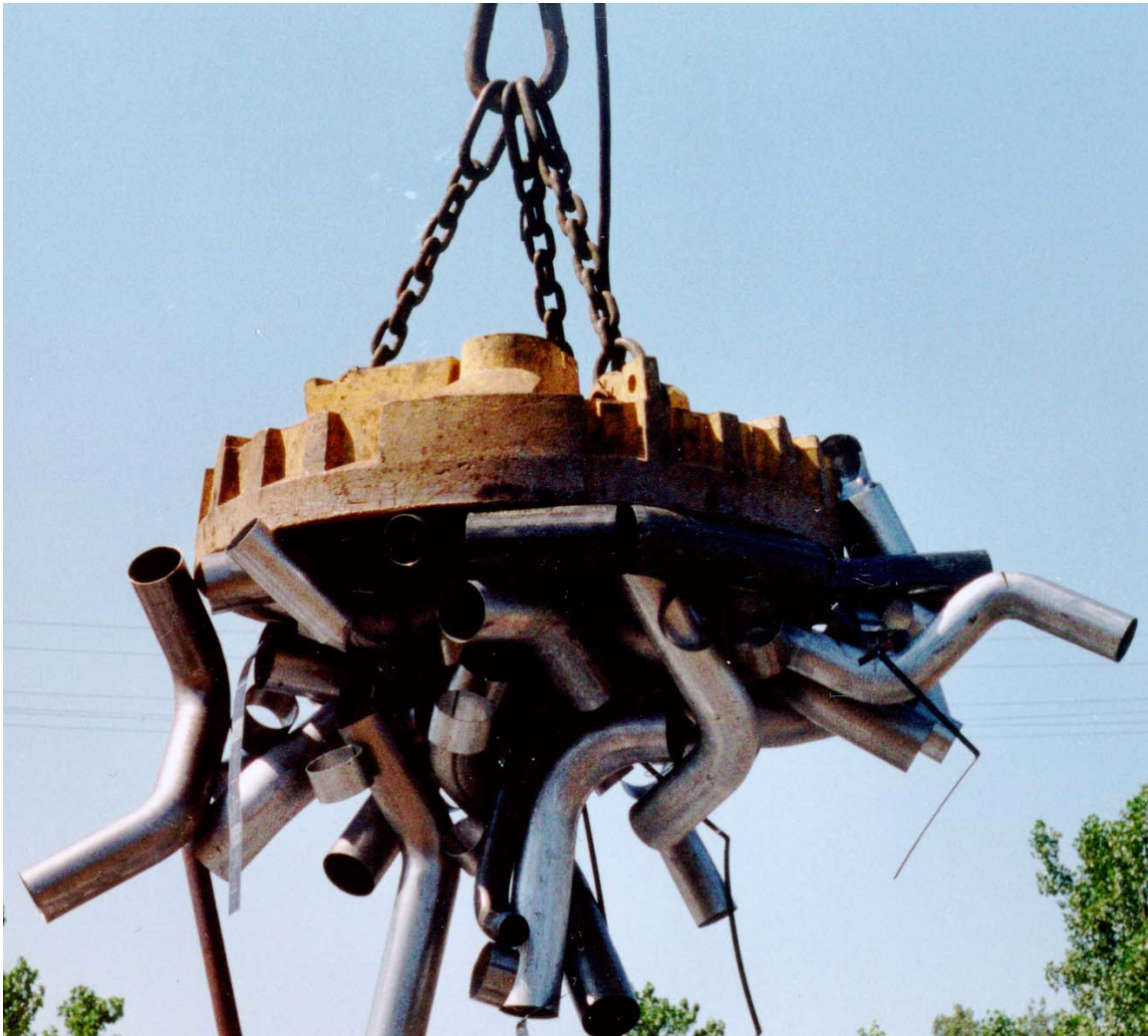


# 8 LES SOURCES DE CHAMP MAGNÉTIQUE

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



[bikesnobnyc.blogspot.ca/2012\\_02\\_01\\_archive.html](http://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 trouva qu'un courant dévie une boussole, il venait en fait de découvrir 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

**Grandeur du champ magnétique fait par un fil rectiligne infini**

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

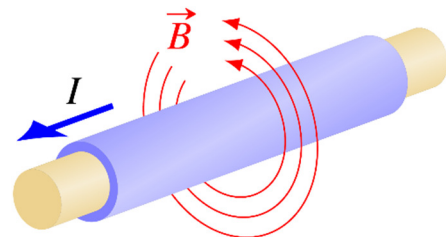
Dans cette formule,  $r$  est la distance entre l'endroit où on veut savoir le champ et le centre du fil.  $\mu_0$  est une constante qu'on appellera *constante magnétique* (elle est aussi appelée perméabilité du vide) qui vaut

**Constante magnétique  $\mu_0$  (perméabilité du vide)**

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

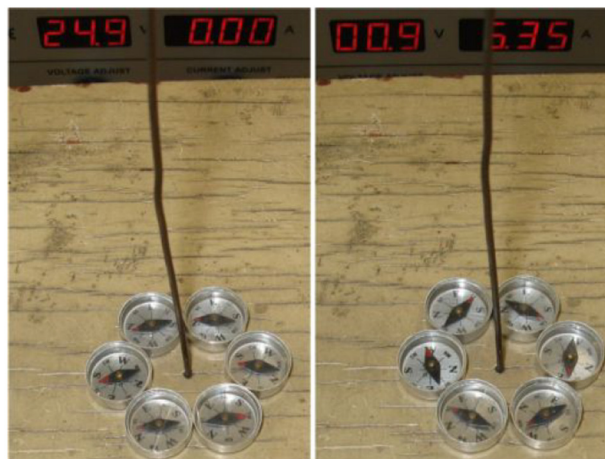
$$\mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7} \frac{Tm}{A}$$

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



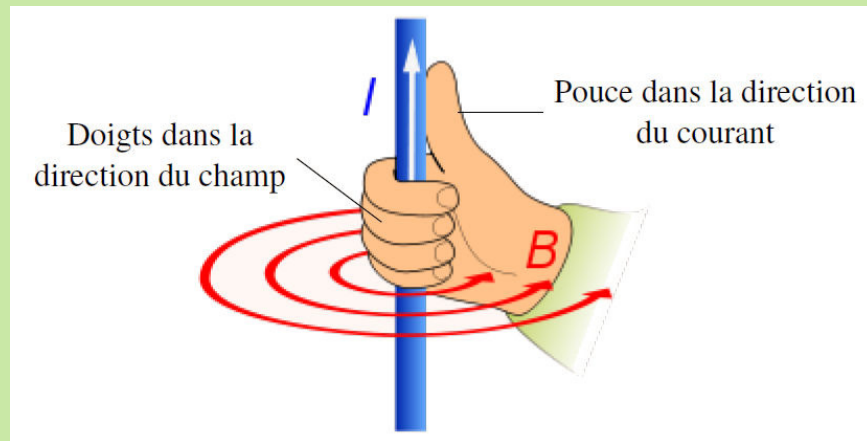
Avec un courant  
dans le fil

[www.trincoll.edu/~cgeiss/stuff/the%20rocky%20road/ch\\_1/ch1\\_p1.htm](http://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



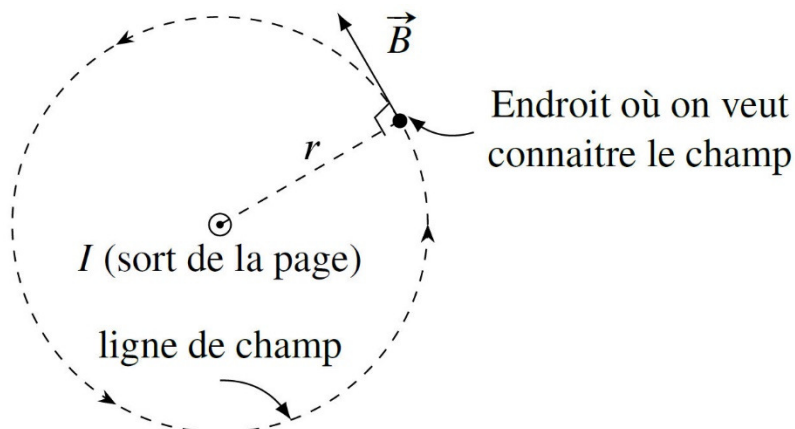
C'est ce que vous montre l'animation suivante.

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

et le vidéo suivant.

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

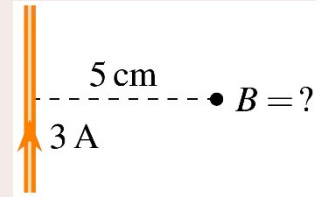
Notez que le champ est toujours tangent aux lignes de champ. Comme les lignes de champ forment des cercles autour des fils, le champ sera toujours perpendiculaire à une ligne allant du fil jusqu'au point où on veut connaître le champ (ligne  $r$  sur la figure).



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

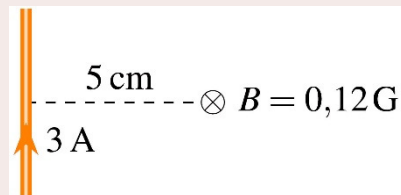
Quel est le champ magnétique à 5 cm du centre d'un fil rectiligne infini parcouru par un courant de 3 A ?



La grandeur du champ est

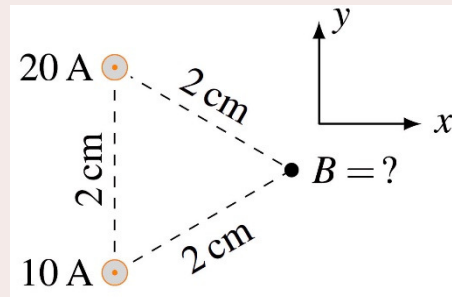
$$\begin{aligned}
 B &= \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \\
 &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \cdot 3 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,05 \text{ m}} \\
 &= 1,2 \times 10^{-5} \text{ T} = 0,12 \text{ G}
 \end{aligned}$$

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. 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 ? Sur cette figure, le courant des fils sort de la page.

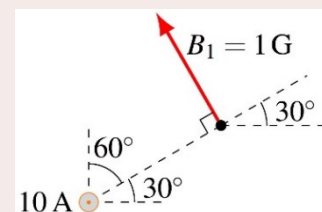


Comme il y a deux fils, on va calculer le champ fait par chacun des fils, pour ensuite les additionner.

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

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

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.



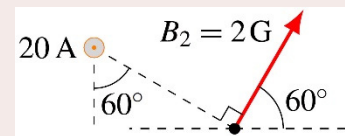
Les composantes du champ sont donc

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

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

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

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

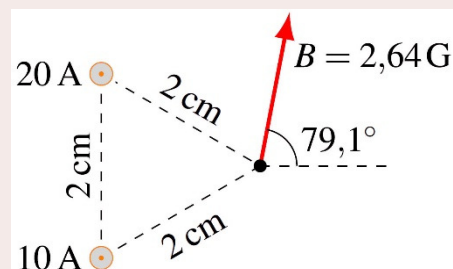
$$\begin{aligned} B_x &= B_{1,x} + B_{2,x} = -0,5G + 1G = 0,5G \\ B_y &= B_{1,y} + B_{2,y} = 0,866G + 1,732G = 2,598G \end{aligned}$$

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.

$$\begin{aligned} B &= \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \\ &= 2,646G \\ \theta &= \arctan \frac{B_y}{B_x} \\ &= 79,1^\circ \end{aligned}$$



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 ?

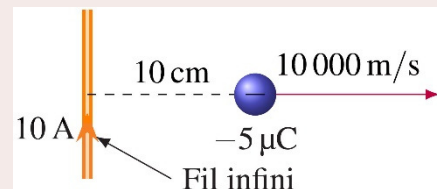
La force sur la charge est

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

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

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

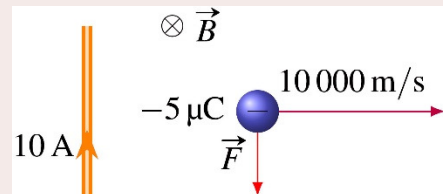


Ce champ entre dans la feuille selon la règle de la main droite.

La force sur la charge est donc

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

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.

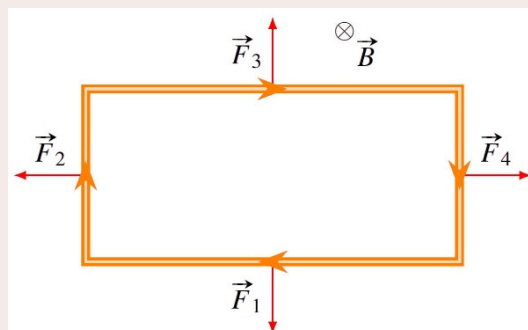
$$F = I\ell B \sin \theta$$

On ne peut pas 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

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

La force sur le fil est donc

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

Calcul de la grandeur de  $F_1$ 

Le champ fait par le fil infini à cette distance est

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \\ &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \frac{Tm}{A} \cdot 10A}{2\pi \cdot 0,22m} \\ &= 9,091 \times 10^{-6} T \end{aligned}$$

La force sur le fil est donc

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

Force résultante

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

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

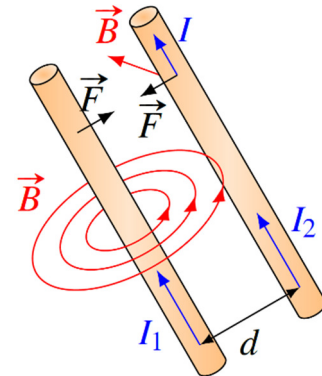
Cette force est vers le haut. Le cadre est donc attiré par le fil infini.



## 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 va faire un champ magnétique. Dans la situation montrée sur la figure, ce champ entre dans la feuille à l'endroit où il y a 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>

## 8.3 LE CHAMP MAGNÉTIQUE D'UN FIL PARCOURU PAR UN COURANT

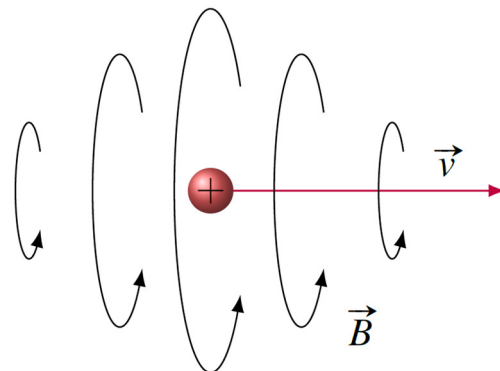
Il n'y a pas que les fils infinis rectilignes qui font un champ magnétique quand ils sont parcourus par un courant. Tous les fils, peu importe leur forme, font un champ magnétique quand ils sont parcourus par un courant. Il est maintenant possible de trouver la formule permettant de trouver le champ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

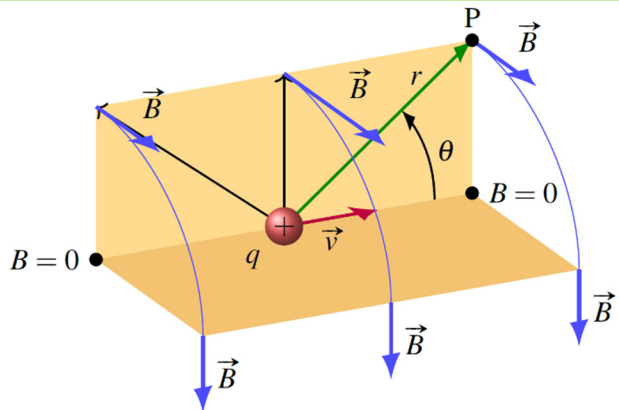


La grandeur du champ est donnée par la formule suivante.

**Champ magnétique fait par une charge en mouvement**

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

Dans cette formule,  $\theta$  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  $P$ .



Quand il y a un courant dans un fil, alors beaucoup de charges se déplacent. Le champ magnétique fait par le fil est la somme des champs faits par toutes les charges en mouvement. En vous épargnant les détails de cette somme, voici ce qu'on obtient pour différentes formes de fil.

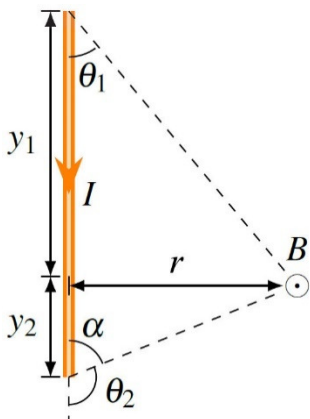
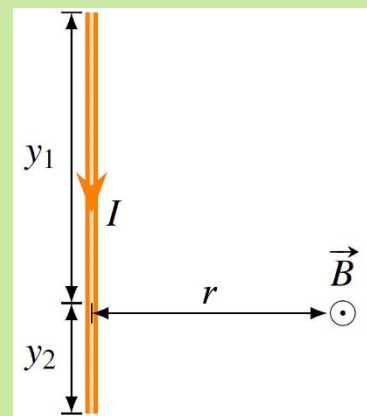
**Champ magnétique fait par un fil rectiligne**

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 ( $\theta_1$  et  $\theta_2$  sur la figure).

Dans ce cas, on a

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

$$\begin{aligned} \cos \theta_2 &= \cos(180^\circ - \alpha) = -\cos \alpha \\ &= -\frac{y_2}{\sqrt{y_2^2 + r^2}} \end{aligned}$$

Ainsi, la grandeur du champ est

### Grandeur du champ magnétique fait par un fil rectiligne

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

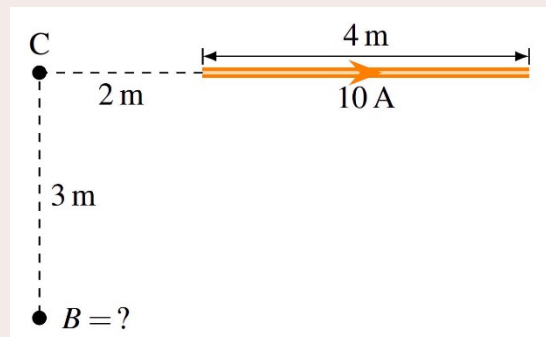
Notez qu'on peut appliquer ces formules même si on cherche le champ à un endroit qui n'est pas directement à côté du fil. L'exemple suivant vous montre comment utiliser la formule dans ce cas.

#### Exemple 8.3.1

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. Dans ce cas, on prolonge le fil et on trace une ligne perpendiculaire au prolongement du fil et qui va à l'endroit où on veut savoir le champ.  $r$  est la longueur de cette ligne qui est perpendiculaire.  $r$  vaut donc 3 m ici.

$y_1$  est la distance entre le bout du fil où arrive le courant et le point C. Normalement, ce bout devrait être à gauche du point C. Quand il est du mauvais côté comme ici, on n'a qu'à mettre  $y_1$  est négatif.  $y_1$  est donc -2 m ici.

$y_2$  est la distance entre le bout du fil où sort le courant et la ligne perpendiculaire  $r$ .  $y_2$  est donc 6 m ici.

Le champ est donc

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

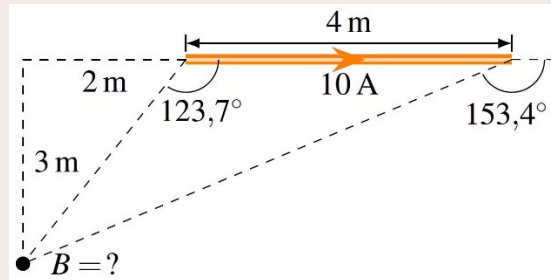
$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \frac{Tm}{A} \times 10A}{4\pi \cdot 3m} \cdot \left| \frac{-2m}{\sqrt{(-2m)^2 + (3m)^2}} + \frac{6m}{\sqrt{(6m)^2 + (3m)^2}} \right|$$

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

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 le haut ici, et les lignes pointillées partant des extrémités et allant au point où on veut connaître le champ. Le champ aurait alors été

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{4\pi r} |\cos \theta_1 - \cos \theta_2| \\ &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \frac{Tm}{A} \cdot 10A}{4\pi \cdot 3m} \cdot |\cos 123,7^\circ - \cos 153,4^\circ| \\ &= 1,132 \times 10^{-7} T \end{aligned}$$

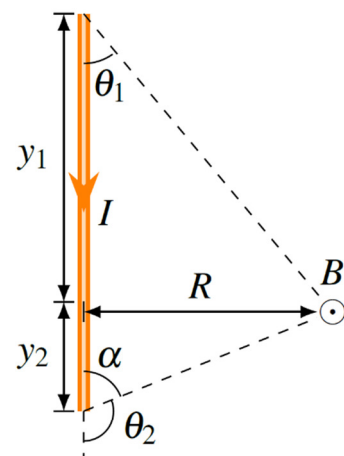
On trouve ensuite la direction avec la règle de la main droite. Notre pouce est vers la droite et nos doigts suivent  $R$ . Comme nos doigts plient alors vers la page, le champ magnétique entre dans la page.

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



Notez aussi qu'on arrive à 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  $\theta_1$  vers  $0^\circ$  et  $\theta_2$  vers  $180^\circ$  dans la formule du fil rectiligne. On a alors

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left| \lim_{\theta_1 \rightarrow 0^\circ} \cos \theta_1 - \lim_{\theta_2 \rightarrow 180^\circ} \cos \theta_2 \right| \\ B &= \frac{\mu_0 I}{4\pi r} |1 - (-1)| \\ B &= \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \end{aligned}$$



Avec un arc de cercle, on a la formule suivante.

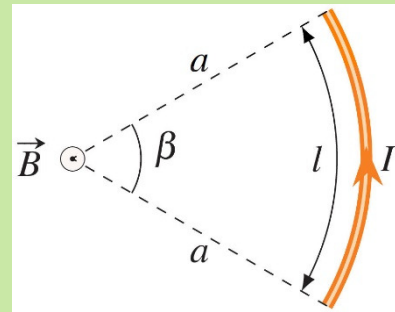
### Champ magnétique au centre de courbure d'un arc de cercle

Grandeur :

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a^2} \ell \quad \text{ou} \quad B = \frac{\mu_0 I}{2a} \frac{\beta}{360^\circ}$$

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 8.3.2

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

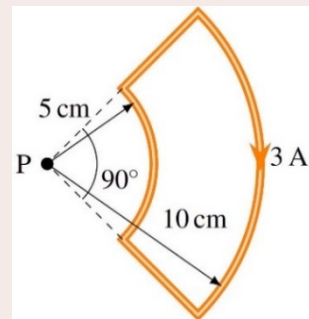
$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{2a} \frac{\beta}{360^\circ} \\ &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \cdot 3\text{A}}{2 \cdot 0,1\text{m}} \cdot \frac{90^\circ}{360^\circ} \\ &= 4,7124 \times 10^{-6} \text{T} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \beta \\ &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \cdot 3\text{A}}{2 \cdot 0,05\text{m}} \cdot \frac{90^\circ}{360^\circ} \\ &= 9,4248 \times 10^{-6} \text{T} \end{aligned}$$

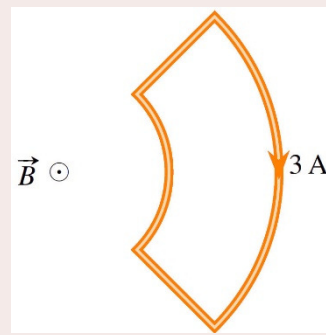
Ce champ sort de la page (pouce vers le haut et doigts vers la gauche : les doigts plient en sortant de la page).



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.



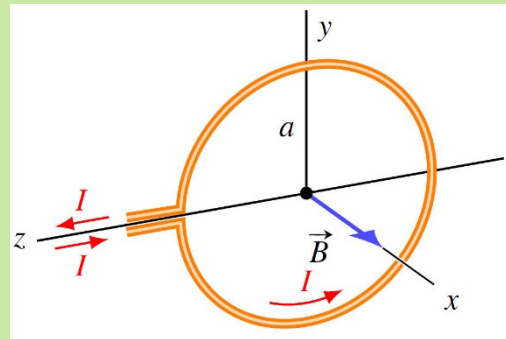
Si on a un anneau avec plusieurs tours de fils, on n'a simplement qu'à appliquer la formule de l'arc de cercle. Avec  $N$  tours de fil, l'angle fait par l'arc est

$$\beta = N \cdot 360^\circ$$

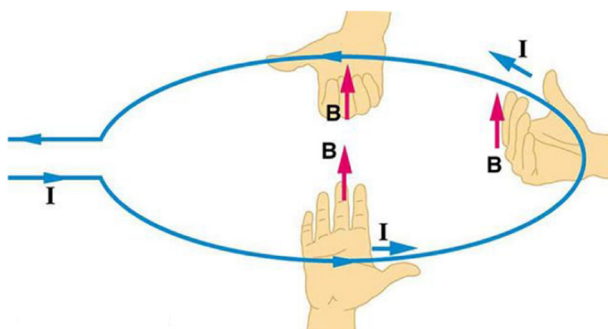
et on obtient la formule suivante.

**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 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.

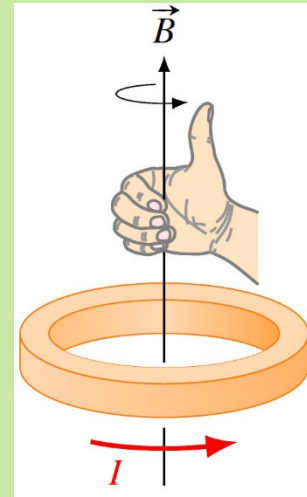
[cnx.org/content/m42382/latest/?collection=coll11406/latest](https://cnx.org/content/m42382/latest/?collection=coll11406/latest)

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.

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

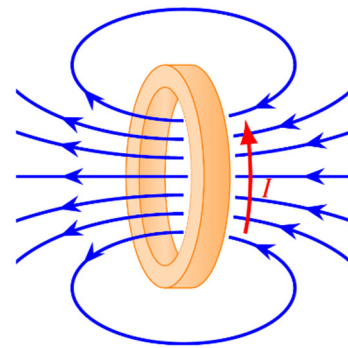
On place nos doigts dans le sens du courant dans la boucle. Notre pouce donne alors la direction du champ magnétique au centre de la boucle.

(C'est notre 4<sup>e</sup> règle de la main droite.)

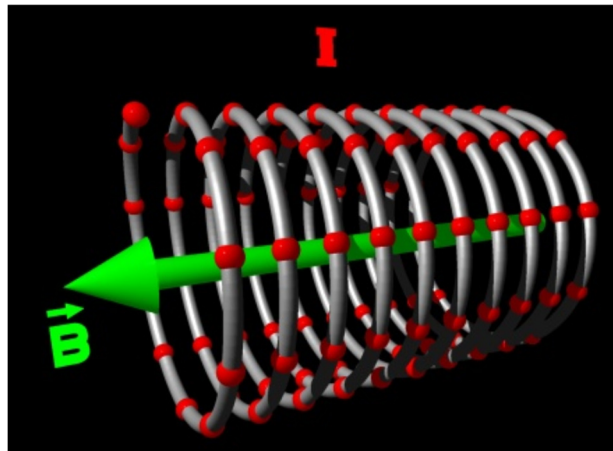


On pourrait calculer le champ n'importe où autour de l'anneau, mais les calculs sont beaucoup plus longs que ce qu'on vient de faire.

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



On peut finalement calculer le champ dans un solénoïde. Un solénoïde ressemble beaucoup à un ressort. On veut connaître le champ dans le solénoïde quand il y a un courant dans le fil.



[web.ncf.ca/ch865/englishdescr/Solenoid.html](http://web.ncf.ca/ch865/englishdescr/Solenoid.html)

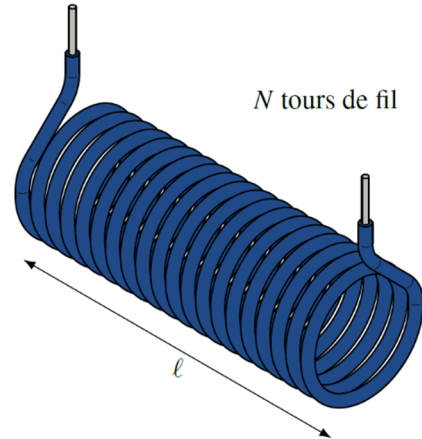
Le résultat est remarquable : le champ est uniforme à l'intérieur du solénoïde (à condition que les anneaux du solénoïde soient assez près l'un de l'autre et qu'on ne soit pas trop près des bouts du solénoïde).

La grandeur du champ dans le solénoïde est

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

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

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



commons.wikimedia.org/wiki/File:Solenoid,\_air\_core,\_insulated,\_20\_turns\_(shaded).svg

On a alors

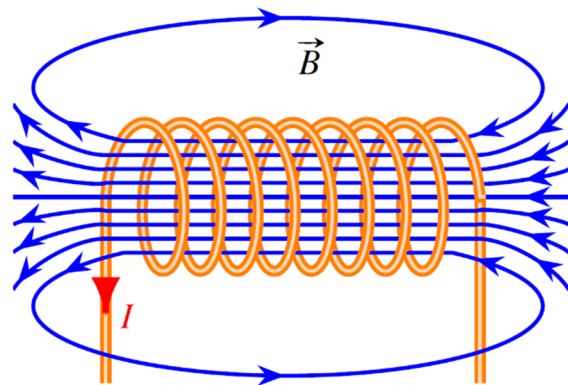
**Grandeur du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde.**

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

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

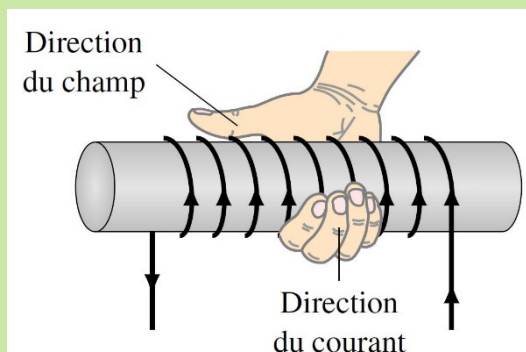
Vous pouvez aussi observer sur cette figure que le champ est uniforme à l'intérieur du solénoïde, en remarquant que les lignes de champ sont équidistantes.

Pour savoir dans quelle direction elles 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.



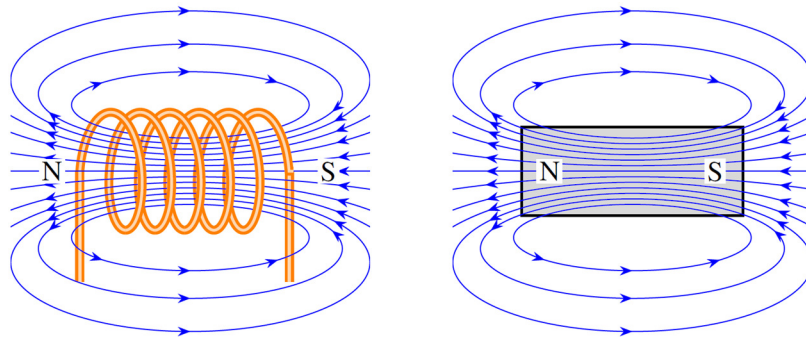
Les solénoïdes occupent une place très importante en magnétisme pour deux raisons.

- 1) Ils permettent de créer un champ magnétique uniforme.

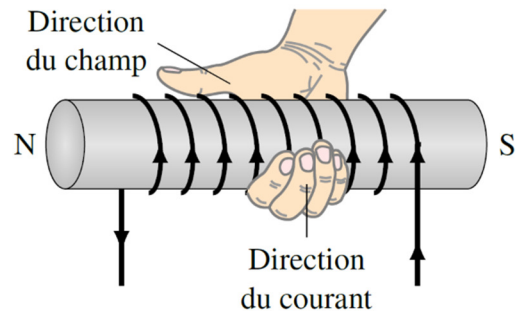
On obtient un champ électrique uniforme avec deux plaques parallèles et on obtient un champ magnétique uniforme avec un solénoïde.

- 2) Les solénoïdes agissent exactement comme un aimant.

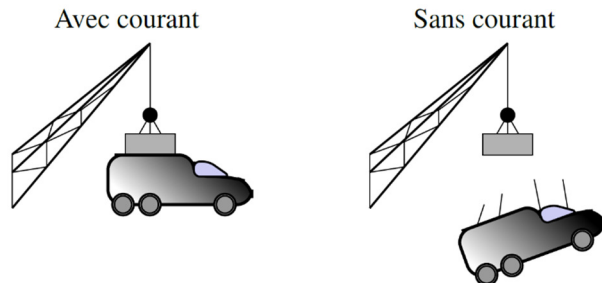
Voici à quoi ressemblent les champs d'un barreau aimanté et d'un solénoïde.



Si les champs sont identiques, cela veut dire que l'effet que le solénoïde a autour de lui est exactement le même que l'effet que l'aimant a autour de lui. On a donc fait un aimant artificiel, qui est un *électroaimant* (inventé en 1823). 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.



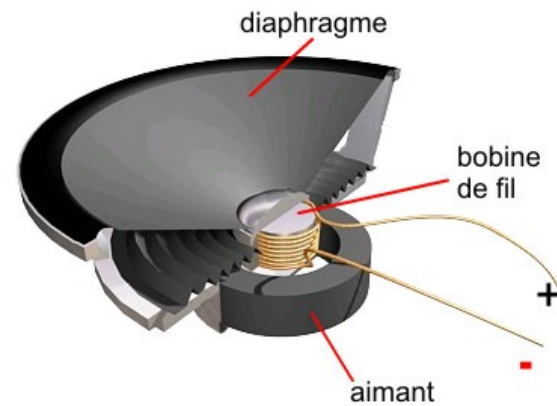
L'avantage de l'électroaimant, c'est qu'on peut avoir ou non un aimant en faisant passer un courant ou non dans le solénoïde. C'est donc un aimant qui peut être en marche ou non, ce qu'on ne peut pas faire avec un aimant permanent.



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.



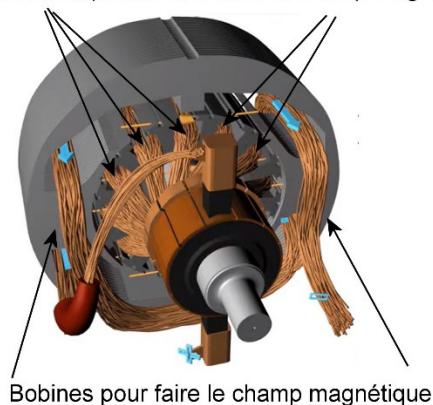
[escplantagenet.org/informatique/robotique/microSon1.html](http://escplantagenet.org/informatique/robotique/microSon1.html)

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.

Boucles de courant qui tournent dans le champ magnétique



## 8.4 LE CHAMP MAGNÉTIQUE FAIT PAR LA MATIÈRE

### Quelle est la source du champ des aimants ?

On a vu que les champs magnétiques sont faits par les courants. Pourtant certaines substances peuvent générer un champ magnétique sans qu'il y ait le moindre courant dans la substance. C'est ce qu'on a avec des aimants de frigo par exemple. L'aimant fait un champ magnétique et il n'y a pas de courant dans cet aimant. Ce champ est fait par les électrons.

Dans un atome, il y a des électrons autour du noyau atomique. Bien que ce ne soit pas exactement correct, on peut imaginer que ces électrons sont en mouvement autour du noyau atomique. Si ces électrons chargés négativement sont en mouvement autour du noyau, alors ils font une boucle de courant et cette boucle crée un champ magnétique. Toutefois, certains atomes tournent dans une direction alors que d'autres tournent dans la direction opposée. Ils font donc des champs de directions opposées ce qui fait en sorte que le champ total fait par le mouvement orbital des électrons n'est jamais très grand. Le mouvement des électrons n'est donc pas la source du champ magnétique fait par certaines substances.

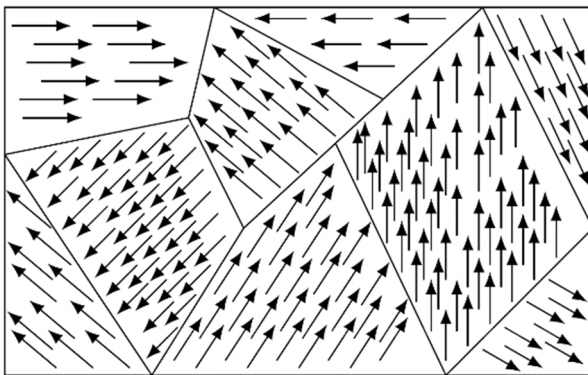
En fait, il y a un champ magnétique parce que l'électron lui-même est un petit aimant permanent. On dit alors que l'électron possède un *moment magnétique intrinsèque*. Il n'y a aucune explication à cela dans la physique actuelle. Les électrons font un champ magnétique autour d'eux. C'est comme ça, c'est tout.

Dans la plupart des substances, les électrons s'organisent pour que les champs magnétiques faits par les électrons s'annulent presque et la substance ne fait que peu ou pas de champ magnétique. Parfois, les champs d'une partie des électrons dans la substance s'additionnent et c'est ce qui permet à la substance de faire un champ magnétique.

### Champ magnétique d'une substance

Le champ magnétique des aimants provient en grande partie du moment magnétique intrinsèque de l'électron.

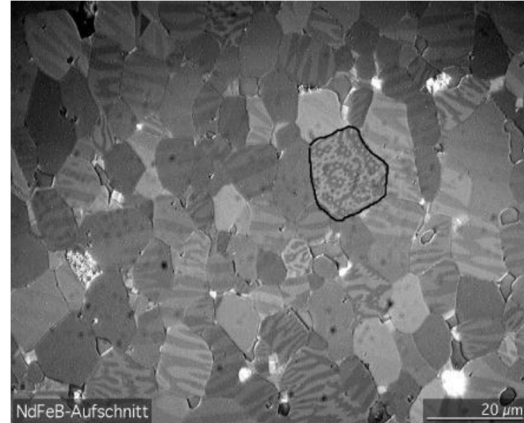
Il n'y a pas beaucoup de substances dans lesquelles les moments magnétiques des électrons s'additionnent ainsi pour créer un champ magnétique important. Parmi les substances pures, il n'y a que le fer, le nickel, le cobalt, le gadolinium et le dysprosium. Ce sont les éléments ferromagnétiques. Il y a aussi plusieurs alliages ferromagnétiques, comme la magnétite.



Toutefois, même les substances ferromagnétiques ne font même pas de champ magnétique la plupart du temps. Il est très rare qu'un clou en fer soit un aimant et qu'il attire les autres clous en fer. Il n'y a pas de champ parce que, bien souvent, la direction des moments magnétiques des électrons qui s'additionnent n'est pas la même partout dans la substance. La substance est séparée en régions appelées *domaines*.

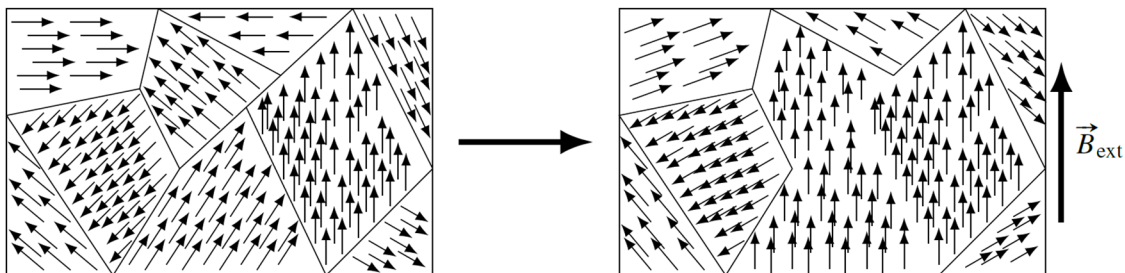
Dans chacun de ces domaines, la direction du moment magnétique net fait par les électrons est le même. Toutefois, la direction change quand on passe d'un domaine à l'autre. Comme la direction du moment magnétique de chaque domaine est aléatoire, la somme des moments magnétiques pour toute la substance est nulle et il n'y a pas de moment magnétique net.

Vous pouvez voir sur cette figure les domaines d'un cristal de NdFeB. Typiquement, ces domaines ont des dimensions des quelques dizaines de micromètres.



[en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_domain](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_domain)

Si le moment magnétique total des substances ferromagnétiques est nul, pourquoi le fer est-il attiré par un aimant alors ? Si on place une substance ferromagnétique dans un champ magnétique externe, il y aura un moment de force qui va chercher à aligner les moments magnétiques des électrons avec le champ externe. 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.



Avec ces changements, la somme des moments magnétiques n'est plus nulle, ce qui signifie que la substance fait un champ magnétique et qu'elle agit maintenant comme un aimant. Le champ magnétique résultant peut alors être très important, tellement qu'il peut être jusqu'à près de 10 000 fois plus fort que le champ magnétique externe.

Ainsi, si on approche un aimant d'un morceau de fer, le champ magnétique de l'aimant va modifier les domaines et le fer va acquérir un moment magnétique. Le morceau de fer deviendra un aimant et il sera attiré par l'aimant qu'on a approché du morceau de fer.

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 !



## Les aimants permanents

Les aimants permanents sont simplement des substances ferromagnétiques qui ont un moment magnétique résultant non nul. Voici comment on peut y arriver.

On place la substance ferromagnétique dans un champ magnétique externe 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 net de la substance disparaît. La substance n'est alors plus un aimant. On appelle *fer doux* le fer qui agit de cette façon. Dans ce cas, on n'obtient pas un aimant permanent puisque le moment magnétique net disparaît.
- 2) Les domaines peuvent aussi rester bloqués dans la configuration qu'ils avaient dans le champ magnétique externe. Dans cette configuration, la substance a un moment magnétique, ce qui veut dire que la substance continue à agir comme un aimant. On a alors un aimant permanent qui 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.

C'est cette 2<sup>e</sup> façon de réagir qui va nous donner les aimants permanents. Les aimants naturels proviennent de substances initialement très chaudes et contenant une substance ferromagnétique (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.

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.

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

L'aimant ainsi obtenu n'est pas permanent au sens strict 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. 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. Si la substance refroidit, elle redevient ferromagnétique et de nouveaux domaines se forment. 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 non ferromagnétique (pas ou peu attiré par l'aimant). Il se passe le contraire quand il refroidit.

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

## Rappel important



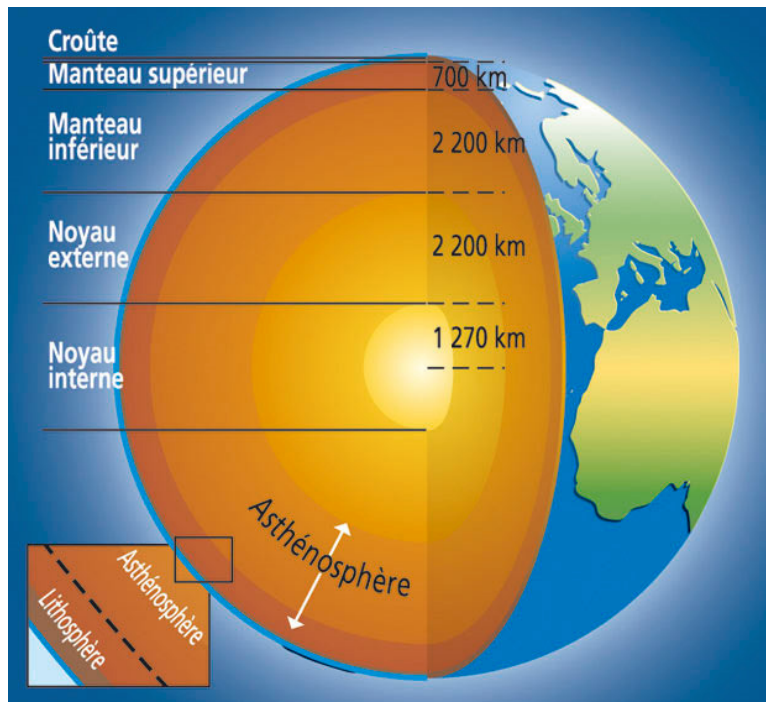
### Erreur fréquente : Penser que tous les métaux sont attirés par les aimants.

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.)

## 8.5 LE CHAMP MAGNÉTIQUE DE LA TERRE

### L'origine du champ

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.



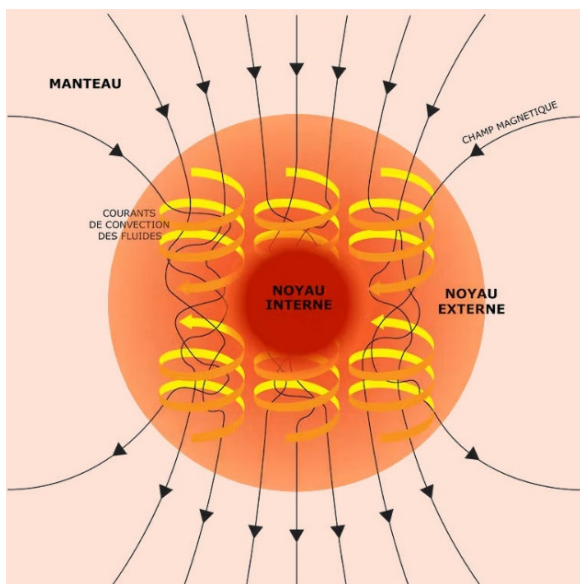
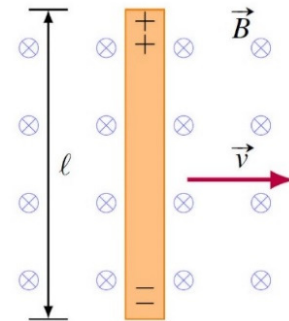
fr.fotolia.com/id/24614965

La croûte et le manteau sont faits de roches, mais il y a très peu de substances ferromagnétiques. 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 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 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 qui 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 ?

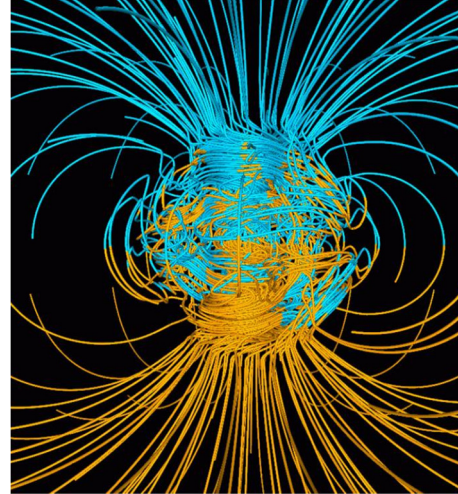
Quand un conducteur se déplace dans un champ magnétique, une différence de potentiel apparaît dans le conducteur. Cette différence de potentiel est générée par la force magnétique qui agit sur les particules chargées dans la matière et qui entraîne une séparation de charge. La différence de potentiel 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.



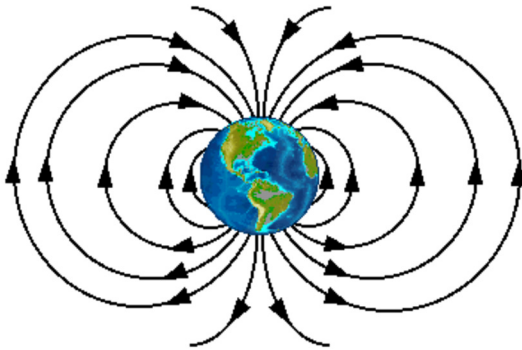
Dans la Terre, on peut donc générer un champ grâce à ce mécanisme dans la partie liquide du noyau. Comme le noyau est composé de fer et de nickel, c'est de la matière conductrice. Cette matière est aussi en mouvement puisque la chaleur qui traverse le noyau liquide fait apparaître de la convection, c'est-à-dire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

Il reste à calculer le champ total généré 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, 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](http://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](http://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 mouvement.
- 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.

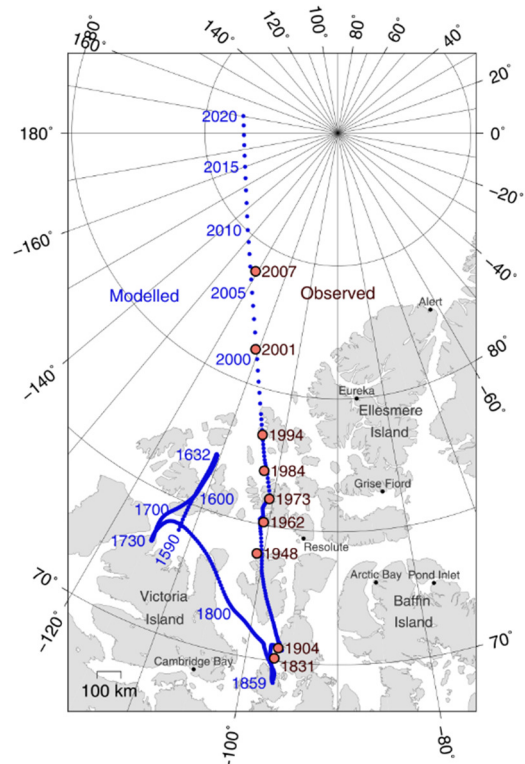
C'est ce qu'on appelle l'*effet dynamo*. Pour que cet effet fonctionne, il y a une condition essentielle : il doit y avoir de la convection de matière conductrice quelque part dans la planète.

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.



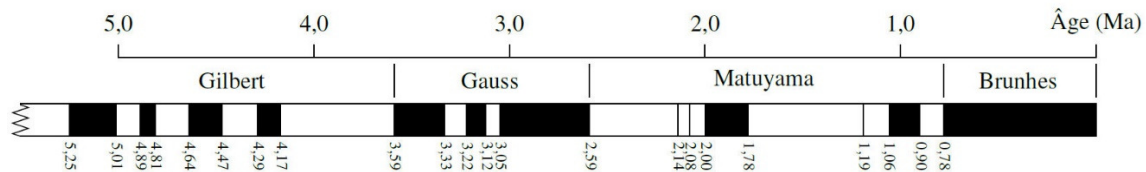
## Les variations du champ

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



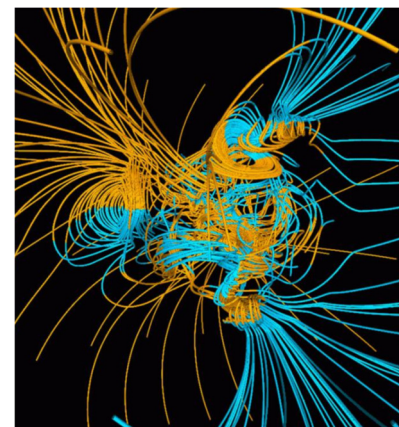
[commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=46888403](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=46888403)

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'inverse 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.)



On observe que les pôles ne sont pas inversés depuis 780 000 ans, ce qui est la plus longue période de stabilité durant les 5 derniers millions d'années.

Durant les inversions (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.



Lors des inversions, il y a plusieurs pôles à la surface de la Terre (figure de droite). Les boussoles deviennent alors totalement inutiles.

Pour l'instant, il est tout à fait impossible de prévoir quand se produira la prochaine inversion des pôles magnétiques.

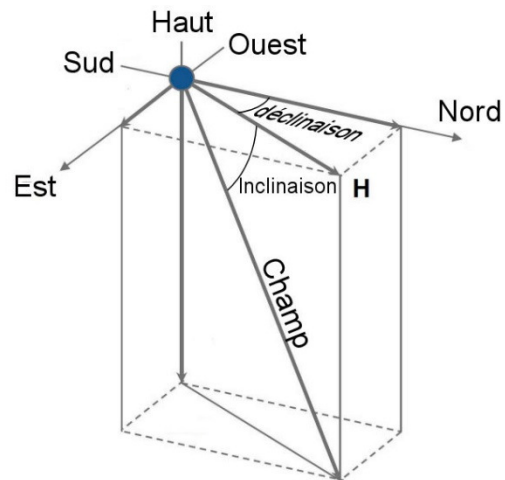
Même si le champ baisse en ce moment et que le mouvement des pôles s'est accéléré récemment, cela ne signifie pas nécessairement qu'une inversion de pôles magnétiques commence, et ce, même si le champ ne s'est pas inversé depuis longtemps. Sachez qu'il y a eu des moments dans l'histoire de la Terre où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

## Les composantes du champ magnétique terrestre

À n'importe quel endroit sur la Terre, le champ magnétique terrestre est représenté par un vecteur à trois dimensions. Pour spécifier la direction de ce vecteur, on commence par trouver la composante horizontale du vecteur champ magnétique. Sur la figure, c'est le vecteur  $H$  (pour composante horizontale.) Les boussoles s'orientent dans la direction de ce vecteur  $H$ .

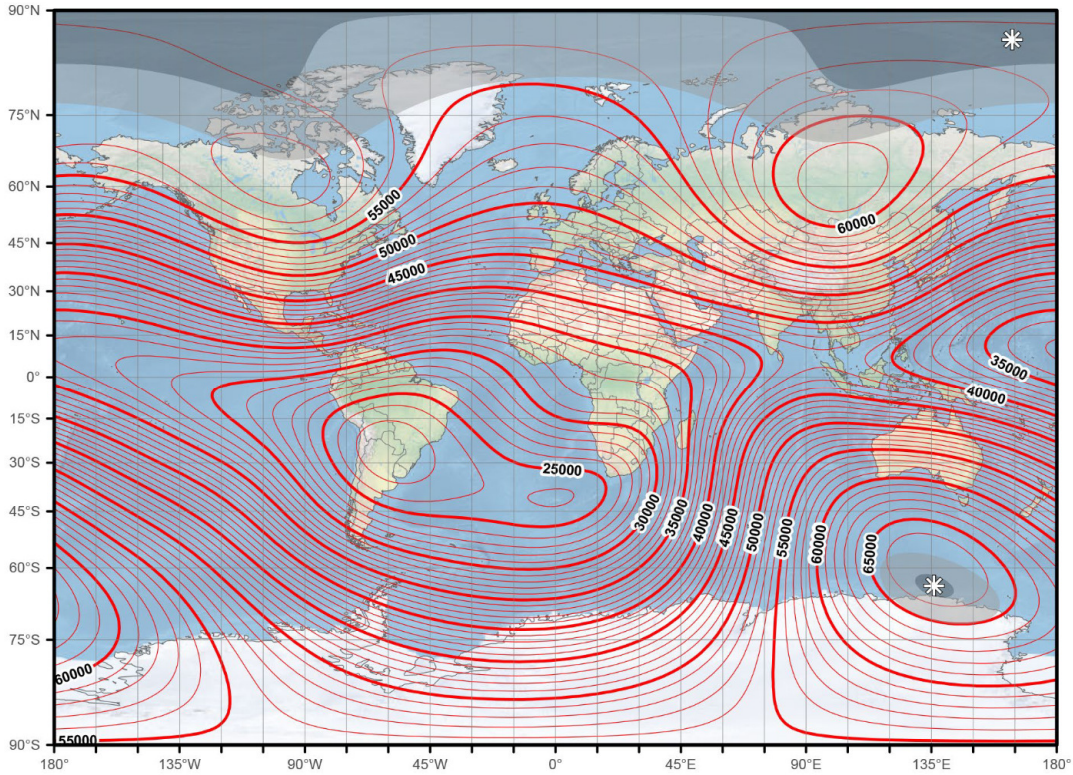
On spécifie ensuite la direction du champ avec 2 angles.

- 1- On donne premièrement l'angle entre le vrai nord et le vecteur  $H$ . Cet angle est appelé la *déclinaison*. Si une boussole pointe directement vers le nord, la déclinaison est nulle. Si une boussole pointe un peu à l'est du vrai nord (comme sur la figure), la déclinaison est positive et si la boussole pointe un peu à l'ouest du vrai nord, la déclinaison est négative.
- 2- On donne ensuite l'angle entre le champ magnétique et le vecteur  $H$ . Cet angle est appelé l'*inclinaison*. Si le champ pointe vers le bas par rapport à l'horizon (comme sur la figure), l'inclinaison est positive et si le champ pointe vers le haut par rapport à l'horizon, l'inclinaison est négative.

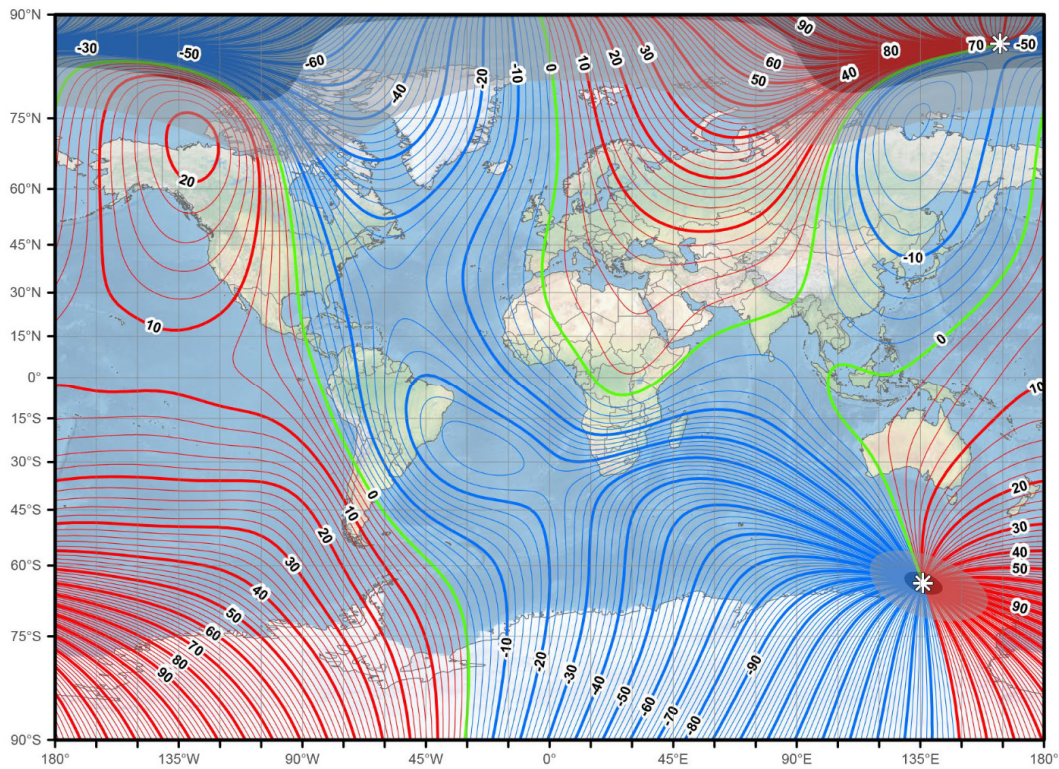


core.ac.uk/download/pdf/323304771.pdf

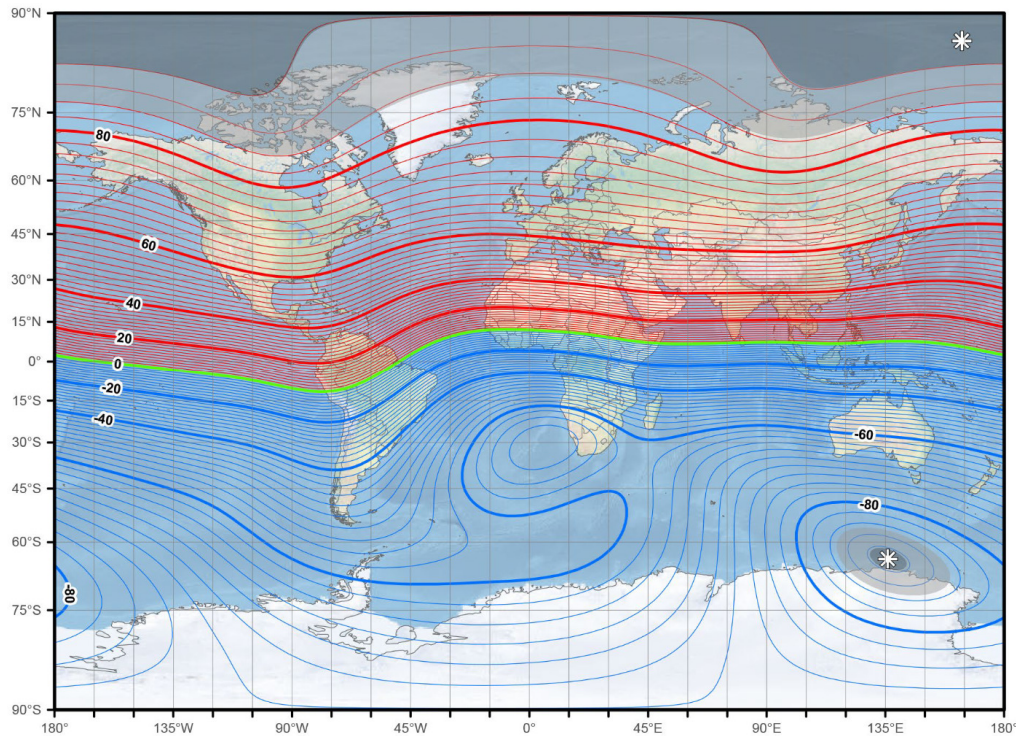
Le champ magnétique terrestre est périodiquement mesuré par divers moyens (satellites, stations au sol, vols d'avions faisant des relevés magnétiques). Les figures suivantes montrent, dans l'ordre, la grandeur (ou l'intensité), la déclinaison et l'inclinaison du champ magnétique tel que modélisé en 2020 (fourni par le National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) et trouvé ici : <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/soft.shtml>).



Grandeur du champ magnétique en nT. Intervalle des lignes de contour est de 1000 nT.



Déclinaison du champ magnétique en degrés. L'intervalle des lignes de contour est de 2 degrés, positive en rouge (est) et négative en bleu (ouest). La ligne verte est la ligne où la déclinaison est nulle (ligne agonique).

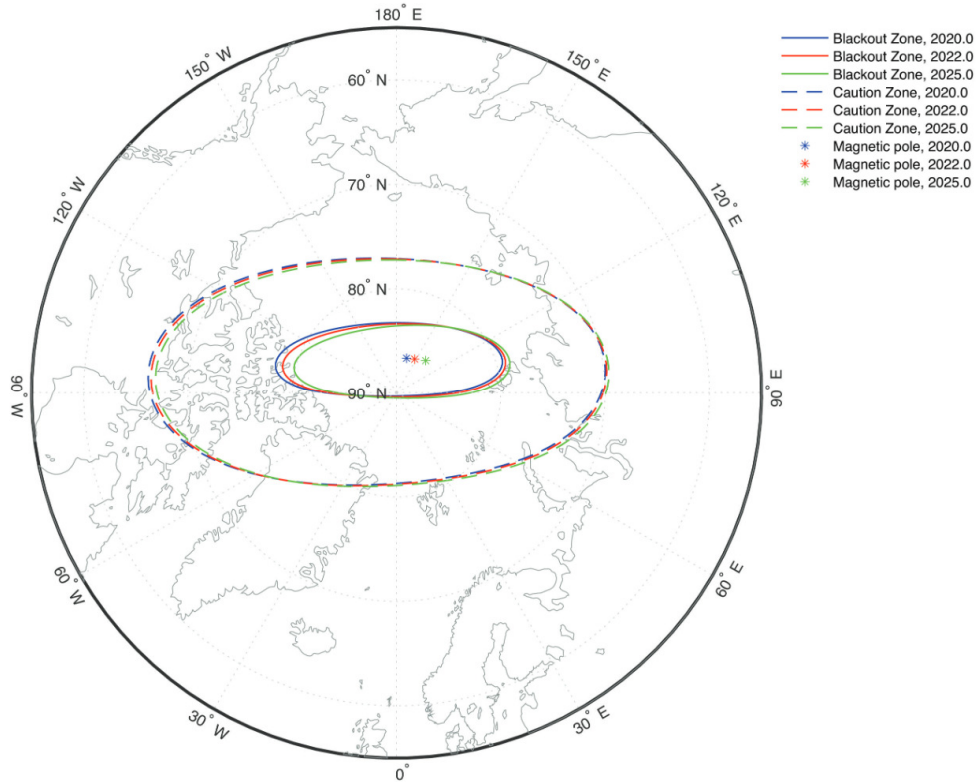


Inclinaison du champ magnétique en degrés. L'intervalle des lignes de contour est de 2 degrés, positive en rouge (vers le bas) et négative en bleu (vers le haut). Aucune inclinaison à la ligne verte.

À Québec, l'intensité du champ magnétique terrestre est de  $53,5 \mu\text{T}$  (ou  $53\,500 \text{ nT}$  ou  $0,535 \text{ G}$ ), la déclinaison de champ est de  $-15,12^\circ$  (les boussoles pointent à  $15,12^\circ$  à l'ouest du vrai nord) et l'inclinaison du champ est assez élevée à  $69,88^\circ$ .

Dans l'Arctique, l'inclinaison du champ magnétique est près de  $90^\circ$ , ce qui signifie que le champ pointe presque directement vers le bas. En Antarctique, l'inclinaison est près de  $-90^\circ$ , ce qui signifie que le champ pointe presque directement vers le haut. Le champ n'a pratiquement pas de composante horizontale et les boussoles, qui mesurent justement la direction de cette composante, n'arrivent pas à trouver sa direction. Les boussoles ne sont donc vraiment pas fiables près des pôles. C'est pour cette raison que la navigation se fait avec les caps vrais dans l'espace aérien intérieur du Nord.

La NGA (national geospatial-intelligence agency) publie en outre une carte montrant les zones où la boussole devient de moins en moins fiable à mesure qu'on se rapproche des pôles magnétiques. Voici le modèle pour le pôle Nord, incluant une projection allant jusqu'à 2025 :



## RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

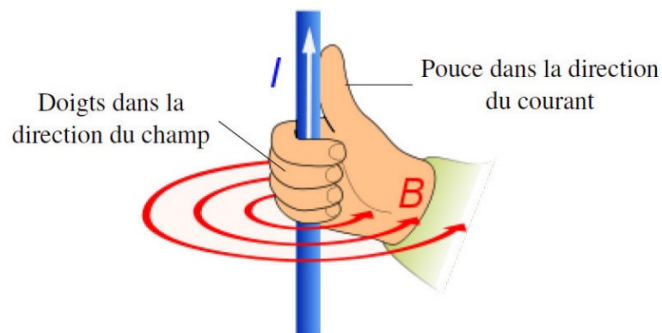
**Grandeur du champ magnétique fait par un fil rectiligne infini**

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

Constante magnétique  $\mu_0$  (perméabilité du vide)

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

**Direction du champ magnétique d'un fil rectiligne infini**



**Champ magnétique fait par une charge en mouvement**

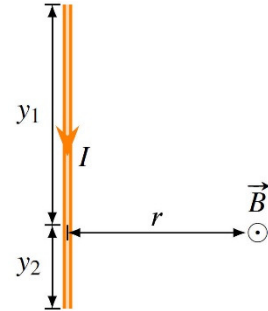
$$B = \frac{\mu_0}{4\pi r^2} qv \sin \theta$$

**Champ magnétique fait par un fil rectiligne**

Grandeur :

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

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



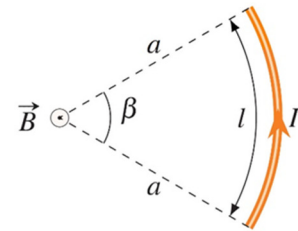
Direction : perpendiculaire à la ligne  $r$ .

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 :

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a^2} \ell \quad \text{ou} \quad B = \frac{\mu_0 I}{2a} \frac{\beta}{360^\circ}$$

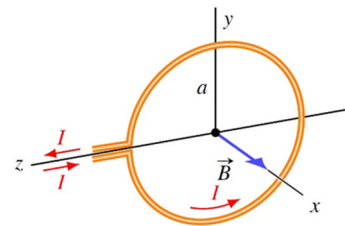


Direction : perpendiculaire à la ligne  $a$ .

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**

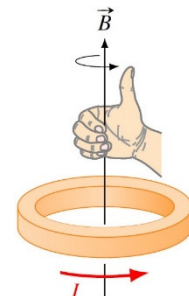
$$B = \frac{\mu_0 NI}{2a}$$



**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 4<sup>e</sup> règle de la main droite.)



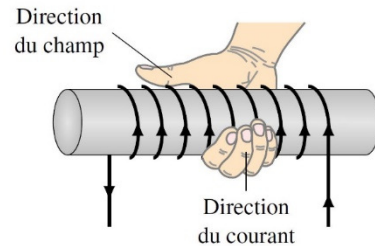
**Grandeur du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde.**

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

**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.



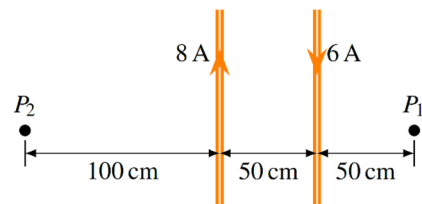
**Moment magnétique des atomes**

Le champ magnétique des aimants provient en grande partie du moment magnétique intrinsèque de l'électron.

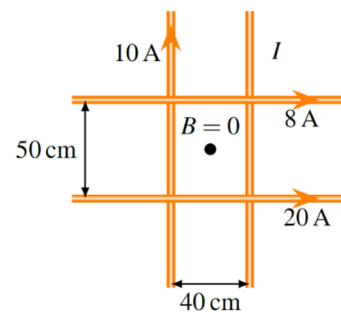
**EXERCICES**

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

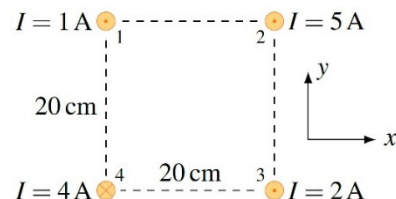
1. Dans la situation montrée sur la figure, trouvez le champ magnétique (grandeur et direction) aux points  $P_1$  et  $P_2$ .



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 ?



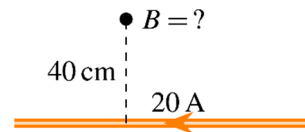
3. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au centre de ce carré délimité par 4 fils infinis ?



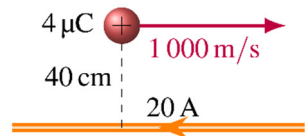
4. Thomas est situé à un endroit où le champ magnétique terrestre a une intensité de 0,5 G et est dirigé directement vers le nord. Thomas sort sa boussole pour s'orienter, sans remarquer qu'il est directement à 20 m en dessous d'une ligne à haute tension transportant un courant de 500 A vers le sud. 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.)

## 8.2 La force magnétique faite par des fils rectilignes infinis

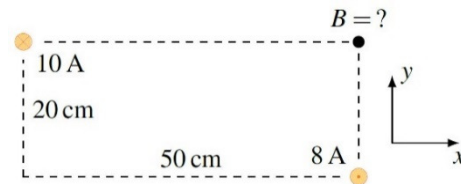
5. a) Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) à l'endroit montré à 40 cm de ce fil infini ?



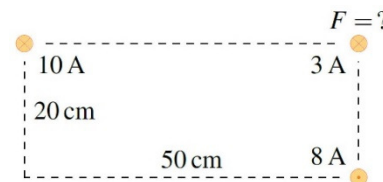
- b) Quelle est la force magnétique (grandeur et direction) sur la charge de 4 μC dans la situation suivante ?



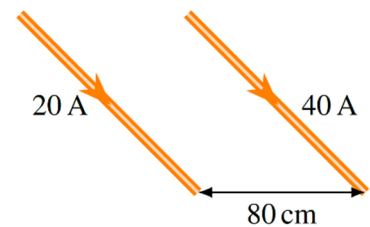
6. a) Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) fait par les deux fils infinis à l'endroit montré sur la figure ?



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



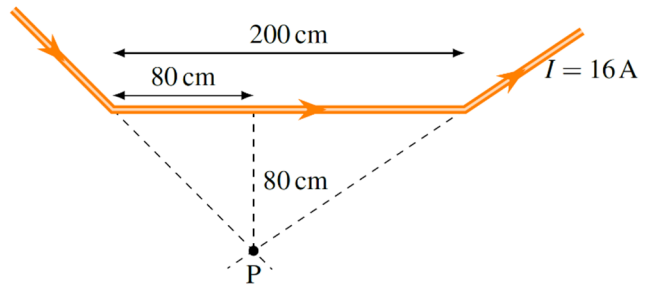
7. Quelle est la force entre ces deux fils ? Le fil parcouru par un courant de 20 A a une longueur infinie et le fil parcouru par un courant de 40 A a une longueur de 5 m. Spécifiez si la force est attractive ou répulsive.



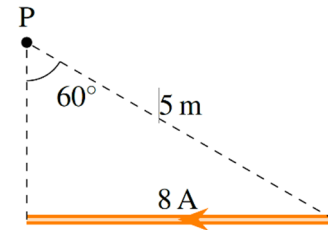


### 8.3 Le champ magnétique d'un fil parcouru par un courant

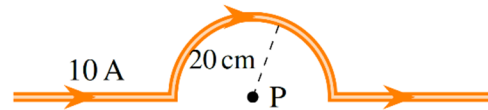
8. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au point P ?



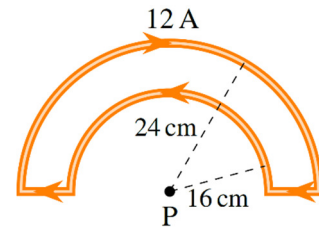
9. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au point P ?



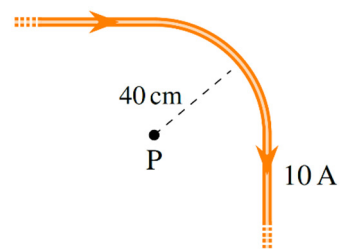
10. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au point P ?



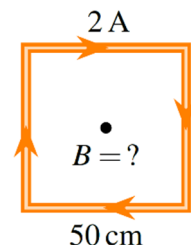
11. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au point P ?



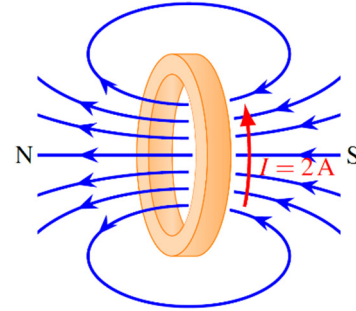
12. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au point P ? (Les deux fils rectilignes sont infinis.)



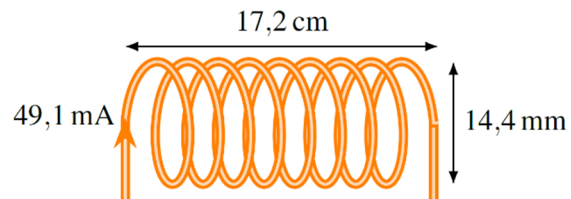
13. Quel est le champ magnétique (grandeur et direction) au centre du carré ?



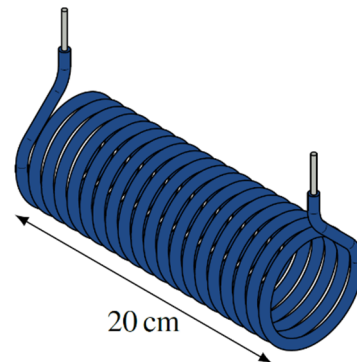
14. Cet anneau a un diamètre de 24 cm. Il est formé d'un fil qui fait plusieurs tours et qui est parcouru par un courant de 2 A. Combien doit-il y avoir de tours de fil pour que le champ magnétique au centre de l'anneau ait une grandeur de 0,002 T ?



15. 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 ?



16. 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.



## 8.5 Le champ magnétique de la Terre

17. Selon les cartes de cette section, déterminez, approximativement, la grandeur du champ magnétique, la déclinaison du champ et l'inclinaison du champ à Rome en Italie. Est-ce qu'une boussole pointe à l'est ou l'ouest du vrai nord à Rome ?

## RÉPONSES

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

1.  $0,8 \mu\text{T}$  en sortant de la page
2. 0,4 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.  $0,001 \text{ N}$ , attractive

## 8.3 Le champ magnétique d'un fil parcouru par un courant

8.  $3,078 \mu\text{T}$ , en entrant dans la feuille.
9.  $0,2771 \mu\text{T}$ , en entrant dans la feuille.
10.  $15,71 \mu\text{T}$ , en entrant dans la feuille.
11.  $7,85 \mu\text{T}$  qui sort de la page.
12.  $8,927 \mu\text{T}$  qui entre de la page.
13.  $4,525 \mu\text{T}$  qui entre de la page.
14. 191
15.  $245,4 \mu\text{T}$
16.  $636,6 \text{ A}$

## 8.5 Le champ magnétique de la Terre

17. Grandeur :  $46,5 \mu\text{T}$  Déclinaison :  $3^\circ$  Inclinaison :  $58^\circ$ . La boussole pointe un peu à l'est du vrai nord.