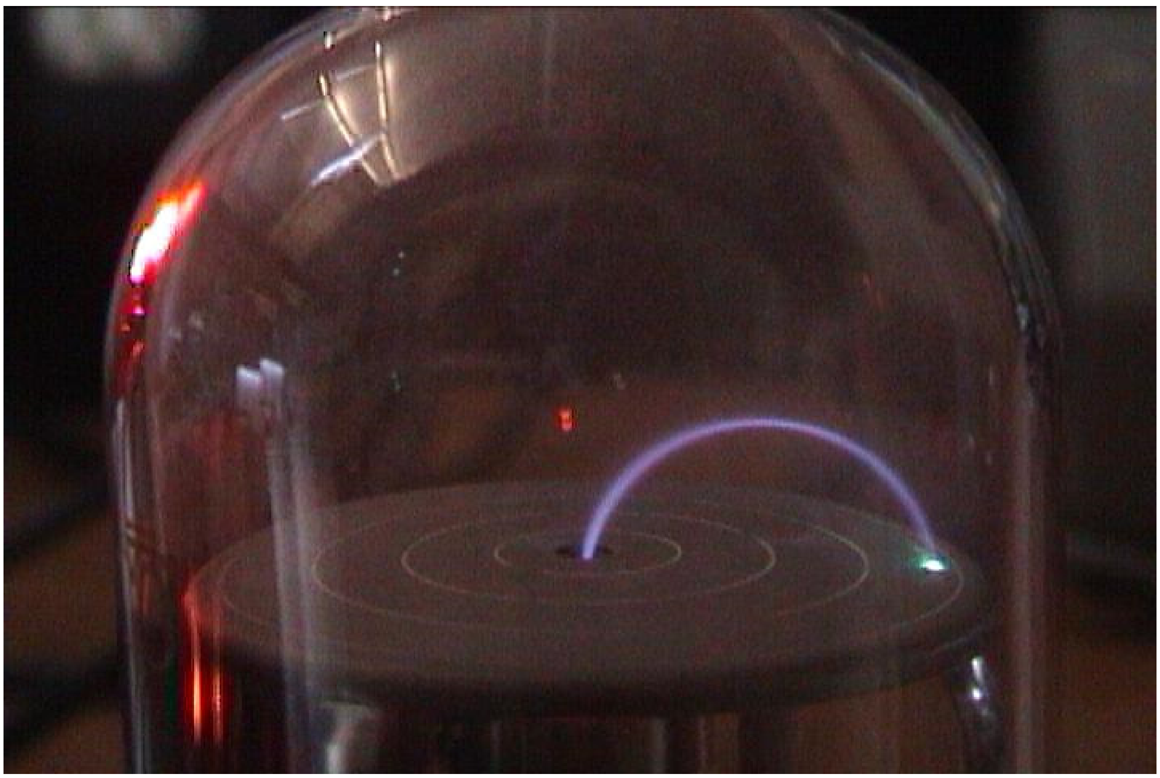
8 LA FORCE MAGNÉTIQUE

On envoie un atome de krypton ionisé 1 fois avec une vitesse de 40 000 m/s dans un spectromètre de masse où il y a un champ magnétique de 0,6 T. L'atome frappe la plaque à une distance de 11,044 cm du point d'entrée de l'atome. Quelle est la masse de l'atome ?



www.clemson.edu/ces/phoenix/labs/cupol/eoverm/

Découvrez comment résoudre ce problème dans ce chapitre.

8.1 LA DÉCOUVERTE DE LA FORCE MAGNÉTIQUE

On connaissait très peu de choses concernant le magnétisme avant 1820. Les Grecs savaient que certaines pierres attiraient de petits morceaux de fer et comme ces pierres venaient de Magnésie (aujourd'hui en Turquie), on parla de magnétisme. Ces pierres sont en fait des aimants naturels et les aimants naturels étaient la seule manifestation connue du magnétisme avant 1820. Voici les éléments qui ont été découverts avec ces aimants naturels avant cette date.

Pôles nord et sud

On a découvert, fort probablement au 9^e siècle en Chine, que les aimants s'alignent dans la direction nord-sud, ce qui a directement mené à l'invention de la boussole. On a alors donné le nom de *pôle* aux deux côtés de l'aimant. Le pôle nord est le côté de l'aimant qui pointe vers le nord et le pôle sud est évidemment le côté de l'aimant qui pointe vers le sud.

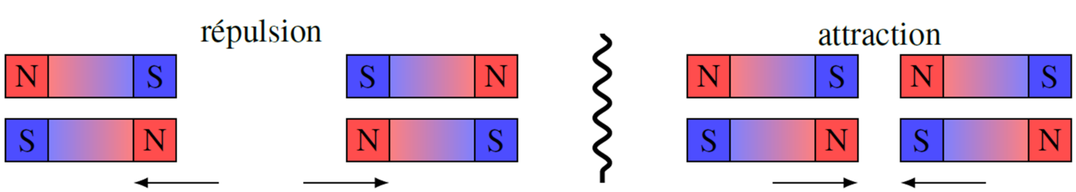
www.ehow.com/how_6317827_read-compass-rose.html

On s'est ensuite rendu compte assez rapidement que parfois les aimants s'attirent et parfois ils se repoussent. Avec quelques observations, on est rapidement arrivé à la conclusion suivante.

Forces entre les pôles

Il existe deux types de pôles sur un aimant : nord et sud

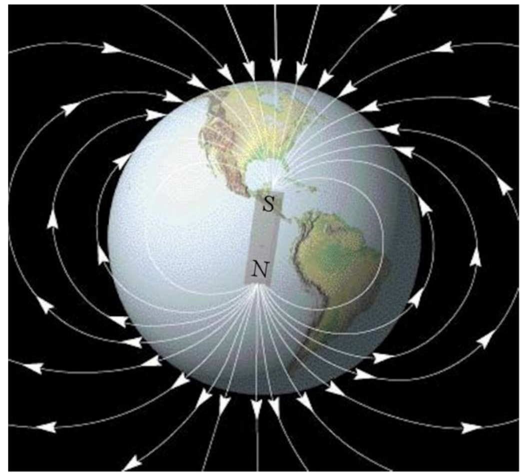
Les pôles de même type se repoussent mutuellement
Les pôles de types contraires s'attirent mutuellement



Il est fort probable que les Chinois connaissaient ces lois d'attraction et de répulsion, mais aucun texte ne les mentionne. Le plus vieux texte connu qui mentionne ces lois a été écrit par le Français Pierre de Maricourt en 1269. Beaucoup plus tard (par Mitchell en 1750, et de façon plus précise par Coulomb en 1785), on a mesuré la force entre de petits pôles presque ponctuels en utilisant des aimants très minces et on est arrivé à la conclusion que la force diminuait avec le carré de la distance.

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

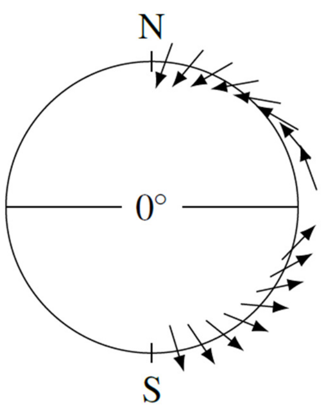
La Terre est un aimant



www.thisoldearth.net/Geology_Online-1_Subchapters.cfm?Chapter=3&Row=4

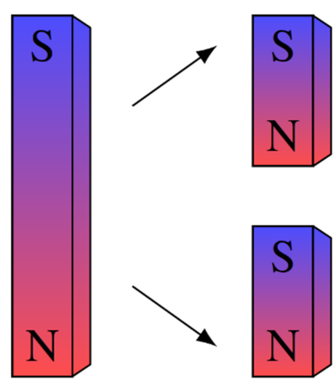
Les lois d’attraction des pôles ont permis à William Gilbert de déduire en 1600 que la Terre devait être un gigantesque aimant avec un pôle magnétique sud dans l’Arctique et un pôle magnétique nord en Antarctique (oui, oui, vous avez bien lu). On pouvait alors expliquer pourquoi l’aimant s’alignait dans la direction nord-sud. Le pôle nord de la boussole est attiré par le pôle magnétique sud dans l’Arctique et le pôle sud de l’aimant est attiré par le pôle magnétique nord en Antarctique.

Remarquez que l’aimant est au centre de la Terre et que les pôles sont assez loin de la surface de la Terre (c’est une erreur assez commune de voir des figures dans lesquelles l’aimant se rend jusqu’à la surface de la Terre). Il en est ainsi parce que le champ est généré au centre de la Terre, dans le noyau liquide. On reviendra sur ce point au chapitre suivant.



Gilbert a même fabriqué un aimant sphérique pour vérifier l’orientation d’un aimant tout autour de cette sphère. Il a alors pu constater que, en plus de s’orienter dans la direction nord-sud, la boussole pointe aussi vers le sol dans l’hémisphère nord et que plus on est près de l’Arctique, plus la boussole pointe vers le sol. Dans l’Arctique, la boussole pointe presque directement vers le sol alors qu’à l’équateur, la boussole est presque parallèle au sol. Cette déviation vers le sol s’appelle *l’inclinaison magnétique.* Ces résultats étaient en accord avec les observations faites à ce sujet depuis que Georg Hartmann avait découvert l’inclinaison magnétique en 1544.

Il n’y a pas de monopôles magnétiques



On a aussi découvert qu’on ne pouvait pas obtenir de monopôle magnétique, c’est-à-dire un aimant qui possède uniquement un pôle nord ou uniquement un pôle sud. Les deux pôles sont toujours présents sur un aimant, ce qui veut dire qu’on a toujours un dipôle magnétique.

Même si on coupe un aimant en deux, on n’aura pas de monopôles puisqu’on verra apparaitre de nouveaux pôles sur chaque morceau pour qu’on ait toujours un dipôle.

Même si on continuait à séparer ainsi l'aimant jusqu'à ce qu'on ait séparé toutes les molécules, on verrait que chaque molécule est un petit dipôle magnétique.

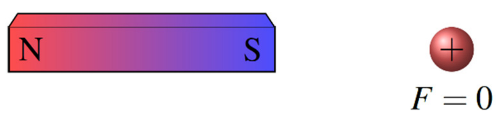
Malgré tous les efforts déployés (parce que certaines théories en physique des particules prédisent l'existence de monopôles magnétiques), on n'a jamais observé de monopôles magnétiques.

C'est John Mitchell qui montra en 1750 que les deux pôles de l'aimant avaient toujours exactement la même grandeur.

Un aimant n'a aucun effet sur les charges électriques au repos

Pendant longtemps, on voyait mal la distinction qu'il y avait entre la force électrique, qui n'était, selon les connaissances de l'époque, qu'une simple attraction de petits morceaux de papier par de l'ambre frotté, et la force magnétique, qui n'était qu'une simple attraction de petits morceaux de fer par un aimant naturel. Gerolamo Cardano fut probablement le premier à comprendre, en 1550, qu'on avait affaire à deux phénomènes complètement différents.

Ainsi, si une charge électrique immobile est à proximité d'un aimant, il ne se passe absolument rien.

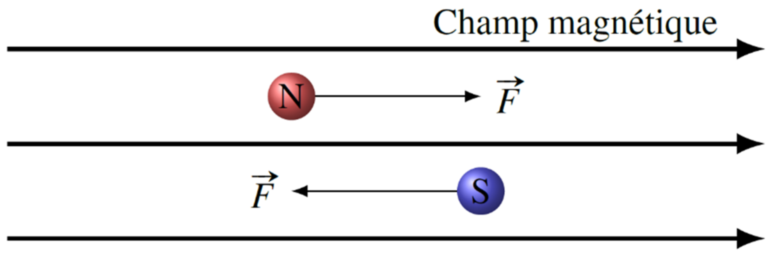


Encore aujourd'hui, les gens peuvent confondre l'électricité et le magnétisme. Impossible de faire une boussole en frottant une aiguille sur son linge. En frottant l'aiguille, on lui donne une charge électrique (et encore, il ne faut pas la tenir directement avec nos doigts, car on doit isoler les conducteurs si on veut les charger), ce qui n'a rien à voir avec une boussole. On peut voir cette erreur dans le film *The Edge* avec Anthony Hopkins (1997).
http://physique.merici.ca/electricite/EDGE2.wmv

Cela résume à peu près ce qu'on savait du magnétisme à la fin du 18^{e} siècle.

8.2 LE CHAMP MAGNÉTIQUE

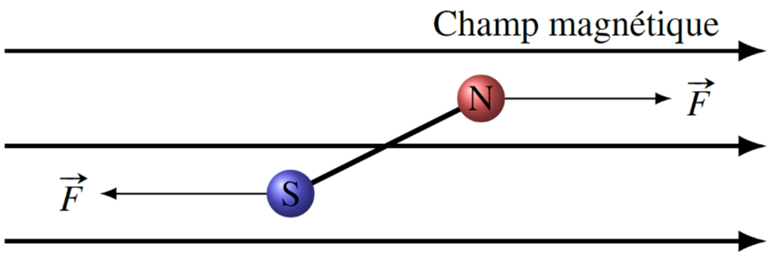
Comme en électricité, on va utiliser le concept de champ. On part de l'idée simple que si un pôle magnétique subit une force quand il est à un endroit, alors il y a un champ magnétique à cet endroit. On va noter ce champ *B*. (C'est une notation empruntée à Maxwell qui utilisait les lettres de *A* à *H* pour noter les composantes de certains vecteurs. Dans cette notation, les trois composantes du champ magnétique étaient représentées par les lettres *B, C, D*.) Les pôles nord subissent une force dans le sens du champ et les pôles sud subissent une force dans le sens contraire du champ.



Plus le champ est grand, plus la force sur les pôles est grande

$$\vec{F} \propto \vec{B}$$

Un dipôle dans un champ magnétique subit les forces suivantes.



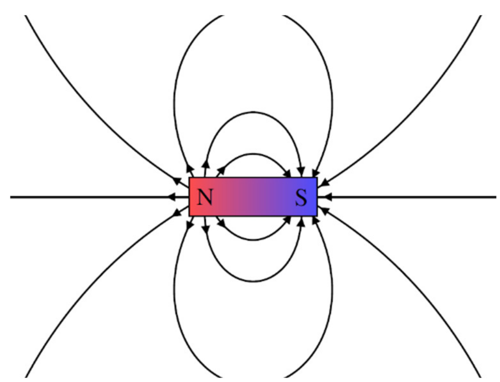
On voit que les forces sur le dipôle l'amènent à s'aligner avec les lignes de champ. Les boussoles, qui sont des dipôles, tournent donc pour s'orienter avec la direction du champ magnétique, exactement comme les dipôles électriques tournaient pour s'aligner avec la direction du champ électrique.

Vous voyez sur les figures qu'on va aussi utiliser les lignes de champ pour représenter le champ magnétique. Ces lignes de champ suivent encore une fois les règles suivantes.

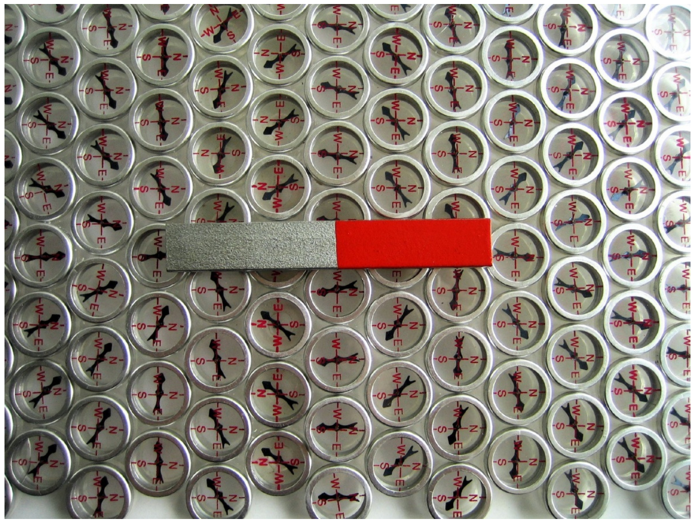
Propriétés des lignes de champ

1) Le champ est toujours tangent à la ligne de champ, dans la direction de la ligne.
2) Plus les lignes de champ s'approchent les unes des autres, plus le champ est grand.
3) Les lignes de champ ne peuvent pas apparaitre ou disparaitre dans le vide.
4) Le nombre de lignes de champ qui arrivent ou qui partent d'un pôle est proportionnel à la grandeur du pôle.
5) Les lignes de champ ne se croisent pas.

Par exemple, le champ d'un barreau aimanté ressemble à ceci.

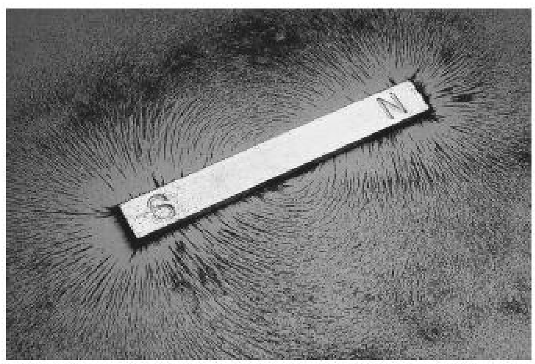


On peut voir sur l'image suivante que les boussoles s'orientent dans le sens du champ magnétique autour d'un aimant.



www.pinterest.com/mommylonglegs36/science-experiments/

On peut aussi mettre ce champ en évidence en mettant de la limaille de fer autour d'un aimant. Comme chaque petit morceau de fer est un dipôle, chacun s'aligne avec le champ, ce qui nous permet de visualiser le champ.

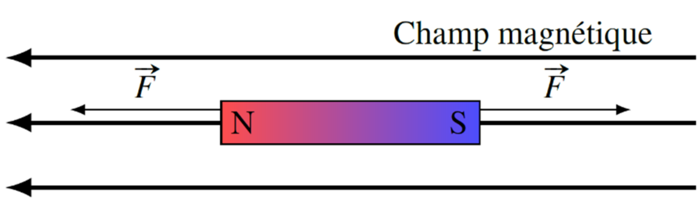


www.chemistryexplained.com/Kr-Ma/Magnetism.html

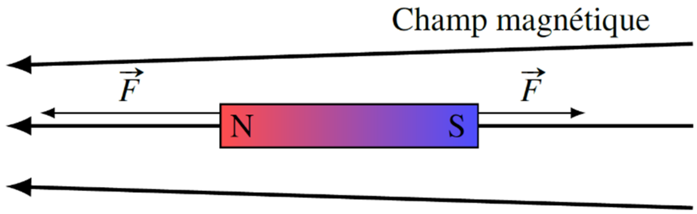
L'attraction entre les aimants

Pour comprendre pourquoi les aimants s'attirent, il faut comprendre comment se comporte un dipôle (parce que les aimants sont des dipôles) dans un champ magnétique.

Premièrement, un aimant dans un champ magnétique uniforme ne subit pas de force nette. En effet, les forces sur les pôles de l'aimant font tourner l'aimant pour qu'il s'aligne avec le champ, mais la force nette sur le dipôle reste toujours nulle puisque les pôles subissent des forces de même grandeur dans des directions opposées.



Pour qu'il y ait une force nette sur un aimant, on doit avoir un champ non uniforme.

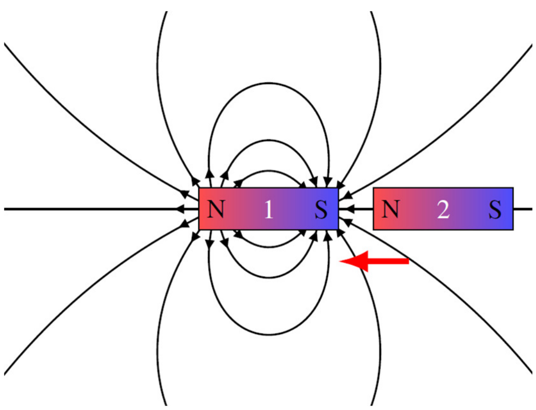


Dans le cas illustré sur la figure, la force sur le pôle nord est maintenant plus grande que celle sur le pôle sud, car le champ est plus grand du côté du pôle nord. Les forces ne s'annulent plus exactement et l'amant est attiré vers la gauche. On pourrait examiner plusieurs situations pour se rendre compte que, une fois que le dipôle est aligné avec le champ magnétique, il est toujours attiré vers l'endroit où le champ est le plus grand.

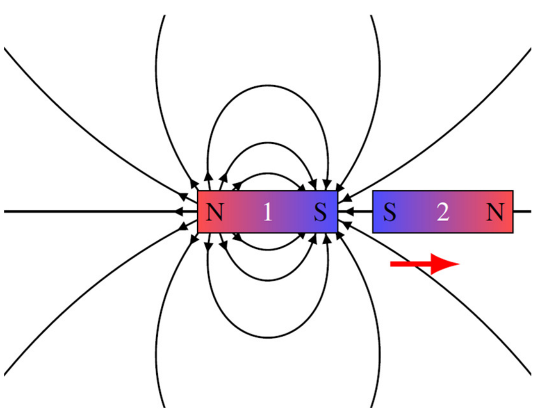
Force sur un dipôle dans un champ magnétique non uniforme

La force sur le dipôle aligné avec le champ est toujours vers l'endroit où le champ est le plus grand.

Il y a une force entre les aimants justement parce que les aimants ne font pas des champs magnétiques uniformes.

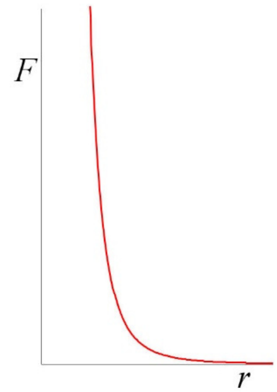


Prenons la situation dans laquelle on approche le pôle nord d'un aimant du pôle sud d'un autre aimant. Sur la figure, on voit le champ fait par l'aimant 1. L'aimant 2 est donc placé dans un champ magnétique non uniforme dirigé vers la gauche. Il y a une force vers la gauche sur le pôle nord de l'aimant 2 et une force vers la droite sur le pôle sud de l'aimant 2. Mais comme le champ est plus grand à l'endroit où est le pôle nord, la force sur le pôle nord (vers la gauche) est plus grande que la force sur le pôle sud (vers la droite). Il y a donc une force nette vers la gauche sur l'aimant 2 et l'aimant 2 est donc attiré par l'aimant 1.



Prenons maintenant la situation dans laquelle on approche le pôle sud d'un aimant du pôle sud d'un autre aimant. Sur la figure, on voit le champ fait par l'aimant 1. L'aimant 2 est donc placé dans un champ magnétique non uniforme dirigé vers la gauche. Il y a une force vers la gauche sur pôle nord de l'aimant 2 et une force vers la droite sur le pôle sud de l'aimant 2. Mais comme le champ est plus grand à l'endroit où est le pôle sud, la force sur le pôle sud (vers la droite) est plus grande que la force sur le pôle nord (vers la gauche). Il y a donc une force nette vers la droite sur l'aimant 2 et l'aimant 2 est donc repoussé par l'aimant 1.

Ce n'est pas la grandeur du champ de l'aimant 1 qui détermine la force nette, mais plutôt le rythme auquel varie ce champ. Plus le champ change rapidement d'un endroit à l'autre, plus les forces sur chaque pôle seront différentes. La force est donc proportionnelle à la dérivée du champ magnétique fait par l'aimant 1. On ne le démontrera pas ici, mais le champ d'un dipôle diminue avec le cube de la distance ($B \propto 1/r^3$). Ainsi, comme la force est proportionnelle à la dérivée du champ, la force entre des aimants est proportionnelle à $1/r^4$.



Le graphique de cette force ressemble à celui montré sur la figure de droite.

On remarque que la force change très rapidement à mesure qu'on approche les aimants. On passe assez rapidement d'une force presque nulle à une très grande force. Ceux qui ont déjà tenté d'approcher les pôles identiques de deux aimants ont surement remarqué cette force répulsive qui apparait soudainement à une certaine distance.

Il est difficile de mathématiser le champ à partir de la force sur les pôles

Reste maintenant à définir mathématiquement la grandeur du champ magnétique. On aurait très bien pu la définir à partir de la force que subissent les pôles dans un champ magnétique (avec quelque chose du genre F = (charge magnétique) $\cdot$ B), mais il y a deux problèmes avec cette approche.

1) Il est très difficile de définir la grandeur d'un pôle magnétique (la charge magnétique, c'est-à-dire la quantité de nord ou de sud, l'équivalent de la charge pour la force électrique) parce qu'il est impossible d'isoler un pôle.

2) C'est un peu inutile de calculer la force sur un seul pôle puisqu'on ne peut jamais avoir un monopôle.

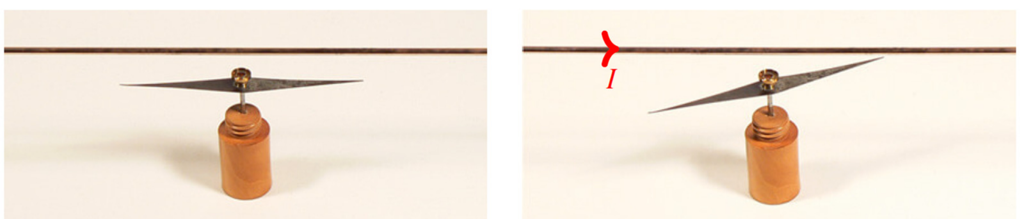
On va donc utiliser une autre approche pour définir le champ. Cette approche est basée sur un autre effet du champ magnétique, découvert par hasard en 1820 : le champ magnétique exerce une force sur les **charges électriques en mouvement**.

8.3 LA FORCE MAGNÉTIQUE SUR UNE CHARGE ÉLECTRIQUE EN MOUVEMENT

Les courants dévient les boussoles

Au 18e siècle, certains pensaient qu'il devait exister un lien entre l'électricité et le magnétisme. On tentait, depuis au moins 1770, de découvrir si un aimant peut exercer une force sur des charges électriques ou si des charges électriques peuvent dévier une boussole, mais sans succès. Les aimants ne faisaient aucune force sur les charges électriques et les charges électriques n'avaient aucun effet sur les aimants dans les situations explorées.

Il faut attendre 1820 pour que Hans Christian Ørsted découvre ce lien. Sachant que les éclairs faisaient dévier une boussole, il fait l'hypothèse que ce doit être le courant électrique qui fait dévier la boussole. Quand il vérifie expérimentalement cette idée le 21 avril 1820, les résultats confirment l'hypothèse sans l'ombre d'un doute : quand un courant passe au-dessus d'une boussole comme sur la figure, elle change de direction.



le.compendium.pagesperso-orange.fr/boussole_des_tangentes.htm

Voici une version très simple de cette expérience.
http://www.youtube.com/watch?NR=1&v=NwEBJBlneNE
Cela signifie donc que les courants peuvent exercer une force sur les pôles de l'aimant pour la faire dévier, et donc que le courant électrique dans le fil fait un champ magnétique. Il y a donc bel et bien un lien entre l'électricité et le magnétisme.

La force magnétique sur un courant

Selon la troisième loi de Newton, si les courants exercent une force sur les pôles magnétiques, alors les pôles doivent aussi exercer une force sur les courants. En voici une magnifique démonstration.
http://www.youtube.com/watch?v=tUCtCYty-ns

La force magnétique sur une charge en mouvement

Comme les courants sont en fait des charges en mouvement, cela signifie que les aimants peuvent exercer une force sur une charge en mouvement, donc que les charges électriques en mouvement dans un champ magnétique subissent une force. On peut faire une démonstration de cette force avec une télévision à écran cathodique (télévision à tube).

Dans ce type de télévision, l'image est créée en projetant des électrons sur un écran de verre recouvert d'une substance fluorescente (à l'intérieur du tube). Quand les électrons frappent cette substance, il y a émission de lumière et cela permet de faire l'image. Toutefois, quand on approche un aimant, l'image se déforme.
http://www.youtube.com/watch?v=owI6Ya73ykI
Elle est déformée parce que l'aimant exerce une force sur les électrons pendant qu'ils se dirigent vers l'écran, ce qui les dévie de leur trajectoire. Ils frappent donc l'écran à la mauvaise place et l'image est déformée.

Des expériences ont montré que cette force est…

1) proportionnelle à la charge q.
2) proportionnelle à la vitesse de la charge v.
3) proportionnelle au champ magnétique B.
4) proportionnelle au sinus de l'angle θ entre la vitesse de la charge et la direction du champ magnétique.

En combinant ces résultats, on obtient

Grandeur de la force magnétique sur une charge en mouvement

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

En fait, cette équation nous sert également de définition du champ magnétique. On peut trouver la grandeur du champ magnétique en mesurant la force sur une charge en mouvement dans ce champ. Si on sait les valeurs de la charge, de la vitesse, de la force et de l'angle entre la vitesse et le champ, cette équation nous permet de calculer la grandeur du champ.

L'unité de champ doit donc être des Ns/mC (pour qu'on obtienne une réponse en newton dans ce calcul). On a donné le nom de tesla à cette unité.

Unité du champ magnétique : le tesla (T)

$$1T = 1\tfrac{Ns}{Cm} = 1\tfrac{kg}{Cs}$$

On utilise aussi le gauss pour mesurer le champ.

Autre unité du champ magnétique : le gauss (G)

$$10\,000G = 1T$$

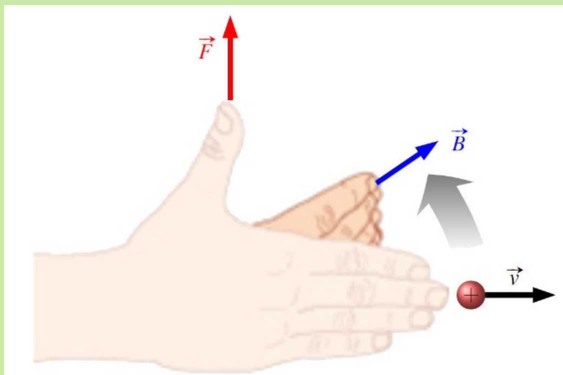
Pour vous donner une idée, le champ magnétique à la surface de la Terre est d'environ 50 µT (0,5 G) et le champ à la surface d'un aimant de frigo est d'environ 5 mT. Un champ magnétique de 1 T est un très grand champ magnétique. On retrouve de tels champs à la surface d'un aimant au néodyme (qui sont très difficiles à séparer à mains nues) ou dans un appareil à résonance magnétique utilisé en médecine.

La direction de la force est un peu surprenante. Pour la trouver, on utilise une règle de la main droite.

Direction de la force magnétique sur une charge en mouvement

Charge positive

1) On met nos doigts de la main droite dans le sens de la vitesse de la particule.
2) On plie nos doigts vers le champ (cela peut demander de tourner la main pour qu'on puisse plier nos doigts dans cette direction).
3) Le pouce pointe alors dans la direction de la force.



Charge négative

On fait la même chose, mais on inverse la direction à la fin.

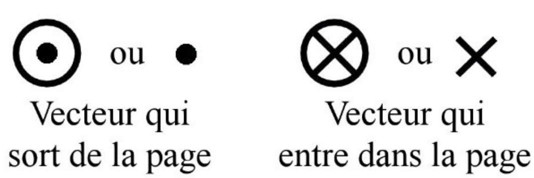
Ce petit vidéo vous montre comment appliquer cette règle pour une charge positive.
http://www.youtube.com/watch?v=JZAnghOVnh0

Certains d'entre vous ont peut-être reconnu les règles pour trouver la grandeur et la direction d'un produit vectoriel. On peut donc écrire la formule de la force magnétique sous la forme suivante.

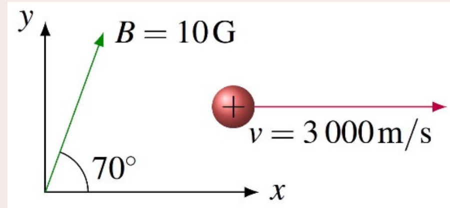
Force magnétique sur une charge en mouvement

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Avec de tels produits vectoriels, nous aurons souvent des vecteurs dans les trois dimensions de l'espace. Il arrivera donc qu'il y ait des vecteurs qui sortent de la page ou qui entrent dans la page et il peut être utile de rappeler la notation pour ces vecteurs.



Exemple 8.3.1

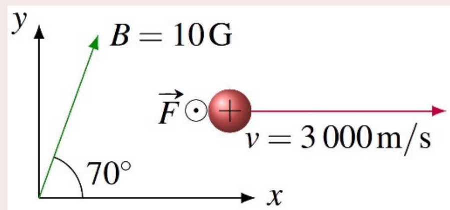


Un proton se déplace vers la droite à 3000 m/s dans un champ de 10 G orienté dans la direction indiquée sur la figure. Quelle est la force sur ce proton ?

La force sur le proton est

$$\begin{aligned} F &= |q| vB \sin\theta \\ &= 1,602\times 10^{-19} C \cdot 3000 \tfrac{m}{s} \cdot 0,001 T \cdot \sin 70° \\ &= 4,516\times 10^{-19} N \end{aligned}$$

Elle est en sortant de la feuille selon la règle de la main droite.



On pourrait aussi le calculer avec le produit vectoriel suivant.

$$\begin{aligned} \vec{F} &= q\vec{v}\times\vec{B} \\ &= q\cdot\begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ v_x & v_y & v_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} \end{aligned}$$

Comme les composantes du champ magnétique sont

$$\begin{aligned} B_x &= B\cos\theta = 10G\cos 70° = 3,420G \\ B_y &= B\cos\theta = 10G\sin 70° = 9,397G \end{aligned}$$

On obtient

$$\begin{aligned} \vec{F} &= 1,602\times 10^{-19} C \cdot \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 3000\tfrac{m}{s} & 0 & 0 \\ 0,0003420T & 0,0009397T & 0 \end{vmatrix} \\ &= 1,602\times 10^{-19} C \cdot 3000 \tfrac{m}{s} \cdot 0,0009397 T\vec{k} \\ &= 4,516\times 10^{-19} N\vec{k} \end{aligned}$$

(Que de bons souvenirs d'algèbre vectorielle…)

Ce résultat indique encore une fois que la force est en sortant de la page.

Notez que si la particule se dirige dans la direction du champ ou dans la direction opposée au champ, la force est nulle puisque l'angle sera alors de 0° ou de 180°. Il est donc possible qu'une charge en mouvement dans un champ ne subisse pas de force.

Exemple 8.3.2

Une charge de 1 μC se déplace dans une région où le champ magnétique est uniforme. Elle ne subit pas de force quand elle se dirige avec une vitesse de 5 m/s dans la direction de l'axe des x positifs. Elle subit cependant une force de 10^{-7} N dans la direction de l'axe des z positifs quand elle a une vitesse de $\vec{v} = \left(3\vec{i} + 4\vec{j}\right)\frac{m}{s}$. Quel est le champ magnétique ?

Puisque la force est nulle quand la charge se déplace dans la direction de l'axe des x, cela signifie que le champ magnétique est dans la direction de l'axe des x, car il faut que l'angle soit de 0° (champ vers les x positifs) ou de 180° (champ vers les x négatifs) pour que le sinus soit nul. On sait donc que les composantes B_y et B_z sont nulles.

On utilise ensuite la valeur de la force quand la vitesse est $\vec{v} = \left(3\vec{i} + 4\vec{j}\right)\frac{m}{s}$ pour trouver la grandeur de B_x. On a alors

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = q \cdot \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ v_x & v_y & v_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}$$

$$10^{-7}N\vec{k} = 10^{-6}C \cdot \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 3\frac{m}{s} & 4\frac{m}{s} & 0 \\ B_x & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Si on développe le déterminant, on a

$$10^{-7}N\vec{k} = 10^{-6}C \cdot \left(0\vec{i} + 0\vec{j} + \left(0 - 4\tfrac{m}{s} \cdot B_x\right)\vec{k}\right)$$

Ce genre d'équation nous donne en fait trois équations, car les composantes en x doivent être égales de chaque côté de l'équation, tout comme les composantes en y et z. On a donc

Composante en x $\quad 0 = 0$

Composante en y $\quad 0 = 0$

Composante en z $\quad 10^{-7}N = 10^{-6}C \cdot \left(-4\frac{m}{s} \cdot B_x\right)$

Cette dernière équation nous permet de trouver que B_x = -0,025 T. Le champ est donc

$$\vec{B} = -0,025\vec{i}T$$

Deux petites notes pour terminer cette section.

1) La force magnétique sur une charge en mouvement est toujours perpendiculaire à la vitesse, donc au déplacement de la charge. Cela veut dire que le travail fait par la force magnétique

$$W = F\Delta x \cos\theta$$

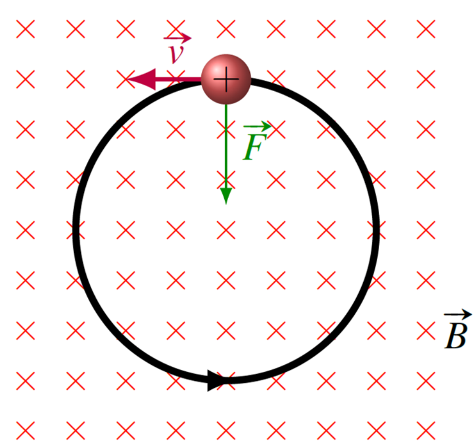
sur une charge en mouvement est toujours nul, car l'angle est toujours de 90°. Cela veut dire que l'énergie cinétique reste toujours constante, et donc que la grandeur de la vitesse reste la même. La force magnétique ne change donc pas la grandeur de la vitesse d'une charge en mouvement, elle ne fait que dévier cette charge.

2) Il semble y avoir quelque chose d'étrange avec cette force. La direction de la force est étrange et c'est aussi étrange que la force dépende de la vitesse parce que la vitesse d'une particule dépend du référentiel de l'observateur. On tentera d'expliquer pourquoi on obtient de tels résultats au chapitre suivant.

8.4 LE MOUVEMENT D'UNE CHARGE DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE

Le mouvement d'une charge si la vitesse est perpendiculaire à champ magnétique uniforme

La force sur la particule chargée est toujours perpendiculaire à la vitesse. Cette force fait donc dévier la particule sans changer la grandeur de la vitesse. Dans un champ uniforme, la force a toujours la même grandeur et elle dévie donc toujours au même rythme, ce qui signifie que le rayon de courbure de la trajectoire est toujours le même. Quand la vitesse est perpendiculaire au champ, on obtient une trajectoire circulaire.



La force magnétique joue alors le rôle de la force centripète. On a donc

$$|q|vB = \frac{mv^2}{r}$$

Ce qui permet de trouver le rayon de la trajectoire.

Rayon de la trajectoire d'une charge dans un champ magnétique uniforme avec une vitesse perpendiculaire au champ magnétique (rayon de Larmor)

$$r = \frac{mv}{|q|B}$$

On peut aussi trouver la période, c'est-à-dire le temps qu'il faut pour que la particule fasse un tour complet, en calculant $T = 2\pi r/v$. On obtient alors

Période du mouvement d'une charge dans un champ magnétique uniforme avec une vitesse perpendiculaire au champ magnétique

$$T = \frac{2\pi m}{|q|B}$$

Étonnamment, cette période ne dépend pas de la vitesse ni du rayon de la trajectoire. Ainsi, tous les électrons dans un champ magnétique prendront le même temps pour faire leur mouvement circulaire, peu importe leur vitesse.

La fréquence du mouvement circulaire est $f = 1/T$. On obtient donc

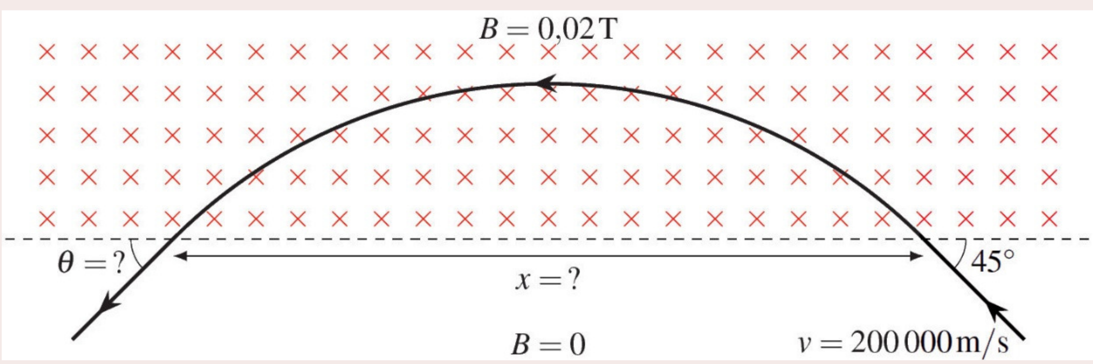
Fréquence du mouvement d'une charge dans un champ magnétique uniforme avec une vitesse perpendiculaire au champ magnétique (fréquence cyclotron)

$$f = \frac{|q|B}{2\pi m}$$

(Cette fréquence porte le nom de *fréquence cyclotron* parce qu'avec un appareil servant à accélérer des particules à l'aide de champs magnétique et électrique appelé cyclotron, on doit inverser la direction du champ électrique avec cette fréquence.)

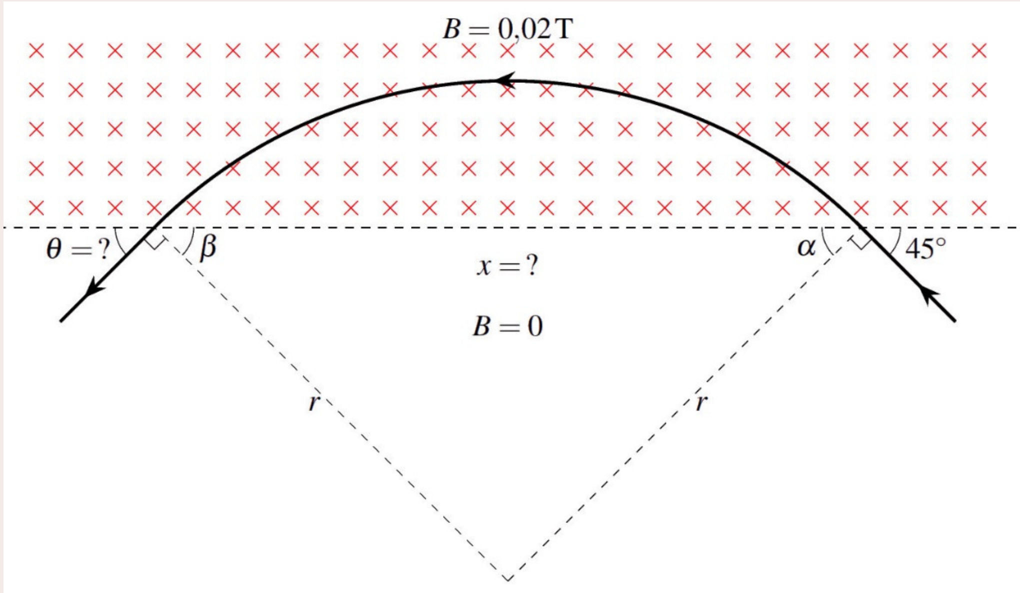
Exemple 8.4.1

Un proton arrive dans une région où il y a un champ magnétique de 0,02 T. L'angle d'entrée du proton dans le champ magnétique est de 45°. Le proton fait alors une partie de mouvement circulaire pour ensuite sortir du champ, tel qu'illustré sur la figure.



a) Quel est l'angle de sortie du proton ?

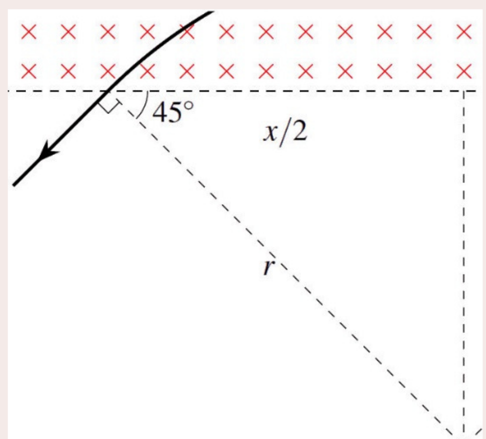
Comme on a une trajectoire circulaire, on va tracer des lignes qui représentent le rayon à l'entrée et à la sortie du champ.



On a alors formé un triangle isocèle puisque deux côtés du triangle ont la même longueur *r*. Cela veut dire que les angles α et β sont égaux. De plus, on peut déduire assez rapidement que $\alpha = 45°$ (car on doit avoir $45° + 90° + \alpha = 180°$) et donc que $\beta = 45°$. Ainsi, on déduit que $\theta = 45°$ (car on doit avoir $\theta + 90° + \beta = 180°$).

b) Quelle est la distance entre le point d'entrée dans le champ et le point de sortie du champ (*x* sur la figure) ?

On peut faire le triangle représenté sur la figure de droite. On a alors



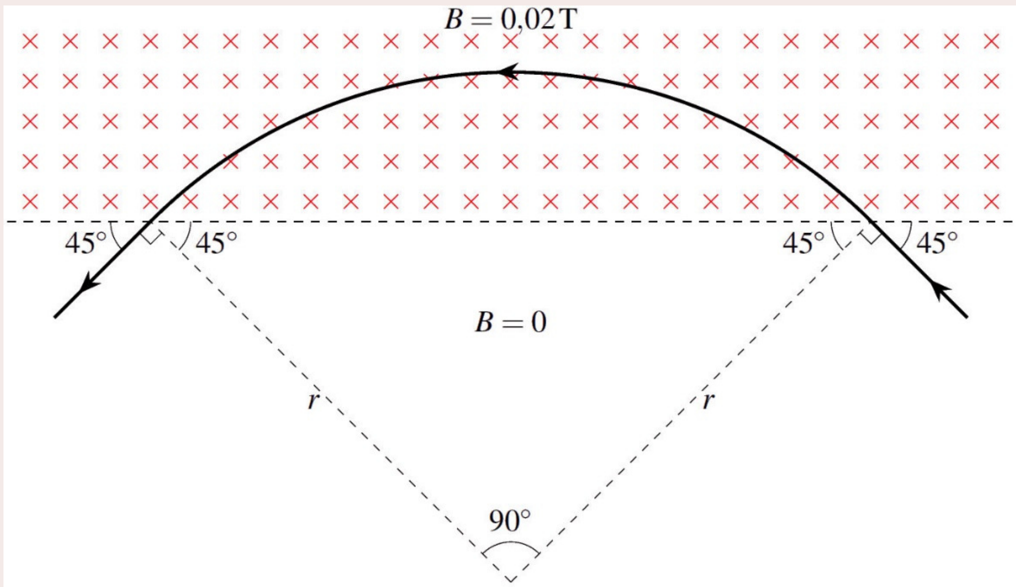
$$\frac{x/2}{r} = \cos 45°$$
$$x = 2r\cos 45°$$
$$x = 2r\frac{\sqrt{2}}{2}$$
$$x = \sqrt{2}r$$

En utilisant la formule du rayon de la trajectoire, on a

$$\begin{aligned} x &= \sqrt{2}\frac{mv}{qB} \\ &= \sqrt{2}\cdot\frac{1{,}67\times 10^{-27}\,kg\cdot 200\,000\,\frac{m}{s}}{1{,}602\times 10^{-19}\,C\cdot 0{,}02T} \\ &= 0{,}148m \end{aligned}$$

c) Combien de temps la particule est-elle restée dans le champ magnétique ?

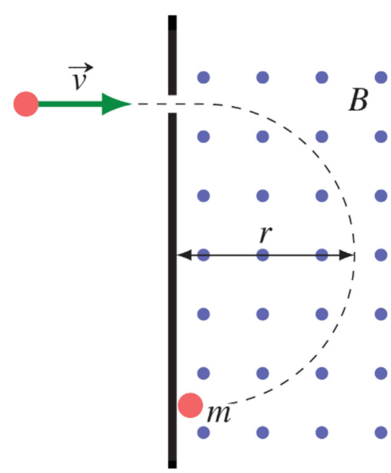
Si les angles α et β sont de 45°, cela veut dire qu'il y a 90° entre les deux rayons de la trajectoire à l'entrée et à la sortie du champ magnétique (parce que la somme des angles d'un triangle est de 180°).



La trajectoire circulaire correspond donc à un quart de la trajectoire circulaire et le temps est donc égal au quart de la période.

$$\begin{aligned} t &= \frac{1}{4}T \\ &= \frac{1}{4}\frac{2\pi m}{qB} \\ &= \frac{1}{4}\cdot\frac{2\pi \cdot 1,67\times 10^{-27}\,kg}{1,602\times 10^{-19}\,C\cdot 0,02T} \\ &= 8,2\times 10^{-7}\,s \end{aligned}$$

Le spectromètre de masse



Comme le rayon de la trajectoire d'une particule dépend de la masse de la particule chargée, on peut s'en servir pour mesurer la masse des particules chargées. Dans cet appareil, les particules passent par un petit trou dans une plaque pour entrer dans une région où il y a un champ magnétique. Étant déviées par la force magnétique, elles font alors un demi-cercle et reviennent frapper la plaque. La distance entre le point d'entrée et le point de collision est le diamètre de la trajectoire.

En divisant par 2, on obtient le rayon de la trajectoire. Comme le rayon de la trajectoire est

$$r = \frac{mv}{|q|B}$$

on trouve que la masse de la particule est

$$m = \frac{|q|rB}{v}$$

C'est de cette façon que l'on confirma l'existence de l'électron en 1897. On doit s'assurer que la vitesse d'entrée des particules dans le spectromètre est toujours la même pour que le rayon de la trajectoire ne dépende que de la masse. On verra un peu plus loin comment on peut y arriver.

Exemple 8.4.2

On envoie un atome de krypton ionisé 1 fois avec une vitesse de 40 000 m/s dans un spectromètre de masse où il y a un champ magnétique de 0,6 T. L'atome frappe la plaque à une distance de 11,044 cm du point d'entrée de l'atome. Quelle est la masse de l'atome ?

La distance entre le point d'entrée de l'atome et l'endroit où il frappe la plaque est le diamètre de la trajectoire circulaire. Le rayon de la trajectoire est donc de 5,522 cm. La masse de l'atome est donc

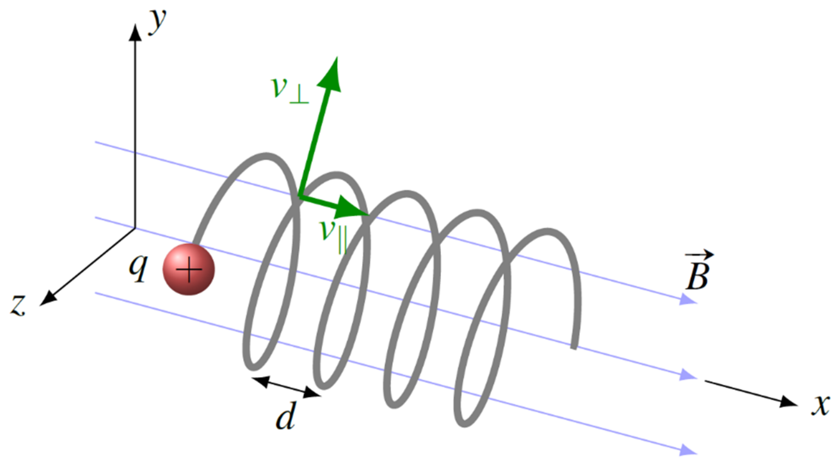
$$\begin{aligned} m &= \frac{|q|rB}{v} \\ &= \frac{\left|1,602\times10^{-19}C\right|\cdot 0,05522m\cdot 0,6T}{40\,000\,\frac{m}{s}} \\ &= 1,327\times10^{-25}kg \\ &= 79,92u \end{aligned}$$

(On pourrait alors conclure qu'il s'agit du krypton 80, un des isotopes de krypton.)

Avec un spectromètre, on peut mesurer la proportion de chaque élément dans un échantillon. Cela permet, entre autres, de faire de la datation au carbone 14.

Le mouvement d'une charge si la vitesse n'est pas perpendiculaire à un champ magnétique uniforme

Quand la vitesse n'est pas perpendiculaire au champ, on la sépare en deux composantes : la composante parallèle au champ ($v_{//}$) et la composante perpendiculaire au champ ($v_\perp$). La composante parallèle n'est pas affectée par le champ magnétique parce que l'angle qu'elle fait avec le champ est nul, alors que la composante perpendiculaire change constamment de direction pour former une trajectoire circulaire, exactement comme dans la section précédente. La particule fait alors un mouvement circulaire tout en se déplaçant à la vitesse constante $v_{//}$ le long des lignes de champ. On obtient donc un mouvement tel qu'illustré sur cette figure.



Vous pouvez voir une animation de ce mouvement.
http://www.youtube.com/watch?v=a2_wUDBl-g8

Il s'agit d'un mouvement hélicoïdal. Le rayon du mouvement se trouve avec la vitesse perpendiculaire.

Rayon de la trajectoire hélicoïdale d'une charge dans un champ magnétique uniforme

$$r = \frac{mv_\perp}{|q|B}$$

Le pas de ce mouvement (distance *d* entre les boucles du mouvement sur la figure) est la distance parallèle au champ fait par la particule pendant une période du mouvement. Cette distance est

$$d = v_{//}T$$

Cela nous donne

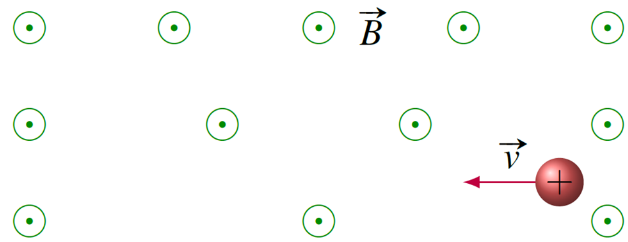
Pas de la trajectoire hélicoïdale d'une charge dans un champ magnétique uniforme

$$d = v_{//}\frac{2\pi m}{|q|B}$$

Les charges sont donc forcées de suivre les lignes de champ tout en tournant autour de ces dernières.

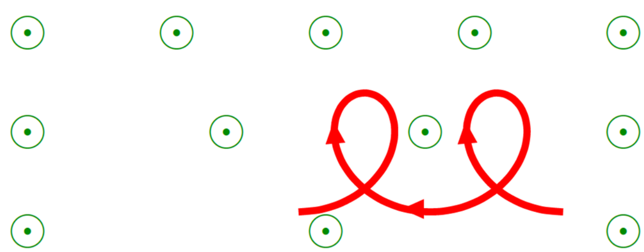
Mouvement si la vitesse est perpendiculaire à un champ magnétique non uniforme (avec le champ qui change dans une direction perpendiculaire au champ)

Tout cela veut dire qu'on a la configuration suivante.

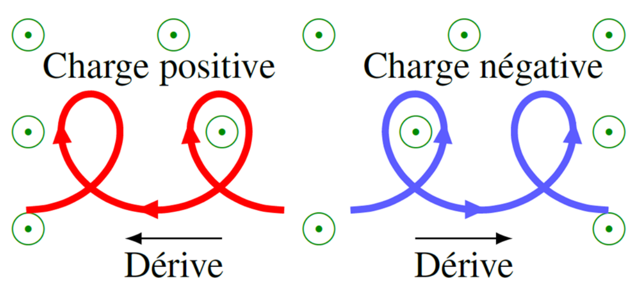


On voit que le champ est plus fort dans le haut de la page que dans le bas de la page (les lignes de champ sont plus denses). Le changement (de bas en haut de la page) est donc dans une direction perpendiculaire à la direction du champ (en sortant de la page).

Pour trouver le mouvement, prenons la charge montrée sur la figure. Dans ce cas, la force magnétique va dévier la particule vers le haut de la page, ce qui la dirige vers l'endroit où le champ est plus fort. Comme le champ est de plus en plus fort, la force va alors augmenter, ce qui fera dévier la particule plus rapidement et, par le fait même, diminuer le rayon de courbure de la trajectoire. Le rayon va ainsi diminuer jusqu'à ce que la particule ait tellement dévié qu'elle revient vers le bas de la page. Comme elle se dirige alors vers une région où le champ est de moins en moins fort, le rayon de courbure de la trajectoire va augmenter. On aura donc la trajectoire suivante.

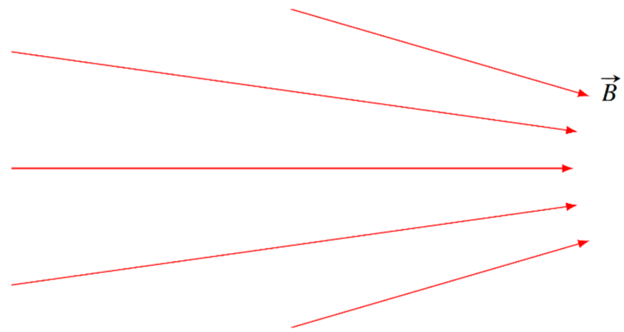


On remarque que la particule se déplace lentement vers la gauche tout en faisant un mouvement approximativement circulaire. On dit que la particule dérive lentement vers la gauche. Une particule négative déviera plutôt vers la droite dans cette situation.

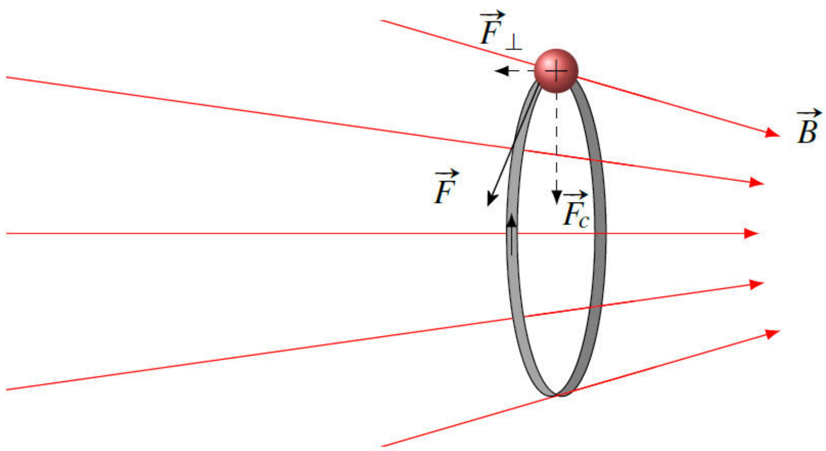


Le mouvement d'une charge si la vitesse est perpendiculaire à un champ magnétique non uniforme (avec le champ qui change dans une direction parallèle au champ)

Tout cela veut dire qu'on a la configuration montrée à droite. On voit que le champ est plus grand à droite qu'à gauche de la page (les lignes de champ sont plus denses). Le changement (de gauche à droite de la page) est donc dans une direction parallèle à la direction du champ (aussi de gauche à droite).

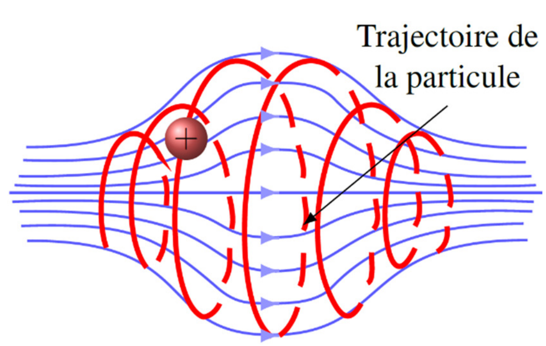


Dans un tel champ, la particule va faire des cercles autour des lignes de champ. Examinons la force sur la particule pendant qu'elle fait ce mouvement. La bande grise représente la trajectoire de la particule.



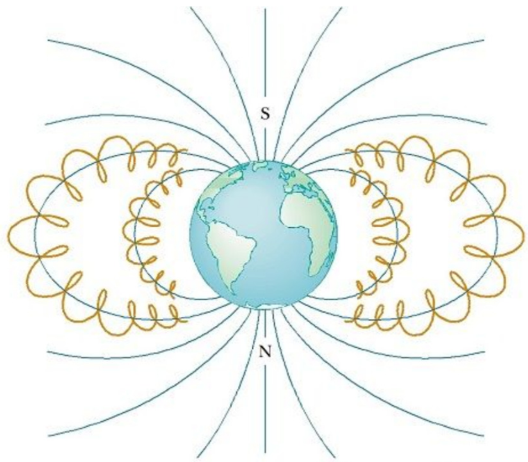
On remarque que la force n'est pas exactement dirigée vers le centre du cercle. Il y a une composante dirigée vers le centre du cercle (F_c) qui joue le rôle de la force centripète. Il y a aussi une composante dirigée perpendiculairement au plan du mouvement circulaire ($F_{\perp}$). Cette force sera toujours dirigée vers l'endroit où le champ est le moins grand. Ainsi, sur notre figure, le mouvement circulaire se déplacera vers la gauche pour amener la particule vers l'endroit où le champ est le moins grand. Comme le champ sera de moins en moins grand, le rayon de la trajectoire circulaire augmentera aussi.

Ce mécanisme permet d'imaginer qu'on peut emprisonner des particules chargées dans un champ magnétique avec la configuration montrée à droite. La particule fait un mouvement de rotation dans le champ magnétique et, chaque fois qu'elle se dirige vers un endroit où le champ est plus grand, une force la ramène vers l'endroit où le champ est



plus faible. C'est ce qu'on appelle une *bouteille magnétique*. Par exemple, on peut utiliser cette bouteille pour contenir des gaz très chaud si on tente de faire de la fusion nucléaire (le gaz est alors à plusieurs millions de °C).

On retrouve aussi ce genre de configuration dans le champ magnétique terrestre.



www.kshitij-school.com/Study-Material/Class-12/Physics/Magnetic-fields/Motion-of-a-charged-particle-in-a-uniform-magnetic-field.aspx

On voit que le champ devient plus grand quand on s'approche des pôles. Il y a donc une bouteille magnétique (quoiqu'un peu tordue) dans le champ magnétique et il y a effectivement plusieurs particules chargées (des protons et des électrons) prisonnières dans le champ magnétique terrestre. Les zones où on retrouve ces particules se nomment les *ceintures de van Allen*. Les particules prises ainsi dans le champ magnétique oscillent entre le pôle nord et le pôle sud magnétique avec des périodes se situant généralement entre 0,1 et 3 secondes.

8.5 LE MOUVEMENT D'UNE CHARGE DANS DES CHAMPS ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE

La force de Lorentz

S'il y a un champ électrique et un champ magnétique en même temps à un endroit, une particule chargée placée à cet endroit sera soumise à deux forces : la force électrique et la force magnétique. La force résultante de ces deux forces est la *force de Lorentz*.

Force de Lorentz

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

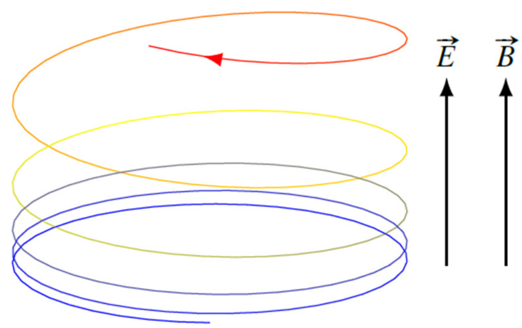
Lorentz est celui qui a refait, vers 1895, tout l'électromagnétisme en supposant que la charge était faite par des particules et non pas par un fluide.

C'est une des 5 équations fondamentales de l'électricité (avec les quatre équations de Maxwell).

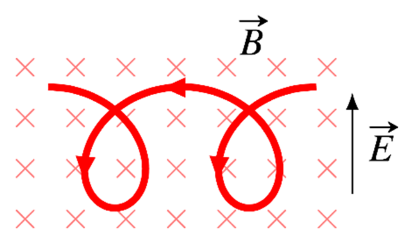
Le mouvement d'une charge peut être assez complexe quand les deux forces sont présentes. On peut illustrer cette complexité en montrant le résultat dans deux situations.

Deux exemples

Supposons premièrement que le champ électrique (uniforme) et le champ magnétique (uniforme) sont parallèles. La force magnétique fera alors tourner les particules autour des lignes de champ pour obtenir un mouvement hélicoïdal. La force électrique fera accélérer la charge positive dans la direction du champ électrique, ce qui augmentera continuellement la vitesse parallèle du mouvement hélicoïdal ($v_{//}$), ce qui fera continuellement augmenter le pas du mouvement hélicoïdal. On aura alors le mouvement montré sur la figure.

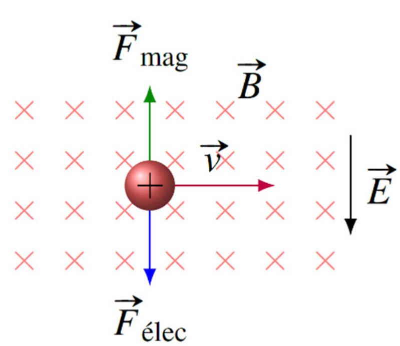


Supposons maintenant que le champ électrique et le champ magnétique soient perpendiculaires l'un à l'autre. On aura alors le mouvement illustré sur la figure. Quand la particule positive se dirige dans la direction opposée au champ électrique, donc vers le bas sur la figure, elle perd de la vitesse, ce qui fait diminue le rayon de courbure de la trajectoire. On peut voir que le rayon de courbure de la trajectoire est plus petit au bas de la figure. Quand la particule positive se dirige dans la direction du champ, donc vers le haut de la figure, elle gagne de la vitesse, ce qui fait augmenter le rayon de courbure de la trajectoire. On peut voir sur la figure que le rayon de courbure de la trajectoire est le plus grand au haut de la figure. Cela nous donne une particule qui dérive lentement vers la gauche tout en faisant un mouvement circulaire.



Le sélecteur de vitesse

Il est également possible que la force magnétique annule la force électrique. On pourrait par exemple avoir la situation montrée sur la figure de droite.



La force résultante sera nulle si la force électrique a la même grandeur que la force magnétique, donc si

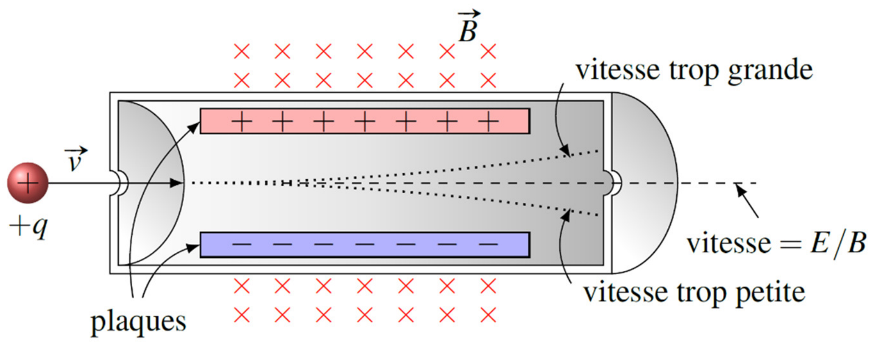
$$qE = qvB$$

Si on isole la vitesse, on arrive à

Grandeur de la vitesse pour que la force résultante soit nulle

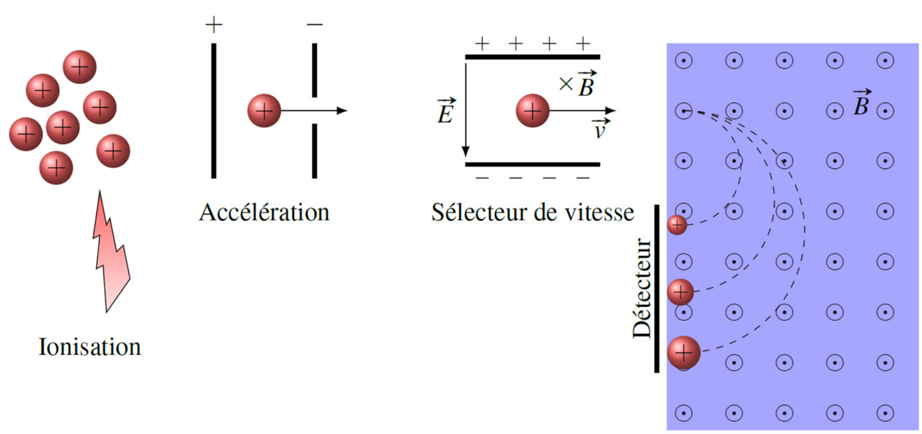
$$v = \frac{E}{B}$$

On peut utiliser ce principe pour faire un sélecteur de vitesse. Cet appareil ressemble à ceci.



On fait entrer, par la gauche, des particules avec n'importe quelle vitesse. Dans l'appareil, il y a un champ magnétique et un champ électrique dont les directions sont choisies pour que la force résultante puisse être nulle. Les particules qui ont juste la bonne vitesse ne subiront pas de force, ne seront pas déviées et pourront sortir par le trou de droite. Si la particule va trop vite, la force magnétique sera plus grande que la force électrique et la particule va dévier vers le haut et elle ne pourra pas passer par le trou à droite. Si la particule va trop lentement, la force magnétique sera plus petite que la force électrique et la particule va dévier vers le bas et elle ne pourra pas passer par le trou à droite. Ainsi, seules les particules ayant une vitesse égale à *E/B* pourront sortir par le trou de droite. Comme on peut ajuster la charge des plaques qui font le champ électrique, on peut ajuster la valeur du champ électrique et donc la vitesse des charges qui sortent du trou à droite.

C'est d'ailleurs avec un sélecteur de vitesse qu'on s'assure que la vitesse d'entrée des particules est toujours le même dans un spectromètre de masse. L'appareil ressemble donc à cela.



8.6 LA FORCE MAGNÉTIQUE SUR UN COURANT

La formule de la force

Revenons à la force exercée sur un fil. Maintenant qu'on a vu la formule de la force sur une charge en mouvement, on va pouvoir trouver la formule de la force magnétique sur un fil parcouru par un courant.

Dans un courant, il y a plusieurs électrons qui se déplacent avec la vitesse de dérive. La force sur chacun de ces électrons est

$$F = ev_d B \sin\theta$$

S'il y a N électrons qui font le courant, la force totale est simplement la somme de toutes ces forces.

$$F = Nev_d B \sin\theta$$

Le nombre de charges dépend de la densité de charges libres n et du volume du fil. On a donc

$$N = n \cdot \text{volume}$$

Si on prend un fil avec une aire A et une longueur ℓ, le volume est $A \cdot \ell$. On a donc

$$N = nA\ell$$

La force est donc

$$F = nA\ell ev_d B \sin\theta$$

Or, comme le courant dans un fil est

$$I = nAev_d$$

cela signifie que la force est

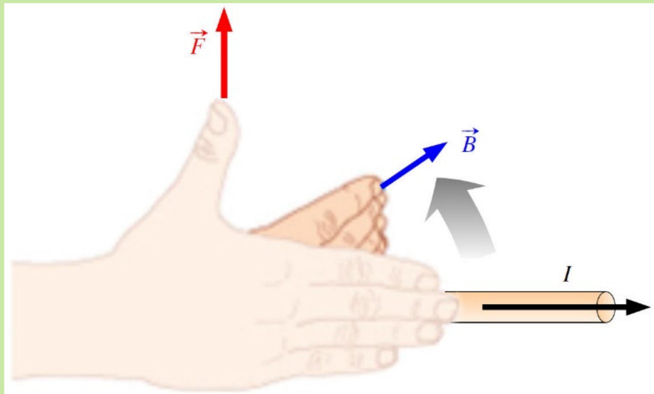
Grandeur de la force magnétique sur un courant

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

On trouve aussi la direction avec la règle de la main droite. Comme le courant est dans la même direction que le mouvement des charges positives, on place initialement nos doigts dans le sens du courant.

Direction de la force magnétique sur un courant

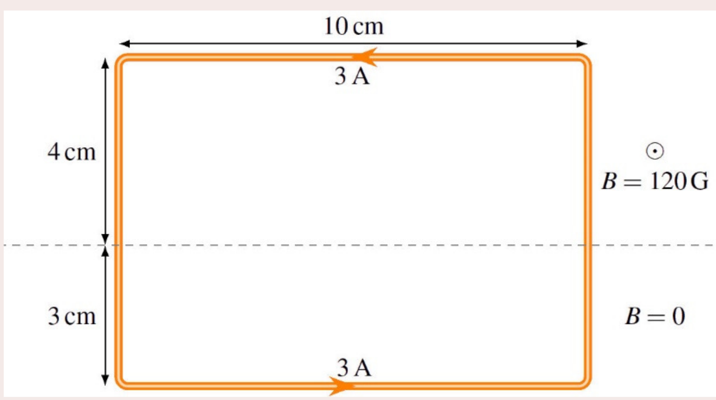
1) On met nos doigts de la main droite dans le sens du courant.
2) On plie nos doigts vers le champ (cela peut demander de tourner la main pour qu'on puisse plier nos doigts dans cette direction).
3) Le pouce pointe alors dans la direction de la force.



On peut appliquer cette formule pour un bout de fil tant que B, θ et l'orientation du fil sont constants. Si B ou θ ou l'orientation du fil varient, on sépare le fil en morceaux où B, θ et l'orientation du fil sont constants, on calcule la force sur chacun de ces morceaux et on somme ensuite pour trouver la force magnétique nette.

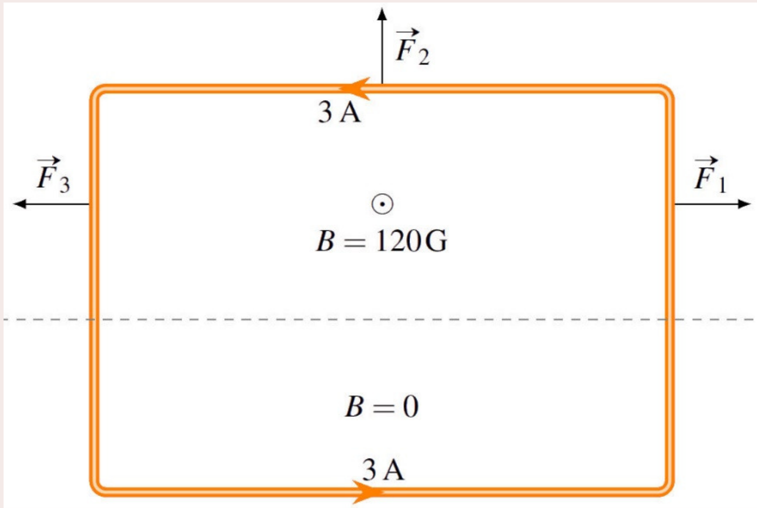
Exemple 8.6.1

Quelle est la force magnétique nette sur ce cadre métallique parcouru par un courant de 3 A ? (Il y a une frontière horizontale qui délimite deux régions avec des champs magnétiques différents. Il y a un champ de 120 G sortant de la page au-dessus de la ligne et un champ nul au-dessous de la ligne.)



Évidemment, les forces sur le fils en bas de la frontière sont toutes nulles puisque le champ est nul.

Au-dessus de la frontière, on doit séparer le cadre en trois morceaux : les deux fils verticaux et le fil horizontal. La direction des forces sur chacun de ces morceaux, trouvée avec la règle de la main droite, est montrée sur cette figure.



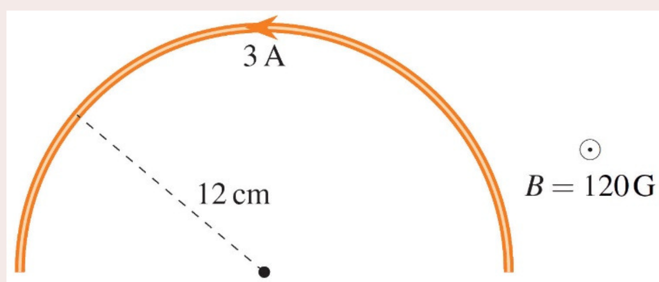
On voit alors qu'il sera bien inutile de calculer F_1 et F_3, car ces forces s'annulent mutuellement. (Il faut s'assurer qu'elles sont de même grandeur, ce qui est le cas ici puisque *I, B, l* et θ sont tous identiques pour ces deux bouts de fil.)

Il ne reste donc qu'à calculer F_2, ce qui donne

$$\begin{aligned} F_2 &= I\ell B\sin\theta \\ &= 3A\cdot 0{,}1m\cdot 0{,}012T\cdot\sin 90° \\ &= 0{,}0036N \end{aligned}$$

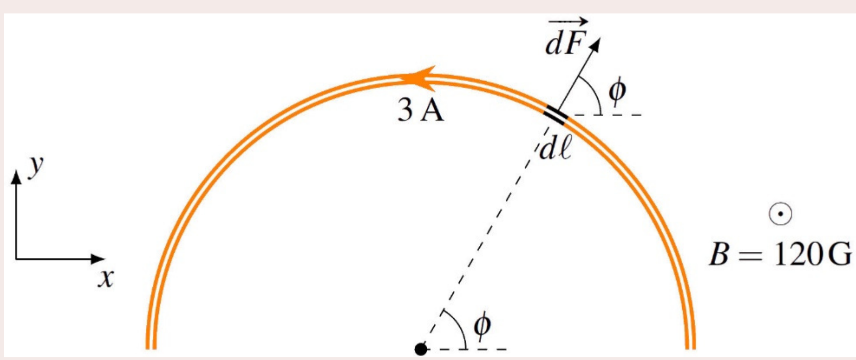
La force nette est donc 0,0036 N vers le haut.

Exemple 8.6.2



Quelle est la force magnétique nette sur ce fil en forme d'arc de cercle ayant un rayon de 12 cm ?

Comme l'orientation change constamment, on va devoir séparer le fil en petits morceaux de longueur infinitésimale *dl*.



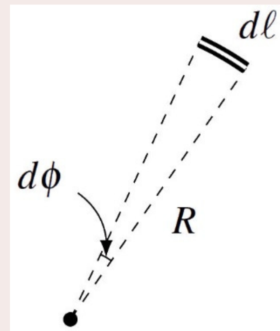
La force sur un des petits morceaux est

$$dF = I\left(d\ell\right)B\sin 90° = IBdl$$

Avant de sommer les forces dF, on doit séparer en composantes parce que la direction de dF change pour chaque morceau. Les composantes sont

$$dF_x = IBd\ell\cos\phi$$
$$dF_y = IBd\ell\sin\phi$$

Avant de sommer, on doit faire le lien entre la longueur du petit morceau et l'angle ϕ. Selon la figure de droite, on a



$$d\phi = \frac{d\ell}{R}$$

puisqu'un angle en radian est égal à la longueur de l'arc de cercle divisée par le rayon.

On somme ensuite les dF en faisant varier ϕ de 0 à π radians. On a donc

$$F_x = \int IBd\ell\cos\phi = \int_0^\pi IBRd\phi\cos\phi = IBR\left[\sin\phi\right]_0^\pi = 0$$

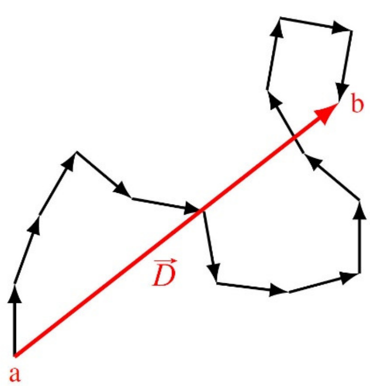
$$F_y = \int IBd\ell\sin\phi = \int_0^\pi IBRd\phi\sin\phi = IBR\left[-\cos\phi\right]_0^\pi = 2IBR$$

Les composantes de la force sont donc

$$F_x = 0 \qquad F_y = 2\cdot 3A\cdot 0,012T\cdot 0,12m = 0,00864N$$

La force est donc de 0,00864 N vers le haut.

En fait, on peut faire ce calcul beaucoup plus rapidement **si le champ est uniforme**, car on peut alors sortir le champ de l'intégrale. En notation vectorielle, on a alors



$$\vec{F} = \int Id\vec{\ell}\times\vec{B}$$
$$\vec{F} = I\left(\int d\vec{\ell}\right)\times\vec{B}$$

où le vecteur $d\ell$ est un petit vecteur orienté dans le sens du fil. Or, la figure nous montre à quoi ressemble cette addition de vecteurs.

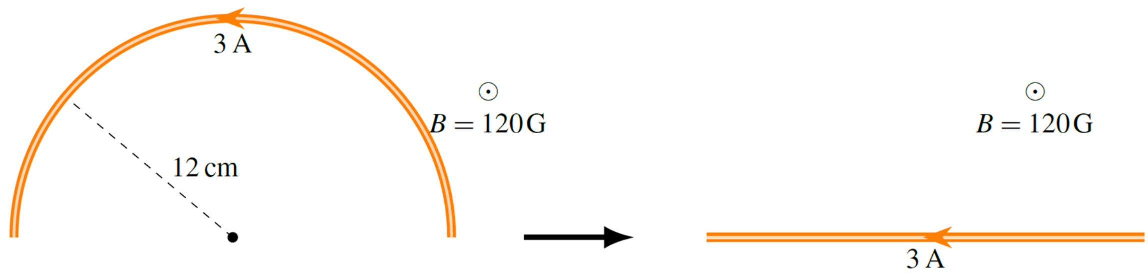
Tous les petits vecteurs $d\ell$ mis bout à bout refont exactement la forme du fil. La somme de ces vecteurs est simplement un vecteur qui va du début du fil à la fin du fil. Appelons ce vecteur D.

On peut donc calculer la force sur le fil avec

$$\vec{F} = I\vec{D}\times\vec{B}$$

qui est la même formule que pour le fil rectiligne.

Ainsi, on pouvait facilement calculer la force sur notre arc de cercle en remplaçant l'arc de cercle par un fil rectiligne allant du début à la fin du fil.



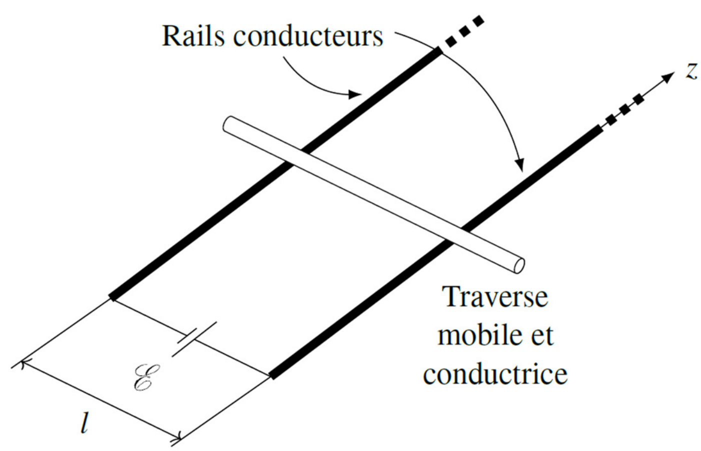
La force est donc

$$\begin{aligned} F &= IDB\sin\theta \\ &= 3A\cdot 0,24m\cdot 0,012T\cdot\sin 90° \\ &= 0,00864N \end{aligned}$$

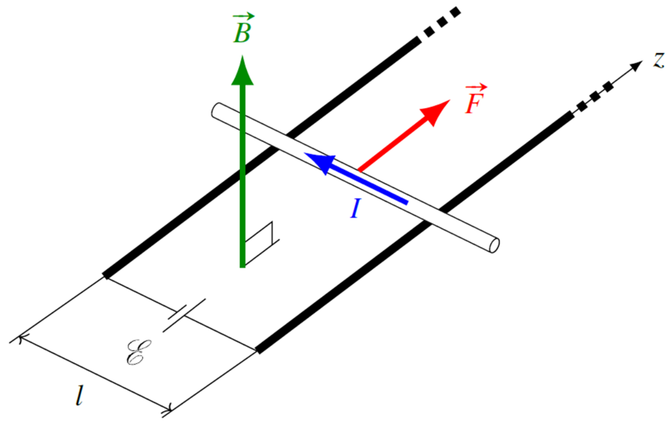
et elle est vers le haut selon la règle de la main droite. On obtient donc le même résultat.

Le moteur linéaire

On peut utiliser la force magnétique sur des courants pour propulser des objets. Donnons ici l'exemple d'une tige conductrice mobile sur des rails conducteurs.



Quand on met une différence de potentiel entre les rails à l'aide d'une source, il y aura un courant dans la tige. Si le tout est placé dans un champ magnétique dans la direction montrée sur la figure, il y aura une force sur la tige.

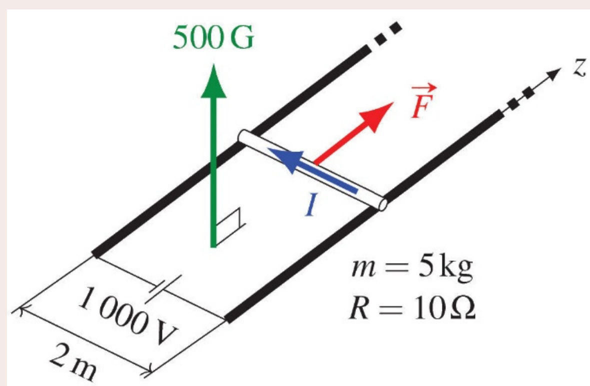


On peut donc accélérer la tige le long des rails et lui donner beaucoup de vitesse.

Voici un test de ce qu'on peut faire avec cette force.
http://www.youtube.com/watch?v=-uV1SbEuzFU
C'est d'ailleurs sur ce principe que fonctionnent les catapultes servant à accélérer les avions sur les porte-avions plus récents. Sur ce film, l'avion se fait tirer par une telle catapulte. (Ça ne parait pas beaucoup, mais la catapulte est fixée à l'avion sur la roue avant. Quand l'avion quitte le sol, elle se détache.)
http://www.youtube.com/watch?v=eL9tmes8eu0

Exemple 8.6.3

Une tige mobile de 5 kg et de 2 m de long est sur des rails. La résistance de la tige est de 10 Ω et la résistance des rails est négligeable. Une source fait une différence de 1000 V entre les rails et le tout est dans un champ magnétique de 500 G dans la direction montrée sur la figure. Quelle est l'accélération initiale de la tige ?



Nous allons trouver l'accélération de la tige à partir de la force magnétique qui s'exerce sur la tige.

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

Pour trouver cette force, on a besoin du courant dans la tige. Ce courant est

$$\begin{aligned} I &= \frac{\mathscr{E}}{R} \\ &= \frac{1000V}{10\Omega} \\ &= 100A \end{aligned}$$

La force sur la tige est donc

$$\begin{aligned} F &= I\ell B \sin\theta \\ &= 100A \cdot 2m \cdot 0,05T \cdot \sin 90° \\ &= 10N \end{aligned}$$

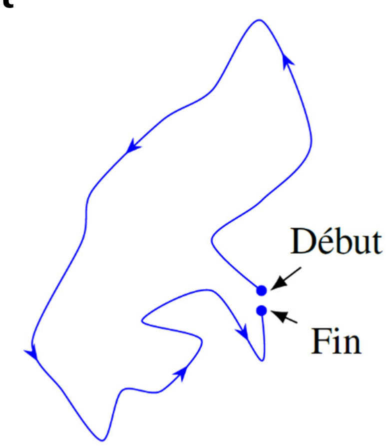
L'accélération est donc

$$\begin{aligned} a &= \frac{F}{m} \\ &= \frac{10N}{5kg} \\ &= 2\tfrac{m}{s^2} \end{aligned}$$

C'est l'accélération initiale puisqu'on verra au chapitre 10 que cette accélération va diminuer dès que la tige va commencer à se déplacer.

8.7 UNE BOUCLE DE COURANT DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE UNIFORME

La force nette sur une boucle de courant



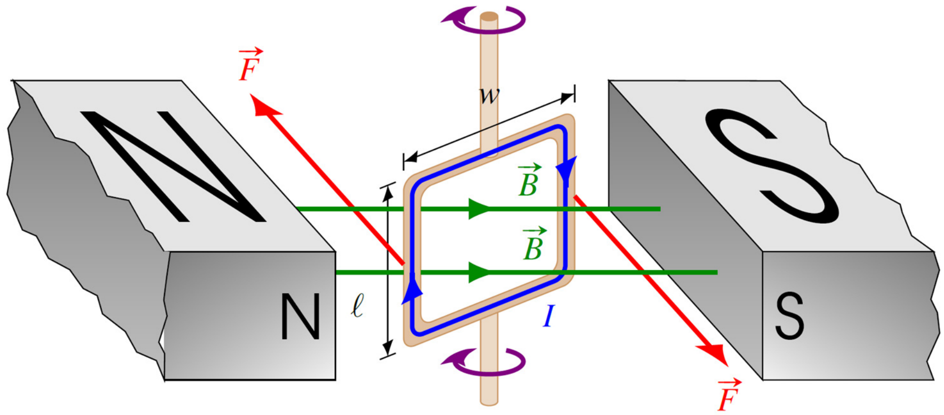
La force nette sur une boucle dans un champ magnétique uniforme est nulle. En effet, si on remplace le fil par un fil en ligne droite qui va du début du fil jusqu'à la fin du fil, on obtient un fil qui a une longueur nulle, car le début est à la même place que la fin pour un fil qui fait une boucle qui se referme sur elle-même.

Ainsi, peu importe la forme de la boucle, on a

$$\vec{F} = 0$$

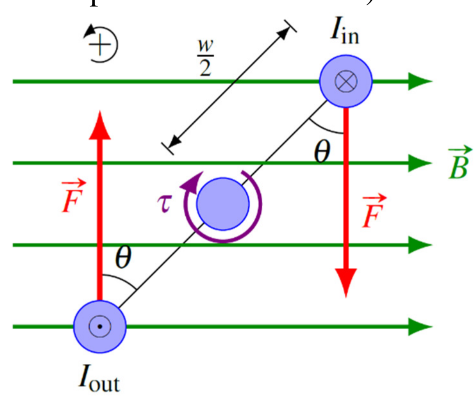
Moment de force nette sur la boucle de courant

Par contre, il peut y avoir un moment de force sur une boucle de courant, ce qui peut la faire tourner. Trouvons ce moment de force. Pour simplifier, nous allons prendre une boucle rectangulaire, mais on pourrait arriver au même résultat en prenant une boucle de n'importe quelle forme.



On voit très bien que les deux forces montrées sur la figure, qui donnent une force nette nulle, cherchent à faire tourner la boucle dans la direction indiquée au sommet de l'axe de rotation. (Il y a aussi une force vers le haut sur le dessous de la boucle et une force vers le bas sur le dessus de la boucle, mais ces deux forces ne font pas tourner la boucle.)

Pour trouver le moment de force, regardons cette boucle par le dessus (figure de droite).



Le moment de force net est donc

$$\begin{aligned}\tau &= \sum Fr\sin\theta \\ &= -F\frac{w}{2}\sin\theta - F\frac{w}{2}\sin\theta \\ &= -Fw\sin\theta\end{aligned}$$

Or, la force F est la force sur les fils, elle est donc

$$F = I\ell B\sin 90° = I\ell B$$

On a donc

$$\tau = -I\ell Bw\sin\theta$$

Comme ℓw est l'aire de la boucle A, le moment de force net est

$$\tau = -IAB\sin\theta$$

Il se peut qu'il y ait plusieurs tours de fil sur une telle boucle. Dans ce cas, chaque tour fait un moment de force et le moment de force est simplement la somme des moments de force pour chaque tour. S'il y a N tours de fil, on a donc

$$\tau = -NIAB\sin\theta$$

Dans cette formule, il y a un groupe de quantités qu'on retrouve dans toutes les formules d'une boucle dans un champ magnétique. On a donc inventé une nouvelle quantité pour le représenter. C'est le *moment dipolaire magnétique*.

Grandeur du moment dipolaire magnétique

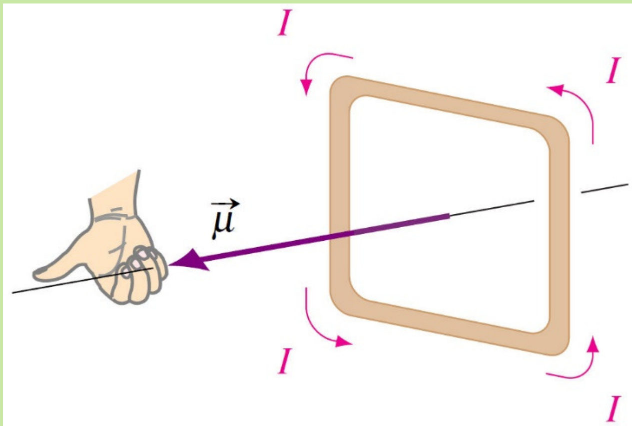
$$\mu = NAI$$

Il s'agit en fait d'un vecteur dont l'orientation est un peu particulière.

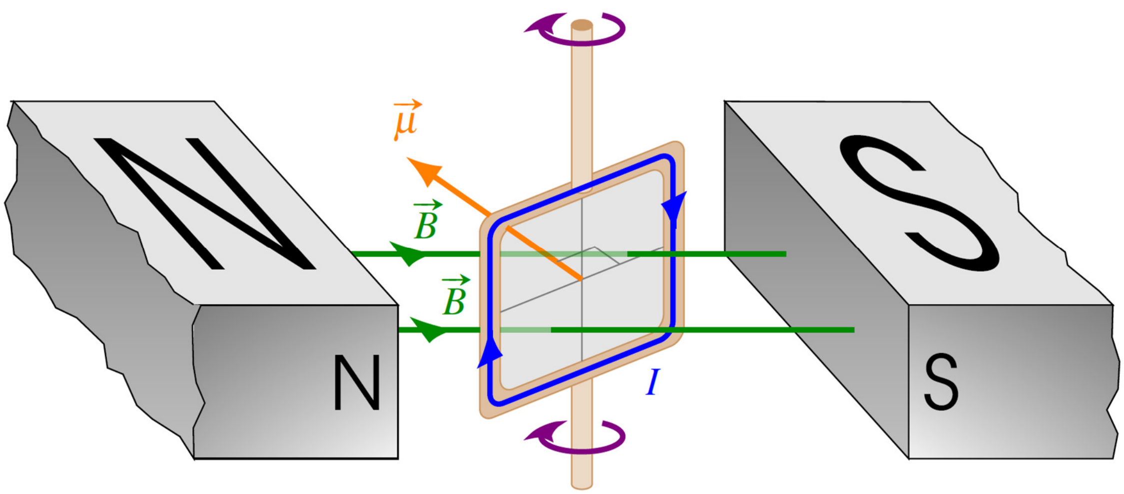
Direction du moment dipolaire magnétique

Il est perpendiculaire au plan de la boucle

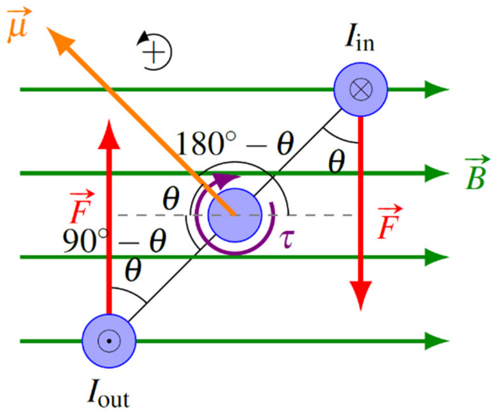
On place ses doigts de la main droite dans le sens du courant dans la boucle. Le pouce pointe alors dans la direction du moment dipolaire magnétique.



Reprenons notre situation de départ. Dans ce cas, voici la direction du moment dipolaire magnétique. (On a mis en gris le plan de la boucle pour qu'il soit plus évident.)



Avec ce vecteur, on peut alors voir que le moment de force cherche à faire tourner la boucle pour que le vecteur μ s'aligner avec le champ. On pourrait examiner plusieurs orientations de la boucle pour se rendre compte que c'est toujours ce qui se passe.



Dans notre formule du moment de force, il y avait l'angle θ. Sachez qu'au lieu d'utiliser cet angle entre la force et le plan de la boucle, on peut aussi utiliser l'angle entre le vecteur μ et le champ magnétique B. Cet angle est 180° - θ, mais cela ne change rien parce que

$$\sin(180° - \theta) = \sin\theta.$$

On peut alors formuler les règles suivantes pour le moment de force sur une boucle de courant dans un champ magnétique.

Moment de force sur une boucle de courant dans un champ magnétique

$$\tau = \mu B \sin\theta$$

Le moment de force cherche à aligner le moment dipolaire magnétique μ avec le champ magnétique B.

Il n'est pas si surprenant que μ s'appelle le moment dipolaire. La boucle dans un champ tourne pour aligner le vecteur μ avec le champ magnétique exactement comme un dipôle magnétique tourne dans un champ pour s'aligner avec le champ. Le comportement des boucles de fil dans un champ magnétique est donc très similaire au comportement des dipôles.

Énergie potentielle d'une boucle de courant dans un champ magnétique

Supposons que notre boucle de courant est dans sa position d'équilibre, donc que μ est aligné avec B. Si on veut détruire cet alignement, il faudra combattre le moment de force qui cherche à réaligner la boucle et il faudra donc fournir du travail, ce qui va augmenter l'énergie potentielle de la boucle. Selon ce qu'on a appris en mécanique, on a

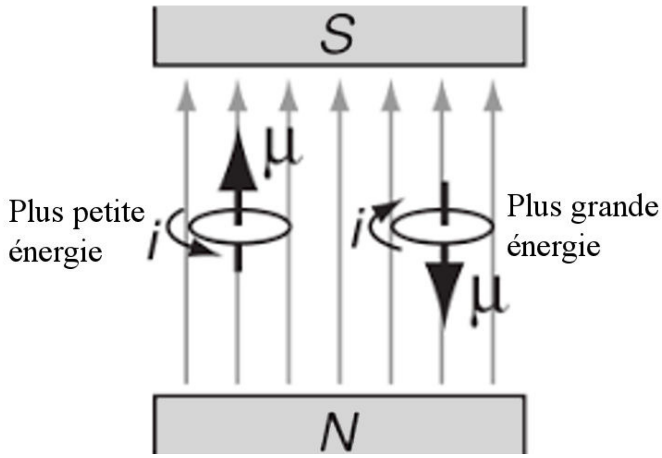
$$\begin{aligned} U &= -\int \tau d\theta \\ &= -\int -\mu B \sin\theta d\theta \\ &= \int \mu B \sin\theta d\theta \\ &= -\mu B \cos\theta + \text{constante} \end{aligned}$$

On choisit une constante nulle pour avoir l'équation la plus simple et on arrive à

Énergie potentielle d'une boucle de fil (dipôle magnétique) dans un champ magnétique

$$U = -\mu B \cos\theta = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

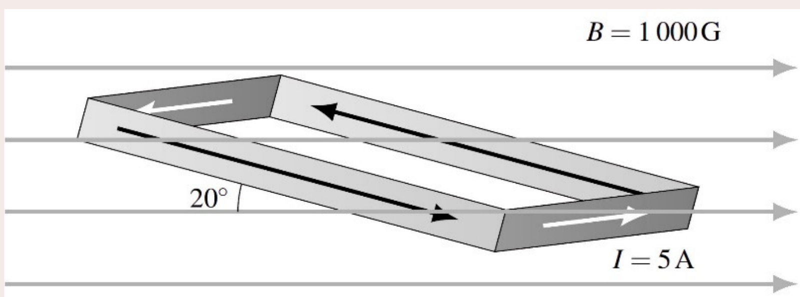
Cette formule indique que l'énergie potentielle du dipôle est à sa valeur minimum ($-\mu B$) quand μ est alignée avec le champ et que l'énergie potentielle du dipôle est à sa valeur maximale ($+\mu B$) quand μ est opposé au champ.



hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/magpot.html

Exemple 8.7.1

Il y a 30 tours de fils dans une boucle rectangulaire ayant les dimensions de 20 cm sur 15 cm. Il y a un courant de 5 A dans le fil de la boucle et elle est dans un champ magnétique uniforme de 1000 gauss avec l'orientation montrée sur la figure.



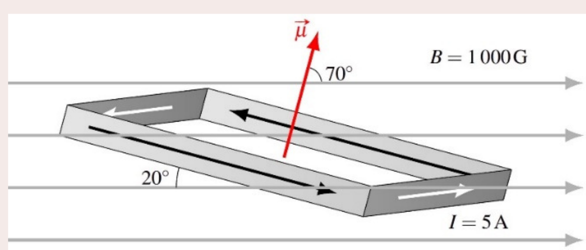
a) Quel est le moment de force sur cette boucle et dans quelle direction cette boucle cherche-t-elle à tourner ?

Pour trouver le moment de force, on doit connaitre le moment dipolaire magnétique μ et l'angle entre μ et B.

Le moment dipolaire magnétique de la boucle est

$$\begin{aligned}\mu &= NIA \\ &= 30 \cdot 5A \cdot (0,2m \cdot 0,15m) \\ &= 4,5Am^2\end{aligned}$$

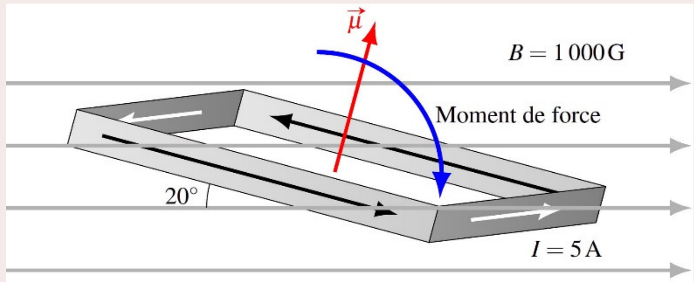
Selon cette figure, il y a 70° entre μ et B.



Le moment de force est donc

$$\begin{aligned}\tau &= \mu B \sin\theta \\ &= 4,5Am^2 \cdot 0,1T \cdot \sin 70° \\ &= 0,4229Nm\end{aligned}$$

Ce moment de force veut faire tourner la boucle pour que μ s'aligne avec B, donc dans la direction montrée sur la figure suivante.



b) Quel travail doit-on fournir pour changer l'orientation de μ de 70° à 150° ?

Le travail externe est simplement la variation d'énergie mécanique.

$$\begin{aligned}W_{ext} &= \Delta E_{mec} \\ &= \Delta E_k + \Delta U\end{aligned}$$

Comme la boucle est au repos au début et à la fin de son mouvement, il n'y a pas de variation d'énergie cinétique. Il ne reste donc qu'à calculer la variation d'énergie potentielle.

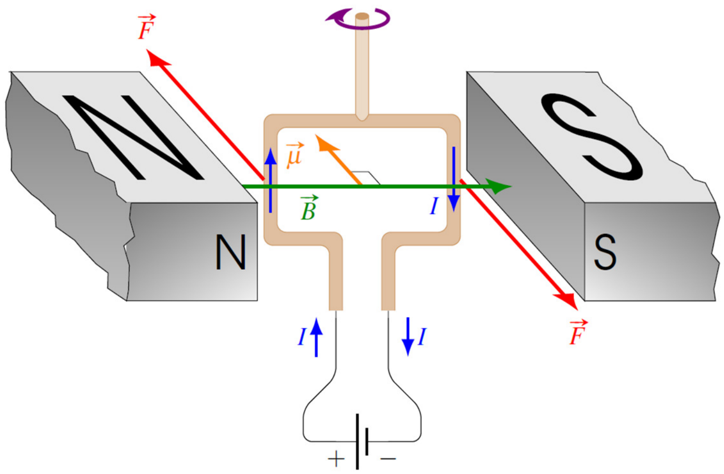
$$\begin{aligned}W_{ext} &= \Delta U \\ &= U_f - U_i \\ &= -\mu B \cos\theta_f - -\mu B \cos\theta_i\end{aligned}$$

Cela nous donne

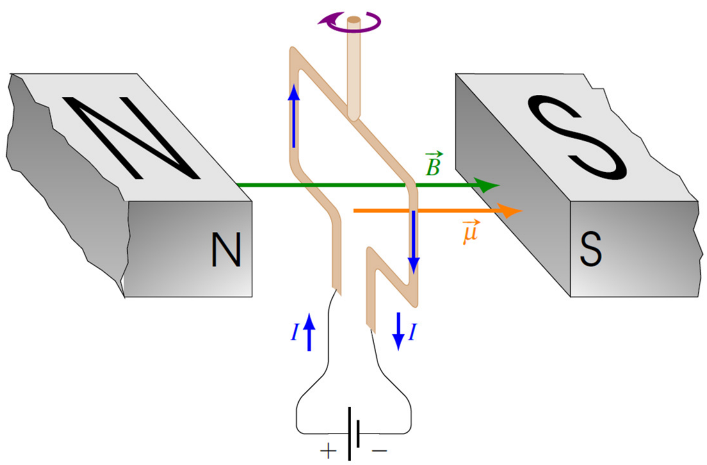
$$\begin{aligned}W_{ext} &= -\mu B \left(\cos\theta_f - \cos\theta_i\right) \\ &= -4,5Am^2 \cdot 0,1T \cdot \left(\cos 150° - \cos 70°\right) \\ &= 0,5436J\end{aligned}$$

Le moteur électrique

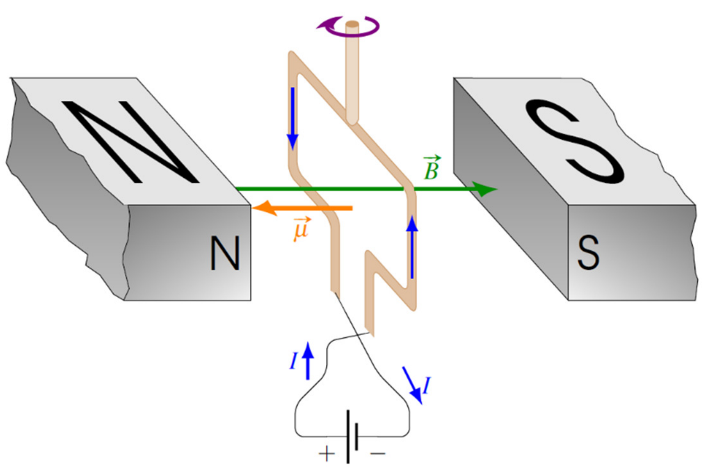
Un moteur électrique est une simple boucle dans un champ magnétique. On fait passer un courant dans la boucle, ce qui fait tourner la boucle pour que μ s'aligne avec le champ. Ici, la boucle tourne dans le sens indiqué par la flèche circulaire en haut de l'axe de rotation.



Sauf qu'une fois que μ est aligné avec le champ, la boucle cesse sa rotation. C'est alors qu'on va changer le sens du courant dans la boucle. Cela inverse la direction de μ, et il n'est plus aligné avec le champ. La boucle doit donc faire un demi-tour pour réaligner μ avec B.



Avant l'inversion du courant

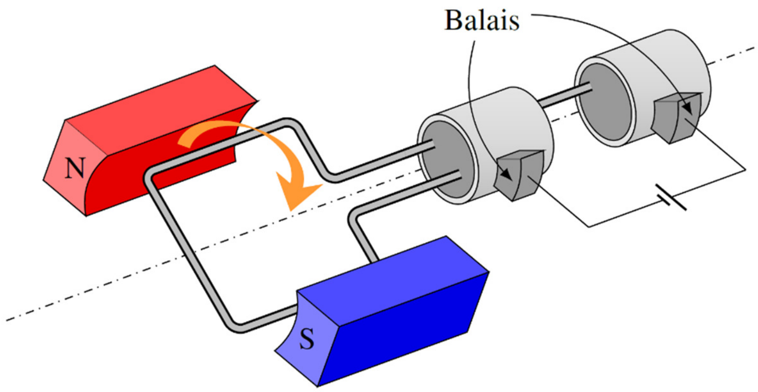


Après l'inversion du courant

Une fois que la boucle a fait un demi-tour pour que μ s'aligne à nouveau avec le champ, on inverse une autre fois le sens du courant, ce qui change la direction de μ et qui force la boucle à faire encore un demi-tour pour refaire l'alignement. On change alors encore la direction du courant, ce qui force la boucle à faire encore un demi-tour, et ainsi de suite… On a alors un moteur qui tourne sans cesse.

Comment faire pour que les fils ne s'emmêlent pas ?

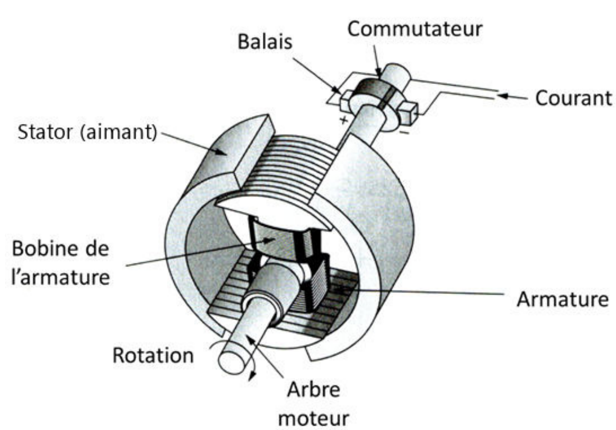
Si les fils de la bobine sont simplement branchés à une source, ils vont s'entortiller l'un autour de l'autre avec la rotation de la bobine. Pour éviter cela, on utilise des petits balais métalliques qui frottent sur des anneaux sur lesquels sont fixés les fils de la bobine.



Cette animation vous montre le fonctionnement d'un moteur électrique.
http://www.youtube.com/watch?v=Xi7o8cMPI0E
On peut voir sur cette animation comment on change le sens du courant chaque demi-tour avec les balais

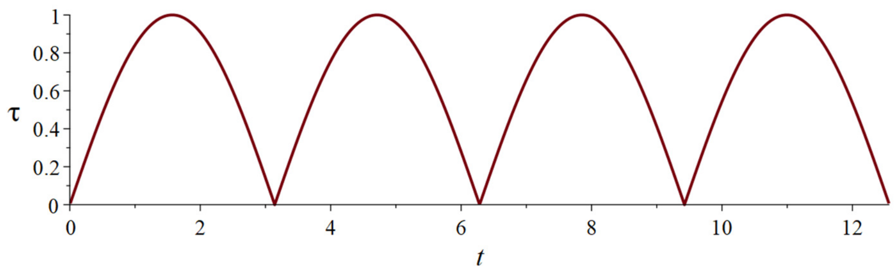
Des moteurs plus raffinés

La figure de droite montre un peu mieux à quoi ressemble un vrai moteur. On reconnait les aimants, les bobines de fil et les balais.

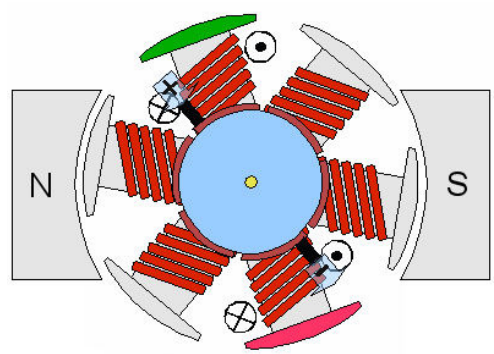


La partie fixe s'appelle le *stator* alors que la partie qui tourne s'appelle le *rotor*.

Toutefois, ce genre de moteur ne fournit pas un moment de force constant. Le moment de force sur la boucle étant donnée par $\tau = \mu B \sin\theta$, on obtient un moment de force qui varie avec le sinus de l'angle. Si le moteur tourne à vitesse constante, le moment de force varie donc de la façon montrée sur le graphique.

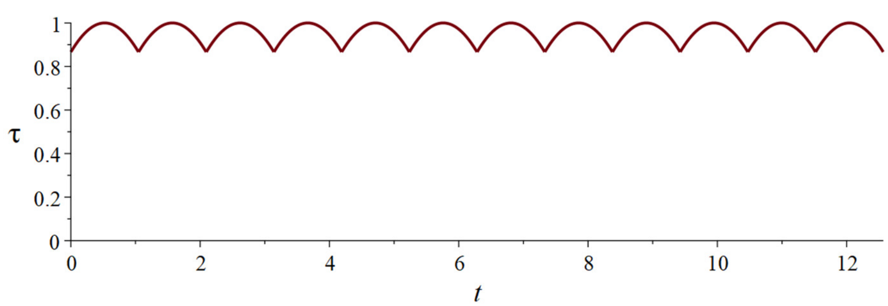


On évite une telle variation de moment de force en utilisant plusieurs bobines de fil légèrement décalées l'une par rapport à l'autre. En envoyant le courant seulement dans la bobine de fil qui est placée à la bonne place pour être au maximum du moment de force, le moteur est presque toujours à son moment de force maximum. Par exemple, imaginons qu'on utilise 3 bobines de fil décalées de 60° l'une par rapport à l'autre.



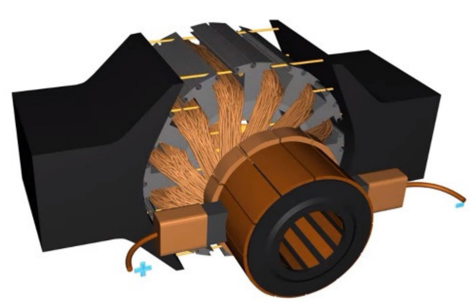
homofaciens.de/bilder/technik/dc-electric-motor-wound-stator_03.htm

À l'instant montré sur la figure, le courant passe dans un seul des 3 ensembles de bobines (celle avec les bouts vert et rouge) et cette bobine cherche à s'aligner avec le champ. Il y a du courant dans une bobine seulement quand le μ de cette bobine fait un angle entre 120° et 60° avec le champ (le moment de force est maximum à 90°). L'angle entre μ et B pour cette bobine passe alors de 120° à 60° avec la rotation. Quand l'angle arrive à 60° et que le moment de force devient trop petit, on passe à la bobine suivante, qui est à 120°. En passant ainsi, d'une bobine à l'autre, le graphique du moment de force ressemble à ceci.



On voit que le moment de force est beaucoup plus constant avec 3 ensembles de boucles.

Avec encore plus de boucles, on pourrait obtenir un moment de force encore plus constant. L'image de droite montre un moteur avec 6 boucles. Le vidéo suivant explique le fonctionnement de tels moteurs avec plusieurs boucles.
https://www.youtube.com/watch?v=A3b3Km5KVXs
(Arrêtez la lecture à 2:31. On examinera la suite au chapitre suivant.)

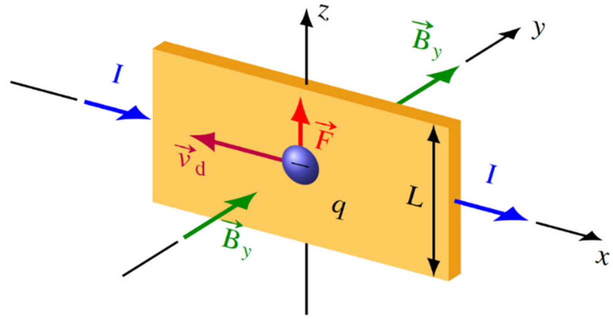


8.8 L'EFFET HALL

Qu'est-ce que l'effet Hall ?

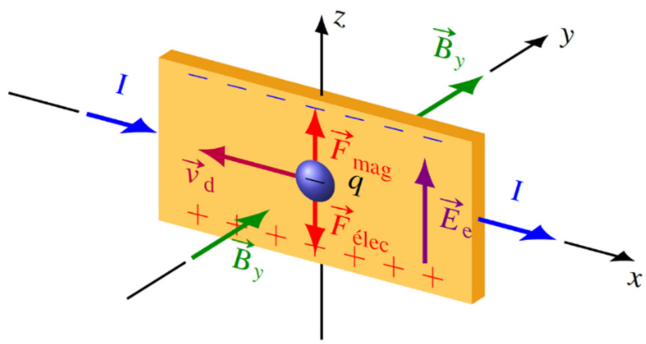
Quand on place un conducteur parcouru par un courant dans un champ magnétique, on remarque qu'il apparait une différence de potentiel de chaque côté du conducteur.

Pour comprendre pourquoi il apparait une telle différence de potentiel, regardons les forces sur les charges en mouvement dans un conducteur. Comme ce sont souvent des électrons, examinons les forces sur les électrons.



Un courant vers la droite signifie que les électrons se déplacent vers la gauche. Les électrons se déplaçant vers la gauche (vers les –x) dans un champ magnétique vers les y positifs subissent une force vers les z positifs, donc vers le haut de la plaque. Les charges négatives vont donc aller s'accumuler dans le haut du conducteur alors qu'il y aura un manque de charge négative dans le bas du conducteur. Il se fera donc une séparation de charge.

Cette séparation de charge fait donc apparaitre un champ électrique vers le haut et ce champ fait une force vers le bas sur les charges négatives. La séparation de charge va cesser quand il n'y aura plus de force qui amène de nouveaux électrons dans le haut du conducteur, donc quand la force électrique sera égale à la force magnétique.



$$F_{élec} = F_{mag}$$
$$qE = qv_dB$$
$$E = v_dB$$

La différence de potentiel d'un côté à l'autre du conducteur, qu'on va appeler la *différence de potentiel de Hall* (ΔV_H), est

$$\Delta V_H = EL$$

où L est la hauteur du conducteur (direction perpendiculaire à la direction du courant et au champ magnétique).

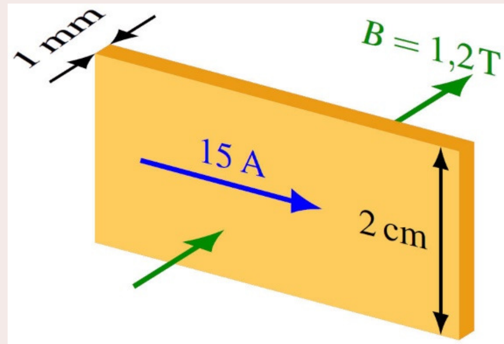
En combinant ces équations, on arrive alors à la formule suivante, découverte en 1879.

Différence de potentiel de Hall

$$\Delta V_H = v_d BL$$

Exemple 8.8.1

Une plaque d'or ayant les dimensions indiquées sur la figure est traversée par un courant de 15 A. Elle est placée dans un champ magnétique de 1,2 T tel qu'illustré sur la figure. Quelle est la différence de potentiel de Hall entre le haut et le bas de la plaque ? (La densité de l'or est de 18 900 kg/m³ et sa masse molaire est de 197 g/mol.)



Pour trouver la différence de potentiel de Hall avec

$$\Delta V_H = v_d BL$$

il faut connaitre la vitesse de dérive, et pour connaitre cette vitesse, on doit connaitre la densité d'électron libre. Ce nombre est

$$n = \text{valence} \cdot \frac{\rho N_A}{M}$$

La valence de l'or étant de 1, on obtient

$$\begin{aligned} n &= 1 \cdot \frac{18900 \frac{kg}{m^3} \cdot 6,02 \times 10^{23}}{0,197 \frac{kg}{mol}} \\ &= 5,78 \times 10^{28} m^{-3} \end{aligned}$$

On trouve ensuite la vitesse de dérive avec l'équation suivante.

$$I = nAv_d e$$
$$15A = 5,78 \times 10^{28} m^{-3} \cdot (0,001m \times 0,02m) \cdot v_d \cdot 1,602 \times 10^{-19} C$$
$$v_d = 8,1 \times 10^{-5} \tfrac{m}{s}$$

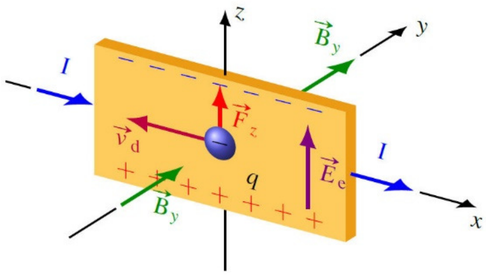
La différence de potentiel de Hall est donc

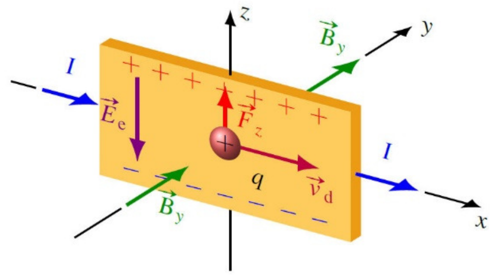
$$\begin{aligned} \Delta V_H &= v_d BL \\ &= 8,1 \times 10^{-5} \tfrac{m}{s} \cdot 1,2T \cdot 0,02m \\ &= 1,94 \times 10^{-6} V \end{aligned}$$

Ce n'est pas énorme, mais c'est mesurable.

Comment connait-on le signe des charges qui font le courant ?

On a dit qu'un courant conventionnel vers la droite peut être fait par un déplacement de charges positives vers la droite ou par un déplacement de charges négatives vers la gauche. Jusqu'ici, cela ne faisait aucune différence, mais ce n'est pas le cas avec l'effet Hall. Examinons quelle est cette différence avec les figures suivantes.





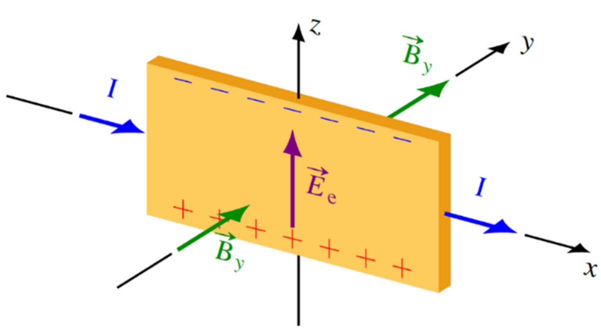
La figure de gauche nous montre que si le courant est fait par des charges négatives se déplaçant vers la gauche, la force magnétique sur les charges est vers le haut, ce qui charge négativement le haut du conducteur et positivement le bas du conducteur.

La figure de droite nous montre que si le courant est fait par des charges positives se déplaçant vers la droite, la force magnétique sur les charges est aussi vers le haut, ce qui charge positivement le haut du conducteur et négativement le bas du conducteur.

Comme on obtient des signes différents pour les charges dans les deux situations, cela nous permet de savoir, en mesurant les signes des charges de chaque côté du conducteur, le signe des charges en mouvement dans le conducteur. C'est ainsi qu'on a su que ce sont des charges négatives qui se déplacent pour faire le courant dans les métaux.

Une explication plus subtile de la force sur un fil parcouru par un courant dans un champ magnétique

La description qu'on a faite de l'effet Hall nous permet de donner une image plus exacte de la force s'exerçant sur un fil parcouru par un courant dans un champ magnétique. Prenons l'exemple d'un fil métallique pour illustrer notre propos. On sait qu'il apparait un champ électrique dans le fil parce qu'il y a une séparation de charge. Avec un courant fait par des électrons, ce champ est dans la direction indiquée sur la figure.



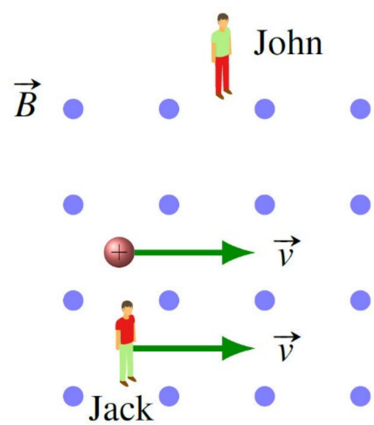
Ce champ électrique va alors exercer une force vers le haut sur les atomes formant le fil. Ces atomes sont immobiles et ont une charge positive, car un ou plusieurs électrons de valence ont quitté l'atome pour devenir des électrons de conductions. C'est cette force électrique vers le haut qui est la force sur le fil.

Cela est également conforme avec l'idée que la force magnétique ne peut pas faire de travail. Comme la force sur le fil parcouru par un courant dans un champ magnétique peut lui donner une vitesse, il y a un travail sur le fil, ce qui semblait contraire à l'idée que la force magnétique fait toujours un travail nul. On vient de voir qu'en réalité, ce travail est fait par la force électrique agissant sur les atomes du fil.

8.9 COMMENT LA FORCE MAGNÉTIQUE PEUT-ELLE DÉPENDRE DE LA VITESSE ?

On a vu que la force magnétique dépend de la vitesse. Toutefois, cela semble aller en contradiction avec le principe de relativité.

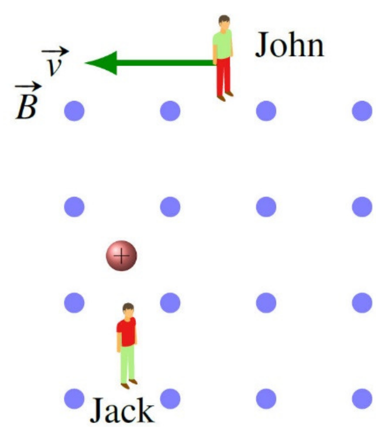
Pour illustrer cela, prenons un exemple très simple : une particule positive qui se déplace vers la droite dans un champ magnétique sortant de la feuille.



Deux observateurs observent la scène. Sur la figure, John est au repos et Jack se déplace à la même vitesse que la particule.

Sur cette première figure, on a le point de vue de John (autrement dit, on est dans le repère de John). Selon John, la particule se déplace dans un champ magnétique et elle subit donc une force vers le bas.

Prenons maintenant le point de vue de Jack. Selon Jack, John se déplace vers la gauche et la particule est au repos.



Mais alors, la particule est au repos selon Jack et la force magnétique est nulle.

On a alors une contradiction. Selon John, la particule subit une force vers le bas, alors qu'il n'y a pas de force selon Jack. (Il n'y a pas de gravitation.)

En fait, c'est le problème avec une force qui dépend de la vitesse. On peut toujours prendre le point de vue d'un observateur qui a la même vitesse que l'objet et la force sera nulle pour cet observateur. Alors, la force est nulle pour cet observateur alors qu'elle n'est pas nulle pour tous les autres observateurs. Comment peut-on alors se sortir de ce paradoxe ?

Dans certains livres, on va spécifier que la vitesse est la vitesse relative entre la charge et le champ magnétique. On va argumenter que selon Jack, le champ se déplace vers la gauche et que la vitesse entre la particule et le champ est restée la même. Cette explication fonctionne quand on parle de la friction de l'air qui est aussi une force qui dépend de la vitesse. Si on prend le point de vue d'un observateur qui se déplace avec l'objet, l'air a alors une certaine vitesse dans la direction opposée et il y a encore une vitesse relative entre l'objet et l'air. Toutefois, le champ magnétique n'est pas quelque chose qui est fait de matière et il est impossible de définir une vitesse pour quelque chose qui n'est pas matériel.

En fait, on trouve la solution quand on connait bien la relativité. La théorie de la relativité indique que les lois de transformations des champs électrique et magnétique sont les suivantes.

$$E'_x = E_x \qquad E'_y = \gamma\left(E_y - vB_z\right) \qquad E'_z = \gamma\left(E_z + vB_y\right)$$

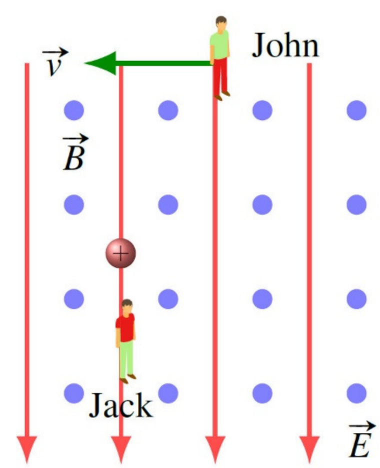
$$B'_x = B_x \qquad B'_y = \gamma\left(B_y + \tfrac{v}{c^2}E_z\right) \qquad B'_z = \gamma\left(B_z - \tfrac{v}{c^2}E_y\right)$$

Examinons ce qu'on obtient alors selon Jack. Pour John, il n'y a qu'un champ magnétique en z. Toutes les autres composantes des champs électrique et magnétique sont nulles. Les champs selon Jack sont donc

$$E'_x = 0 \qquad E'_y = \gamma\left(0 - vB_z\right) \qquad E'_z = \gamma\left(0 + v0\right)$$

$$B'_x = 0 \qquad B'_y = \gamma\left(0 + \tfrac{v}{c^2}0\right) \qquad B'_z = \gamma\left(B_z - \tfrac{v}{c^2}0\right)$$

On voit qu'il y a encore un champ magnétique qui sort de la feuille (qui est même plus grand qu'avant), mais on a aussi un champ électrique négatif en y. C'est donc un champ électrique vers le bas. Ainsi, la véritable situation selon Jack est celle montrée à droite.



Puisqu'il y a maintenant un champ électrique vers le bas, Jack va maintenant conclure qu'il y a une force vers le bas, tout comme John. (Notez que la grandeur de la force n'est pas la même pour les deux, mais c'est parce qu'il y a aussi des lois de transformations pour la force.)

On vient d'apprendre plusieurs choses intéressantes. Premièrement, on a appris que les champs se transforment selon les observateurs. Certains champs peuvent même disparaitre complètement selon certains observateurs. C'est ce qui se produit dans notre exemple, il y a un champ électrique selon Jack, mais il n'y en a pas selon John. On a aussi appris que la force peut être de nature différente selon les observateurs. Pour John, la particule subit une force purement magnétique alors que pour Jack la particule subit une force purement électrique. Pour les autres observateurs, une partie de la force serait magnétique et une partie de la force serait électrique.

L'important, ce n'est pas que tous soient d'accord sur la nature de cette force. L'important c'est d'obtenir une force totale qui va donner un mouvement équivalent pour tous les observateurs.

C'est un peu comme si les champs électrique et magnétique faisaient partie d'une même entité qui peut prendre une forme différente selon l'observateur.

Notez qu'avec ces lois de transformations des champs, on peut montrer que la force magnétique doit être donnée par $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$.
https://physique.merici.ca/electricite/Forcemagrelativite.pdf

RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

Forces entre les pôles

Il existe deux types de pôles sur un aimant : nord et sud
Les pôles de même type se repoussent mutuellement.
Les pôles de types contraires s'attirent mutuellement.

Propriétés des lignes de champ magnétique

1) Le champ est toujours tangent à la ligne de champ, dans la direction de la ligne.
2) Plus les lignes de champs s'approchent les unes des autres, plus le champ est fort.
3) Les lignes de champ ne peuvent pas apparaitre ou disparaitre dans le vide.
4) Le nombre de lignes de champ qui arrivent ou qui partent d'un pôle est proportionnel à l'intensité du pôle.
5) Les lignes de champ ne se croisent pas.

Force sur un dipôle dans un champ magnétique non uniforme

La force sur le dipôle aligné avec le champ est toujours vers l'endroit où le champ est le plus fort.

Grandeur de la force magnétique sur une charge en mouvement

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

Unité du champ magnétique : le tesla (T)

$$1T = 1\tfrac{Ns}{Cm} = 1\tfrac{kg}{Cs}$$

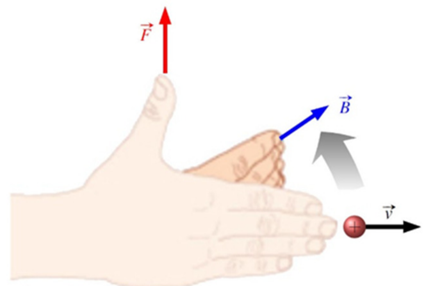
Autre unité du champ magnétique : le gauss (G)

$$10\,000G = 1T$$

Direction de la force magnétique sur une charge en mouvement

Charge positive

1) On met nos doigts de la main droite dans le sens de la vitesse de la particule.
2) On plie nos doigts vers le champ (cela peut demander de tourner la main pour qu'on puisse plier nos doigts dans cette direction).
3) Le pouce pointe alors dans la direction de la force.



Charge négative

On fait la même chose, mais on inverse la direction à la fin.

Force magnétique sur une charge en mouvement

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Rayon de la trajectoire d'une charge dans un champ magnétique uniforme avec une vitesse perpendiculaire au champ magnétique (rayon de Larmor)

$$r = \frac{mv}{|q|B}$$

Période du mouvement d'une charge dans un champ magnétique uniforme avec une vitesse perpendiculaire au champ magnétique

$$T = \frac{2\pi m}{|q|B}$$

Fréquence du mouvement d'une charge dans un champ magnétique uniforme avec une vitesse perpendiculaire au champ magnétique (fréquence cyclotron)

$$f = \frac{|q|B}{2\pi m}$$

Rayon de la trajectoire hélicoïdale d'une charge dans un champ magnétique uniforme

$$r = \frac{mv_\perp}{|q|B}$$

Pas de la trajectoire hélicoïdale d'une charge dans un champ magnétique uniforme

$$d = v_{//}\frac{2\pi m}{|q|B}$$

Force de Lorentz

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Grandeur de la vitesse pour que la force résultante soit nulle

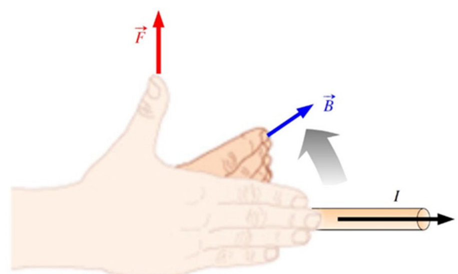
$$v = \frac{E}{B}$$

Grandeur de la force magnétique sur un courant

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

Direction de la force magnétique sur un courant

1) On met nos doigts de la main droite dans le sens du courant.
2) On plie nos doigts vers le champ (cela peut demander de tourner la main pour qu'on puisse plier nos doigts dans cette direction).
3) Le pouce pointe alors dans la direction de la force.



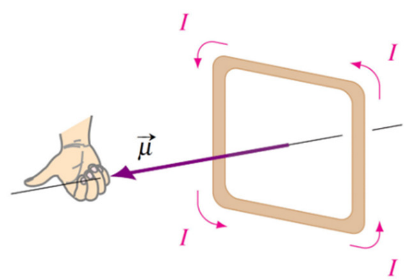
Grandeur du moment dipolaire magnétique

$$\mu = NAI$$

Direction du moment dipolaire magnétique (μ)

Il est perpendiculaire au plan de la boucle.

On place ses doigts de la main droite dans le sens du courant dans la boucle. Le pouce pointe alors dans la direction du moment dipolaire magnétique.



Moment de force sur une boucle de courant dans un champ magnétique

$$\tau = \mu B \sin\theta$$

Le moment de force cherche à aligner le moment dipolaire magnétique μ avec le champ magnétique B.

Énergie potentielle d'une boucle de fil (dipôle magnétique) dans un champ magnétique

$$U = -\mu B \cos\theta = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

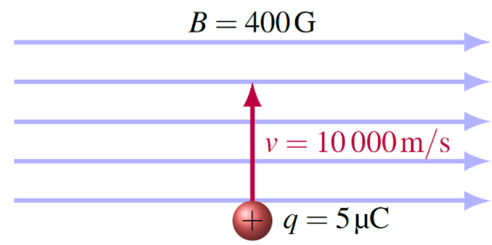
Différence de potentiel de Hall

$$\Delta V_H = v_d BL$$

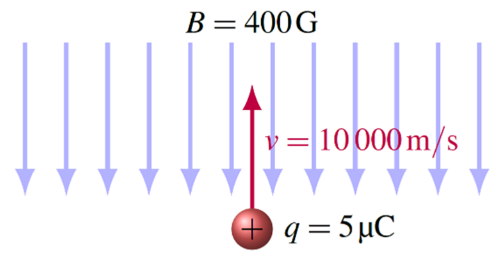
EXERCICES

8.3 La force magnétique sur une charge électrique en mouvement

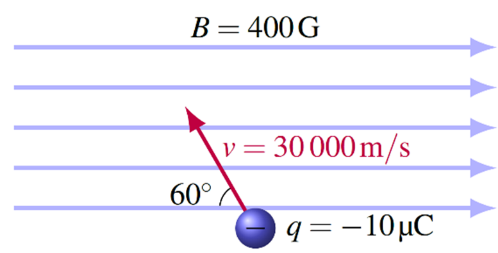
1. Quelle est la force (grandeur et direction) sur cette charge ?



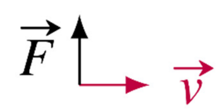
2. Quelle est la force sur cette charge ?



3. Quelle est la force (grandeur et direction) sur cette charge ?



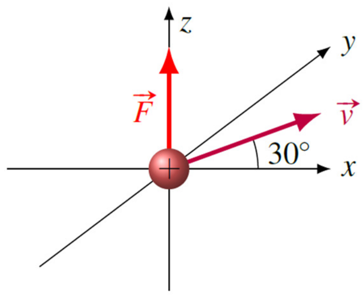
4. Un électron se dirigeant vers la droite à une vitesse de 10^6 m/s subit une force magnétique de 4 x 10^{-14} N vers le haut. Déterminez la grandeur et la direction du champ magnétique sachant que le champ est perpendiculaire à la vitesse.

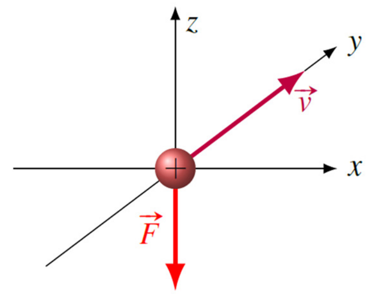


5. Une charge de 8 mC se déplace à 10^6 m/s dans un champ magnétique de 0,1 G. Quel est l'angle entre le champ magnétique et la vitesse si la charge subit une force dont la grandeur est de 0,06 N ?

6. Quand une particule positive va dans la direction montrée sur la 1re figure, elle subit une force magnétique dirigée vers les *z* positifs. (La vitesse est dans le plan *xy* et il y a un angle de 30° entre la vitesse et l'axe des *x*.) Quand la même charge va dans la direction montrée sur la 2e figure, elle subit une force magnétique dirigée vers

les z négatifs. Dans les deux cas, la grandeur de la force magnétique est la même. Dans quelle direction est le champ magnétique ?





7. Une charge de -2 µC a une vitesse de $\vec{v} = \left(2\vec{i} - 3\vec{j} - \vec{k}\right) \times 10^6 \frac{m}{s}$ dans un champ magnétique de $\vec{B} = \left(0,02\vec{i} - 0,04\vec{j} + 0,05\vec{k}\right)T$. Quelle est la force magnétique sur la charge ? (Donnez votre réponse sous la forme $\vec{F} = \left(F_x\vec{i} + F_y\vec{j} + F_z\vec{k}\right)N$)

8. Une charge de 10 µC et ayant une vitesse de $\vec{v} = \left(\vec{i} + 3\vec{j} + \vec{k}\right) \times 10^6 \frac{m}{s}$ subit une force de $\vec{F} = \left(6\vec{i} - 3\vec{j} + 3\vec{k}\right)N$ quand elle se déplace dans un champ magnétique. Quel est le champ magnétique sachant que B_y est nul ? (Donnez votre réponse sous la forme $\vec{B} = \left(B_x\vec{i} + B_y\vec{j} + B_z\vec{k}\right)T$)

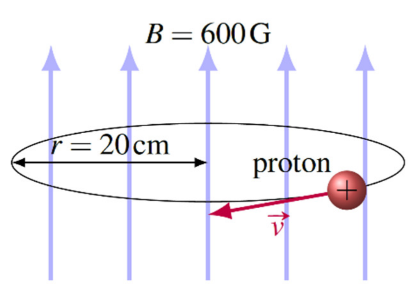
8.4 Le mouvement d'une charge dans un champ magnétique

9. Un électron ayant une énergie cinétique de 2 keV se déplace perpendiculairement à un champ magnétique de 500 G. La masse de l'électron est de 9,11 x 10^{-31} kg.

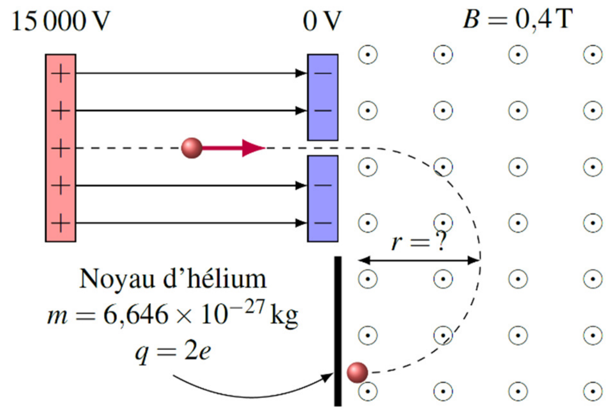
   a) Quel est le rayon de la trajectoire ?
   b) Quelle est la grandeur de l'accélération de l'électron ?
   c) Quelle est la période du mouvement circulaire ?

10. Un proton se déplaçant dans un champ magnétique de 600 G fait un mouvement le long d'une trajectoire circulaire de 20 cm de rayon. La masse du proton est de 1,673 x 10^{-27} kg.

   a) Quelle est la vitesse du proton ?
   b) Quelle est la période du mouvement circulaire ?

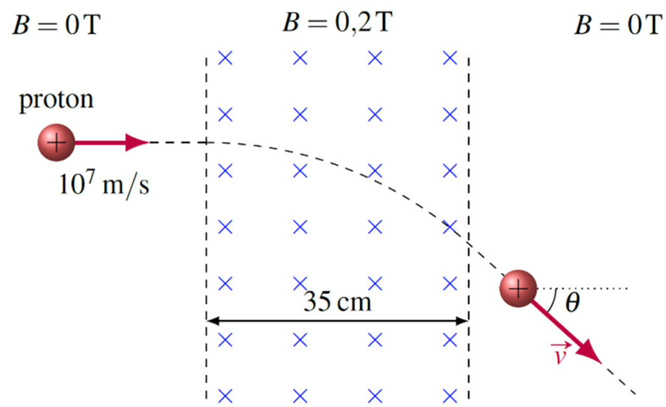


11. Un noyau d'hélium est accéléré par une différence de potentiel de 15 000 V entre deux plaques pour ensuite pénétrer dans un champ magnétique, tel qu'illustré sur la figure. Quel est le rayon de la trajectoire circulaire quand le noyau d'hélium est dans le champ magnétique ?



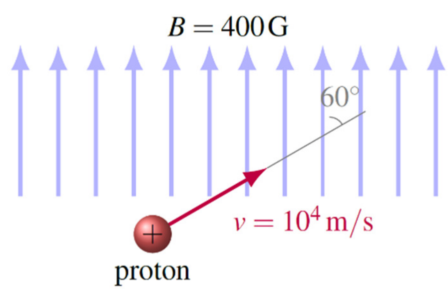
12. Dans la situation suivante, un proton (masse = 1,673 x 10^{-27} kg) traverse une région où il y a un champ magnétique uniforme de 0,2 T de 35 cm de large.

a) Quelles sont les valeurs de θ et v ?
b) Pendant combien de temps le proton est-il resté dans le champ magnétique ?



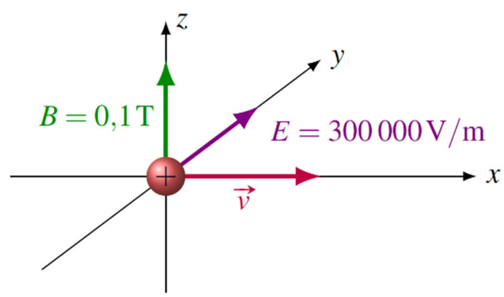
13. Une particule chargée arrive dans un champ magnétique avec la vitesse et l'angle montrés sur la figure pour faire un mouvement hélicoïdal dans le champ magnétique. La masse du proton est de 1,673 x 10^{-27} kg.

a) Quel est le pas de la trajectoire ?
b) Quel est le rayon de la trajectoire ?

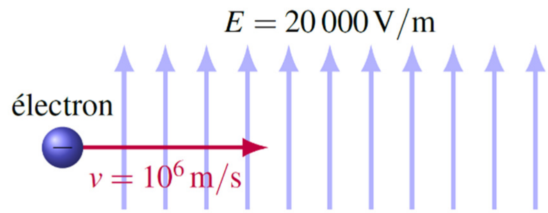


8.5 Le mouvement d'une charge dans des champs électrique et magnétique

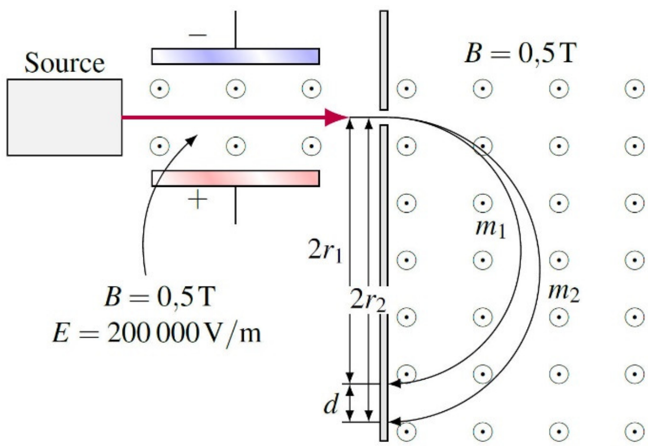
14. Une particule se déplace dans une région où il y a des champs magnétique et électrique dont les directions sont montrées sur la figure. Quelle doit-être la vitesse de la charge pour que la force nette sur la charge soit nulle ?



15. Dans la situation suivante, quelles doivent être la grandeur et la direction du champ magnétique pour que la force nette sur l'électron soit nulle, sachant que le champ magnétique est perpendiculaire à la vitesse de l'électron ?

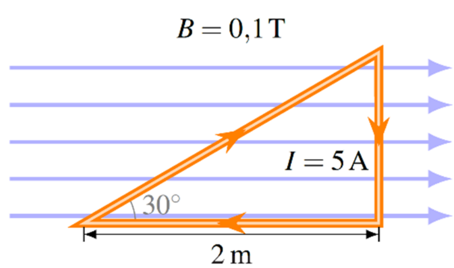


16. Une source envoie des atomes ionisés 1 fois dans un spectromètre de masse. Les ions passent dans un sélecteur de vitesse avant d'entrer dans le spectromètre. Quelle sera la distance d si la source envoie des atomes de carbone 14 (m = 2,325 x 10^{-26} kg) et de carbone 12 (m = 1,993 x 10^{-26} kg) ?

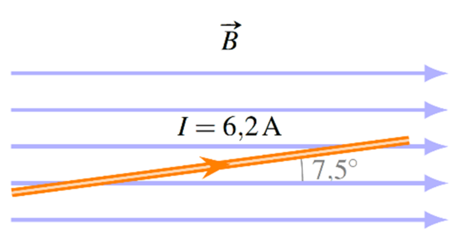


8.6 La force magnétique sur un courant

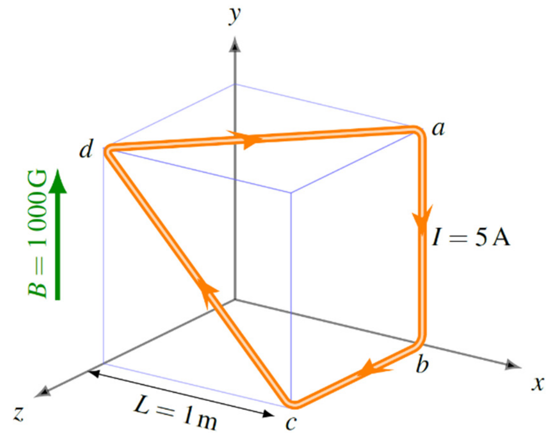
17. Quelle est la force (grandeur et direction) sur chacune des portions droites de ce fil ?



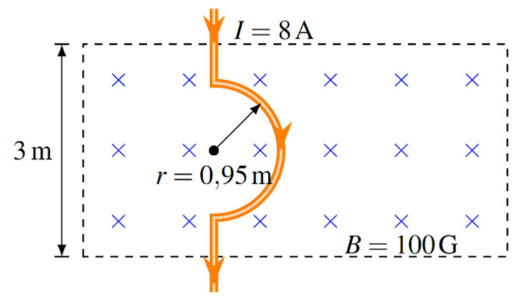
18. Ce fil de 5 m de long subit une force de 0,02 N qui entre dans la page. Quelle est la grandeur du champ magnétique ?



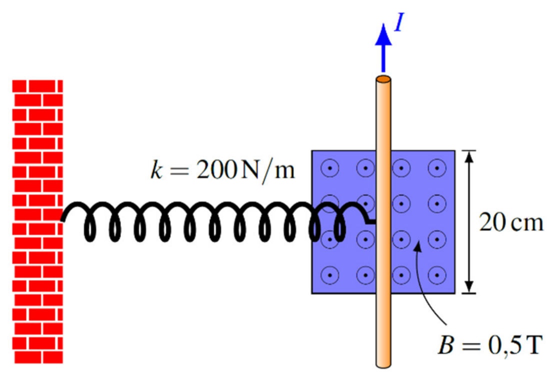
19. Quelle est la force (grandeur et direction) sur chacune des 4 portions droites de ce fil ?



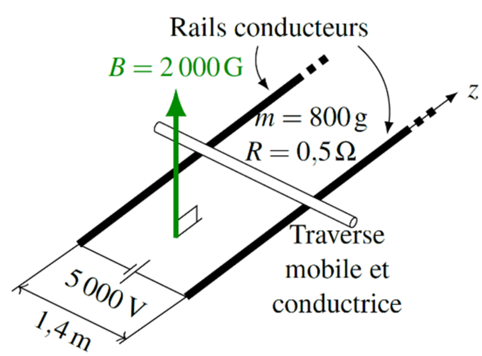
20. Quelle est la force (grandeur et direction) sur ce bout de fil dans le champ magnétique de 3 m de largeur ?



21. Dans la situation montrée sur la figure, le ressort n'est ni étiré ni comprimé quand il n'y a pas de courant dans le fil. Quand on fait passer un courant dans le fil, le ressort allonge de 2 mm. Quel est alors le courant dans le fil ?

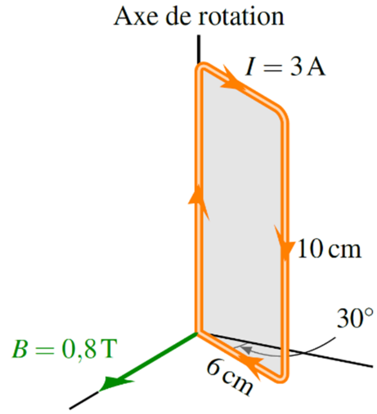


22. Quelle est l'accélération de cette tige dans ce moteur linéaire ? (Les rails n'ont pas de résistance.)



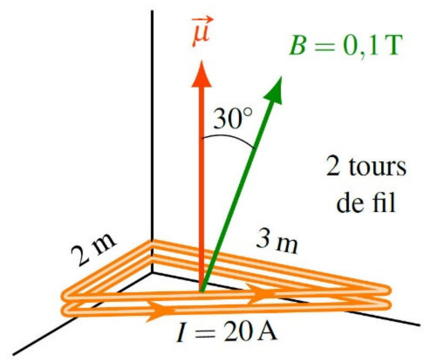
8.7 Une boucle de courant dans un champ magnétique uniforme

23. La figure montre un cadre métallique rectangulaire dans un champ magnétique. Il y a un courant de 3 A dans le cadre.



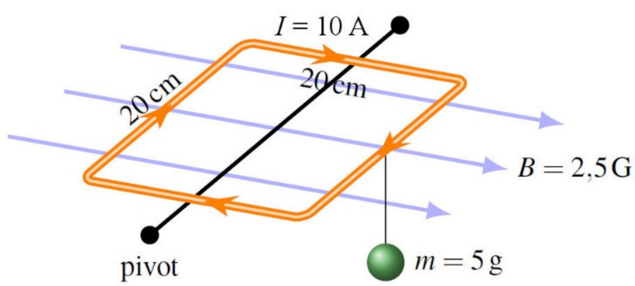
a) Quel est le moment magnétique (grandeur et direction) du cadre ?
b) Quel est le moment de force sur le cadre ?
c) Dans quel sens le moment de force cherche-t-il à faire tourner le cadre ?
d) Combien d'énergie doit-on fournir si on veut diminuer l'angle de 30° sur la figure jusqu'à 0° ? (L'énergie cinétique est nulle au début et à la fin.)

24. Voici une boucle de fil initialement immobile dans un champ magnétique.



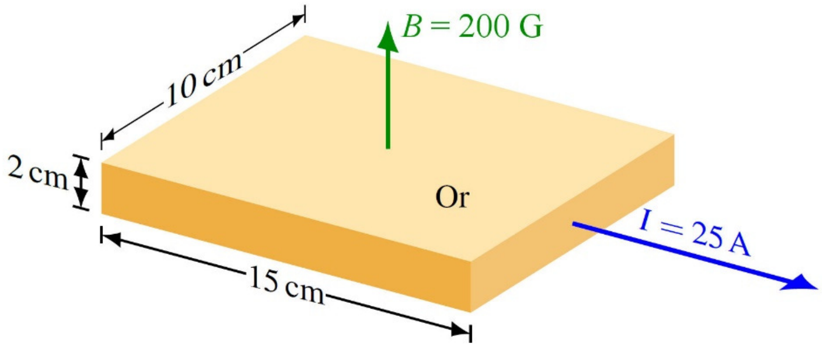
a) Quel est le moment de force sur la boucle ?
b) Quelle sera l'énergie cinétique de rotation de la boucle quand le moment magnétique sera aligné avec le champ magnétique ?

25. Dans la situation montrée sur la figure, la boucle de fil est en équilibre, ce qui signifie que le moment de force fait par le champ magnétique est égal au moment de force fait par le poids de 5 g sur la boucle. Combien y a-t-il de tours de fil dans la boucle ?



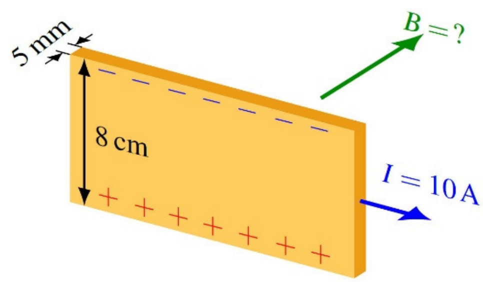
8.8 L'effet Hall

26. Un courant de 25 A passe dans une plaque d'or tel qu'illustré sur la figure. La valence de l'or est 1, sa densité est de 19 300 kg/m³ et sa masse molaire est de 196,97 g/mol.



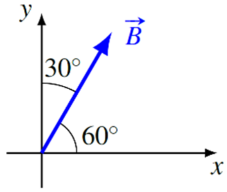
a) Quelle est la différence de potentiel de Hall qui apparait entre les deux côtés de la plaque ?
b) Quel côté de la plaque a le potentiel le plus élevé ?

27. Un courant de 10 A passe dans cette plaque d'or. Quelle est la grandeur du champ magnétique si la différence de potentiel entre le dessus de la plaque et le dessous de la plaque est de 0,2 µV ? La valence de l'or est 1, sa densité est de 19 300 kg/m³ et sa masse molaire est de 196,97 g/mol.



RÉPONSES

8.3 La force magnétique sur une charge électrique en mouvement

1. 0,002 N qui entre dans la page.
2. 0 N
3. 0,0104 N qui sort de la page
4. 0,2497 T qui sort de la page
5. 48,6°
6. 

7. $0,38N\vec{i} + 0,24N\vec{j} + 0,04N\vec{k}$
8. $-0,1T\vec{i} + 0T\vec{j} + 0,2T\vec{k}$

8.4 Le mouvement d'une charge dans un champ magnétique

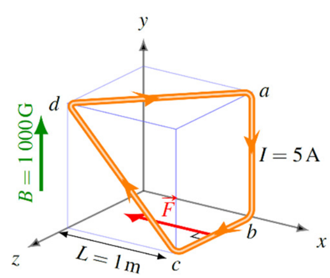
9. a) 3,016 mm b) $2,332 \times 10^{17}$ m/s² c) $7,146 \times 10^{-10}$ s
10. a) $1,149 \times 10^{6}$ m/s b) $1,093 \times 10^{-6}$ s
11. 6,24 cm
12. a) $v = 10^7$ m/s et $\theta = 42,1°$ b) $3,84 \times 10^{-8}$ s
13. a) 8,202 mm b) 2,26 mm

8.5 Le mouvement d'une charge dans des champs électrique et magnétique

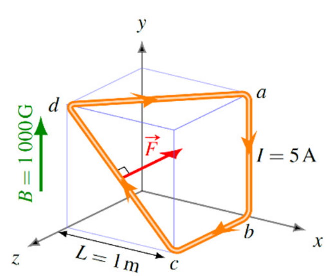
14. 3×10^{6} m/s
15. 0,02 T en sortant de la page
16. 3,316 cm

8.6 La force magnétique sur un courant

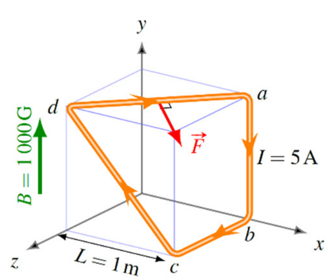
17. Fil de droite : 0,577 N qui sort de la feuille
    Fil du bas : 0 N
    Fil qui forme l'hypoténuse : 0,577 N qui entre dans la feuille
18. 49,4 G
19. Fil de *a* à *b* : 0 N
    Fil de *b* à *c* : 0,5 N



Fil de *c* à *d* : 0,5 N



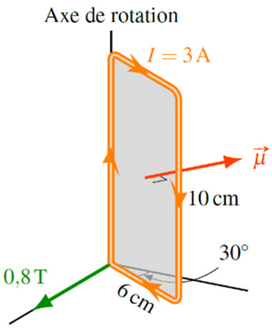
Fil de *d* à *a* : 0,7071 N



20. 0,24 N vers la droite
21. 4 A
22. 3500 m/s²

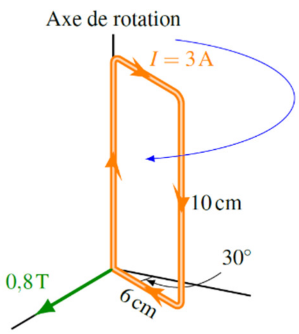
8.7 Une boucle de courant dans un champ magnétique uniforme

23. a) 0,018 Am²



b) 0,0072 Nm

c)



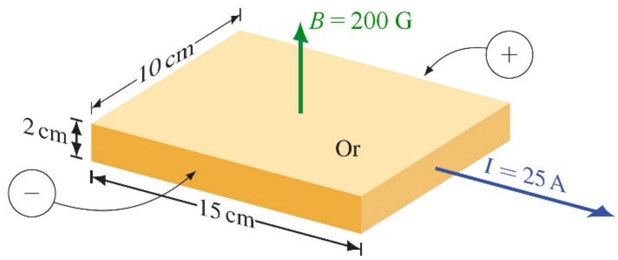
d) 0,00193 J

24. a) 6 Nm b) 1,608 J
25. 49

8.8 L'effet Hall

26. a) 2,645 x 10^{-9} V

b) Le côté + sur cette figure.



27. 0,945 T