défis

(Questions plus difficiles que les questions qu'il y aura à l'examen.)

23. Ce disque mince de rayon R a une charge Q répartie uniformément sur sa surface. Quel est le champ magnétique au point P ?



RÉPONSES

9.1 Le champ magnétique d'un fil infini parcouru par un courant

1. a) 0,8 µT en sortant de la page b) 0,8 µT en sortant de la page
2. 0,4 A vers le haut
3. 12,8 µT dans la direction -51,3°.
4. La boussole dévie de 5,71° vers l'est.

9.2 La force magnétique faite par des fils rectilignes infinis

5. a) 10 µT qui entre dans la feuille. b) 4 x 10^{-8} N vers le haut
6. a) 8,944 µT à 206,6° b) 1,342 x 10^{-4} N à 116,6°
7. 1,17 x 10^{-4} N vers la gauche.
8. 0,001 N, attractive
9. 2,28 x 10^{-4} N à 217,9°

9.4 Le champ magnétique d'un fil parcouru par un courant

10. 3,078 µT, en entrant dans la feuille.
11. 0,2771 µT, en entrant dans la feuille.
12. 15,71 µT, en entrant dans la feuille.
13. 7,85 µT qui sort de la page.
14. 8,927 µT qui entre de la page.
15. 4,525 µT qui entre de la page.
16. 191
17. 5,378 µT qui sort de la page.
18. 245,4 µT
19. 636,6 A

9.6 Le théorème d'Ampère

20. a) 25 µT b) 10 µT
21. a) 0 T b) 2,625 x 10^{-8} T c) 2,8 x 10^{-8} T
22. a) 6 µT b) 8 µT c) 2,64 µT d) 0 µT

Défis

23. $B_z = \frac{\mu_0}{2}\frac{Q\omega}{\pi R^2}\left[\frac{R^2+2x^2}{\sqrt{R^2+x^2}} - 2x\right]$