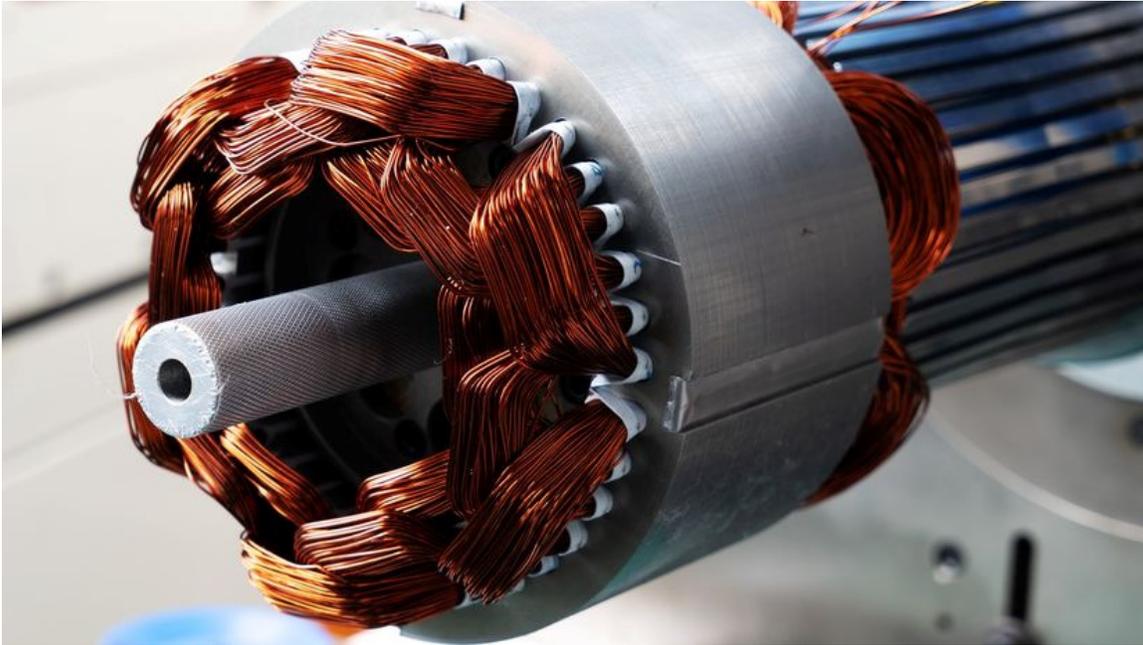


# 6 LA FORCE MAGNÉTIQUE

*Comment fonctionne un moteur électrique ?*



[electronics.howstuffworks.com/motor.htm](http://electronics.howstuffworks.com/motor.htm)

**Trouvez la réponse à cette question dans ce chapitre.**

## 6.1 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<sup>e</sup> 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](http://www.ehow.com/how_6317827_read-compass-rose.html)

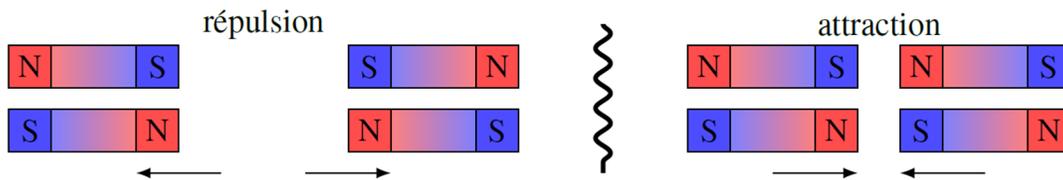
On s'est ensuite rendu compte assez rapidement que parfois les aimants s'attirent et parfois ils se repoussent. Avec quelques observations, on est rapidement arrivé à la conclusion suivante.

### 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

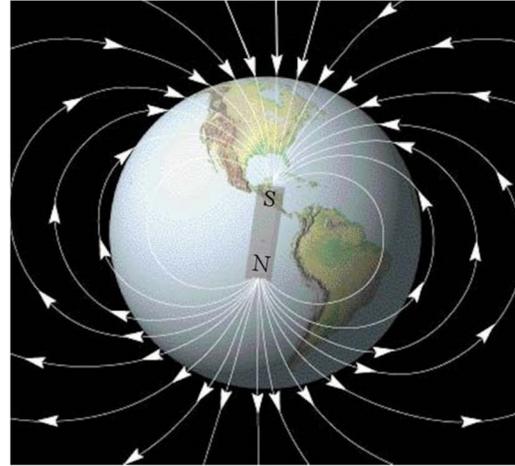


Il est fort probable que les Chinois connaissaient ces lois d'attraction et de répulsion, mais aucun texte ne les mentionne. Le plus vieux texte connu qui mentionne ces lois a été écrit par le Français Pierre de Maricourt en 1269. Beaucoup plus tard (par Mitchell en 1750, et de façon plus précise par 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.

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

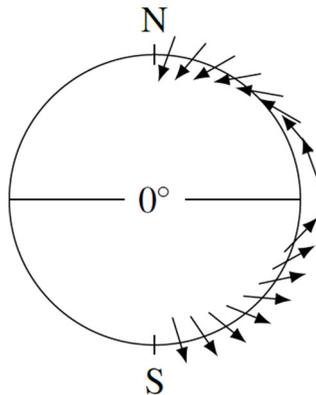
## La Terre est un aimant

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.



[www.thisoldearth.net/Geology\\_Online-1\\_Subchapters.cfm?Chapter=3&Row=4](http://www.thisoldearth.net/Geology_Online-1_Subchapters.cfm?Chapter=3&Row=4)

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.

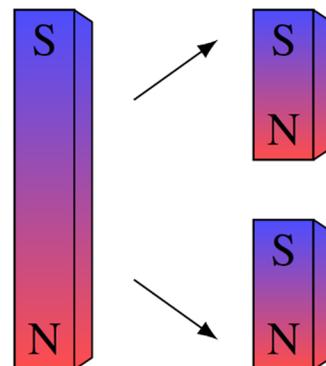


Gilbert a même fabriqué un aimant sphérique pour vérifier l'orientation d'un aimant tout autour de cette sphère. Il a alors pu constater que, en plus de s'orienter dans la direction nord-sud, la boussole pointe aussi vers le sol dans l'hémisphère nord et que plus on est près de l'Arctique, plus la boussole 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 apparaître 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.

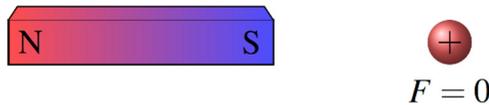
Malgré tous les efforts déployés (parce que certaines théories en physique des particules prédisent l'existence de monopôles magnétiques), on n'a jamais observé de monopôles magnétiques.

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.

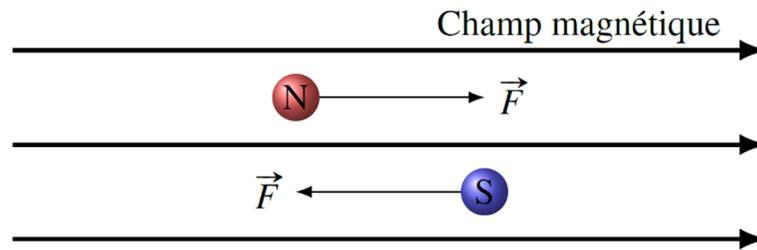


Encore aujourd'hui, les gens peuvent confondre l'électricité et le magnétisme. Impossible de faire une boussole en frottant une aiguille sur son linge. En frottant l'aiguille, on lui donne une charge électrique (et encore, il ne faut pas la tenir directement avec nos doigts, car on doit isoler les conducteurs 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). <https://physique.merici.ca/electricite/EDGE2.wmv>

Cela résume à peu près ce qu'on savait du magnétisme à la fin du 18<sup>e</sup> siècle.

## 6.2 LE CHAMP MAGNÉTIQUE

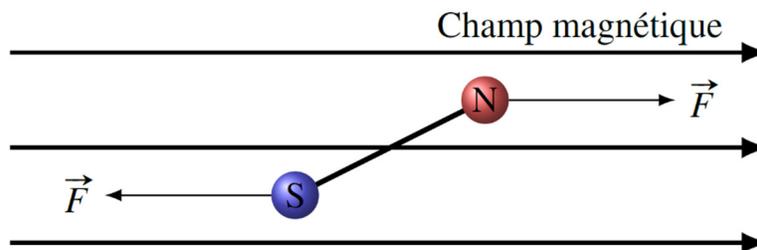
Comme en électricité, on va utiliser le concept de champ. On part de l'idée simple que si un pôle magnétique subit une force quand il est à un endroit, alors il y a un champ magnétique à cet endroit. On va noter ce champ  $B$ . (C'est une notation empruntée à Maxwell qui utilisait les lettres de  $A$  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.

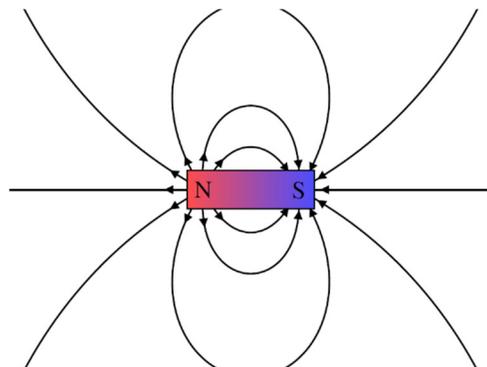
Vous voyez sur les figures qu'on va aussi utiliser les lignes de champ pour représenter le champ magnétique. Ces lignes de champ suivent encore une fois les règles suivantes.

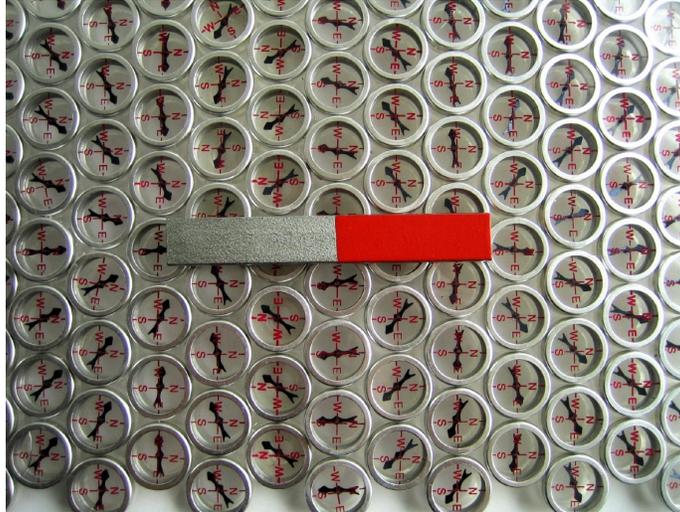
### Propriétés des lignes de champ

- 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 apparaître ou disparaître 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.

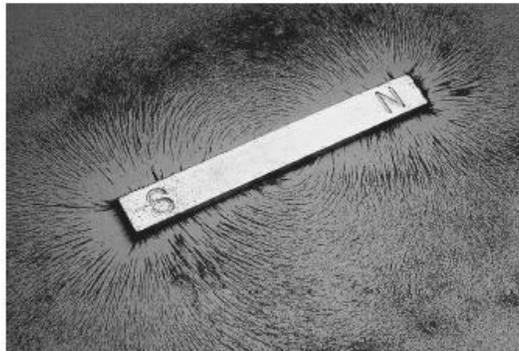
On peut voir sur l'image suivante que les boussoles s'orientent dans le sens du champ magnétique autour d'un aimant.





[www.pinterest.com/mommylonglegs36/science-experiments/](http://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.

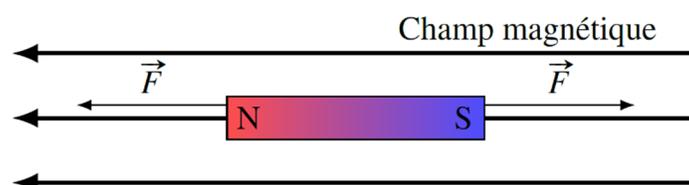


[www.chemistryexplained.com/Kr-Ma/Magnetism.html](http://www.chemistryexplained.com/Kr-Ma/Magnetism.html)

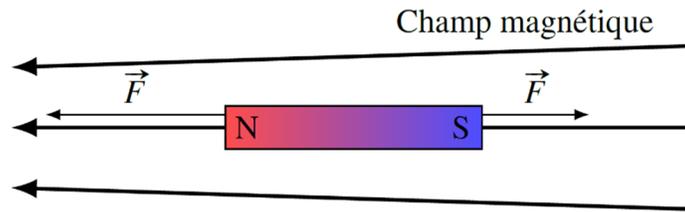
## L'attraction entre les aimants

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.

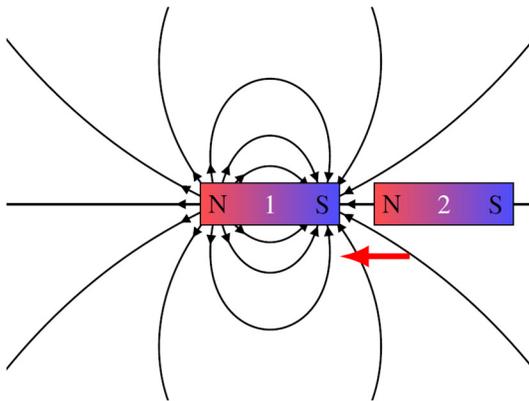


Dans le cas illustré sur la figure, la force sur le pôle nord est maintenant plus grande que celle sur le pôle sud, car le champ est plus grand du côté du pôle nord. Les forces ne s'annulent plus exactement et l'aimant est attiré vers la gauche. On pourrait examiner plusieurs situations pour se rendre 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

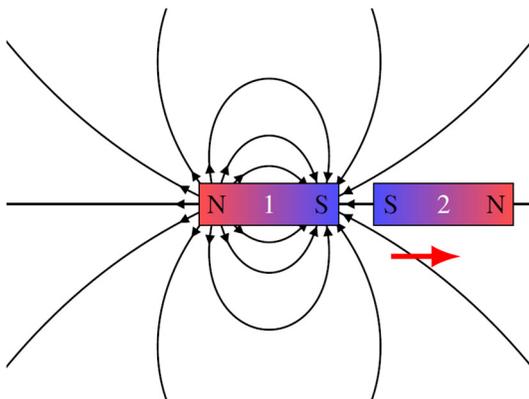
La force sur le dipôle aligné avec le champ est toujours vers l'endroit où le champ est le plus grand.

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



nette vers la gauche sur l'aimant 2 et l'aimant 2 est donc attiré par l'aimant 1.

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



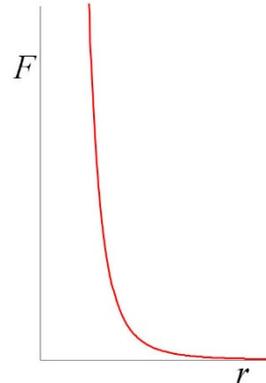
Prenons maintenant la situation dans laquelle on approche le pôle sud d'un aimant du pôle sud d'un autre aimant. Sur la figure, on voit le champ fait par l'aimant 1. L'aimant 2 est donc placé dans un champ magnétique non uniforme dirigé vers la gauche. Il y a une force vers la gauche sur pôle nord de 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 sûrement remarqué cette force répulsive qui apparaît 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  $F = (\text{charge magnétique}) \cdot B$ ), 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.

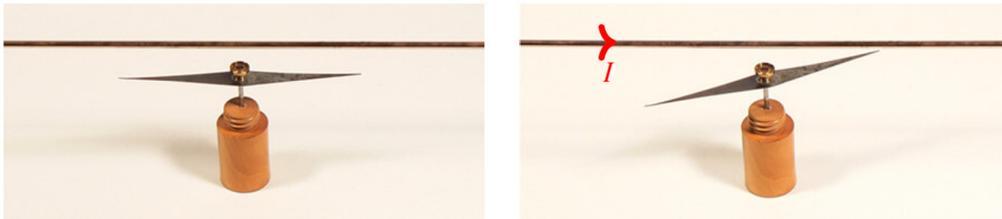
On va donc utiliser une autre approche pour définir le champ. Cette approche est basée sur un autre effet du champ magnétique, découvert par hasard en 1820 : le champ magnétique exerce une force sur les **charges électriques en mouvement**.

## 6.3 LA FORCE MAGNÉTIQUE SUR UNE CHARGE ÉLECTRIQUE EN MOUVEMENT

### Les courants dévient les boussoles

Au 18<sup>e</sup> 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.

<https://www.youtube.com/watch?NR=1&v=NwEJBIneNE>

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.

<https://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.

<https://www.youtube.com/watch?v=owI6Ya73yKl>

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  $\theta$  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)

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

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  $50 \mu\text{T}$  (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

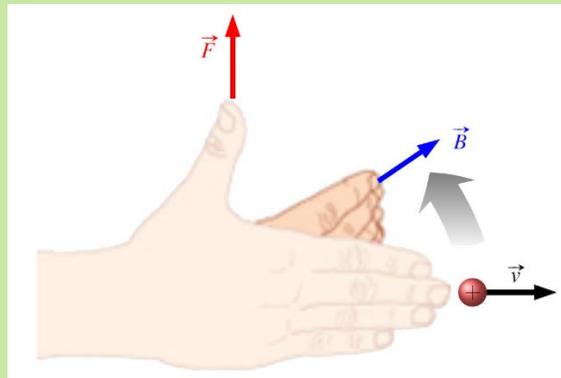
surface d'un aimant au néodyme (qui sont très difficiles à séparer à mains nues) ou dans un appareil à résonance magnétique utilisé en médecine.

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.

<https://www.youtube.com/watch?v=JZAnghOVnh0>

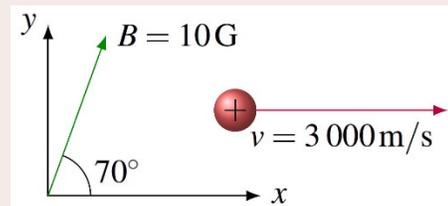
Avec de tels produits vectoriels, nous aurons souvent des vecteurs dans les trois dimensions de l'espace. Il arrivera donc qu'il y ait des vecteurs qui sortent de la page ou qui entrent dans la page et il peut être utile de rappeler la notation pour ces vecteurs.

 ou  $\bullet$   
Vecteur qui  
sort de la page

 ou  $\times$   
Vecteur qui  
entre dans la page

### Exemple 6.3.1

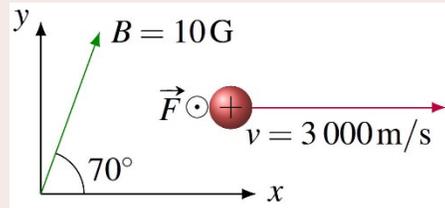
Un proton se déplace vers la droite à 3000 m/s dans un champ de 10 G orienté dans la direction indiquée sur la figure. Quelle est la force sur ce proton ?



La force sur le proton est

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

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



Notez que si la particule se dirige dans la direction du champ, la force est nulle puisque l'angle sera alors de  $0^\circ$ . Il est donc très possible qu'une charge en mouvement dans un champ ne subisse pas de force.

## 6.4 LA FORCE MAGNÉTIQUE SUR UN COURANT

### La formule de la force

Revenons à la force exercée sur un fil. Dans un courant, il y a plusieurs électrons qui se déplacent avec la vitesse de dérive. Si on additionne la force sur tous les électrons qui se déplacent, on arrive à la formule suivante.

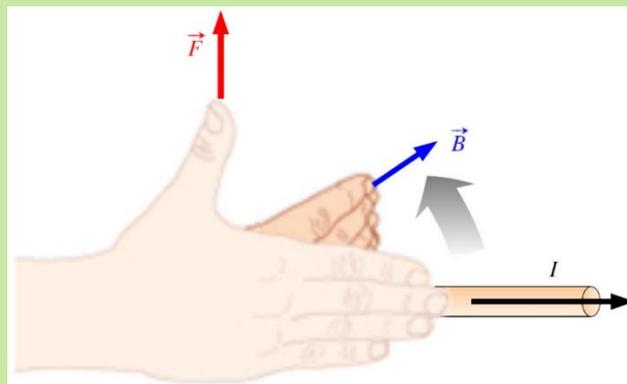
#### Grandeur de la force magnétique sur un courant

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

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

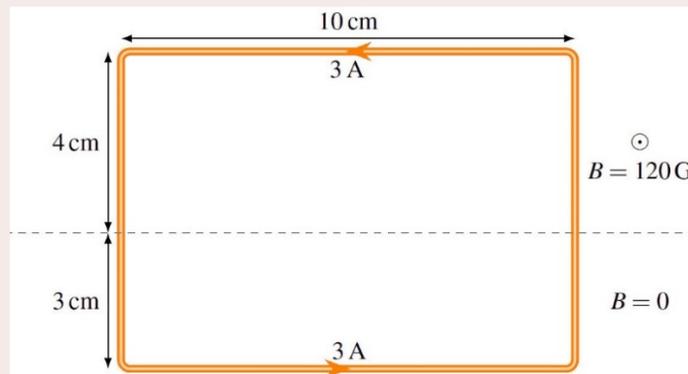
- 1) On met nos doigts de la main droite dans le sens du courant.
- 2) On plie nos doigts vers le champ (cela peut demander de tourner la main pour qu'on puisse plier nos doigts dans cette direction).
- 3) Le pouce pointe alors dans la direction de la force.



On peut utiliser cette formule pour un bout de fil tant que  $B$ ,  $\theta$  et l'orientation du fil sont constants. Si  $B$  ou  $\theta$  ou l'orientation du fil varient, on sépare le fil en morceaux où  $B$ ,  $\theta$  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.

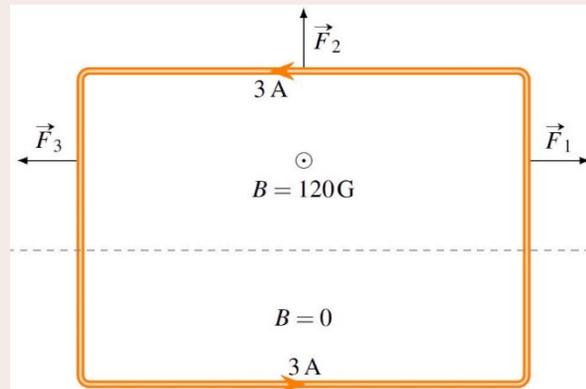
### Exemple 6.4.1

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  $\theta$  sont tous identiques pour ces deux bouts de fil.)

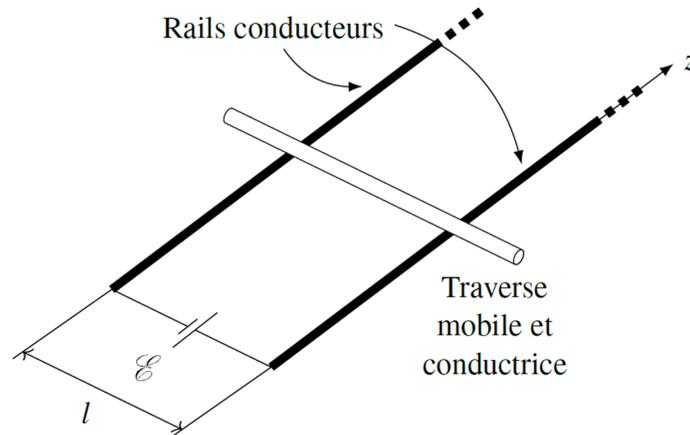
Il ne reste donc qu'à calculer  $F_2$ , ce qui donne

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

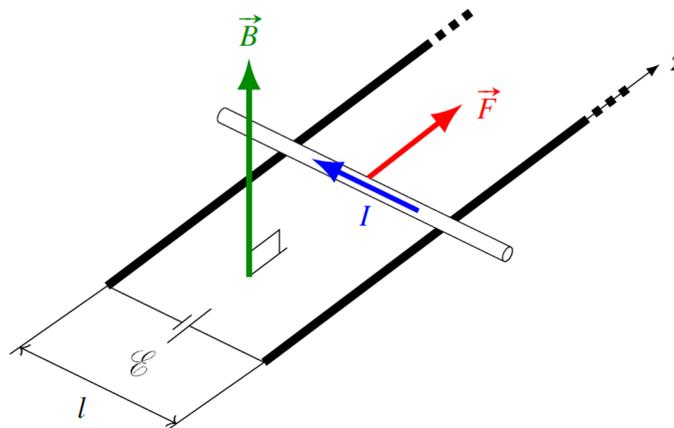
La force nette est donc 0,0036 N vers le haut.

## 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 et lui donner beaucoup de vitesse. En reliant la tige à un objet, on peut accélérer à peu près n'importe quoi ainsi. Voici un test de ce qu'on peut faire avec cette force.

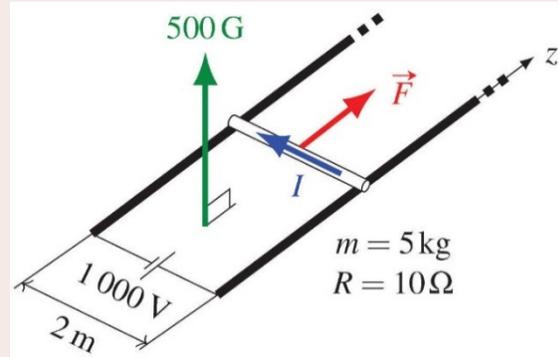
[https://www.youtube.com/watch?v=O2QqOvFMG\\_A](https://www.youtube.com/watch?v=O2QqOvFMG_A)

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 paraît pas beaucoup, mais la catapulte est fixée à l'avion sur la roue avant. Quand l'avion quitte le sol, elle se détache.)

<https://www.youtube.com/watch?v=eL9tmes8eu0>

### Exemple 6.4.2

Une tige mobile de 5 kg et de 2 m de long est sur des rails. La résistance de la tige est de  $10 \Omega$  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

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

La force sur la tige est donc

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

L'accélération est donc

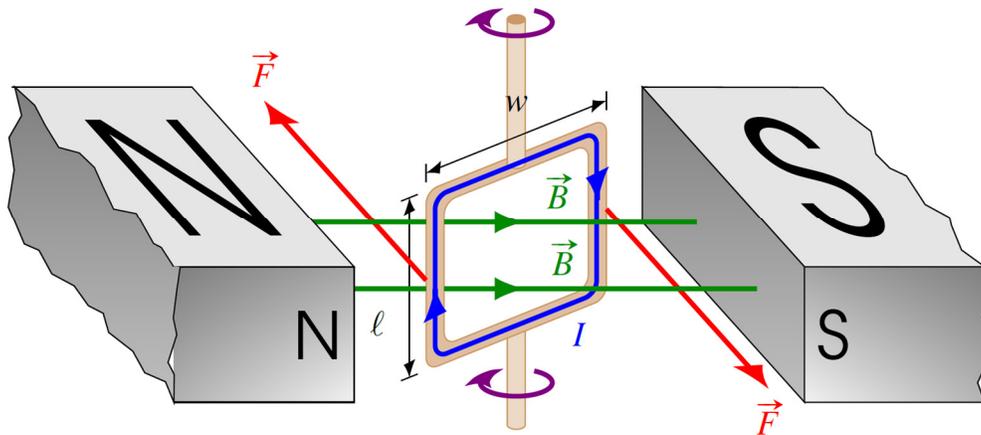
$$\begin{aligned} a &= \frac{F}{m} \\ &= \frac{10\text{N}}{5\text{kg}} \\ &= 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \end{aligned}$$

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.

## 6.5 UNE BOUCLE DE COURANT DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE UNIFORME

### Moment de force nette sur la boucle de courant

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.

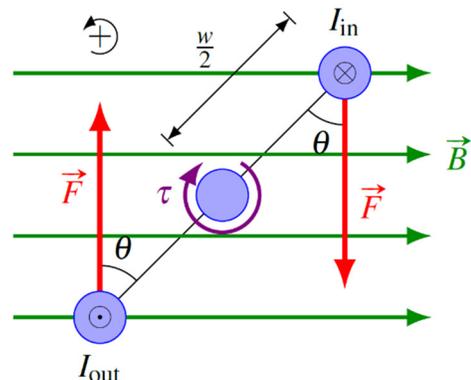


On voit très bien que les deux forces montrées sur la figure cherchent à faire tourner la boucle dans le sens indiqué par les flèches rouges. (Il y a aussi une force vers le haut sur le dessus de la boucle et une force vers le bas sur le dessous de la boucle, mais ces deux forces ne font pas tourner 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

$$F = I\ell B \sin 90^\circ = I\ell B$$

On a donc

$$\tau = -I\ell B w \sin \theta$$

Comme  $\ell w$  est l'aire de la boucle  $A$ , on a

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

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.

### Grandeur du moment dipolaire magnétique

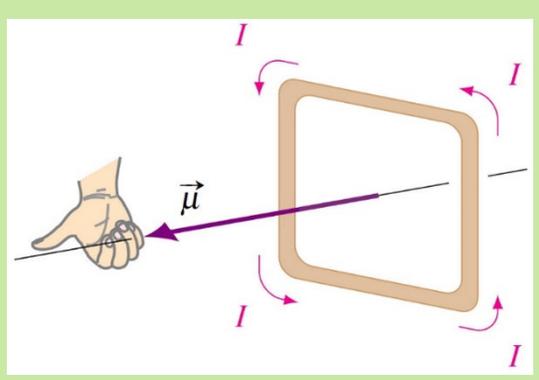
$$\mu = NAI$$

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

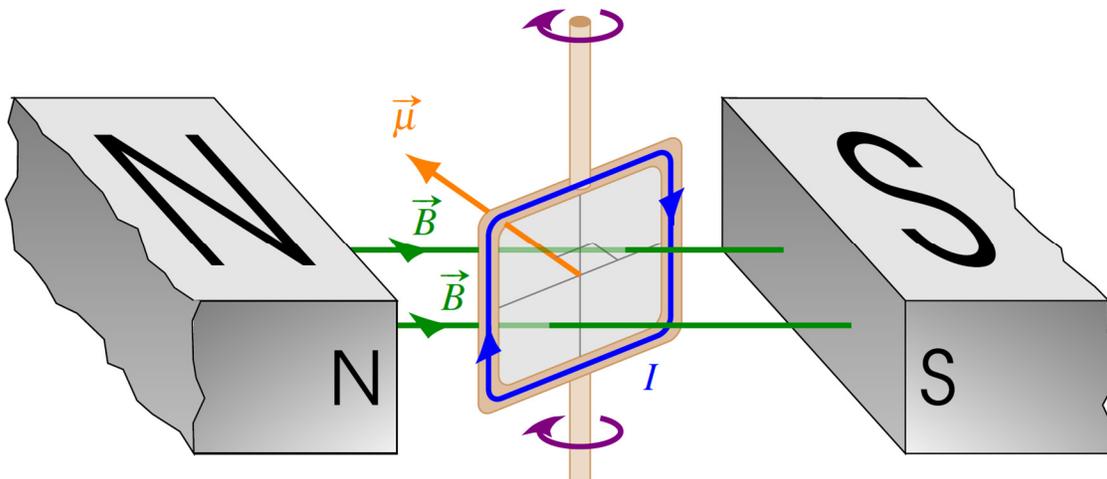
### Direction du moment dipolaire magnétique

Il est perpendiculaire au plan de la boucle

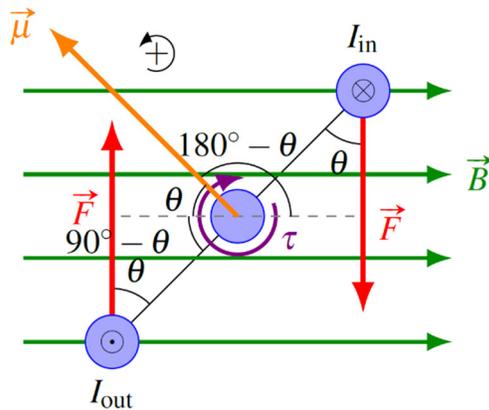
On place ses doigts de la main droite dans le sens du courant dans la boucle. Le pouce pointe alors dans la direction du moment dipolaire magnétique.



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 la rotation de la boucle se fait dans le sens qui permet au vecteur  $\mu$  de 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  $\theta$ . 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  $\mu$  et le champ magnétique  $B$ . Cet angle est  $180^\circ - \theta$ , mais cela ne change rien parce que  $\sin(180^\circ - \theta) = \sin \theta$ .

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

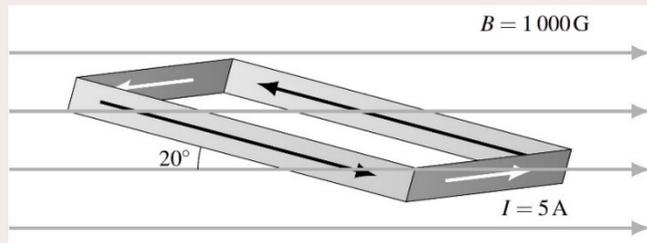
**Moment de force sur une boucle de courant dans un champ magnétique**

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

Le moment de force cherche à aligner le moment dipolaire magnétique  $\mu$  avec le champ magnétique  $B$ .

**Exemple 6.5.1**

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



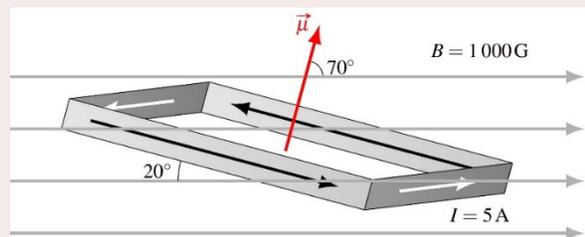
Pour trouver le moment de force, on doit connaître le moment dipolaire magnétique  $\mu$  et l'angle entre  $\mu$  et  $B$ .

Le moment dipolaire magnétique de la boucle est

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

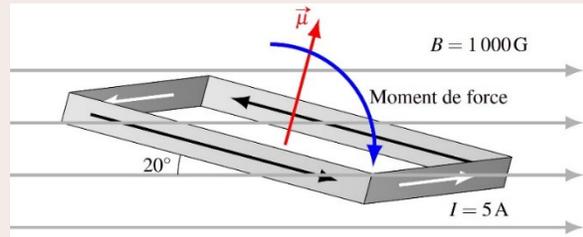
Selon cette figure, il y a  $70^\circ$  entre  $\mu$  et  $B$ .

Le moment de force est donc



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

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



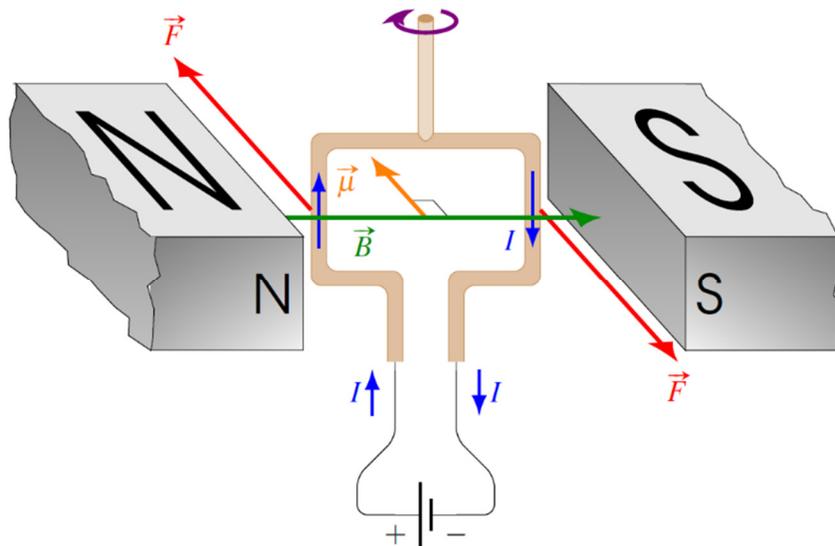
## 6.6 LE MOTEUR ÉLECTRIQUE

Les moteurs électriques sont très importants en aviation, car ils ont plusieurs applications dans nos avions. En voici quelques-unes :

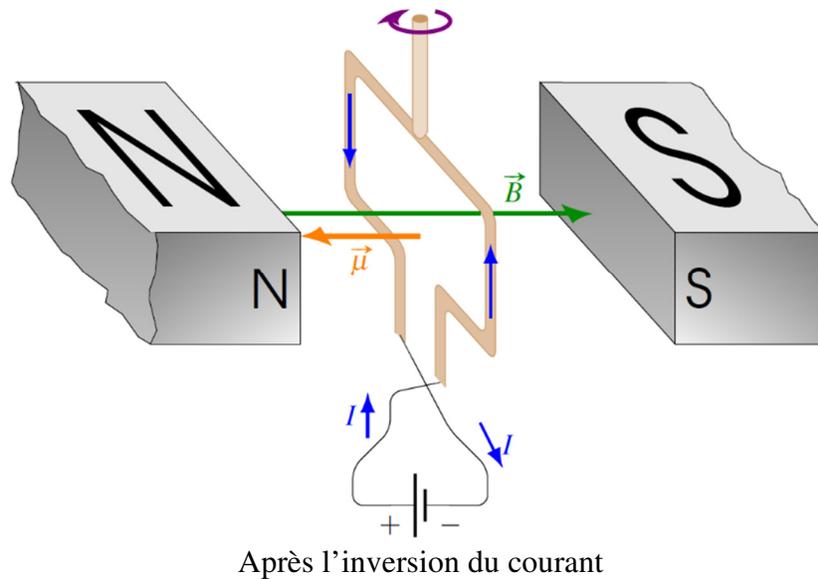
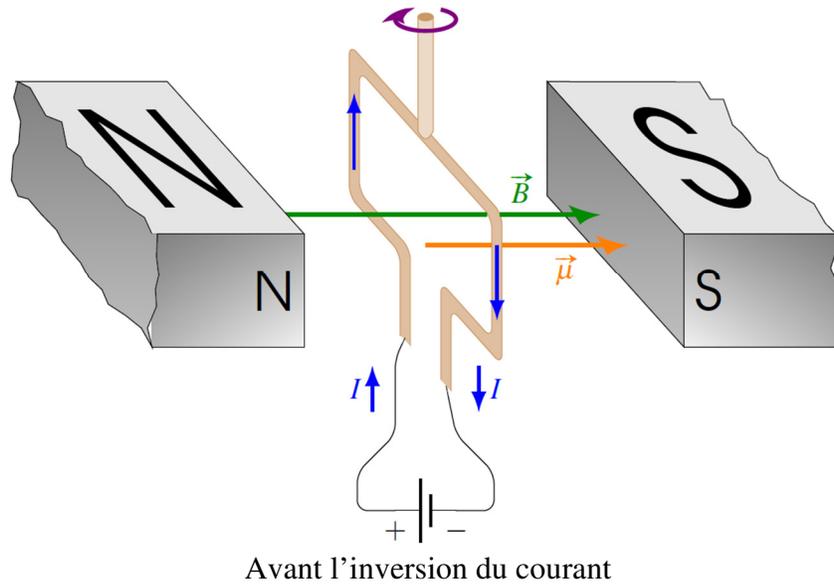
- Démarreurs
- Vannes de régulation
- Train d'atterrissage
- Volets
- Compensateur
- Commandes de vol
- Servos
- Pompes à carburant
- Pompes hydrauliques
- Pompes à vide
- Appareils de navigation (autopilote)

### Principe de fonctionnement

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  $\mu$  s'aligne avec le champ. Ici, la boucle tourne dans le sens indiqué par la flèche circulaire en haut de l'axe de rotation.



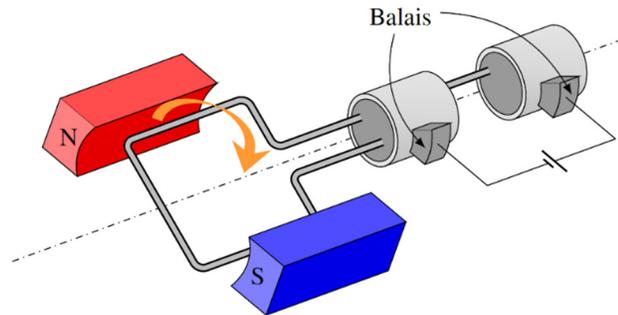
Sauf qu'une fois que  $\mu$  est aligné avec le champ, la boucle cesse sa rotation. C'est alors qu'on va changer le sens du courant dans la boucle. Cela inverse la direction de  $\mu$ , et il n'est plus aligné avec le champ. La boucle doit donc faire un demi-tour pour réaligner  $\mu$  avec  $B$ .



Une fois que la boucle a fait un demi-tour pour que  $\mu$  s'aligne à nouveau avec le champ, on inverse une autre fois le sens du courant, ce qui change la direction de  $\mu$  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>

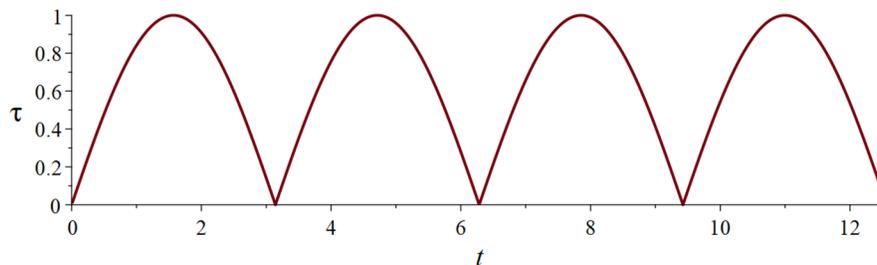
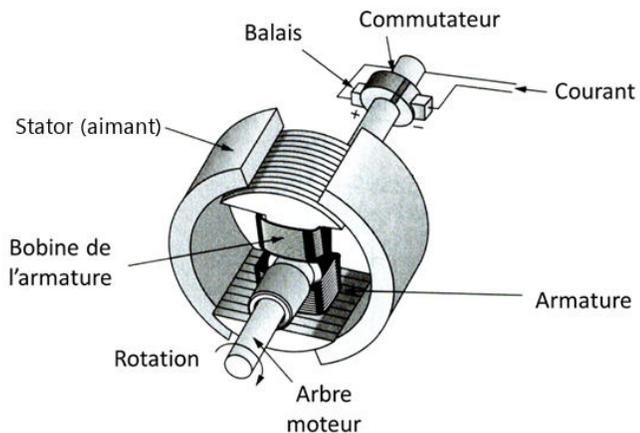
On peut voir sur cette animation comment on change le sens du courant chaque demi-tour avec les balais. On change la direction du courant avec un anneau déparé en 2 parties. Cet anneau est le *commutateur*.

## Des moteurs plus raffinés

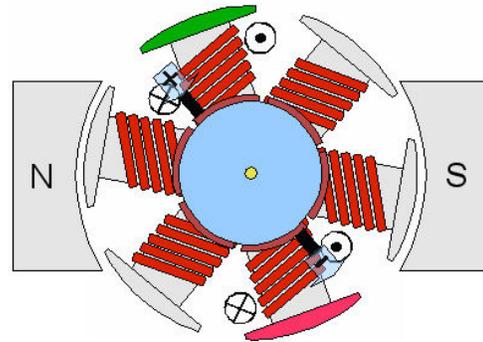
La figure de droite montre un peu mieux à quoi ressemble un vrai moteur. On reconnaît les aimants, les bobines de fil et les balais.

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.

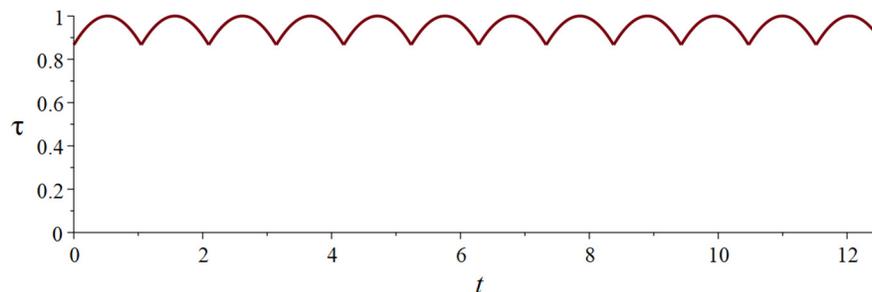


On évite une telle variation de moment de force en utilisant plusieurs bobines de fil légèrement décalées l'une par rapport à l'autre. En envoyant le courant seulement dans la bobine de fil qui est placée à la bonne place pour être au maximum du moment de force, le moteur est presque toujours à son moment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



homofaciens.de/bilder/technik/dc-electric-motor-wound-stator\_03.htm

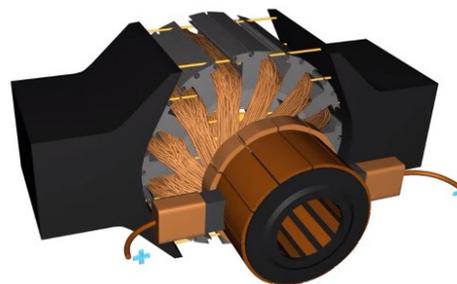
À l'instant montré sur la figure, le courant passe dans un seul des 3 ensembles de bobines (celle avec les bouts vert et rouge) et cette bobine cherche à s'aligner avec le champ. Il y a du courant dans une bobine seulement quand le  $\mu$  de cette bobine fait un angle entre  $120^\circ$  et  $60^\circ$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



On a vu que la connexion électrique entre la source et le commutateur est faite à partir de balais. Ces balais qui frottent sur le commutateur s'usent et doivent être remplacés périodiquement. Il y a souvent des étincelles au contact des balais et du commutateur, ce qui peut affecter de l'équipement électronique tel que les radios. Un autre type de moteur, appelé moteurs sans balais, ou moteur à commutation électronique, utilise un interrupteur électronique au lieu des balais. Ces moteurs sont plus efficaces, requièrent moins d'entretien, et ne génèrent pas d'étincelles. Ils sont cependant plus coûteux.

Le *rapport puissance/poids* des moteurs électriques d'avion doit être élevé. Un moteur doit donc générer un maximum de puissance pour un poids minimum. À cette fin, on obtient une grande puissance en opérant le moteur à haute vitesse et avec un courant élevé. Ceci entraîne une production de chaleur dans le moteur, nécessitant l'utilisation de composants résistants à la chaleur, particulièrement dans l'isolant des fils de l'armature, et l'utilisation du flux d'air dans lequel passe l'avion (ram air) ou de ventilateurs pour refroidir les moteurs. La vitesse de rotation pose aussi le problème des forces centripètes importantes dans les composants du moteur. On minimise ce problème en gardant le diamètre de l'armature relativement plus petit en comparaison avec sa longueur.

Les moteurs électriques sont aussi classifiés selon leur période d'utilisation, soit continue (pompe à essence) ou intermittente (volets, train d'atterrissage).

## RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

**Grandeur de la force magnétique sur une charge en mouvement**

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

**Grandeur de la force magnétique sur un courant**

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

**Grandeur du moment dipolaire magnétique**

$$\mu = NAI$$

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

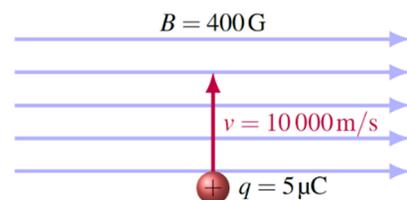
$$\tau = \mu B \sin \theta$$

Le moment de force cherche à aligner le moment dipolaire magnétique  $\mu$  avec le champ magnétique  $B$ .

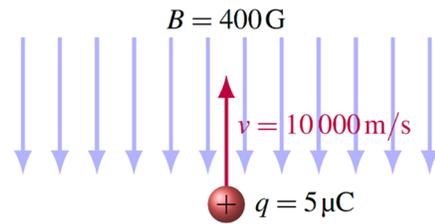
## EXERCICES

### 6.3 La force magnétique sur une charge électrique en mouvement

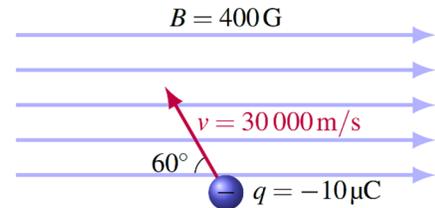
1. Quelle est la force (grandeur et direction) sur cette charge ?



2. Quelle est la force sur cette charge ?



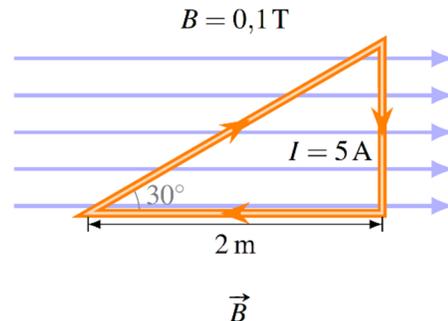
3. Quelle est la force (grandeur et direction) sur cette charge ?



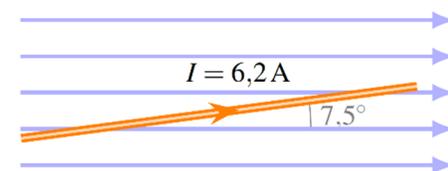
4. Une charge de 8 mC se déplace à  $10^6$  m/s dans un champ magnétique de 0,1 G. Quel est l'angle entre le champ magnétique et la vitesse si la charge subit une force dont la grandeur est de 0,06 N ?

### 6.4 La force magnétique sur un courant

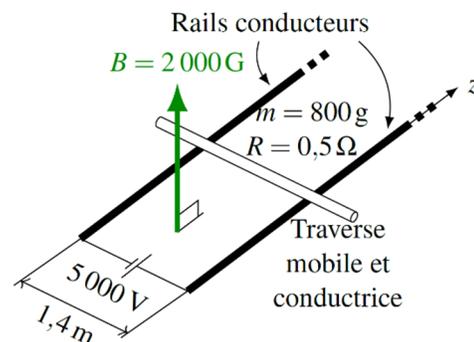
5. Quelle est la force (grandeur et direction) sur chacune des portions droites de ce fil ?



6. 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 ?



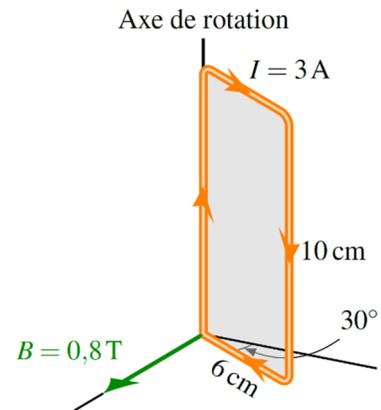
7. Quelle est l'accélération de cette tige dans ce moteur linéaire ? (Les rails n'ont pas de résistance.)



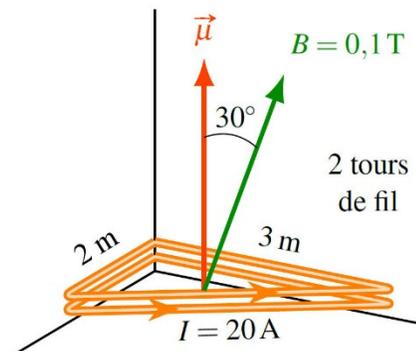
## 6.5 Une boucle de courant dans un champ magnétique uniforme

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

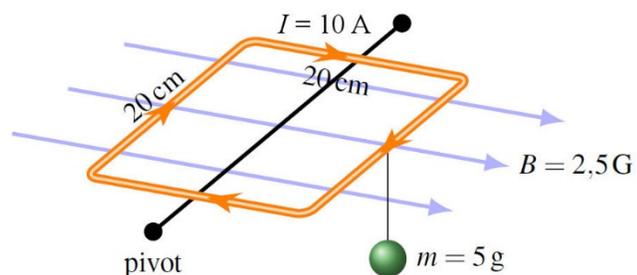
- Quel est le moment magnétique (grandeur et direction) du cadre ?
- Quel est le moment de force sur le cadre ?
- Dans quel sens le moment de force cherche-t-il à faire tourner le cadre ?



9. Voici une boucle de fil initialement immobile dans un champ magnétique. Quel est le moment de force sur la boucle ?



10. 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 tour de fil dans la boucle ?



## RÉPONSES

### 6.3 La force magnétique sur une charge électrique en mouvement

- 0,002 N qui entre dans la page.

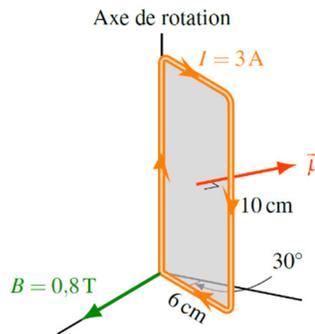
2. 0 N
3. 0,0104 N qui sort de la page
4. 48,6°

### 6.4 La force magnétique sur un courant

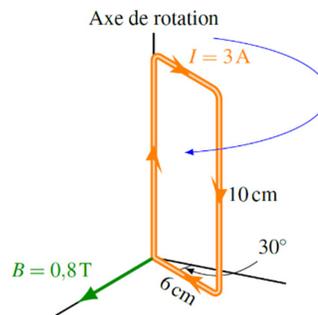
5. Fil de droite : 0,577 N qui sort de la feuille  
 Fil du bas : 0 N  
 Fil qui forme l'hypoténuse : 0,577 N qui entre dans la feuille
6. 49,4 G
7. 3500 m/s<sup>2</sup>

### 6.5 Une boucle de courant dans un champ magnétique uniforme

8. a) 0,018 Am<sup>2</sup>



- b) 0,0072 Nm
- c)



9. 6 Nm
10. 49