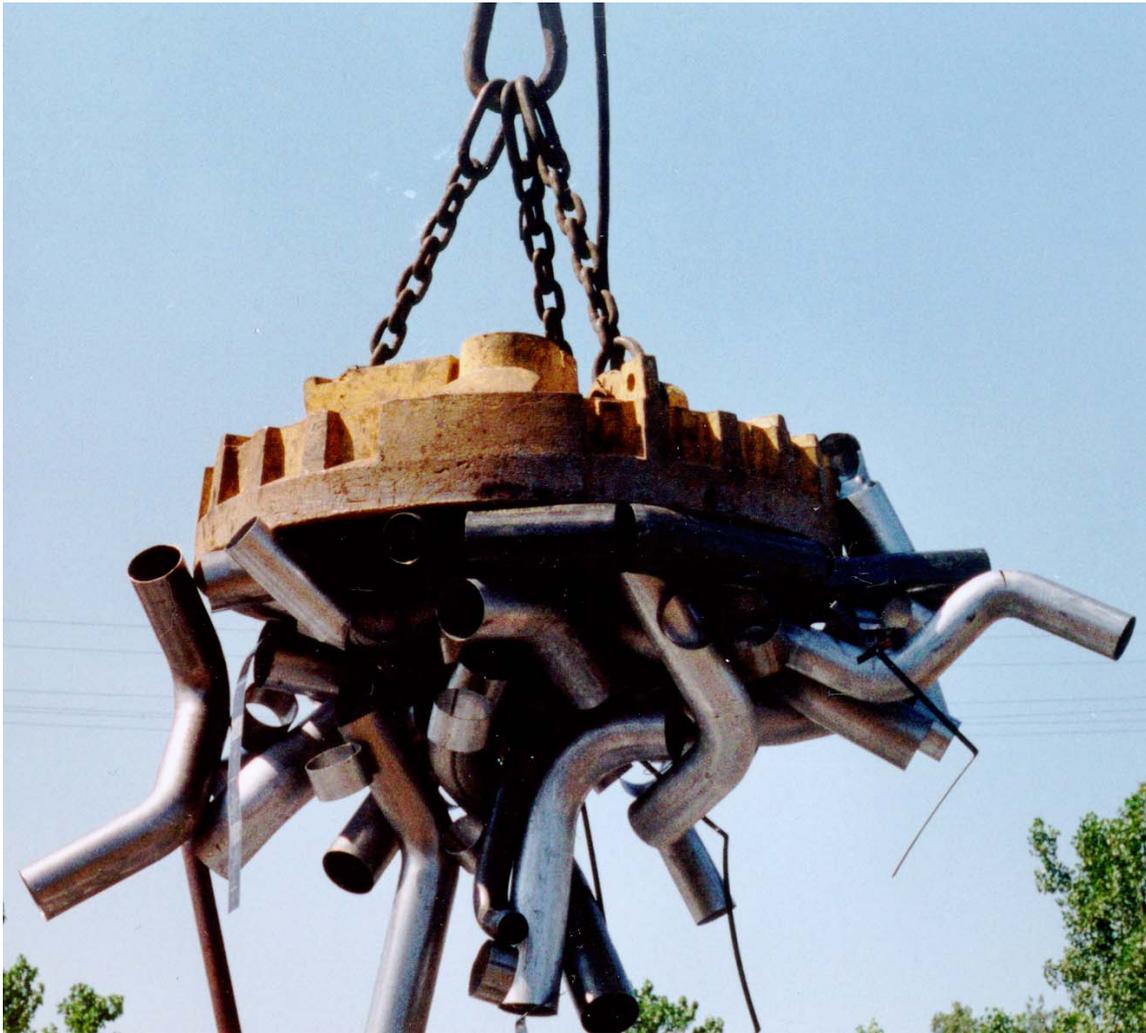


8 LES SOURCES DE CHAMP MAGNÉTIQUE

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.

8.1 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.

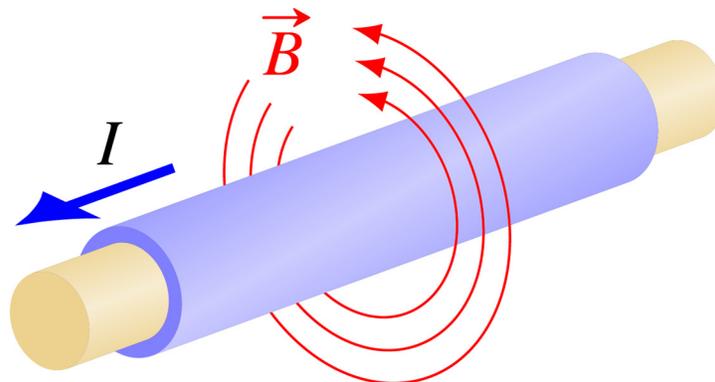
μ_0 est une constante qu'on appellera *constante magnétique* (elle est aussi appelée perméabilité du vide) qui vaut

Constante magnétique μ_0 (perméabilité du vide)

$$\mu_0 = 12,566\,37 \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$$

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

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.

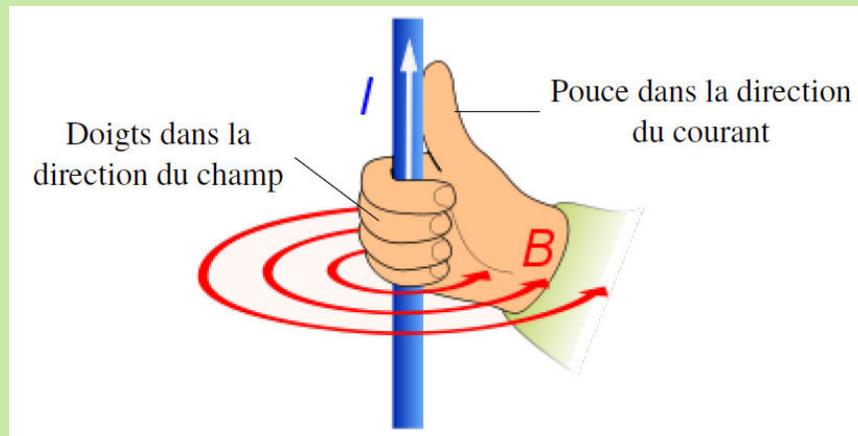


www.trincoll.edu/~cgeiss/stuff/the%20rocky%20road/ch_1/ch1_p1.htm

(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



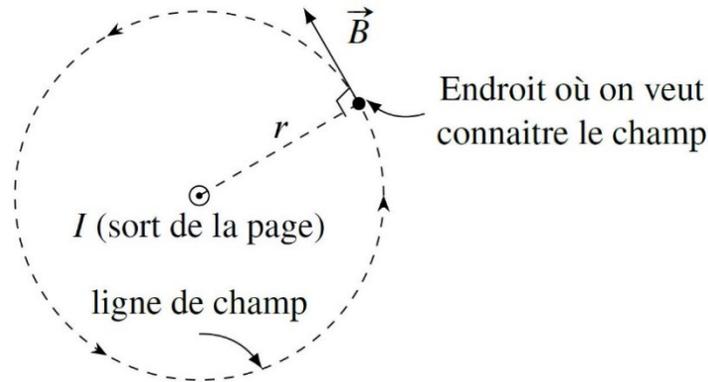
C'est ce que vous montre l'animation suivante.

<https://www.youtube.com/watch?v=Z927bDX1104>

et le vidéo suivant.

<https://www.youtube.com/watch?v=CfUCOIMoQvE>

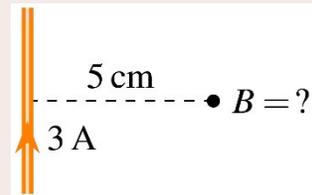
Notez que le champ est toujours tangent aux lignes de champ. Comme les lignes de champ forment des cercles autour des fils, le champ sera toujours tangent au cercle et perpendiculaire au rayon, donc à une ligne allant du fil jusqu'au point où on veut connaître le champ (ligne r sur la figure).



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 8.1.1

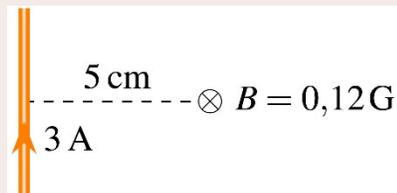
Quel est le champ magnétique à 5 cm du centre d'un fil rectiligne infini parcouru par un courant de 3 A ?



La grandeur du champ est

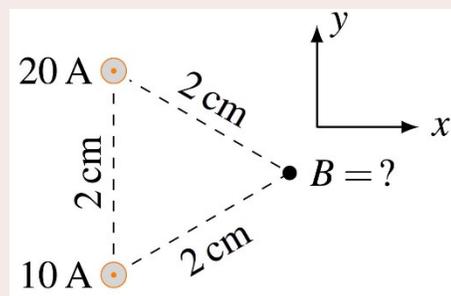
$$\begin{aligned}
 B &= \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \\
 &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \frac{Tm}{A} \cdot 3A}{2\pi \cdot 0,05m} \\
 &= 1,2 \times 10^{-5} T = 0,12G
 \end{aligned}$$

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 8.1.2

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 ?

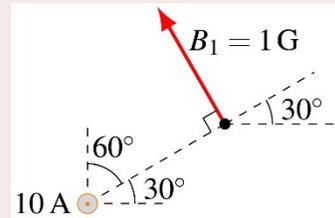


Comme il y a deux fils, on va calculer le champ fait par chacun des fils, pour ensuite les additionner (vectoriellement).

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.



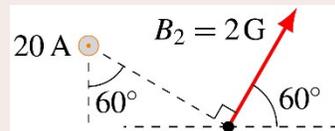
Les composantes du champ sont donc

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

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

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

Ainsi, les composantes du champ total sont

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

et le champ résultant est

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

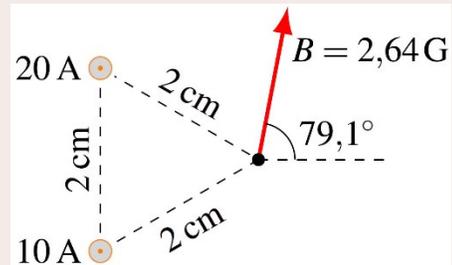
Cela répond déjà à la question, mais on pourrait aussi trouver la grandeur du champ ainsi que sa direction.

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

$$= 2,646G$$

$$\theta = \arctan \frac{B_y}{B_x}$$

$$= 79,1^\circ$$



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

8.2 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 8.1 avec ce qu'on a appris au chapitre 7.

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

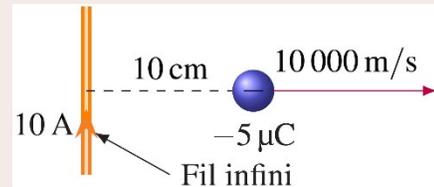
$$F = |q|vB \sin \theta$$

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 8.2.1

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

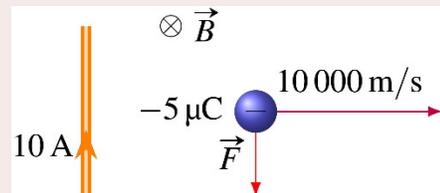
$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \\ &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \frac{Tm}{A} \cdot 10A}{2\pi \cdot 0,1m} \\ &= 2 \times 10^{-5} T \end{aligned}$$

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

La force sur la charge est donc

$$\begin{aligned} F &= |q|vB \sin \theta \\ &= |5 \times 10^{-6} C| \cdot 10\,000 \frac{m}{s} \cdot 2 \times 10^{-5} T \cdot \sin 90^\circ \\ &= 10^{-6} N \end{aligned}$$

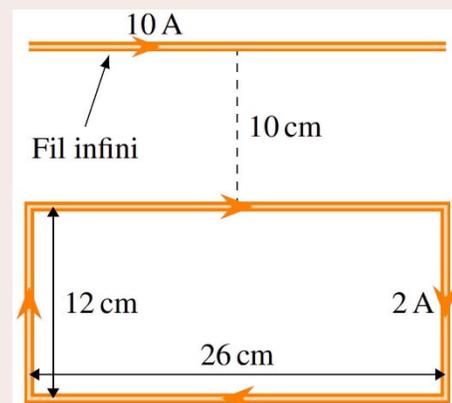
Cette force est vers le bas selon la règle de la main droite. (N'oubliez pas que c'est une charge négative et que la direction de la force est à l'opposé de ce que nous donne la règle de la main droite.)

**Exemple 8.2.2**

Une boucle de courant rectangulaire est près d'un fil rectiligne infini parcouru par un courant de 10 A. Quelle est la force magnétique résultante sur le cadre métallique ?

On va calculer la force avec la formule suivante.

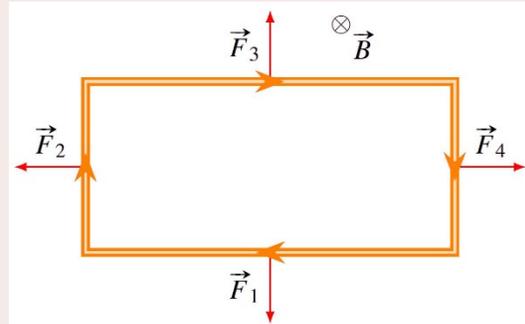
$$F = I\ell B \sin \theta$$



On ne peut pas trouver la force en un seul calcul, on doit séparer le 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, la grandeur du champ diminue 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

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

La force sur le fil est donc

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

Calcul de la grandeur de F_1

Le champ fait par le fil infini à cette distance est

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

$$= 9,091 \times 10^{-6} T$$

La force sur le fil est donc

$$\begin{aligned} F_1 &= I \ell B \sin \theta \\ &= 2 A \cdot 0,26 m \cdot 9,091 \times 10^{-6} T \cdot \sin 90^\circ \\ &= 4,727 \times 10^{-6} N \end{aligned}$$

Force résultante

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

$$\begin{aligned} F &= F_3 - F_1 \\ &= 1,04 \times 10^{-5} N - 4,727 \times 10^{-6} N \\ &= 5,673 \times 10^{-6} N \end{aligned}$$

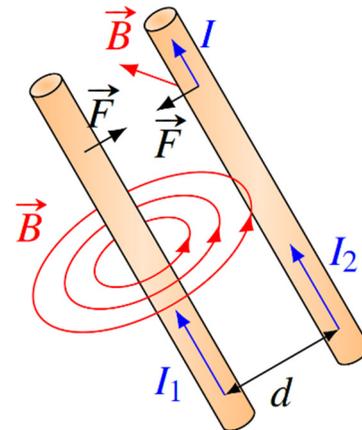
Cette force est vers le haut. Le cadre est donc attiré par le fil infini.

La 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.

<https://www.youtube.com/watch?v=43AeuDvWc0k>

<https://www.youtube.com/watch?v=kapi6ZDvoRs>

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

8.3 LA FORCE DANS LE REPÈRE DE LA PARTICULE

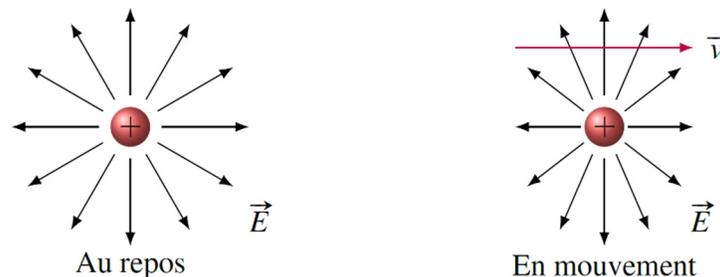
Prenons le cas d'une charge qui se dirige vers un fil rectiligne dans lequel circule un courant.



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.

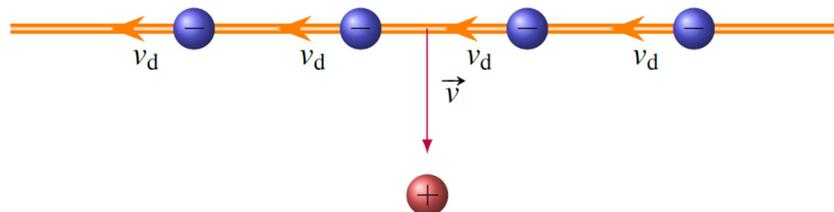
Selon la relativité, quand une charge se déplace, les lignes de champ s'approchent les unes des autres telles qu'illustrées sur la figure à cause de la contraction des longueurs.



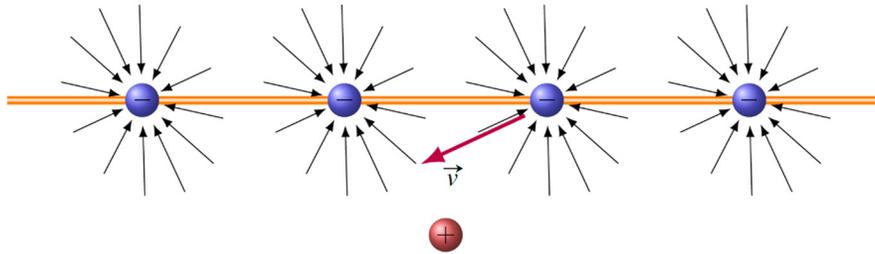
Cliquez ici si vous voulez voir la preuve :

<https://physique.merici.ca/electricite/Echargemouvement.pdf>

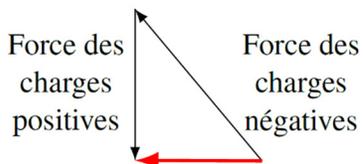
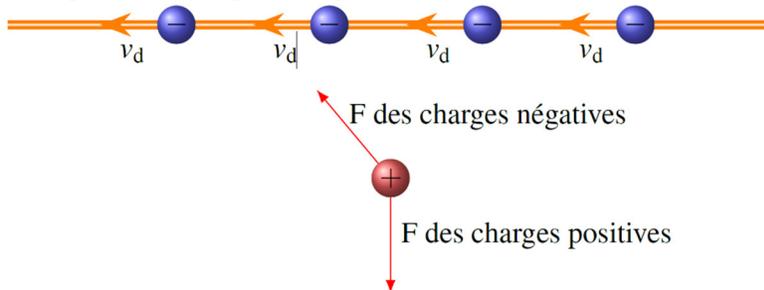
Regardons maintenant ce qu'on obtient dans le repère de la charge. Pour cette charge, le fil s'approche de la charge avec la vitesse v . En même temps, les électrons qui font le courant se déplacent vers la gauche avec la vitesse de dérive.



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.



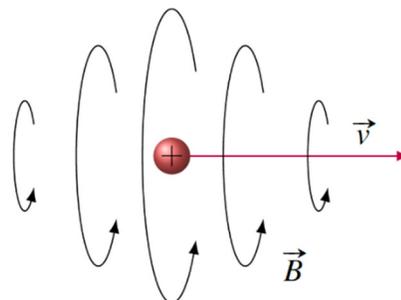
Quand on additionne ces deux forces pour obtenir la force résultante, on obtient une force vers la gauche. On voit donc d'où vient cette force dans le repère de la particule.

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

Le champ magnétique fait par une charge en mouvement

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.

Pour trouver ce 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.

<https://www.youtube.com/watch?v=wyFFrVJfS54>

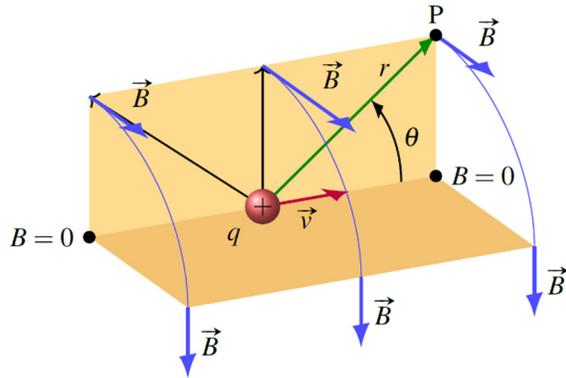
La grandeur du champ est donnée par la formule suivante.

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

Cliquez ici si vous voulez voir la preuve de cette formule à partir de la relativité :

<https://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 de droite si on cherche la valeur du champ au point P .



Notez que, avec la formule du champ fait par une charge en mouvement et celle de la force magnétique sur une charge, c'est facile d'imaginer une situation dans laquelle la 3^e loi de Newton ne semble pas s'appliquer pour la force magnétique. Jetez un coup d'œil à ce document pour plus de détails.

<https://physique.merici.ca/electricite/3meNewton.pdf>

La loi de Biot-Savart

On peut alors utiliser la formule du champ fait par une charge en mouvement pour trouver le champ fait par un très petit bout parcouru par une courant I . Ce petit bout de fil a une longueur ℓ et l'aire du bout du fil 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

$$I = nev_d A$$

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

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

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

on a

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

En utilisant cette valeur de N dans la formule du champ, on arrive à

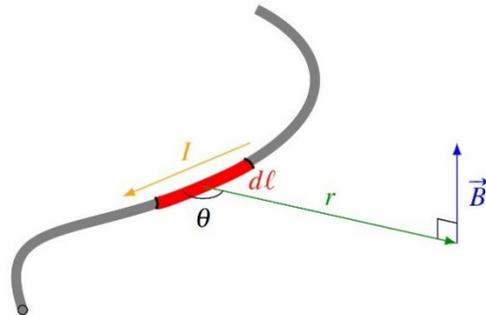
$$B = \frac{I \ell}{ev_d} \frac{\mu_0}{4\pi r^2} ev_d \sin \theta$$

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

On va maintenant faire tendre la longueur du fil vers 0 pour obtenir le champ fait par un très petit bout de fil. On a alors la formule suivante.

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

Le champ est toujours perpendiculaire à la ligne qui va du fil à l'endroit où on veut connaître le champ (ligne r sur la figure). Pour connaître 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 a été faite par Jean-Baptiste Biot et Félix Savart en 1820, soit très peu de temps après la découverte de Ørsted.

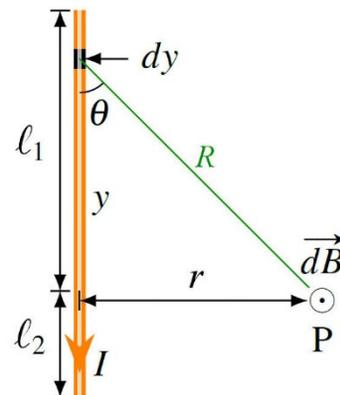
Donc si on voulait trouver le champ fait par un fil, on devrait séparer le fil en petits morceaux infinitésimaux et trouver le champ fait par chacun des petits morceaux. On devrait ensuite sommer tous ces champs à l'aide d'intégrales (une pour chaque composante) pour trouver le champ total. On ne va pas vraiment faire ces intégrales. On va faire un seul cas pour illustrer la méthode et ensuite, on va simplement donner le résultat des intégrales pour quelques autres cas.

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

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

Avec un courant vers le bas, ce champ sort de la page. (C'est d'ailleurs le cas pour tous les morceaux du fil. On aura donc une seule intégrale puisqu'il n'y a qu'une seule composante à calculer.) Quand on change de morceau, R et θ changent. 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

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

Ensuite, on a que

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

ce qui nous amène à

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

On peut maintenant intégrer pour obtenir le champ total

$$B = \int_{-\ell_2}^{\ell_1} \frac{\mu_0 r}{4\pi (r^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} Idy$$

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.)

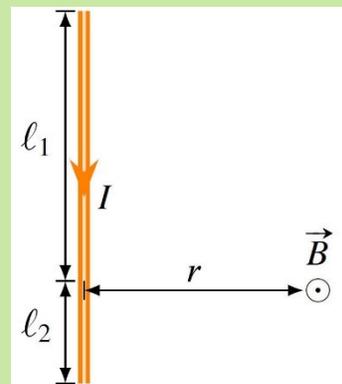
Champ magnétique fait par un fil rectiligne

Grandeur :

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left| \frac{\ell_1}{\sqrt{\ell_1^2 + r^2}} + \frac{\ell_2}{\sqrt{\ell_2^2 + r^2}} \right|$$

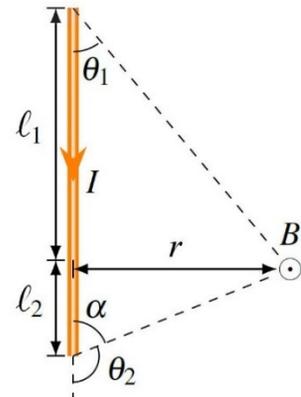
Direction : perpendiculaire à la ligne r .

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

$$\begin{aligned} \cos \theta_1 &= \frac{\ell_1}{\sqrt{\ell_1^2 + r^2}} \\ \cos \theta_2 &= \cos(180^\circ - \alpha) = -\cos \alpha \\ &= -\frac{\ell_2}{\sqrt{\ell_2^2 + r^2}} \end{aligned}$$



Ainsi, la grandeur du champ est

Grandeur du champ magnétique fait par un fil rectiligne

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

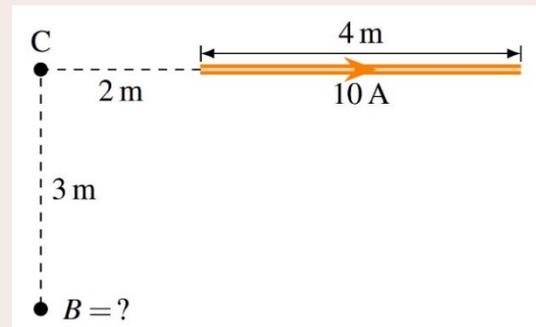
Notez qu'on peut appliquer ces formules même si on cherche le champ à un endroit qui n'est pas directement à côté du fil. L'exemple suivant vous montre comment utiliser la formule dans ce cas.

Exemple 8.4.1

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

On trouve le champ avec

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left| \frac{\ell_1}{\sqrt{\ell_1^2 + r^2}} + \frac{\ell_2}{\sqrt{\ell_2^2 + r^2}} \right|$$



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 ℓ_1 et ℓ_2 sont toutes les 2 positives. Quand le point C est sur le prolongement du fil, une des valeurs de y est négative.

ℓ_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 ℓ_1 est négatif. ℓ_1 est donc -2 m ici.

ℓ_2 est la distance entre le bout du fil où sort le courant et le point C. ℓ_2 est donc 6 m ici.

Le champ est donc

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left| \frac{\ell_1}{\sqrt{\ell_1^2 + r^2}} + \frac{\ell_2}{\sqrt{\ell_2^2 + r^2}} \right|$$

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \frac{Tm}{A} \times 10A}{4\pi \cdot 3m} \cdot \left| \frac{-2m}{\sqrt{(-2m)^2 + (3m)^2}} + \frac{6m}{\sqrt{(6m)^2 + (3m)^2}} \right|$$

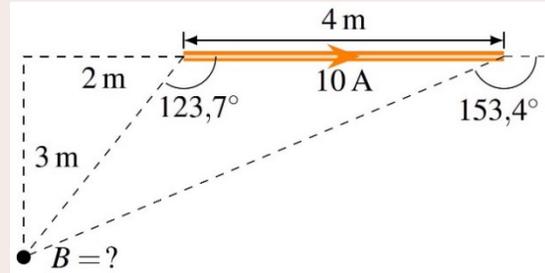
$$= 1,132 \times 10^{-7} T$$

Si on avait voulu le faire avec la formule

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

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

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



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

$$= \frac{4\pi \times 10^{-7} \frac{Tm}{A} \cdot 10A}{4\pi \cdot 3m} \cdot |\cos 123,7^\circ - \cos 153,4^\circ|$$

$$= 1,132 \times 10^{-7} T$$

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.

Notez que le champ vis-à-vis le bout du fil est nul.



Ce n'est pas évident avec la formule du fil rectiligne parce qu'on a alors la forme 0/0, mais on peut trouver le champ assez rapidement en retournant à la formule du champ fait par un petit morceau de fil.

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

Comme l'endroit où on veut savoir le champ est directement dans la direction du courant ou directement opposé à la direction du courant, on a que $\theta = 0^\circ$ ou $\theta = 180^\circ$. Dans les 2 cas, on a $\sin \theta = 0$ et $dB = 0$. En sommant tous les champs faits par tous les morceaux, on additionnera plein de 0, ce qui donne un champ nul.

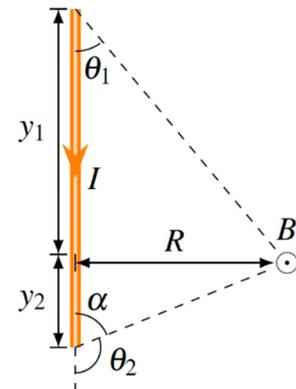
Le champ magnétique fait par un fil rectiligne infini

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

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

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} |1 - (-1)|$$

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



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

Le champ magnétique au centre de courbure d'un arc de cercle

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

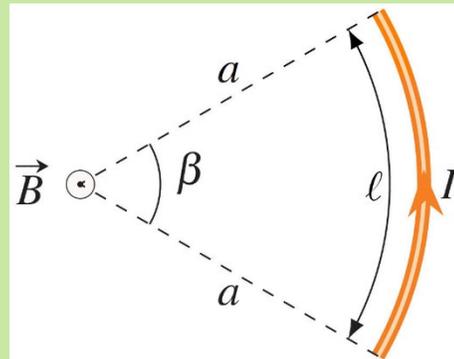
Grandeur :

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

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.

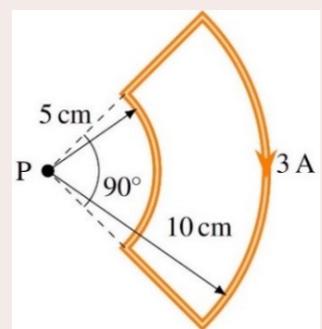
Si vous voulez la voir, voici la preuve de cette formule.

<https://physique.merici.ca/electricite/Champmagnitigecourbe.pdf>

Exemple 8.4.2

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 connaître le champ.

Le champ du grand arc est

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

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

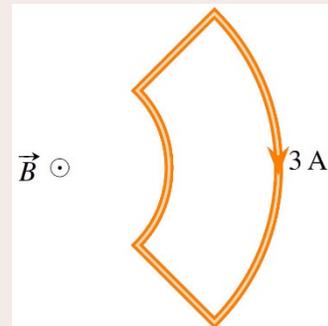
$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \beta \\ &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \frac{Tm}{A} \cdot 3A \cdot \frac{\pi}{2}}{4\pi \cdot 0,05m} \\ &= 9,4248 \times 10^{-6} T \end{aligned}$$

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.



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

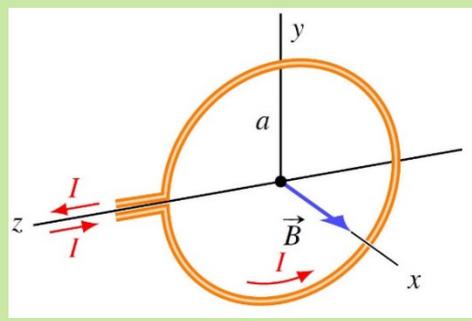
Pour trouver ce champ, on n'a qu'à appliquer la formule de l'arc de cercle. Avec N tours de fil, l'angle fait par l'arc est

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

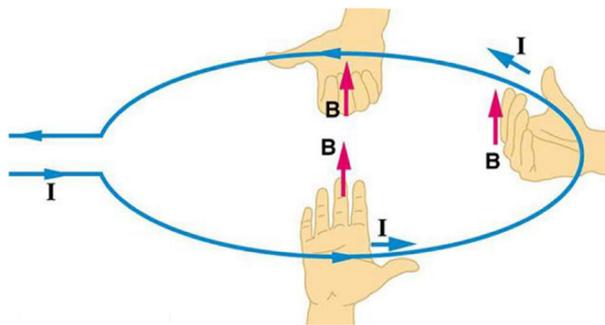
On arrive alors à la formule suivante.

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 connaît 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 connaître le champ).



La direction du champ est donnée par la direction vers laquelle nos doigts plient.

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.

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

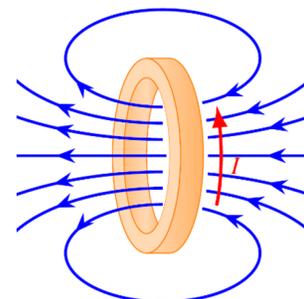
On peut aussi trouver la direction du champ avec une autre règle de la main droite pour déterminer la direction du champ au centre de la boucle. (C'est notre 4^e règle de la main droite.)

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.



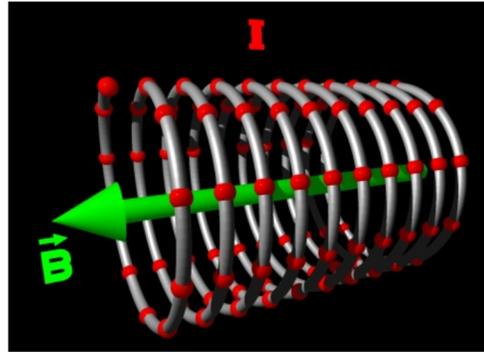
Voici le champ qu'on obtient quand on calcule le champ partout autour de l'anneau.



Le champ magnétique dans un solénoïde

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

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

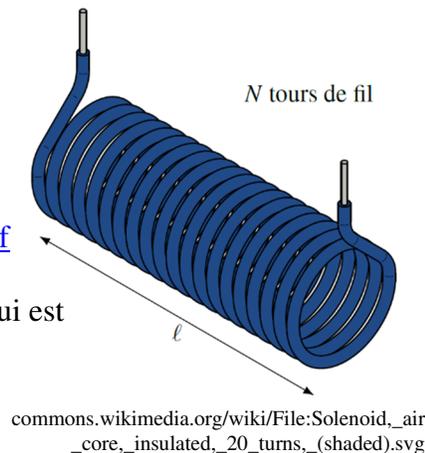
$$B = \frac{\mu_0 NI}{\ell}$$

Voici la preuve si vous voulez la voir :

<https://physique.merici.ca/electricite/Champsolenoid.pdf>

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

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



On a alors le champ suivant.

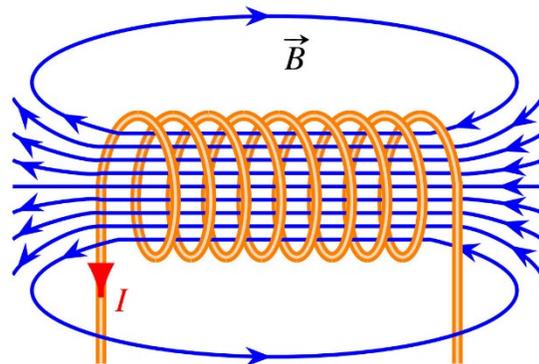
Grandeur du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde.

$$B = \frac{\mu_0 NI}{\ell} = \mu_0 nI$$

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.

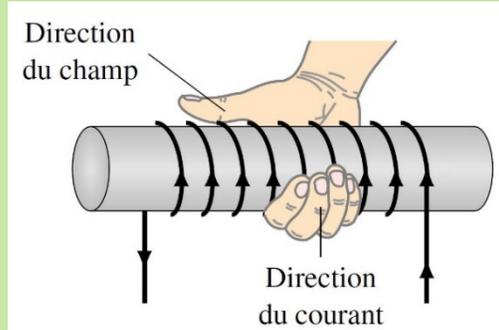
Pour savoir dans quelle direction ces lignes suivent l'axe, on prend le même truc qu'avec l'anneau (c'est la même règle parce que le solénoïde est en fait une série d'anneaux).



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.



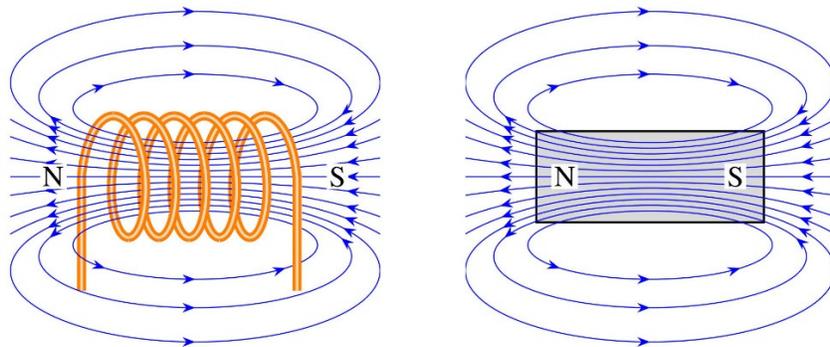
Les solénoïdes occupent une place très importante en magnétisme pour deux raisons.

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

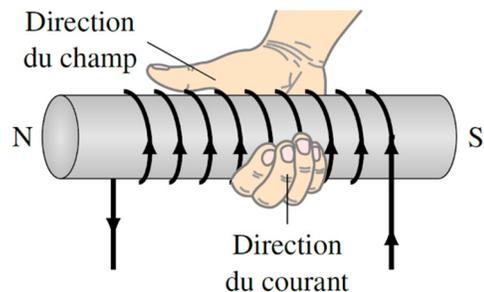
Nous allons explorer un peu plus cette 2^e possibilité dans la prochaine section.

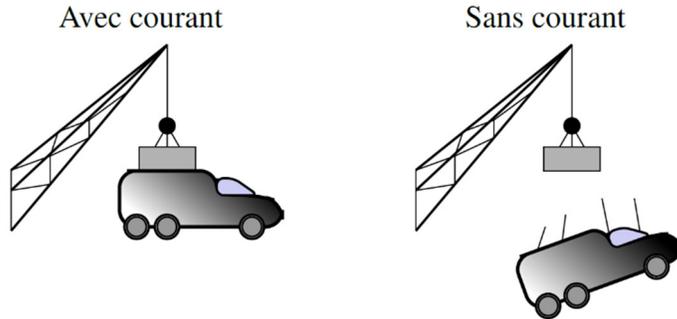
8.5 LES ÉLECTROAIMANTS ET LES RELAIS

Voici à quoi ressemblent les champs magnétiques 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.



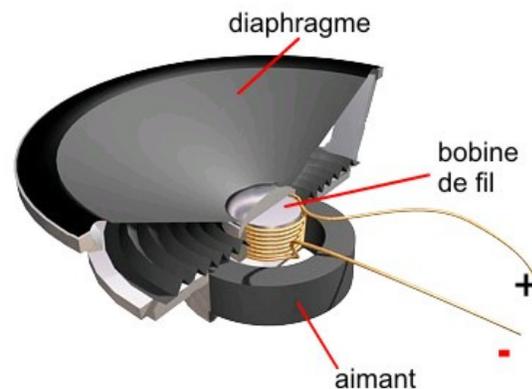


L'avantage de l'électroaimant, c'est qu'on peut avoir ou non un aimant en faisant passer un courant ou non dans le solénoïde. C'est donc un aimant qui peut être en marche ou non, ce qu'on ne peut pas faire avec un aimant permanent.

On peut voir un électroaimant en action dans ce clip.

<https://www.youtube.com/watch?v=lSmuqLtmuwg>

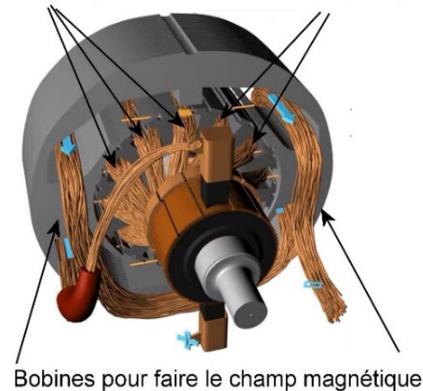
C'est en utilisant ces propriétés du solénoïde qu'on fabrique un hautparleur. Dans un hautparleur, il y a un aimant permanent et un solénoïde. Selon le courant qui passe dans le solénoïde, ce dernier sera attiré ou repoussé par l'aimant. Si on veut faire un son de 500 Hz, on va inverser le courant rapidement 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.



esclantagenet.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. 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.

Boucles de courant qui tournent dans le champ magnétique

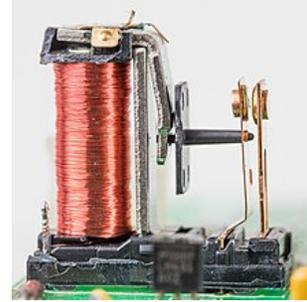


On peut maintenant écouter une autre partie (de 2:31 à 3:21) de notre vidéo.

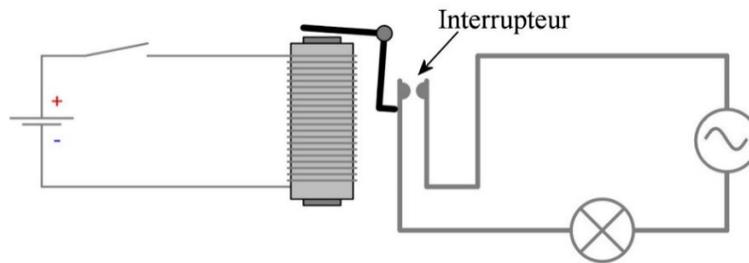
<https://www.youtube.com/watch?v=A3b3Km5KVXs>

On utilise aussi les électroaimants dans les relais. Un relais 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.

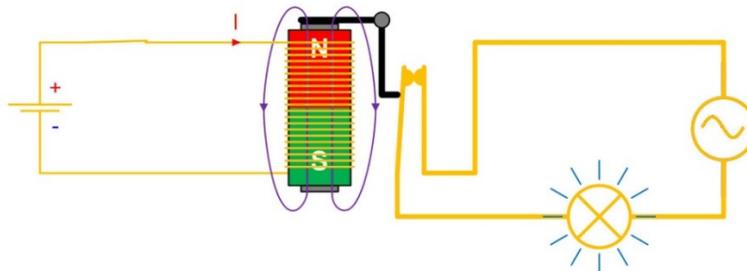
Le relai est composé d'une bobine de fil qui va jouer le rôle d'un électroaimant. Quand il n'y a pas de courant dans la bobine, l'interrupteur est ouvert.



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 autour d'un axe, 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 2^e circuit.



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).

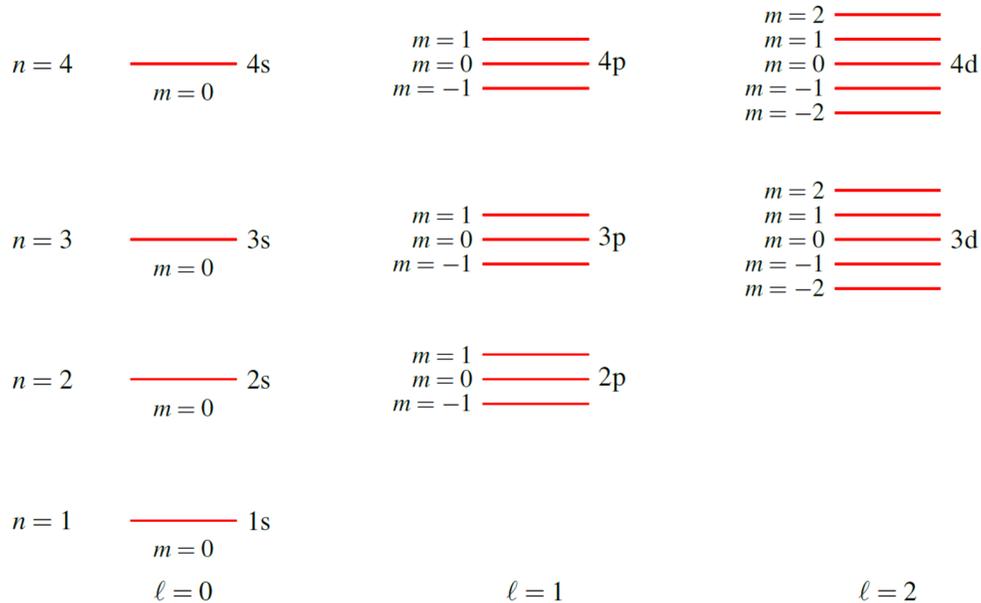
8.6 LE CHAMP MAGNÉTIQUE FAIT PAR LA MATIÈRE

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 qu'une composante 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 du moment magnétique fait par l'électron sur l'orbitale. Cette valeur est

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

(La constante de $9,2740 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$ 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

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

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.

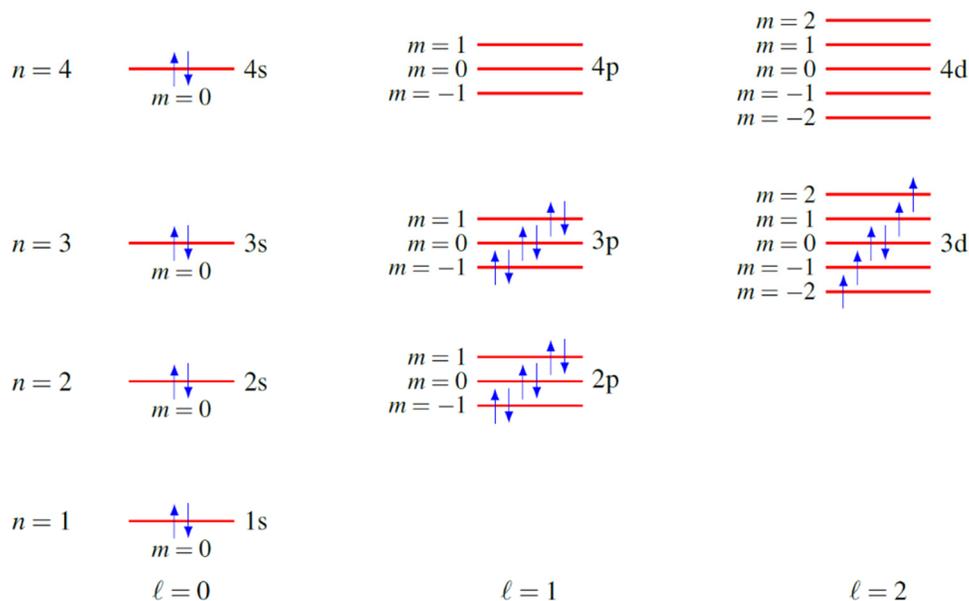
Évidemment, deux électrons avec des spins opposés feront des moments magnétiques qui s'annulent mutuellement.

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 intrinsèque de l'électron.

Cette addition des moments magnétiques dus au spin 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 qu'un seul atome ait un moment magnétique, mais que les moments magnétiques des atomes s'annulent entre eux quand il y a plusieurs atomes. Cela peut se produire, par exemple, dans un métal. Dans un métal, il y a des quelques électrons de chaque atome qui sont dans des orbitales partagées. Imaginons que l'atome, sans ses électrons partagés, n'a pas de moment magnétique et que les électrons partagés se placent dans les orbitales de sorte que les spins des électrons s'annulent (ce qui se produit très

souvent). Dans ce cas, le moment magnétique total sera nul. C'est ce qui se produit avec le cuivre, l'or, l'argent, le zinc, le cadmium, le mercure, le bismuth, le carbone et le plomb.

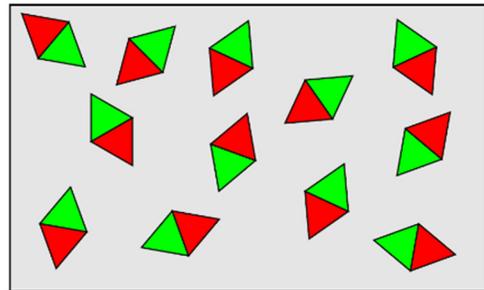
N'essayez donc pas d'attirer un morceau de cuivre avec un aimant. Il ne se passera rien, car la substance n'a pas de moment magnétique et elle ne subira aucune force dans un champ magnétique.

Le paramagnétisme

Parfois, la substance a un petit moment magnétique, mais qui va apparaître seulement quand on place la substance dans un champ magnétique. Ce sont les substances *paramagnétiques*.

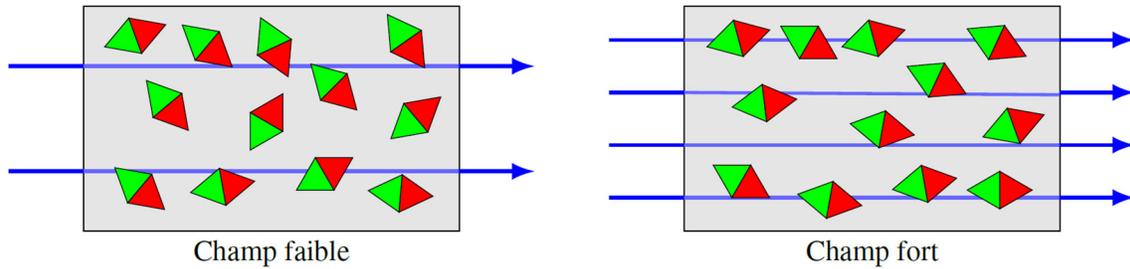
Pour que cela se produise, il faut premièrement que l'atome ait un petit moment magnétique. Imaginons maintenant que, dans un métal, les électrons partagés se placent encore dans les orbitales de sorte que les spins des électrons s'annulent, mais que l'atome sans ses électrons partagés, ait un petit moment magnétique. Dans ce cas, chaque atome aura un petit moment magnétique.

Même si chaque atome a un moment magnétique, 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. Toutefois, aux températures ambiantes, l'agitation thermique est suffisamment grande pour que les moments magnétiques pointent dans des directions aléatoires (voir la figure). Ainsi, la substance n'a pas de moment magnétique, car la somme de tous les moments magnétiques est nulle.



Par contre, 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 les aligner avec les lignes de champ. Donc, 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 grand.

En fait, quand on place la substance dans un champ magnétique externe, il y a alors un genre de combat entre le champ magnétique qui cherche à aligner les dipôles et l'agitation thermique qui cherche à les désaligner. Plus le champ externe est grand, plus l'alignement des dipôles est bon, et plus le moment dipolaire de la substance est grand. 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) résultant 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 grand (meilleur alignement) et diminue si la température augmente (plus d'agitation thermique).

Le moment magnétique qui apparaît 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.

<https://www.youtube.com/watch?v=Lt4P6ctf06Q>

Le ferromagnétisme

Dans certains métaux, beaucoup d'électrons dans les orbitales partagées ont des spins orientés dans la même direction. Normalement, les électrons remplissent les orbitales partagées en alternant la direction des spins de sorte que les moments magnétiques s'annulent. Pour quelques rares substances, plusieurs électrons se placent dans les orbitales partagées avec des spins dans la même direction avant que d'autres se placent avec des spins dans la direction opposée. Avec des spins dans la même direction, les moments magnétiques des électrons s'additionnent et la substance a un moment magnétique important. Ce sont les substances *ferromagnétiques*.

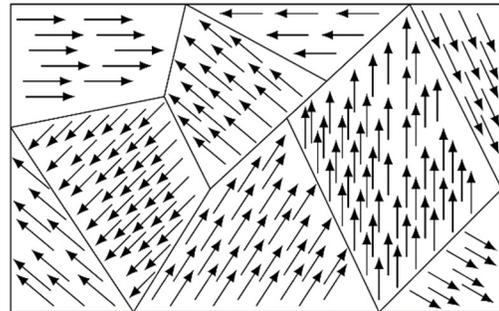
Cet alignement de spins est possible seulement dans quelques substances. Pour que cela se produise, il faut qu'il y ait une certaine distance entre les atomes, un certain écart entre les niveaux d'énergie des orbitales partagées et une valence assez élevée. Ce sont des

conditions un peu particulières qui ne sont remplies que pour 5 éléments : le fer, le nickel, le cobalt, le gadolinium et le dysprosium. Il y a aussi des alliages et des composés qui sont ferromagnétiques, comme la magnétite qu'on retrouve dans les aimants naturels. Pour plus de détails sur l'alignement des spins dans les substances ferromagnétiques, consultez ce document.

<https://physique.merici.ca/electricite/ferromagnetisme.pdf>

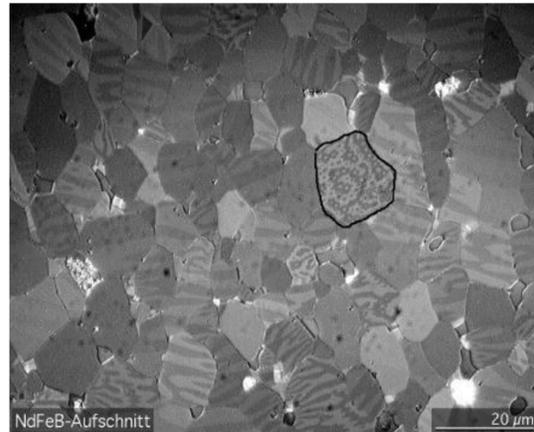
Mais alors, pourquoi un morceau de fer n'est-il pas toujours attiré par un autre morceau de fer si le fer est ferromagnétique et qu'il devrait agir comme un aimant ? Pourquoi votre couteau et votre fourchette en fer ne s'attirent-ils pas ?

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 *domains* (plus précisément, ce sont les *domains de Weiss*). Dans chacun de ces domaines, l'orientation du moment dipolaire total de la substance est différente de celle des autres domaines.

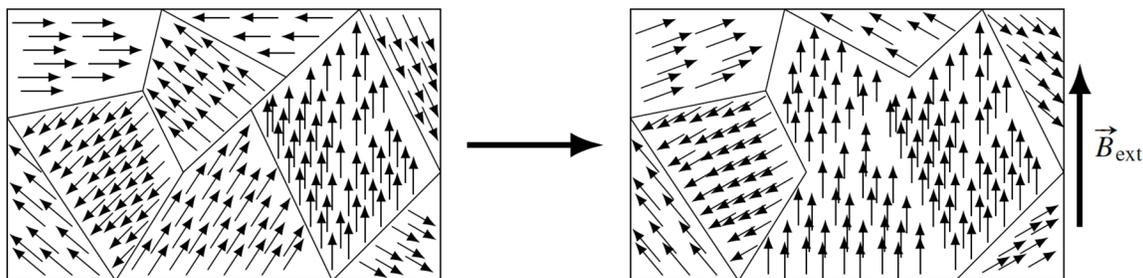


Comme l'orientation de chaque domaine est aléatoire, la somme des moments magnétiques est nulle et la substance n'a pas de moment magnétique. Vous pouvez voir sur cette figure les domaines d'un cristal de NdFeB. Typiquement, ces domaines ont des dimensions des quelques dizaines de micromètres.

Si on place une substance ferromagnétique dans un champ magnétique externe, il y aura un moment de force qui cherchera 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.



en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_domain



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 grand 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) 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.

Les aimants permanents

Les aimants permanents sont simplement des substances ferromagnétiques pour lesquelles il y a un moment magnétique résultant. Pour obtenir une telle substance, on place la substance ferromagnétique 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 disparaît. 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 ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). Vous pouvez les voir en action dans ce vidéo.

<https://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 apparaîtront

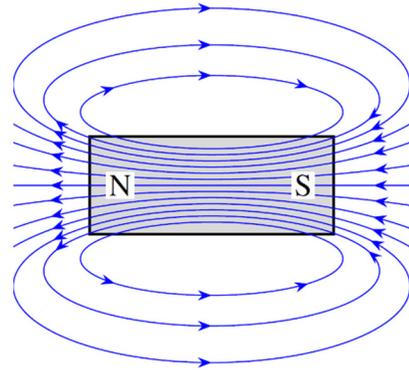
aussitôt. On peut aussi chauffer la substance. En chauffant, l'agitation thermique peut devenir tellement grande qu'elle modifie la façon dont les électrons s'organisent dans la substance de sorte que les moments magnétiques des électrons vont maintenant se soustraire plutôt que s'additionner et la substance 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.

<https://www.youtube.com/watch?v=SIFcXfoF5i0>

Les aimants naturels proviennent de roches fondues contenant des substances ferromagnétiques. 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.

Les lignes de champ des aimants

En réalité, les lignes de champ fait par des aimants ne sont pas des lignes qui commencent au pôle nord de l'aimant et qui se terminent au pôle sud de l'aimant. Une étude plus approfondie révèle que les lignes de champ se prolongent dans l'aimant pour se refermer sur elles-mêmes (figure de droite). C'est seulement à l'extérieur de l'aimant qu'elles vont du nord au sud.



C'est d'ailleurs une propriété générale. Toutes les lignes de champ magnétique se referment ainsi sur elles-mêmes.

Un 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 apparaître. Ce qui est un peu spécial, c'est que ce moment magnétique qui apparaît 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.

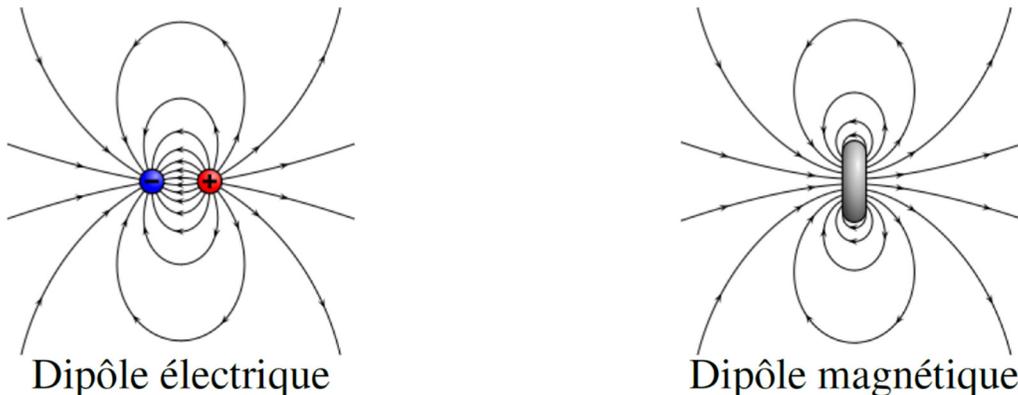
<https://www.youtube.com/watch?v=A1vyB-O5i6E>

Cette modification des orbitales se produit dans toutes les substances, mais, bien souvent, elle est imperceptible si l'atome a un moment magnétique, car le paramagnétisme sera plus important que le diamagnétisme.

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 entraînait une baisse de champ électrique. Dans la présente section, on vient voir que l'alignement des dipôles magnétiques dans un champ magnétique entraîne 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.



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.

Un rappel important

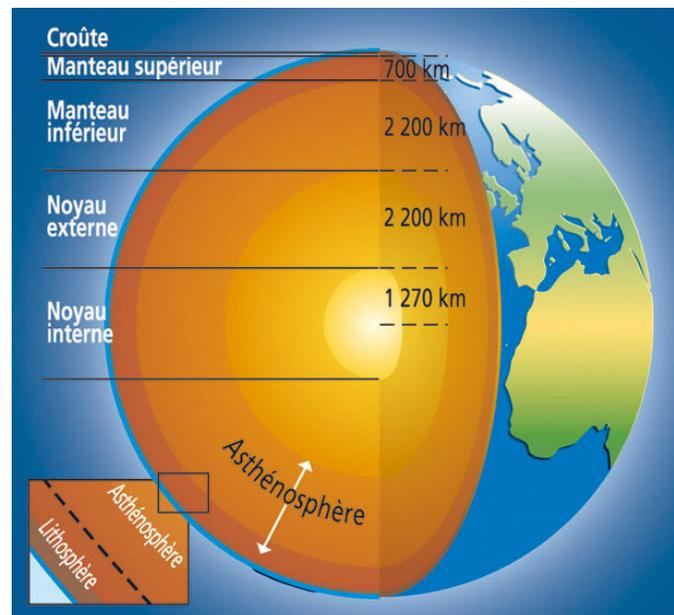


Erreur fréquente : Penser que tous les métaux sont attirés par les aimants.

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 est quasi 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.)

8.7 LE CHAMP MAGNÉTIQUE DE LA TERRE

Les champs ne peuvent être que produits par des courants ou des substances ferromagnétiques. 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.



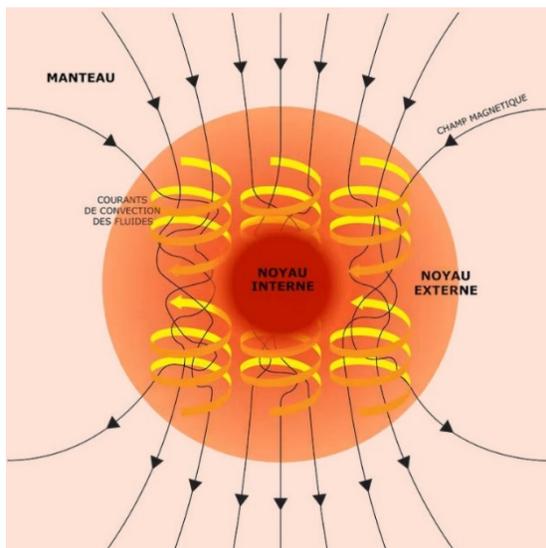
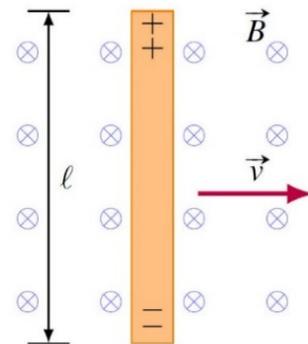
fr.fotolia.com/id/24614965

La croûte et le manteau sont faits de roches dans lesquelles il y a très peu de substances ferromagnétiques. De plus, ces roches sont très peu 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 croûte 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 ?

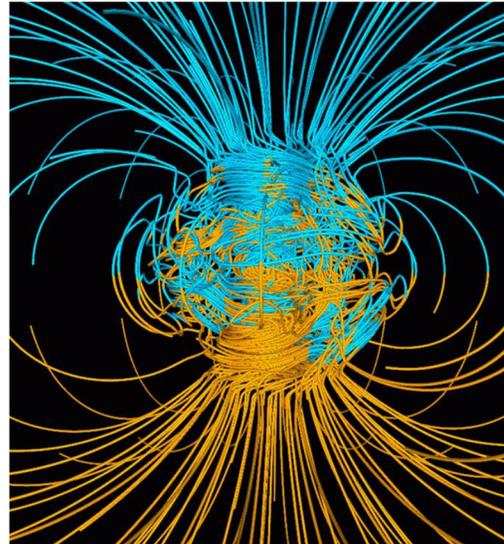
Comme on l'a vu à la fin de chapitre 7, une différence de potentiel apparaît dans le conducteur quand ce dernier se déplace dans un champ magnétique. Cette différence de potentiel est générée par la force magnétique qui agit sur les particules chargées dans la matière et qui entraîne une séparation de charge. La différence de potentiel qui apparaît peut alors créer des courants dans la matière environnante et ces courants génèrent des champs magnétiques. Évidemment, le champ qui apparaît 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.



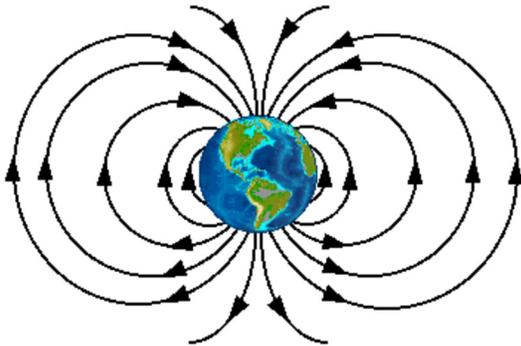
Dans la Terre, on peut donc générer un champ grâce à ce mécanisme dans la partie liquide du noyau. Comme le noyau est composé de fer et de nickel, c'est de la matière conductrice. Cette matière est aussi en mouvement puisque la chaleur qui traverse le noyau liquide fait apparaître de la convection, c'est-à-dire 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 :

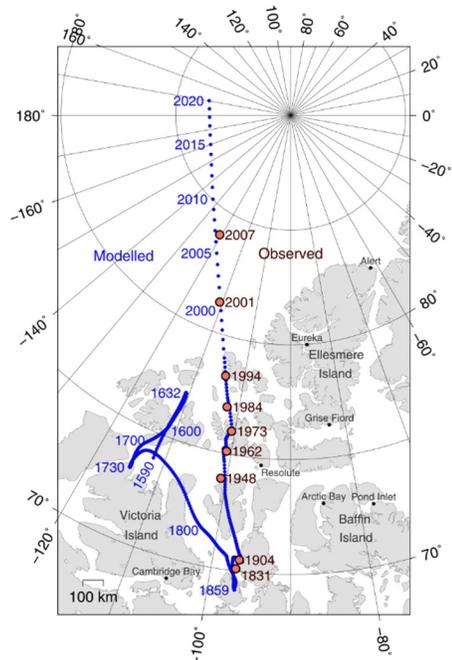
- 1- Il y a de la matière conductrice qui fait des tourbillons dans un champ magnétique.
- 2- Ce mouvement de matière amène la création d'une différence de potentiel dans la matière en rotation.
- 3- Cette différence de potentiel amène la formation de courant dans la matière environnante.
- 4- Les courants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

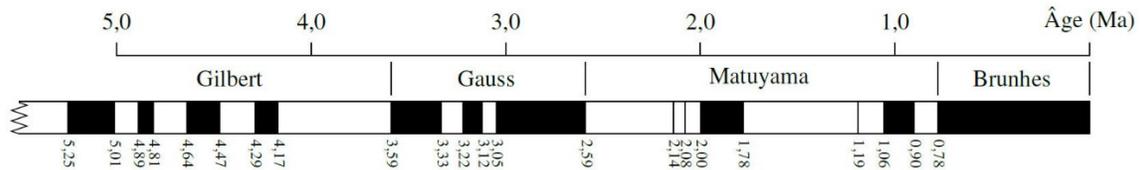
Le champ de la Terre n'est pas toujours le même. La convection étant turbulente, il y a des variations continues du champ magnétique. Les variations sont telles que la position des

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.



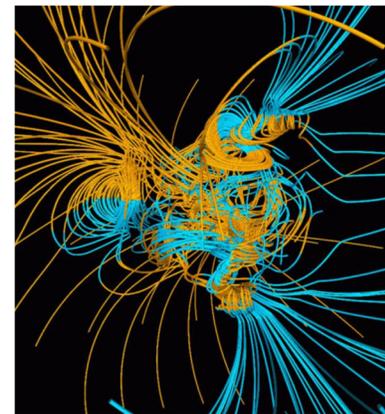
commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=46888403

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 pointerait 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.

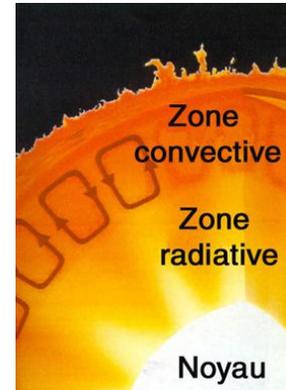
Durant les périodes d'inversion (qui durent typiquement 1000 ans), le champ ne disparaît pas, mais il prend une configuration très complexe. Les simulations arrivent à ce genre de configuration du champ lors des inversions (image de droite).



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_letaches/taches5.htm

RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

Grandeur du champ magnétique fait par un fil rectiligne infini

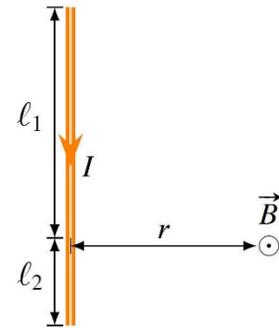
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Champ magnétique fait par un fil rectiligne

Grandeur :

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left| \frac{\ell_2}{\sqrt{\ell_2^2 + r^2}} + \frac{\ell_1}{\sqrt{\ell_1^2 + r^2}} \right|$$

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



Direction : perpendiculaire à la ligne r .

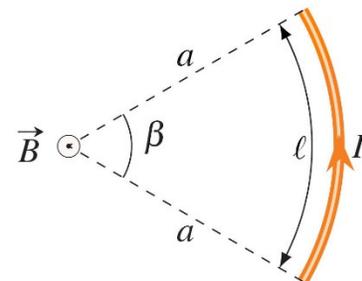
On place notre pouce de la main droite dans le sens du courant et nos doigts dans le sens de r . Le champ est dans la direction vers laquelle nos doigts plient.

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

Grandeur :

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

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



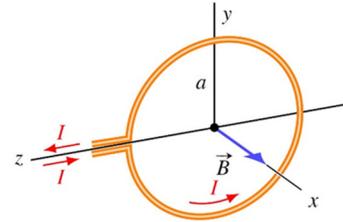
Attention : β est en radians dans cette formule.

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

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



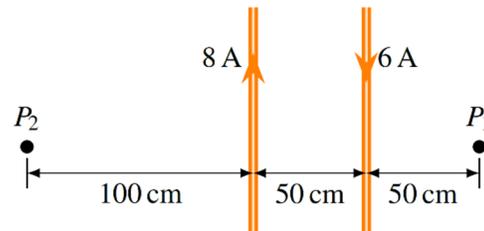
Grandeur du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde.

$$B = \frac{\mu_0 NI}{\ell} = \mu_0 nI$$

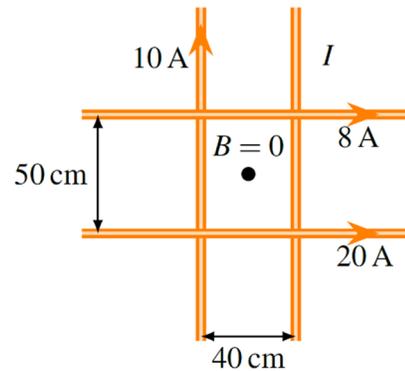
EXERCICES

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

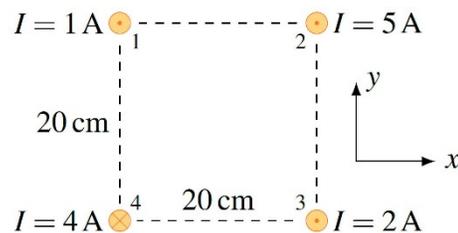
1. Dans la situation montrée sur la figure, trouvez le champ magnétique (grandeur et direction) aux points P_1 et P_2 .



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 ?

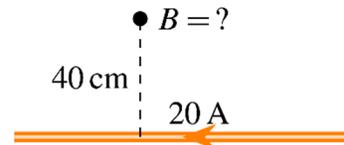


4. Thomas est situé à un endroit où le champ magnétique terrestre a une grandeur de 0,5 G et est dirigé directement vers le nord. Thomas sort sa boussole pour s'orienter, sans remarquer qu'il est directement à 20 m en dessous d'une ligne à haute tension

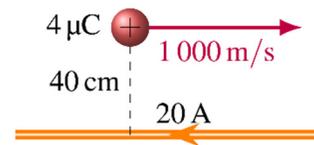
transportant un courant de 500 A vers le sud. Comme le champ magnétique du fil va perturber la boussole, celle-ci ne pointera pas directement vers le nord. Dans quelle direction pointe la boussole de Thomas ? (Donnez l'angle entre le nord et la direction vers laquelle pointe la boussole. Dites aussi si la déviation est vers l'est ou vers l'ouest.)

8.2 La force magnétique faite par des fils rectilignes infinis

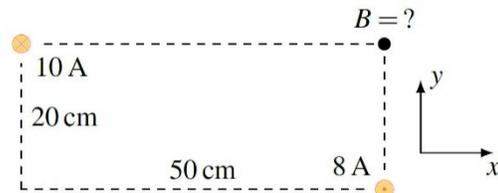
5. a) Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) à l'endroit montré à 40 cm de ce fil infini ?



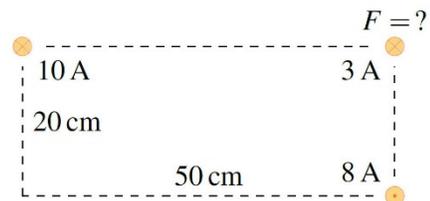
- b) Quelle est la force magnétique (grandeur et direction) sur la charge de $4 \mu\text{C}$ dans la situation suivante ?



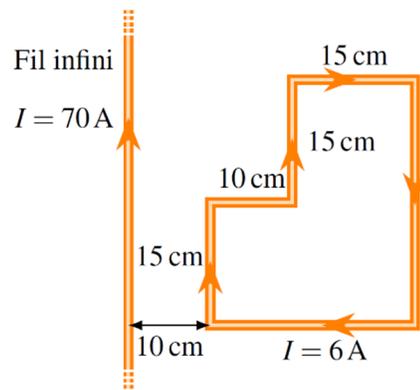
6. a) Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) fait par les deux fils infinis à l'endroit montré sur la figure ?



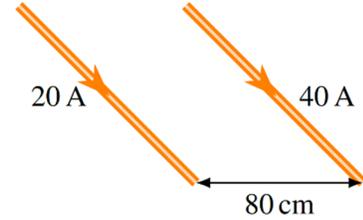
- b) Quelle est la force (grandeur et direction) sur le fil de 5 m de long et transportant un courant de 3 A ?



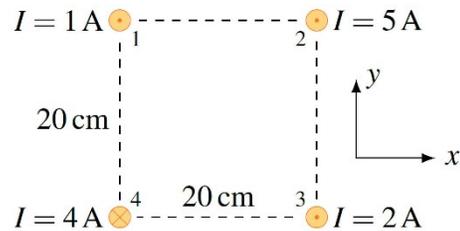
7. Quelle est la force magnétique nette sur le cadre montré sur la figure ?



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.

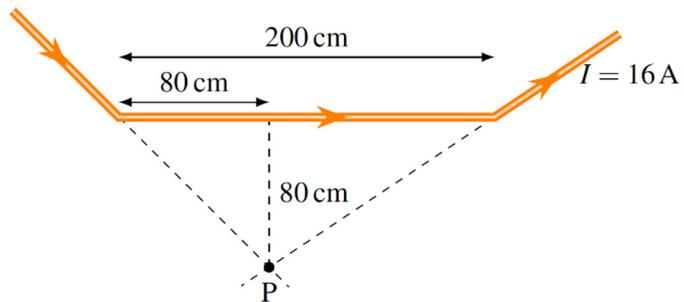


9. Quatre fils parallèles sont disposés tels qu'illustrés sur la figure. Les fils 1,2 et 3 ont une longueur infinie et le fil 4 a une longueur de 10 m. Quelle est la force (grandeur et direction) sur le fil n° 4?

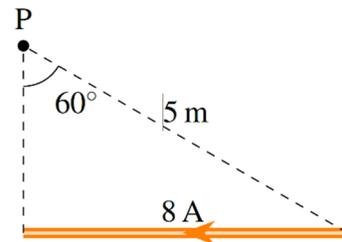


8.4 Le champ magnétique d'un fil parcouru par un courant

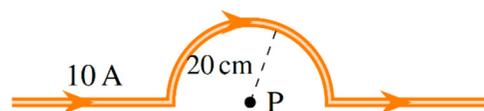
10. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au point P?



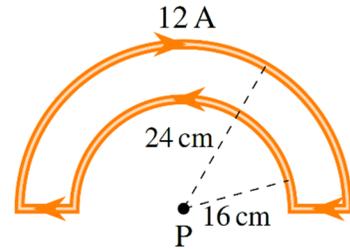
11. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au point P?



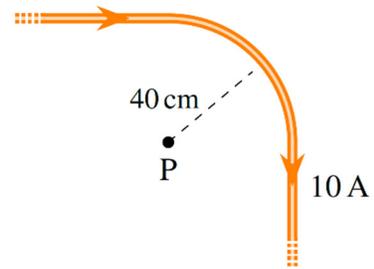
12. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au point P?



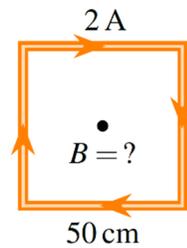
13. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au point P ?



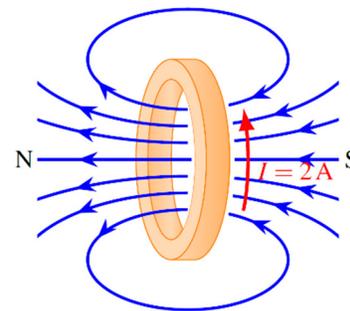
14. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au point P ? (Les deux fils rectilignes sont infinis.)



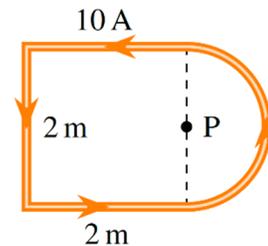
15. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au centre du carré ?



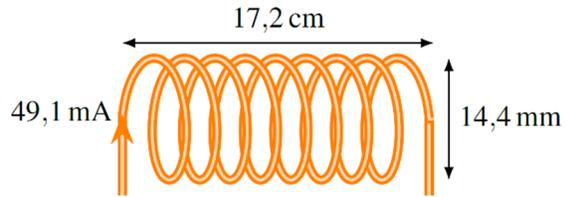
16. Cet anneau a un diamètre de 24 cm. Il est formé d'un fil qui fait plusieurs tours et qui est parcouru par un courant de 2 A. Combien doit-il y avoir de tours de fil pour que le champ magnétique au centre de l'anneau ait une grandeur de 0,002 T ?



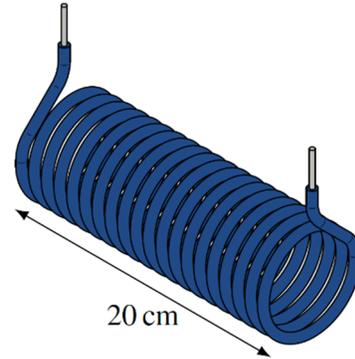
17. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au point P ?



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 ?



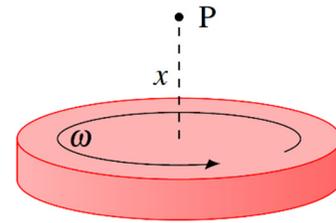
19. Quel courant doit-on faire passer dans ce solénoïde pour qu'il y ait un champ magnétique de 0,08 T à l'intérieur (pas trop près des bouts du solénoïde) ? Le nombre de tours de fil sur la figure correspond au véritable nombre de tours de fil.



Défis

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

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



RÉPONSES

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

1. a) $0,8 \mu\text{T}$ en sortant de la page b) $0,8 \mu\text{T}$ en sortant de la page
2. $0,4 \text{ A}$ vers le haut
3. $12,8 \mu\text{T}$ dans la direction $-51,3^\circ$.
4. La boussole dévie de $5,71^\circ$ vers l'est.

8.2 La force magnétique faite par des fils rectilignes infinis

5. a) $10 \mu\text{T}$ qui entre dans la feuille. b) $4 \times 10^{-8} \text{ N}$ vers le haut
6. a) $8,944 \mu\text{T}$ à $206,6^\circ$ b) $1,342 \times 10^{-4} \text{ N}$ à $116,6^\circ$
7. $1,17 \times 10^{-4} \text{ N}$ vers la gauche.
8. $0,001 \text{ N}$, attractive
9. $2,28 \times 10^{-4} \text{ N}$ à $217,9^\circ$

8.4 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

Défis

$$20. B_z = \frac{\mu_0 Q\omega}{2\pi R^2} \left[\frac{R^2 + 2x^2}{\sqrt{R^2 + x^2}} - 2x \right]$$