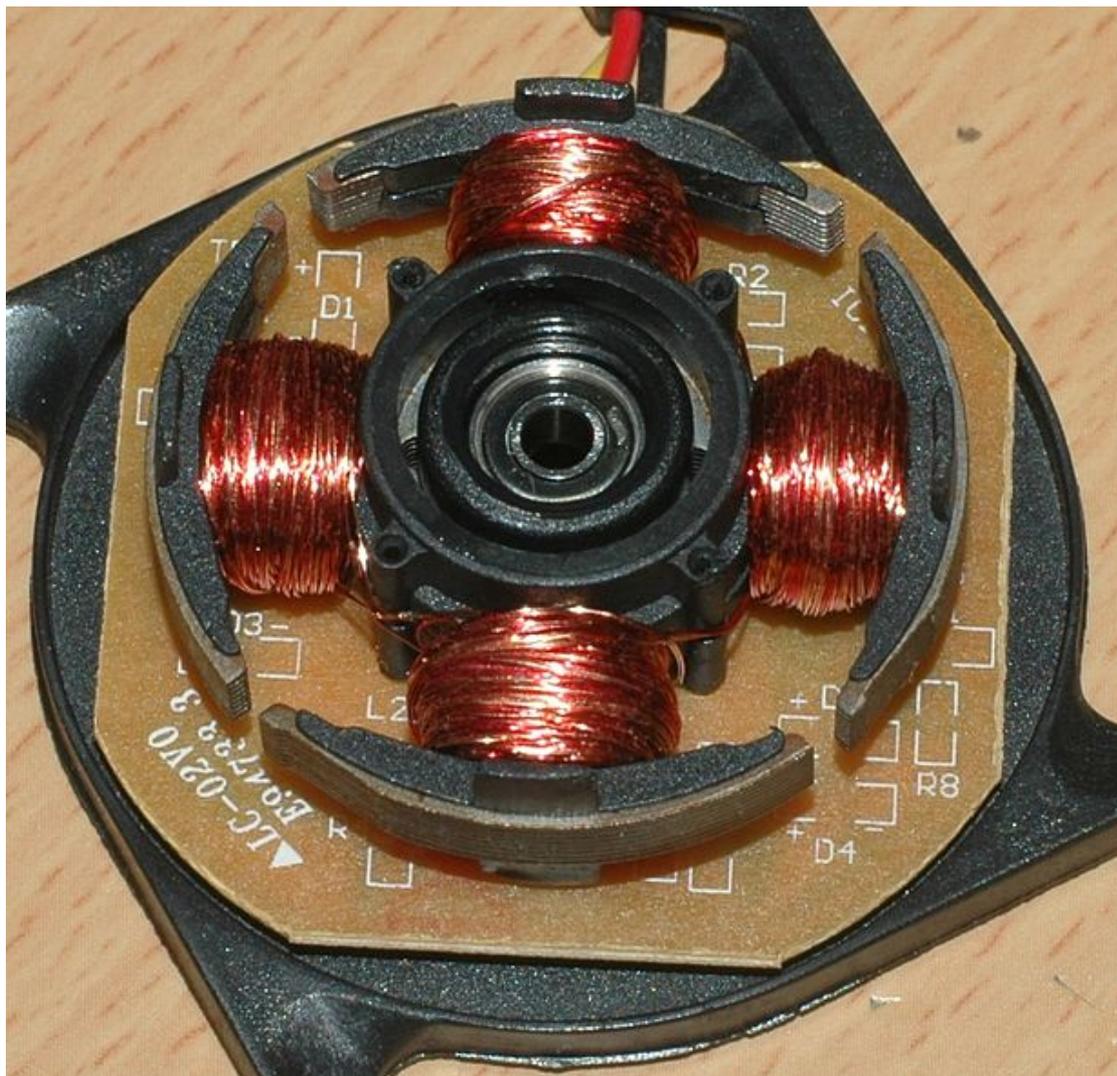


# ACTION D'UN CHAMP MAGNETIQUE



Les 4 bobines ci contre constituent les 4 pôles du stator de ce moteur électrique qui permet de faire tourner l'ailette de refroidissement d'un ventilateur d'ordinateur (le rotor a été retiré).

## Rappels

Tout champ magnétique est dû à des charges en mouvement

✓ **Courant électrique** (écoulement de charges dans un conducteur)

✓ **Aimant.** Il y a des courants électriques ordonnés dans la matière à l'échelle atomique: mouvement des électrons autour du noyau et le spin des électrons, c'est-à-dire leur « rotation » sur eux-mêmes

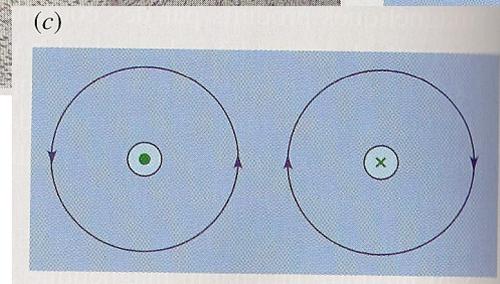
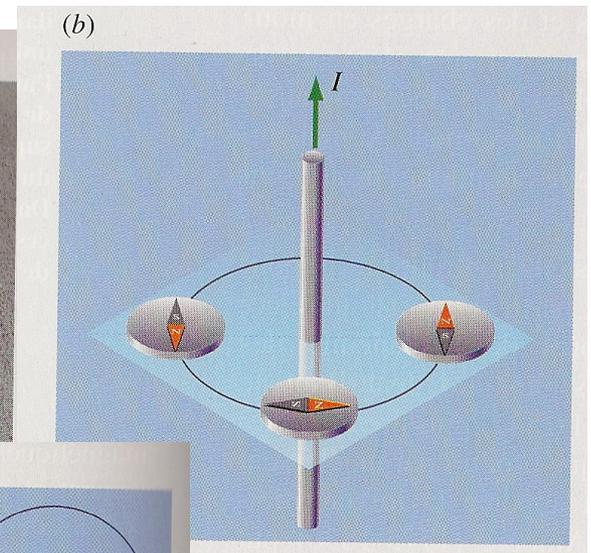
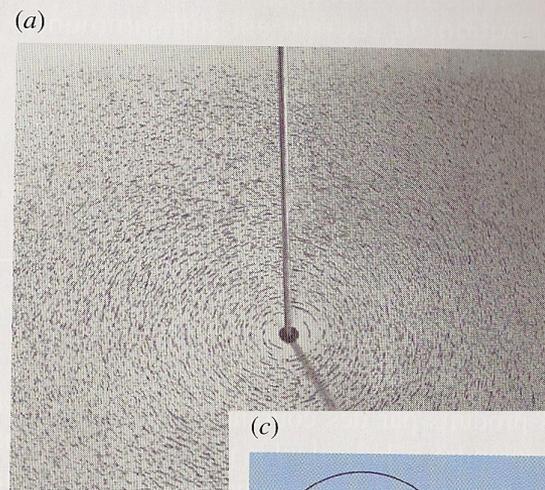
### a) Champ magnétique créé par un long fil conducteur rectiligne

#### Figure 9.1 ►

(a) La configuration de la limaille de fer autour d'un long conducteur rectiligne parcouru par un courant. Par définition, les lignes de champ suivent l'orientation de la limaille et ont donc la forme de cercles.

(b) La forme circulaire des lignes de champ magnétique peut également être mise en évidence à l'aide d'une boussole.

(c) Une des lignes de champ magnétique associée à un courant sortant de la page (point) et entrant dans la page (croix).



# 1-Expression du champ magnétique de distributions simples de courant

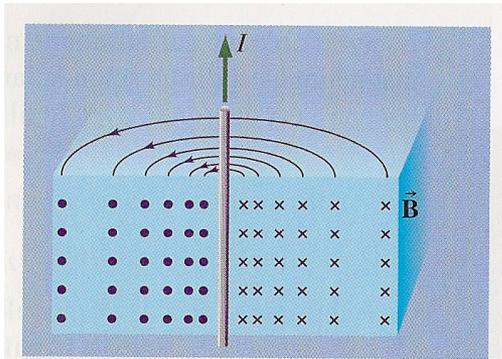


Figure 9.2 ▲

La densité des lignes de champ magnétique diminue avec la distance à partir du conducteur.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{u}_\theta$$

$r$  = distance au fil

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m.A}^{-1}$  (perméabilité du vide)

$\vec{u}_\theta$  = vecteur orthoradial en coordonnées polaires

## b) Champ magnétique produit à l'intérieur d'un long solénoïde

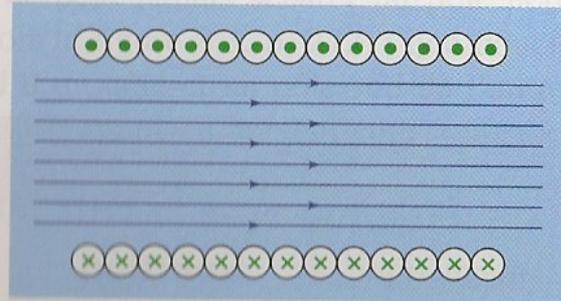
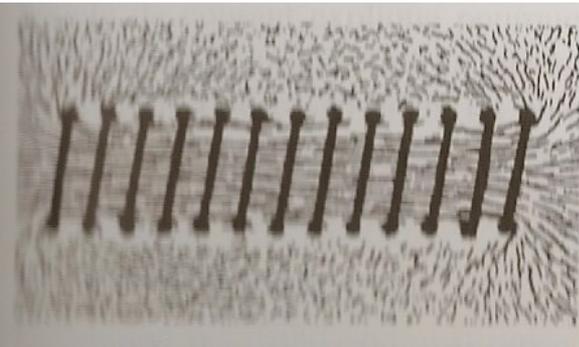


Figure 9.17 ◀

Le champ magnétique à l'intérieur d'un long solénoïde est uniforme. À l'extérieur, il est pratiquement nul.

$$\vec{B} = \mu_0 n I \vec{u}$$

$n$  = nombre de spires par unité de longueur

$\vec{u}$  = vecteur unitaire orienté le long des lignes de champ

## a) Relation entre le courant et la vitesse de dérive des électrons dans un conducteur

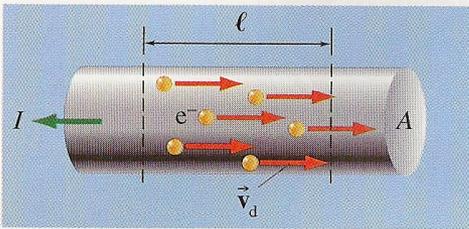


Figure 6.8 ▲

Pour calculer le courant en fonction du mouvement des électrons, on néglige leur mouvement aléatoire et on ne tient compte que de la faible vitesse de dérive acquise par le « gaz d'électrons libres » dans son ensemble.

- $n$  = nombre d'électrons par unité de volume
- $v_d$  = vitesse de dérive moyenne des électrons
- $\Delta Q = n(A\ell)e$  = charge totale (en valeur absolue  $q = -e$ ) dans le cylindre de longueur  $\ell$  et de section  $A$
- $I = \Delta Q / \Delta t$  avec  $\Delta t = \ell / v_d$  le temps que met une charge pour franchir la distance  $\ell$

$$I = nAev_d$$

## b) Force magnétique sur un conducteur parcouru par un courant

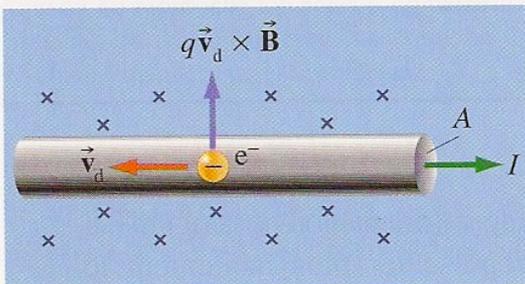


Figure 8.10 ▲

Lorsqu'un courant circule dans un fil, la force magnétique sur les électrons en mouvement est transmise au fil.

- $\vec{F}_\ell = -e\vec{v}_d \wedge \vec{B} \Leftrightarrow F_\ell = ev_d B$  = force de Lorentz sur un seul électron
- $F_L = n(A\ell)ev_d B$  = force de Lorentz sur tous les électrons de la longueur du fil  $\ell$
- Avec l'expression précédente du courant et si  $\theta$  est l'angle entre le sens du courant et le champ:  $F_L = I\ell B \sin\theta$ .

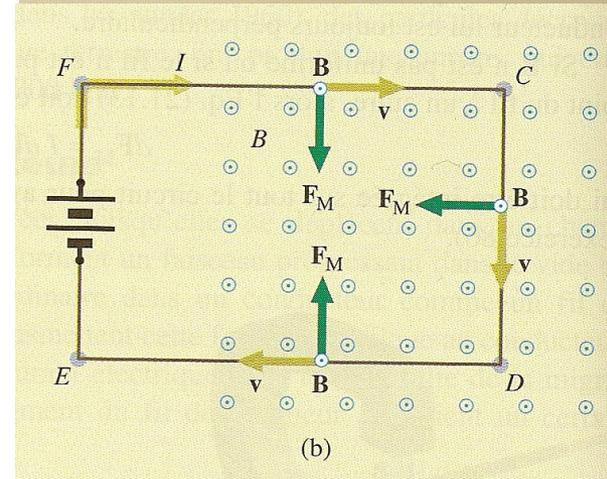
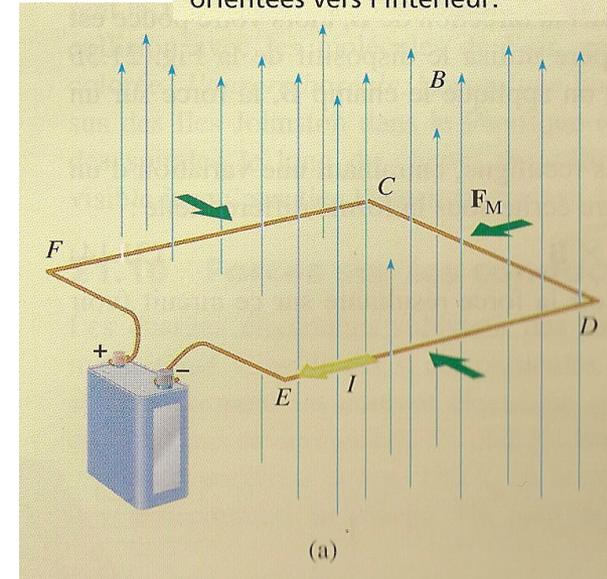
Force magnétique agissant sur un élément parcouru par un courant (force de Laplace)

$$\vec{F}_L = I\vec{\ell} \wedge \vec{B}$$

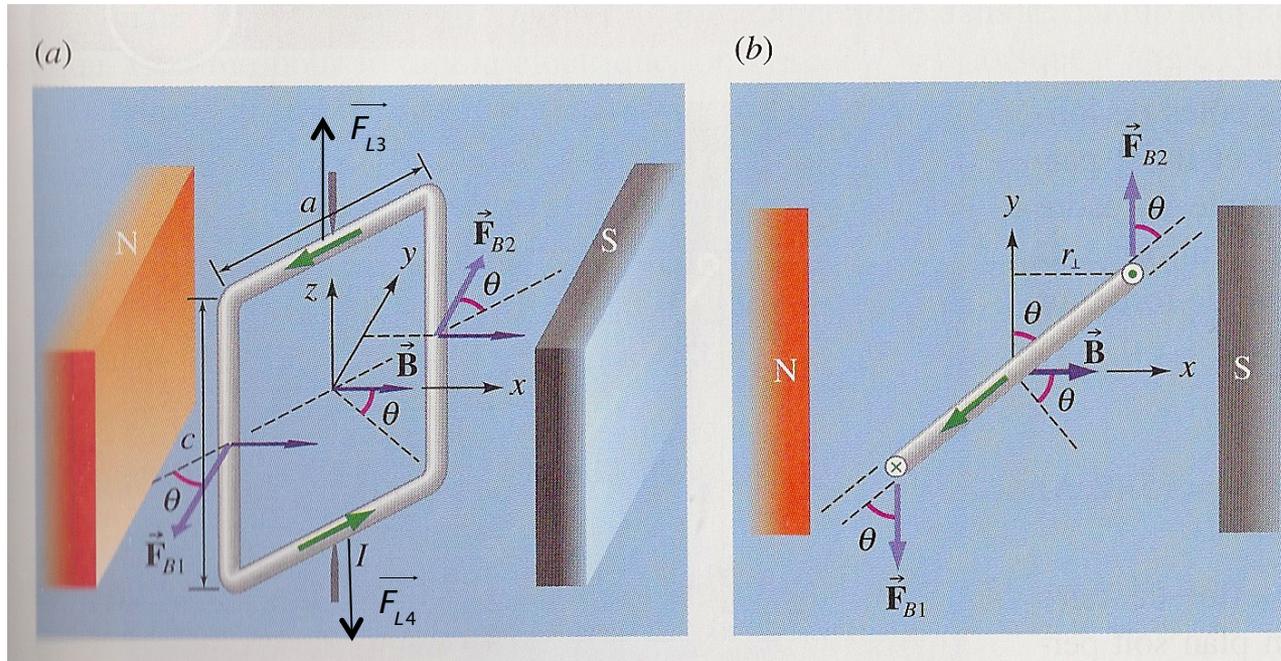
## Exercice d'application

Une spire rectangulaire, plate et horizontale est placée dans un champ magnétique uniforme et vertical de  $0,10\text{ T}$  (Fig. 21.36). Le côté  $FC$  mesure  $30\text{ cm}$  et le côté  $CD$  mesure  $20\text{ cm}$ . Déterminer la force totale agissant sur la spire lorsqu'elle transporte un courant de  $1,0\text{ A}$ .

**Figure 21.36** (a) Une spire rectangulaire transportant un courant dans un champ magnétique vertical et uniforme. (b) Les forces sur les segments métalliques sont partout orientées vers l'intérieur.



# 3-Couple et moment de force sur une spire (boucle) de courant



On considère une spire rectangulaire plongée dans un champ magnétique uniforme.

**Figure 8.17** ◀  
 Un cadre parcouru par un courant, libre de pivoter dans un champ magnétique. Les forces magnétiques agissant sur les côtés verticaux produisent un moment de force par rapport à l'axe central. (a) Le cadre vu de côté ; (b) le cadre vu d'en haut.

$$\left. \begin{aligned} \vec{F}_{L1} &= I(-c\vec{k}) \wedge (B\vec{i}) = -IcB\vec{j} \\ \vec{F}_{L2} &= I(c\vec{k}) \wedge (B\vec{i}) = IcB\vec{j} \end{aligned} \right\} \vec{F}_{L1} + \vec{F}_{L2} = \vec{0} \text{ mais peut faire tourner la spire autour de l'axe } z \text{ et forme un couple} \Rightarrow M_z(\vec{F}_{L1} + \vec{F}_{L2}) \neq 0$$

$$\left. \begin{aligned} \vec{F}_{L3} &= IaB\vec{k} \\ \vec{F}_{L4} &= -IaB\vec{k} \end{aligned} \right\} \vec{F}_{L3} + \vec{F}_{L4} = \vec{0} \text{ et n'a pas tendance à faire tourner la spire autour de l'axe } z \Rightarrow M_z(\vec{F}_{L3} + \vec{F}_{L4}) = 0$$

Moment du couple (on dit souvent couple par abus de langage) exercé sur la spire par rapport à l'axe de rotation:

$$M_z(\vec{F}_{L1} + \vec{F}_{L2}) = M_z(\vec{F}_{L1}) + M_z(\vec{F}_{L2}) = (IcB) \times \underbrace{\left(\frac{a}{2} \sin\theta\right)}_{\text{bras de levier}} + (IcB) \times \underbrace{\left(\frac{a}{2} \sin\theta\right)}_{\text{bras de levier}} = 2(IcB) \left(\frac{a}{2} \sin\theta\right) = I \underbrace{S}_{=ac=\text{surface de la spire}} B \sin\theta$$

### 3-Couple et moment de force sur une spire (boucle) de courant

Pour un cadre comportant  $N$  spires, le module du moment de force est  $N$  fois plus grand donc:

Moment des forces de Laplace (ou simplement couple) s'exerçant sur une spire de courant (par rapport à l'axe de rotation)

$$M = NISB \sin \theta$$

Remarque:

→ Quelle que soit la forme de la spire, on peut montrer que l'on a toujours  $\sum \vec{F} = \vec{0}$  et  $M_z = NISB \sin \theta$

→ Si le champ magnétique n'est pas uniforme, l'expression du moment précédent n'est plus valable mais si la boucle a une surface faible, on peut considérer que le champ dans lequel sont plongés ses fils varie peu et donc l'expression du moment sera valable. Par contre une boucle de courant dans une telle situation subira aussi une force résultante non nulle. Elle aura donc deux comportements:

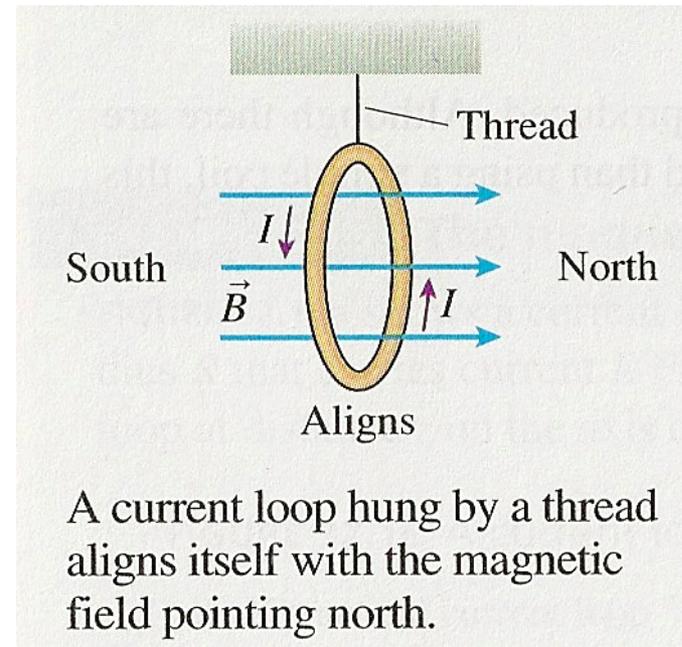
- Pivoter pour aligner son plan perpendiculairement au champ,
- Accélérer dans la direction de la force magnétique résultante.

Puissance des forces de Laplace

$$P = M\omega = NISB\omega \sin \theta$$

avec  $\omega \equiv \dot{\theta}$  = vitesse angulaire

Les expressions du moment et de la puissance vont être très importantes pour l'étude des moteurs électriques.



## a) Moment magnétique associé à une boucle de courant plane

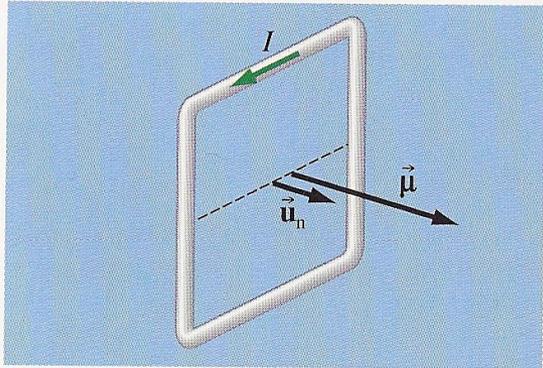


Figure 8.19 ▲

Le sens du moment magnétique  $\vec{\mu}$  est donné par la règle de la main droite : si vous refermez vos doigts dans le sens du courant, votre pouce tendu donne l'orientation de  $\vec{u}_n$ .

A une boucle de courant, on associe une grandeur physique importante, appelé son **moment magnétique** défini de la façon suivante (cf. figure ci-contre):

Moment magnétique associé à une boucle de courant

$$\vec{\mu} \equiv NIS \vec{u}_n$$

- $S$  = surface de la spire
- $NI$  = courant total des  $N$  spires
- $\vec{u}_n$  vecteur unitaire perpendiculaire au plan de la spire orientée par la règle de la main droite
- unité:  $A.m^2$

## b) Moment exercé sur un moment magnétique plongé dans un champ magnétique

Grâce à l'expression du moment magnétique, on peut exprimer le moment exercé sur la spire (par rapport à son centre) plongé dans un champ magnétique uniforme de façon plus concise:

Moment de force qui agit sur un moment magnétique

$$\vec{M} = \vec{\mu} \wedge \vec{B}$$

Le moment de force a **tendance à aligner le moment magnétique sur le champ magnétique** tout comme l'aiguille d'une boussole. **Le moment est indépendant du point où on l'exprime.**

# 3-Moment magnétique

## c) Energie potentielle d'interaction

Il existe une énergie potentielle d'interaction, d'origine magnétique, entre le moment magnétique de la boucle et le champ magnétique (créé par d'autres courants que ceux de la boucle) :

$$E_{pB} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

Pour justifier cette équation, il suffit d'évaluer le travail du champ magnétique nécessaire pour faire tourner le dipôle à vitesse constante:

Le signe moins est nécessaire car le moment des forces de Laplace tend à diminuer l'angle  $\theta$ !

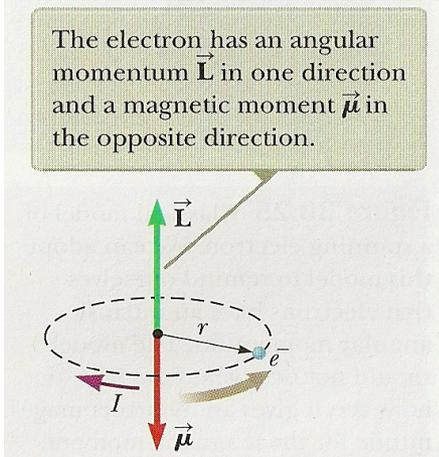
$$W_{ext} = \int_{\theta_0}^{\theta} -M d\theta = -\mu B \int_{\theta_0}^{\theta} \sin\theta d\theta = - \left( \underbrace{-\mu B \cos\theta}_{E_{pB}(\theta)} - \underbrace{-\mu B \cos\theta_0}_{E_{pB}(\theta_0)} \right) = -\Delta E_{pB}$$

On obtient donc  $E_{pB} = -\mu B \cos\theta = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$  avec comme origine  $E_{pB} = 0$  quand  $\theta = \pi/2$

## d) Moment magnétique d'un atome, modèle classique

On considère un modèle classique de l'atome (vision très simplifiée) dans lequel l'électron a un mouvement circulaire uniforme autour du noyau. Ce dernier constitue donc une boucle de courant (charge en mouvement).

**Figure 30.24** An electron moving in the direction of the gray arrow in a circular orbit of radius  $r$ . Because the electron carries a negative charge, the direction of the current due to its motion about the nucleus is opposite the direction of that motion.



# 3-Moment magnétique

→  $I = e/T = ev/2\pi r$  : intensité de la "boucle de courant " d'électron

→  $\mu = IS = \left(\frac{ev}{2\pi r}\right)\pi r^2 = \frac{1}{2}evr$  : moment magnétique associé

→ Le moment cinétique de l'électron est donné par  $L = m_e vr$  ce qui implique que:

$$\mu = \left(\frac{e}{2m_e}\right)L$$

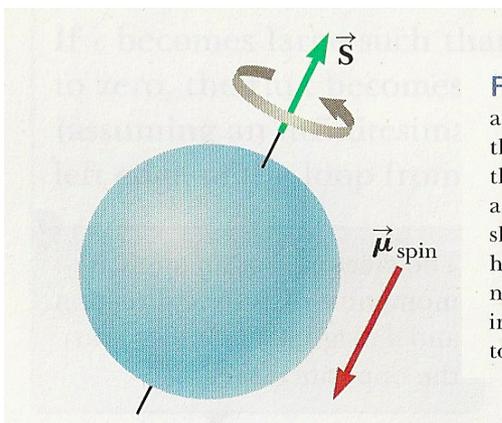
→ Comme la charge de l'électron est négative  $\vec{\mu}$  et  $\vec{L}$  sont dans des directions opposées. Les deux vecteurs sont perpendiculaires au plan de l'orbite.

→ La physique quantique montre que la plus petite valeur de  $L$  possible vaut  $h/2\pi$ . Ainsi  $\mu = \left(\frac{e}{2m_e}\right)\frac{h}{2\pi} = \frac{eh}{4\pi m_e}$ .

Cette valeur est appelée magnéton de Bohr et est notée  $\mu_B$  et vaut  $\mu_B = 9,274 \times 10^{-24} \text{ A.m}^2$  (ou  $\text{J.T}^{-1}$ )

→ L'électron possède aussi en propre un moment magnétique appelé spin, cf. cours de chimie.

On peut voir cela comme la rotation de l'électron sur lui-même, mais l'électron étant sans dimension, cela n'a pas de sens, le spin est une grandeur purement quantique! Ce moment magnétique a pour valeur exactement celle du magnéton de Bohr !



**Figure 30.25** Classical model of a spinning electron. We can adopt this model to remind ourselves that electrons have an intrinsic angular momentum. The model should not be pushed too far, however; it gives an incorrect magnitude for the magnetic moment, incorrect quantum numbers, and too many degrees of freedom.

### Pitfall Prevention 30.3

**The Electron Does Not Spin** The electron is *not* physically spinning. It has an intrinsic angular momentum *as if it were spinning*, but the notion of rotation for a point particle is meaningless. Rotation applies only to a *rigid object*, with an extent in space, as in Chapter 10. Spin angular momentum is actually a relativistic effect.

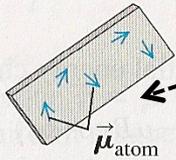
### Table 30.1 Magnetic Moments of Some Atoms and Ions

Atom or Ion	Magnetic Moment ( $10^{-24} \text{ J/T}$ )
H	9.27
He	0
Ne	0
Ce <sup>3+</sup>	19.8
Yb <sup>3+</sup>	37.1

# 3-Moment magnétique

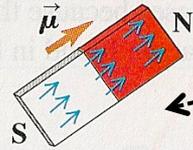
## e) Action d'un champ magnétique extérieur uniforme sur un aimant

(a) Unmagnetized iron: magnetic moments are oriented randomly.



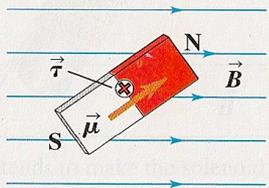
Dans un matériau ordinaire non magnétique, les moments magnétiques des atomes sont arrangés au hasard  $\Rightarrow \sum_{\text{atome}} \vec{\mu}_{\text{atome}} = \vec{0}$

(b) In a bar magnet, the magnetic moments are aligned.



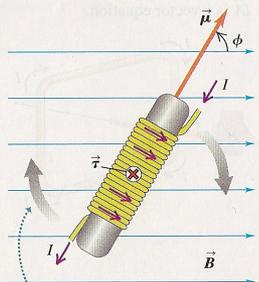
Dans un matériau magnétique, les moments magnétiques sont organisés, alignés. Le matériau (l'aimant) possède un moment magnétique total non nul !  $\Rightarrow \vec{\mu} = \sum_{\text{atome}} \vec{\mu}_{\text{atome}} \neq \vec{0}$

(c) A magnetic field creates a torque on the bar magnet that tends to align its dipole moment with the  $\vec{B}$  field.



Même comportement: **alignement** dans le champ magnétique dû au moment des forces de Laplace. On dit par abus de langage que le moment magnétique est soumis à un couple.

**27.34** The torque  $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$  on this solenoid in a uniform magnetic field is directed straight into the page. An actual solenoid has many more turns, wrapped closely together.



The torque tends to make the solenoid rotate clockwise in the plane of the page, aligning magnetic moment  $\vec{\mu}$  with field  $\vec{B}$ .

Positions d'équilibres:

$$\left( \frac{dE_{pB}}{d\theta} \right)_{\theta=\theta_{eq}} = 0 \Leftrightarrow \frac{d}{d\theta} (-\mu B \cos\theta) = 0 \Rightarrow \theta_{eq} = 0 \text{ ou } \pi$$

Position d'équilibre stable:

$$\left( \frac{d^2E_{pB}}{d\theta^2} \right)_{\theta=\theta_{eq}} > 0 \Rightarrow \theta_{eq} = 0$$



Equilibre stable  
 $\theta = 0$



Equilibre instable  
 $\theta = \pi$