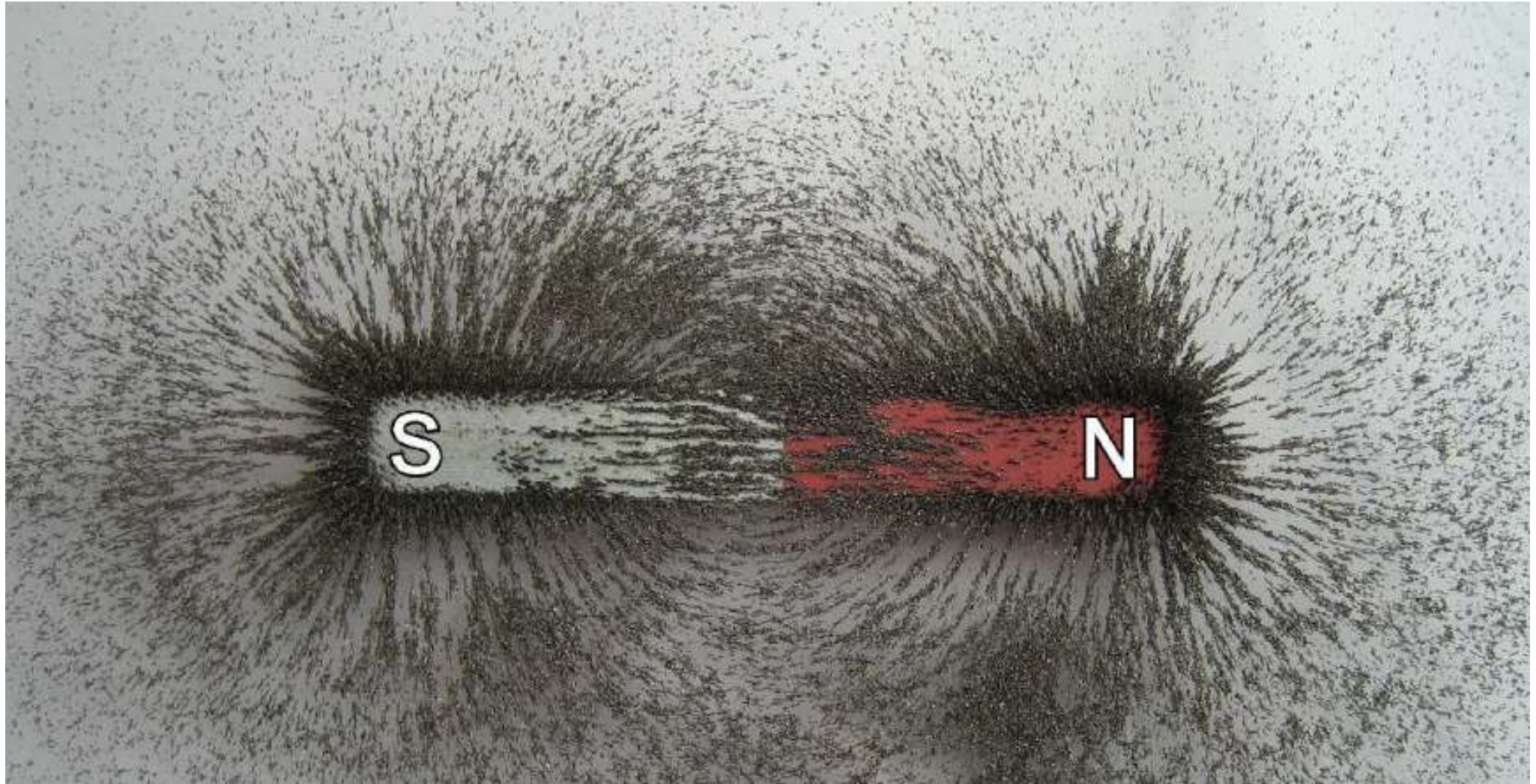


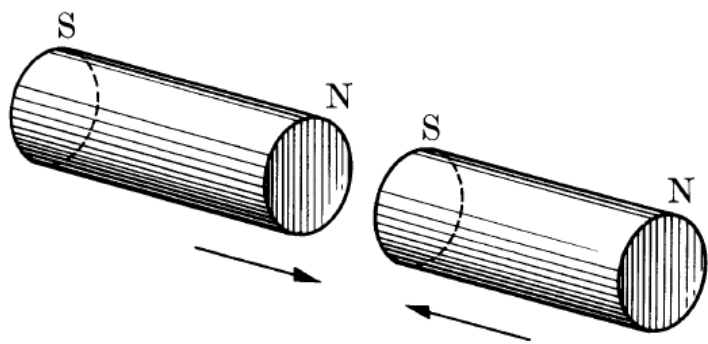
# Le Magnétisme



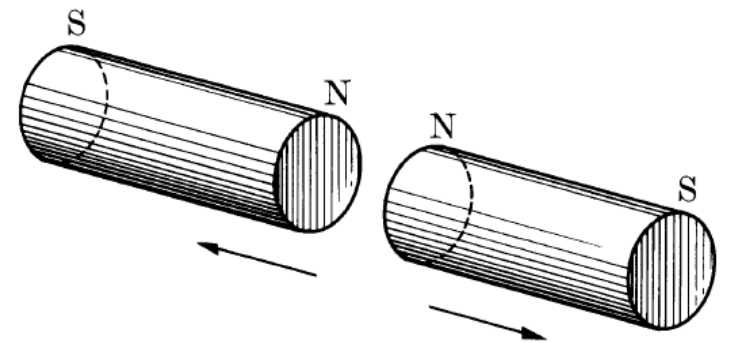
# 1. Introduction

- Comme pour l'électrostatique, les effets **magnétiques** sont connus depuis des millénaires. Des corps naturels tel que la **magnétite** (ou **oxyde de fer**  $Fe_3O_4$ ) a la propriété d'attirer des morceaux de fer. Ce sont les **aimants naturels**.
- Les quelques substances attirées par l'aimant sont dites « magnétiques ». On trouve principalement le fer, le cobalt, le nickel et certains de leurs composés et alliages. Convenablement traités, ces corps magnétiques peuvent donner naissance à des aimants artificiels.
- Ce chapitre examine les effets des forces sur les charges mobiles et sur les fils conducteurs en présence d'un champ magnétique.

- Dans les chapitres précédents, nous avons étudié les forces exercées par une masse sur une autre (**force gravitationnelle**) et par une charge sur une autre (**force électrique**).
- Expérimentalement, nous constatons **qu'une charge en mouvement** exerce également une force sur une autre (en plus de la force électrique). Cette force est la **force magnétique**, elle se manifeste le plus souvent lorsque deux aimants



(ou se repoussent)



- Bien que la force entre deux pôles magnétiques soit par ailleurs similaire à la force entre deux charges électriques, des charges électriques peuvent être isolées (comme l'électron et le proton) alors qu'un seul pôle magnétique n'a jamais été isolé.
- C'est-à-dire, les pôles magnétiques se trouvent toujours par paires. Toutes les tentatives jusqu'à présent pour détecter un pôle magnétique isolé ont échoué.

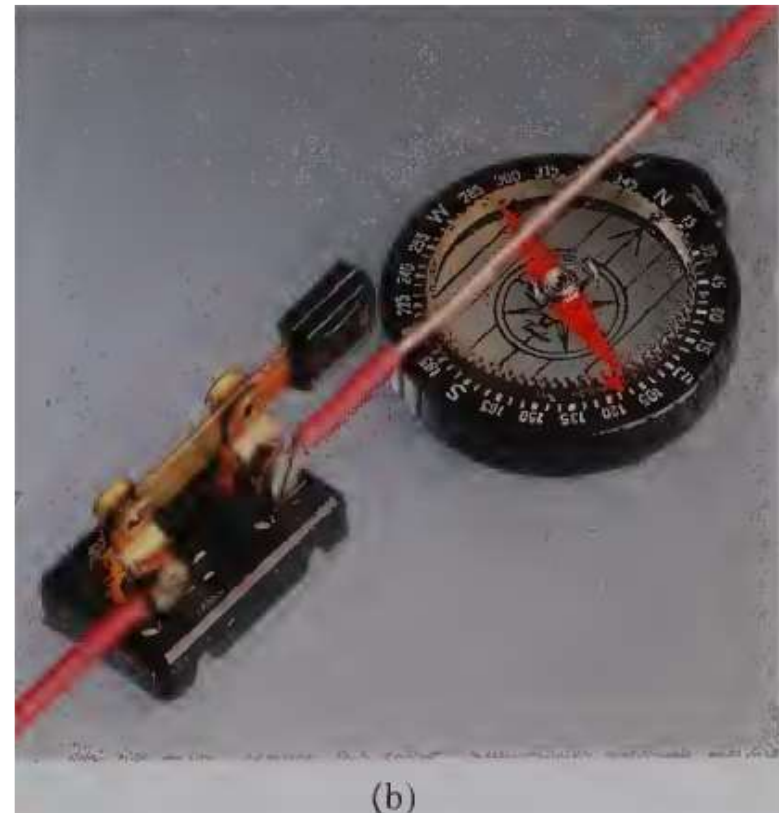
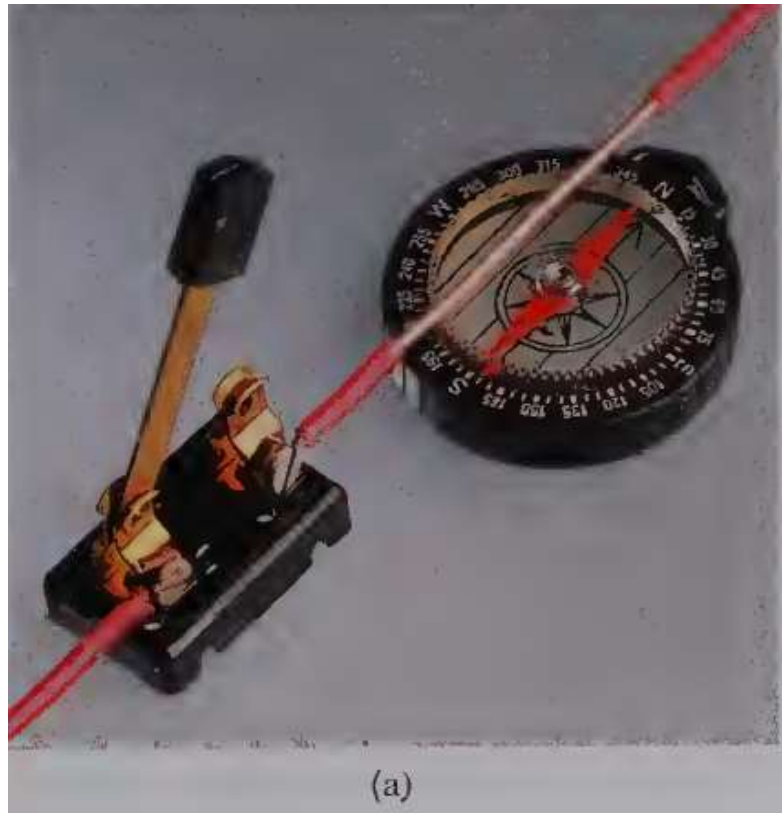
## 2. Magnétisme et électricité

### deux aspects différents d'une même entité naturelle

- Historiquement, **le magnétisme** a été considéré comme **distinct** de l'électricité, tout en y étant **lié**.
- La relation entre magnétisme et électricité a été découverte en **1819** lorsque, lors d'une démonstration de conférence, le scientifique danois **Hans Christian Oersted** a constaté qu'un courant électrique dans un fil conducteur déviait l'aiguille d'une boussole placée à proximité.

# Expérience d'Oersted

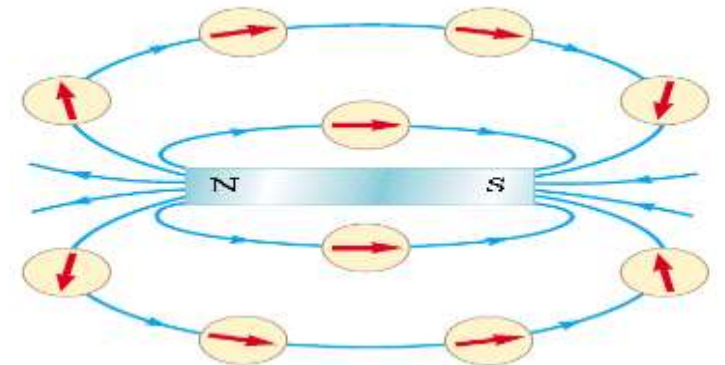
- a) En absence de courant dans le fil, l'aiguille de la boussole est dirigée vers le nord.
- b) Quand le fil transporte un courant, l'aiguille dévie et s'aligne presque avec le champ créé par le courant.



- Dans les années **1820**, **Faraday** et **Joseph Henry** (**1797-1878**) ont démontré indépendamment d'autres liens entre électricité et magnétisme. Ils ont montré qu'un courant électrique pouvait être produit dans un circuit soit en déplaçant un aimant près du circuit, soit en modifiant le courant dans un circuit voisin. Ces observations démontrent qu'un *champ magnétique variable crée un champ électrique*.
- Des années plus tard, les travaux théoriques de **Maxwell** ont montré que l'inverse est également vrai : *un champ électrique variable crée un champ magnétique*.
- En réalité, la théorie de la relativité restreinte nous apprend que *le magnétisme et l'électricité sont deux aspects différents d'une même entité naturelle* : ***le champ électromagnétique***.

### 3. Champs et forces magnétiques

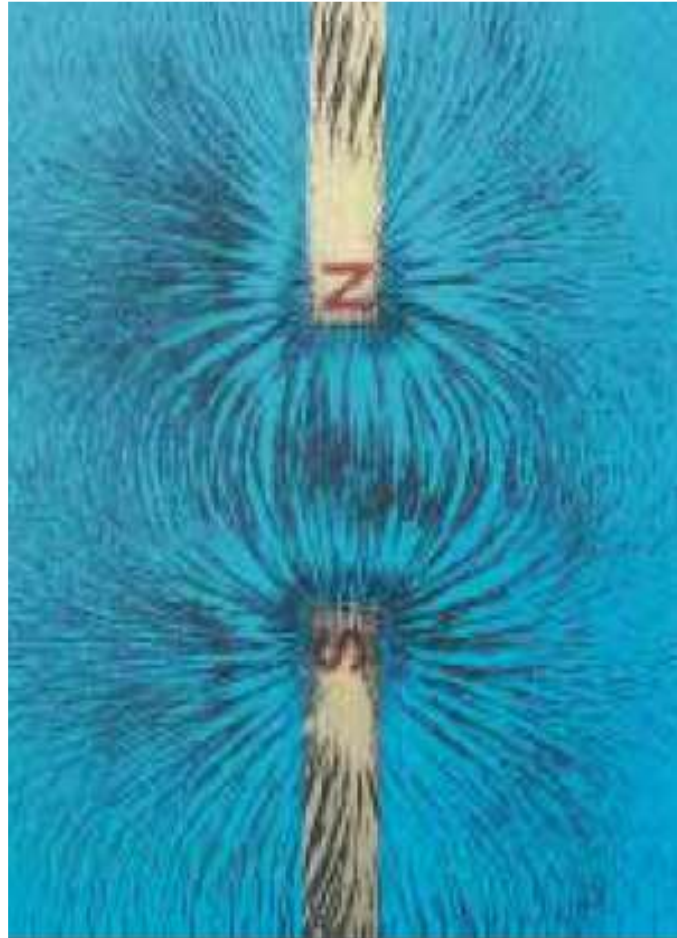
- Dans notre étude de l'électricité, nous avons décrit les interactions entre les objets chargés en termes de champs électriques. Rappelons qu'un champ électrique entoure toute charge électrique.
- Outre un champ électrique, la région de **l'espace entourant** toute **charge électrique en mouvement** contient également un **champ magnétique**. Un champ magnétique entoure également une substance magnétique constituant un aimant permanent.
- Historiquement, le symbole  **$B$**  a été utilisé pour représenter un champ magnétique, et c'est la notation que nous utilisons.
- Les lignes de champ magnétique à l'extérieur de l'aimant pointent de l'extérieur des pôles nord vers l'intérieur des pôles sud.



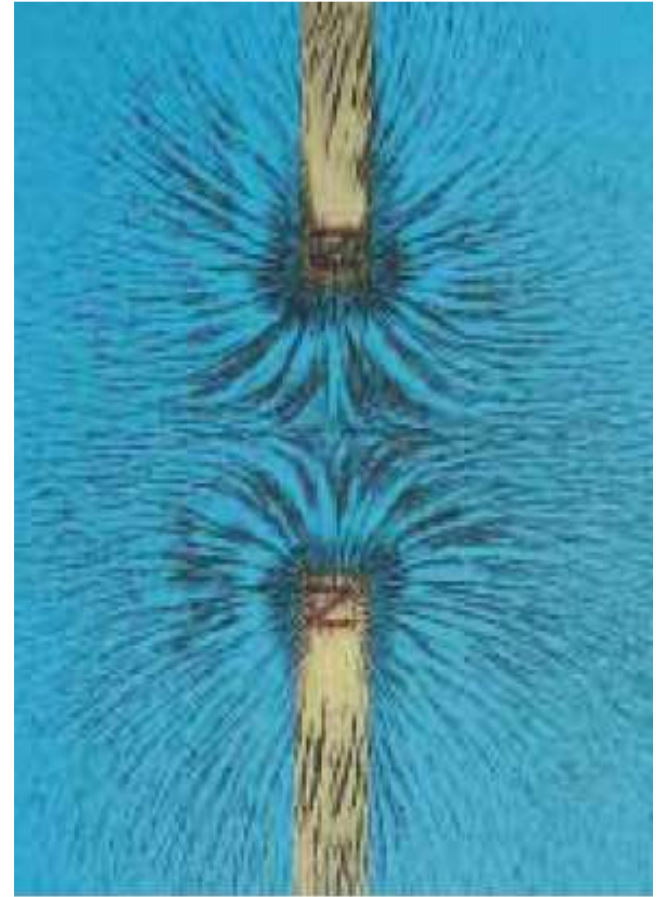
➤ On peut afficher des motifs de champ magnétique d'un aimant droit à l'aide de petite limaille de fer, comme illustré sur les figures suivantes :



(a)



(b)



(c)

➤ Les champs magnétiques ont des valeurs typiques qui sont présentées dans le tableau suivant :

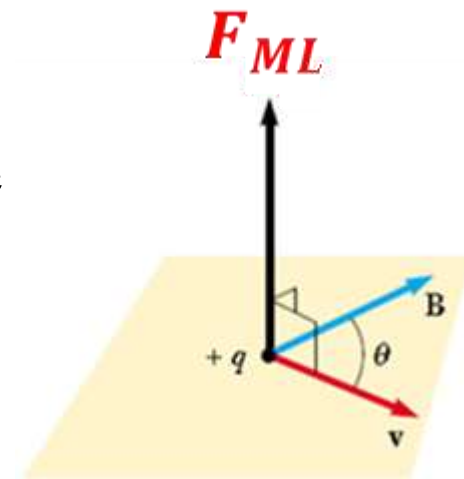
# Valeurs approximatives du champ magnétique

Source	Champ Magnétique (T)
<b>Aimant de laboratoire supraconducteur puissant</b>	<b>30</b>
<b>Unité d'IRM médicale</b>	<b>1,5</b>
<b>Aimant barre</b>	<b><math>10^{-2}</math></b>
<b>Surface du Soleil</b>	<b><math>10^{-2}</math></b>
<b>Surface de la Terre</b>	<b><math>0,5 \cdot 10^{-4}</math></b>
<b>À l'intérieur du cerveau humain (en raison des impulsions nerveuses)</b>	<b><math>10^{-13}</math></b>

### 3.1. La force Magnétique de Lorentz $\vec{F}_{ML}$

- Si une particule de charge électrique  $q$  se déplace à la vitesse  $\vec{V}$  dans un référentiel dans lequel le champ magnétique vaut  $\vec{B}$  la force magnétique qu'elle subit appelée force de Lorentz  $\vec{F}_{ML}$ .
- Supposons pour l'instant qu'aucun champ électrique ou gravitationnel ne soit présent à l'emplacement de cette particule.
- Des expériences sur diverses particules chargées se déplaçant dans un champ magnétique donnent les résultats suivants :

- ❖ L'amplitude  $F_{ML}$  de la force magnétique exercée sur la particule est proportionnelle à la charge  $q$  et à la vitesse  $V$  de la particule.
- ❖ L'amplitude et la direction de  $F_{ML}$  dépendent de la vitesse de la particule et de l'amplitude et de la direction du champ magnétique  $B$ .
- ❖ Lorsqu'une particule chargée se déplace parallèlement au vecteur champ magnétique  $B$ , la force magnétique  $F_{ML}$  agissant sur la particule est nulle.
- ❖ Lorsque le vecteur vitesse  $\vec{V}$  de la particule forme un angle quelconque  $\theta \neq 0$  avec le champ magnétique  $\vec{B}$ , la force magnétique agit dans une direction perpendiculaire à la fois à  $\vec{V}$  et à  $\vec{B}$ ; c'est-à-dire que  $\vec{F}_{ML}$  est perpendiculaire au plan formé par  $\vec{V}$  et  $\vec{B}$ .



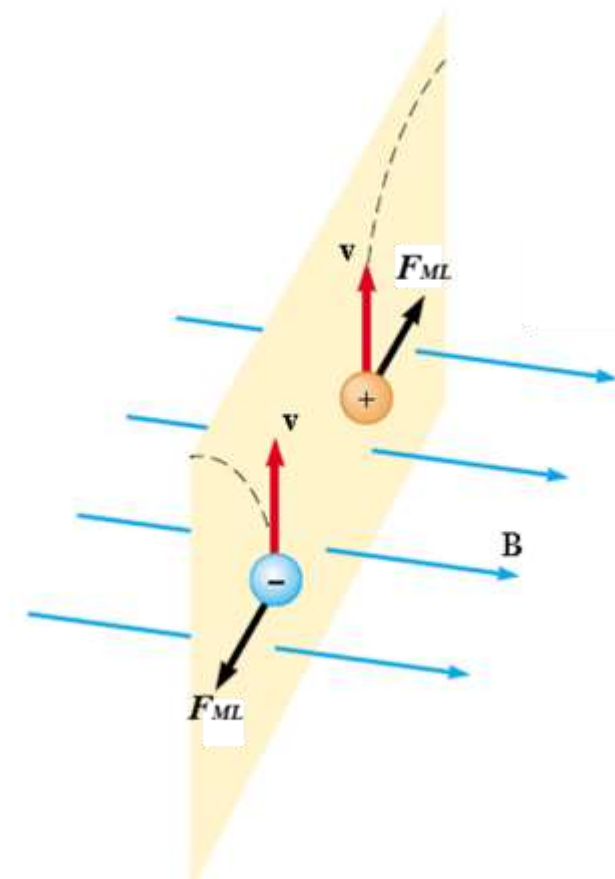
❖ La force magnétique appliquée à une charge positive se déplace dans le sens opposé à celui de la force magnétique appliquée à une charge négative, se déplaçant dans la même direction.

❖ L'amplitude de la force magnétique exercée sur la particule en mouvement est proportionnelle à  **$\sin \theta$** , où  **$\theta$**  est l'angle que fait le vecteur vitesse de la particule avec la direction de  **$B$** .

➤ Nous pouvons résumer ces observations en écrivant la force magnétique de

Lorentz sous la forme :

$$\vec{F}_{ML} = q \vec{V} \wedge \vec{B} \quad (1)$$



➤ L'amplitude d'une force magnétique **de Lorentz** sur une particule chargée est :

$$F_{ML} = |q| V B \sin \theta \quad (2)$$

ou  $\theta$  est le petit angle entre  $V$  et  $B$ .

➤ À partir de cette expression, nous voyons que  $F_{ML}$  est nul lorsque  $V$  est parallèle ou antiparallèle à  $B$  ( $\theta = 0$  ou  $180^\circ$ ) et maximal lorsque  $V$  est perpendiculaire à  $B$  ( $\theta = 90^\circ$ ).

➤ L'unité **S.I** du champ magnétique est le newton par coulomb-mètre par seconde, appelé tesla ( $T$ ) :

$$1. T = 1. \frac{N}{C \cdot m/s}$$

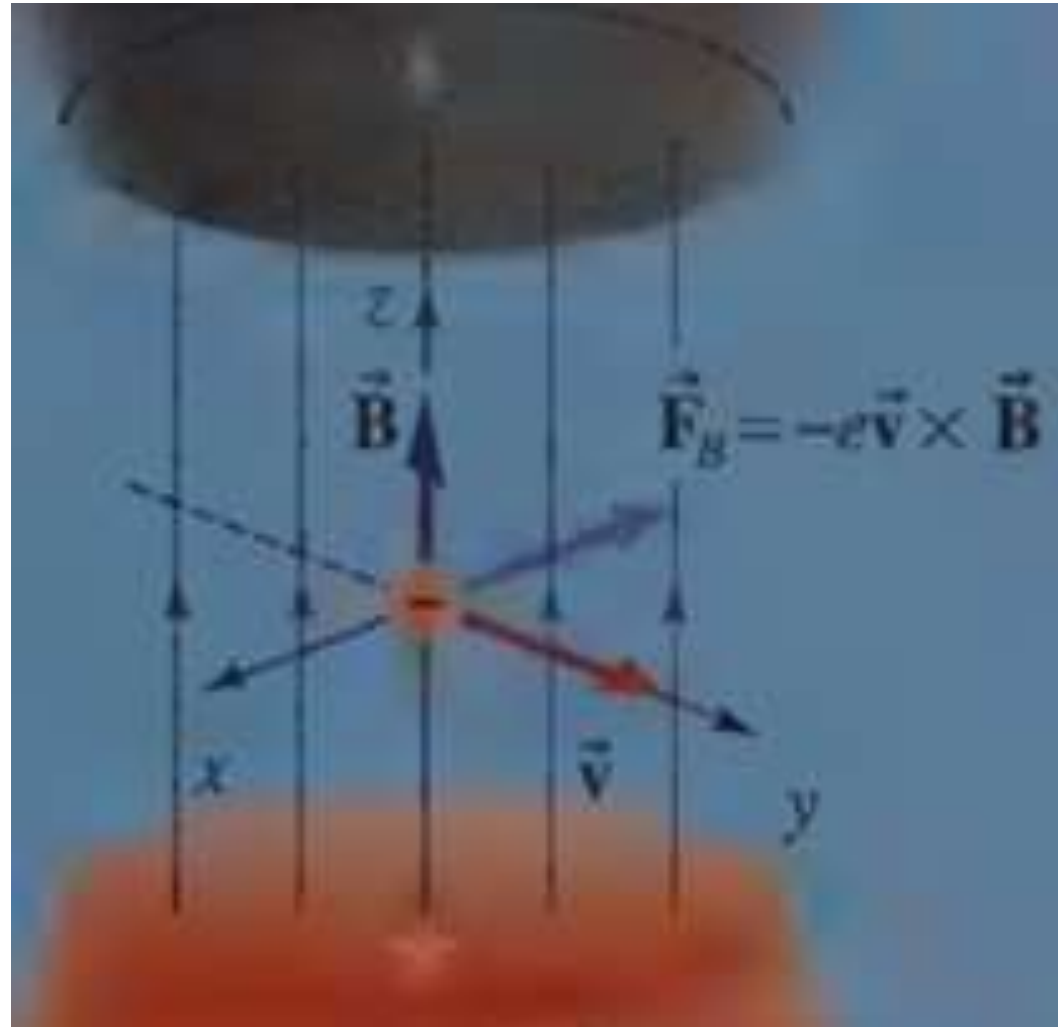
Puisqu'un coulomb par seconde est défini comme un ampère, on constate que :

$$1. T = 1. \frac{N}{A \cdot m}$$

Une unité de champ magnétique non-**S.I** d'usage courant, appelée le gauss ( $G$ ), est liée au tesla par la conversion :  $1. T = 10^4 G$ .

## Exemple 01

Un électron a une vitesse  $\vec{V} = 10^6 \vec{j}$  (m/s) dans un champ  $\vec{B} = 500 \vec{k}$  (G).

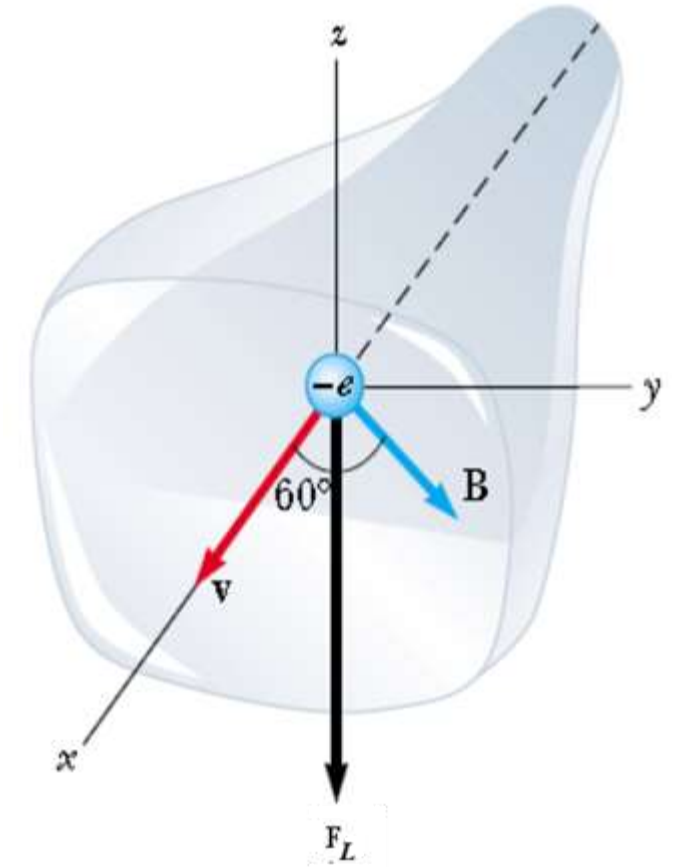


Quelle est la force magnétique agissant sur l'électron ?

## Exemple 02

Un électron contenu dans un tube cathodique de télévision se déplace vers l'avant du tube à une vitesse de  $8 \cdot 10^6 \text{ m/s}$  le long de l'axe  $x$ .

Autour du col du tube se trouvent des bobines de fil qui créent un champ magnétique d'intensité  $0,025 \text{ T}$ , dirigé à un angle de  $60^\circ$  par rapport à l'axe  $x$  et situé dans le plan  $xy$ .

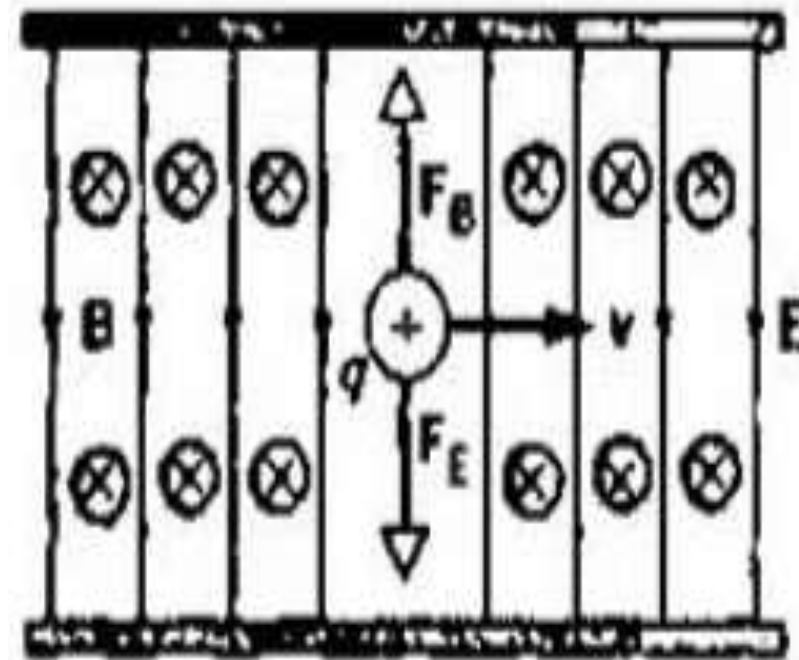


- 1) Calculez la force magnétique exercée sur l'électron.
- 2) Déterminez l'expression vectorielle de la force magnétique exercée sur l'électron.

## Exemple 03

➤ Un certain type de sélecteur de vitesse est constitué de deux plaques parallèles entre lesquelles règne un champ électrique  $E$ . Un faisceau de particules de masse  $m$ , de charge  $q$  et de vitesse  $V$  est dirigé parallèlement aux plaques, dans la région située entre elles. Un champ magnétique  $\vec{B}$  est appliqué perpendiculairement à  $\vec{E}$  et  $\vec{V}$ .

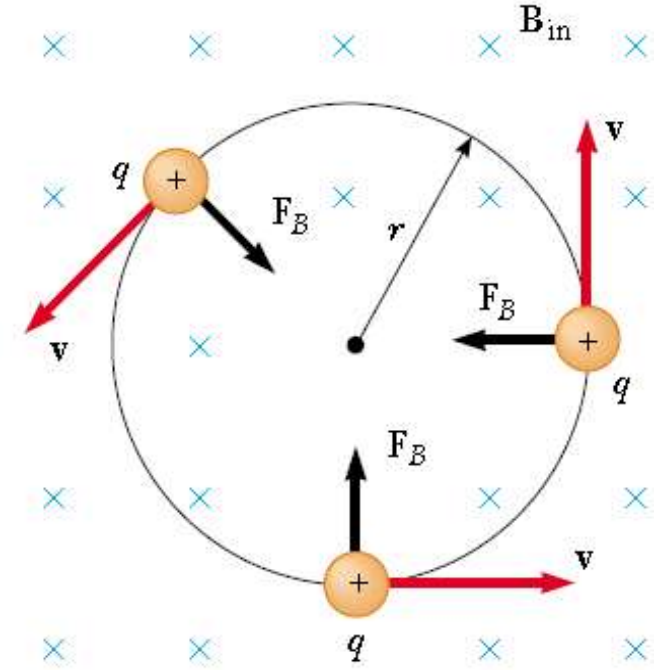
➤ Sur la figure en face,  $\vec{B}$  est dirigé vers l'intérieur de la feuille, comme indiqué par le symbole  $\otimes$  (à l'image des plumes d'une flèche s'éloignant de vous). Un vecteur sortant de la feuille est indiqué par  $\odot$  (à l'image de la pointe d'une flèche venant vers vous).



Déterminez une expression pour la vitesse des particules **non déviées** par ce dispositif.

### 3.1.1. Trajectoire d'une particule chargée dans un champ magnétique

➤ Considérons le cas particulier d'une particule chargée positivement se déplaçant dans un champ magnétique uniforme, le vecteur vitesse initiale de la particule étant perpendiculaire au champ. Supposons que le champ magnétique soit dirigé vers l'intérieur de la page.



➤ Lorsque la particule change de direction sous l'effet de la force magnétique, cette dernière reste perpendiculaire à sa vitesse.

➤ Si la force est toujours perpendiculaire à la vitesse, **la trajectoire** de la particule est un **cercle**

➤ La particule se déplaçant en cercle dans un **plan perpendiculaire** au **champ magnétique**.

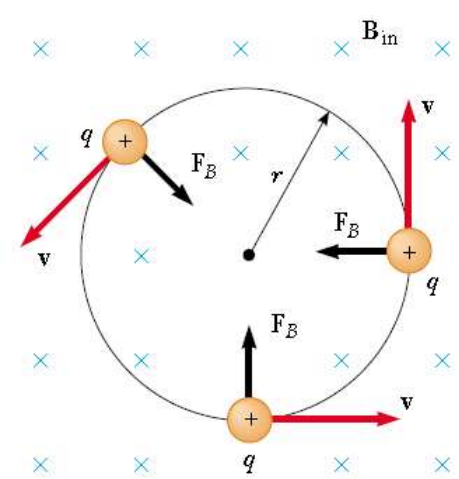
➤ La particule décrit un cercle car la force magnétique  $\vec{F}_B$  est perpendiculaire à  $\vec{V}$  et à  $\vec{B}$  et a une intensité constante  $qVB$ .

➤ La rotation est antihoraire pour une charge positive. Si  $q$  était négatif, la rotation serait horaire.

➤ Nous pouvons utiliser **la deuxième loi de Newton** pour évaluer cette force magnétique au produit de la masse de la particule et de l'accélération centripète :

$$\sum F = ma_c \Leftrightarrow qVB = \frac{mV^2}{r} \text{ alors : } \boxed{r = \frac{mV}{qB}}$$

Ce rayon est appelé **rayon cyclotron** en raison de son application dans le cyclotron, l'un des premiers accélérateurs de particules.



➤ Autrement dit, **rayon cyclotron** de la trajectoire est proportionnel à la quantité de mouvement linéaire  $mV$  de la particule et inversement proportionnel à la valeur absolue de la charge de la particule et à l'intensité du champ magnétique.

➤ La fréquence cyclotron  $f_c$  est déterminée à partir de la vitesse angulaire de la

particule :  $\omega_c = \frac{V}{r} = \frac{qB}{m}$  où  $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{qB}{2\pi m}$

➤ La période du mouvement (l'intervalle de temps nécessaire à la particule pour effectuer une révolution complète) est égale à la circonférence du cercle divisée

par la vitesse linéaire de la particule :  $T = \frac{2\pi r}{V} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$

## Exemple 04

On observe qu'un proton (de masse  $1,67 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$ ) décrit un arc de cercle de  $32 \text{ cm}$  de rayon lorsqu'il se déplace perpendiculairement à un champ magnétique de  $1,4 \text{ T}$ .

Quelle est la **quantité de mouvement** et la **fréquence cyclotron** du **proton** ?

## Exemple 05

Un proton (de masse  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ) décrit une orbite circulaire de rayon  $14 \text{ cm}$  dans un champ magnétique uniforme de  $0,35 \text{ T}$ , perpendiculaire à sa vitesse.

Déterminez sa vitesse linéaire.

## 3.2. Force magnétique agissant sur un conducteur parcouru par un courant:

### La force magnétique de Laplace $\vec{f}_{ML}$

- C'est la force exercée par un **champ magnétique** sur un **conducteur** parcouru par un **courant**.
- Si une force magnétique  $\vec{F}_{ML}$  exerce sur une particule chargée lorsqu'elle se déplace dans un champ magnétique, il n'est pas surprenant qu'un fil conducteur parcouru par un courant subisse également une force  $\vec{f}_{ML}$  lorsqu'il est placé dans un champ magnétique.
- Ceci s'explique par le fait que le **courant** est un ensemble de nombreuses **particules chargées en mouvement** ;
- par conséquent, la force résultante exercée par le champ sur le fil est la somme vectorielle des forces individuelles exercées sur toutes les particules chargées constituant le courant.

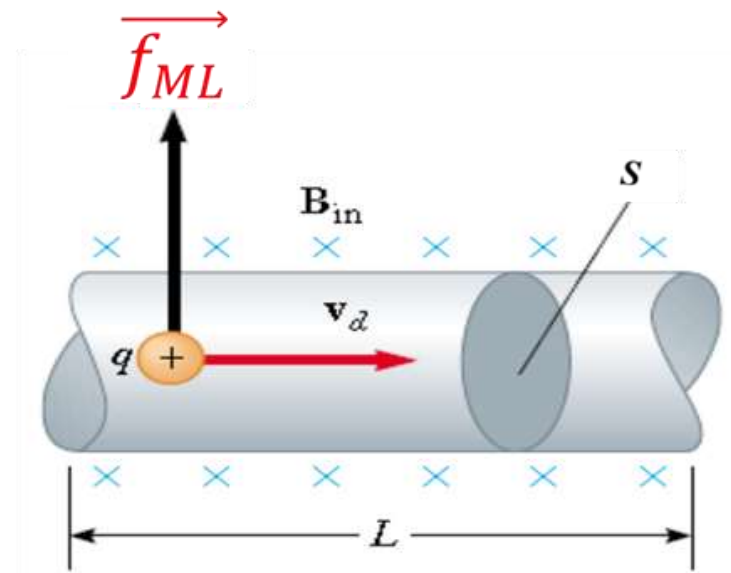
➤ Quantifions cette discussion en considérant un segment de fil rectiligne de longueur  $L$  et de section  $S$ , parcouru par un courant  $I$  dans un champ magnétique uniforme  $B$

➤ La force magnétique exercée sur une charge  $q$  se déplaçant à la vitesse de dérive  $\vec{V}_d$  est  $(q \vec{V}_d \wedge \vec{B})$ . Pour déterminer la **force totale** agissant sur le fil, on **multiplie** la force  $(q \vec{V}_d \wedge \vec{B})$  exercée sur une charge par le **nombre de charges** présentes dans le segment.

➤ Le volume du segment étant  $(SL)$ , le nombre de charges dans le segment est  $(nSL)$ , où  $n$  est le nombre de charges par unité de volume  $(n = \frac{N}{V} = \frac{N}{SL} \Leftrightarrow N = nSL)$ .

Par conséquent, la force magnétique totale exercée sur le fil de longueur  $L$  est :

$$\vec{f}_{ML} = (q \vec{V}_d \wedge \vec{B}) N \Leftrightarrow \boxed{\vec{f}_{ML} = (q \vec{V}_d \wedge \vec{B}) nSL}$$



Nous pouvons écrire cette expression sous une forme plus pratique en notant que, le courant dans le fil est  $I = nqV_dS$ . Par conséquent :

$$\vec{f}_{ML} = I \vec{L} \wedge \vec{B} \quad (3)$$

où  $\vec{L}$  est un vecteur orienté dans le sens du courant  $I$  et dont la norme est égale à la longueur  $L$  du segment.

➤ Il est à noter que cette expression ne s'applique qu'à un segment de fil rectiligne placé dans un champ magnétique uniforme.

## Remarque

- La force magnétique de Lorentz ( $\vec{F}_{ML}$ ) est une force qui existe à l'échelle microscopique car elle agit sur des particules.
- La force magnétique de Laplace ( $\vec{f}_{ML}$ ) agit à l'échelle des conducteurs c'est-à-dire à notre échelle macroscopique.
- Il faut donc faire attention à ne pas confondre ces deux forces.

## Exemple 06

Un fil conducteur parcouru par un courant de  $2,0 \text{ A}$  est disposé selon l'axe  $x$ .

Le courant circule dans le sens positif de l'axe  $x$ . Un champ magnétique de  $1,2 \text{ T}$  est parallèle au plan  $xy$  et forme un angle de  $30^\circ$  avec l'axe  $x$  (orienté vers le premier quadrant).

Quelle est la force exercée sur un segment de fil conducteur de  $0,40 \text{ m}$  de long ?

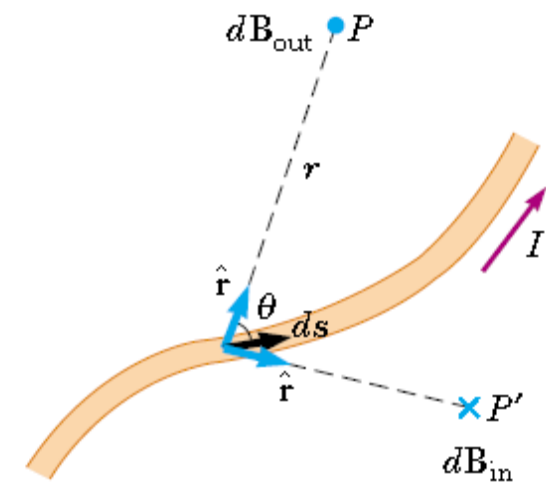
## 4. Sources du champ magnétique

- Dans la première partie de ce chapitre, nous avons étudié la force magnétique exercée sur une particule chargée se déplaçant dans un champ magnétique.
- Afin de compléter la description de l'interaction magnétique, cette partie explore l'origine du champ magnétique : les charges en mouvement.
- Nous commençons par montrer comment utiliser la **loi de Biot et Savart** pour calculer le champ magnétique produit en un point de l'espace par un faible élément de courant.
- À l'aide de ce formalisme et du principe de superposition, nous calculons ensuite le champ magnétique total dû à différentes distributions de courant.
- Nous montrons ensuite comment déterminer la force entre deux conducteurs parcourus par un courant, ce qui conduit à la définition de l'ampère.

## 4.1. La loi de Biot et Savart

- Peu après la découverte par **Oersted** en **1819** que l'aiguille d'une boussole est déviée par un conducteur parcouru par un courant,
- **Jean-Baptiste Biot** (**1774-1862**) et **Félix Savart** (**1791-1841**) réalisèrent des expériences quantitatives sur la force exercée par un courant électrique sur un aimant proche.
- À partir de leurs résultats expérimentaux, **Biot et Savart** obtinrent une expression mathématique qui donne le champ magnétique en un point donné de l'espace en fonction du courant qui le produit.

➤ Cette expression repose sur les observations **expérimentales** suivantes concernant le champ magnétique  $d\vec{B}$  au point  $P$  un segment de longueur  $ds$  d'un fil conducteur courant continu  $I$  :



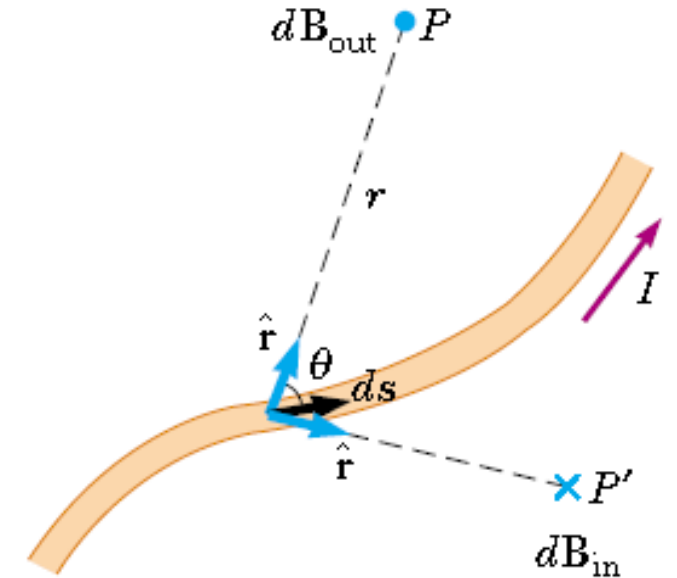
- ❖ Le vecteur  $d\vec{B}$  est perpendiculaire à la fois à  $d\vec{s}$  (qui pointe dans le sens du courant) et au vecteur unitaire  $\hat{r}$  dirigé de  $d\vec{s}$  vers  $P$ .
- ❖ La norme de  $d\vec{B}$  est inversement proportionnelle à  $r^2$ , où  $r$  est la distance entre  $d\vec{s}$  et  $P$ .
- ❖ La norme de  $d\vec{B}$  est proportionnelle au courant et à la norme  $ds$  de l'élément de longueur  $d\vec{s}$ .
- ❖ La norme de  $d\vec{B}$  est proportionnelle à  $\sin \theta$ , où  $\theta$  est l'angle entre les vecteurs  $d\vec{s}$  et  $\hat{r}$ .

Ces observations sont résumées dans l'expression mathématique aujourd'hui connue sous le nom de **loi de Biot-Savart** :

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I d\vec{s} \wedge \vec{r}}{4\pi r^2} \quad (4)$$

où  $\mu_0$  représente la constante de **perméabilité** du vide :

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T.m/A}$$



➤ Notez que le champ  $d\vec{B}$  dans l'équation (4) est le champ créé par le courant dans un seul élément de longueur  $d\vec{s}$  du conducteur.

➤ Pour trouver le champ magnétique total  $\vec{B}$  créé en un point donné par un courant de longueur finie, il faut calculer  $\vec{B}$  en intégrant l'équation (4).

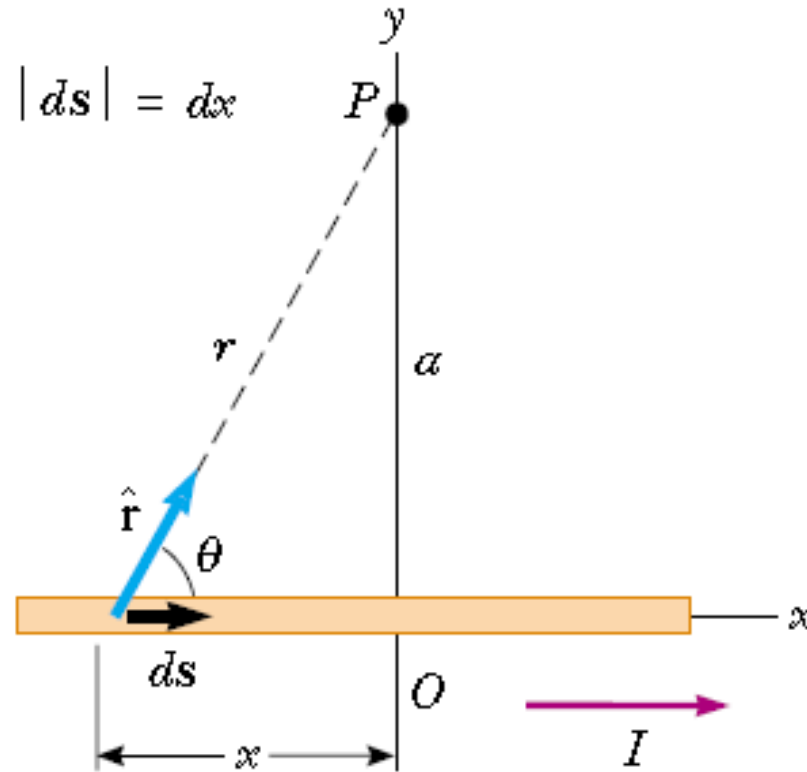
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{s} \wedge \vec{r}}{r^2} \quad (5)$$

où l'intégrale est prise sur toute la distribution de courant.

Cette expression doit être manipulée avec une attention particulière car l'intégrande est un produit vectoriel et donc une grandeur vectorielle.

## Exemple 07

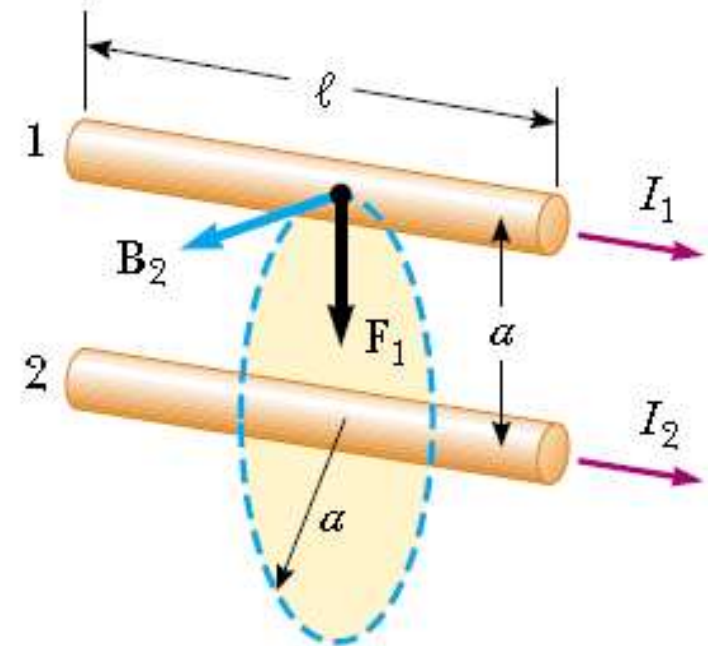
Considérons un fil conducteur fin et rectiligne parcouru par un courant constant  $I$  et placé le long de l'axe  $x$ , comme illustré sur la figure suivante:



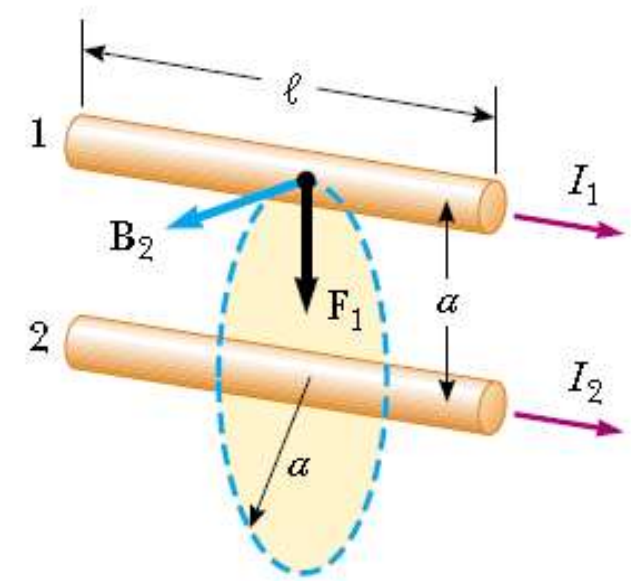
Déterminez la direction et l'intensité du champ magnétique au point  $P$  induit par ce courant.

## 5. Interaction de deux fils parallèles, l'ampère

- Ampère fit passer un courant électrique dans deux longs fils parallèles et trouva qu'ils agissaient l'un sur l'autre.
- Il cherchait à établir qu'un conducteur transportant un courant interagit avec le champ magnétique, dans lequel il est plongé, que ce champ soit produit par un aimant permanent ou par un autre courant électrique.
- Considérons deux longs fils droits et parallèles séparés par une distance  $a$  et transportant des courants  $I_1$  et  $I_2$  dans la même direction,



➤ On peut déterminer la force exercée sur un fil conducteur le champ magnétique créé par l'autre fil. Le fil 2, par un courant  $I_2$  et arbitrairement désigné comme un champ magnétique  $\vec{B}_2$  à l'emplacement test. La direction de  $\vec{B}_2$  est perpendiculaire sur la figure.



➤ D'après l'équation (3), la force magnétique exercée sur un segment  $l$  du fil 1 est  $\vec{f}_1 = I_1 \vec{l} \wedge \vec{B}_2$ . Comme l'axe de rotation est perpendiculaire à  $\vec{B}_2$  dans cette situation, la norme de  $\vec{f}_1$  est  $f_1 = I_1 l B_2$ . La norme de  $\vec{B}_2$  étant donnée par l'équation (5), on constate que :

$$f_1 = I_1 l B_2 = I_1 l \left( \frac{\mu_0 I_2}{2\pi a} \right)$$

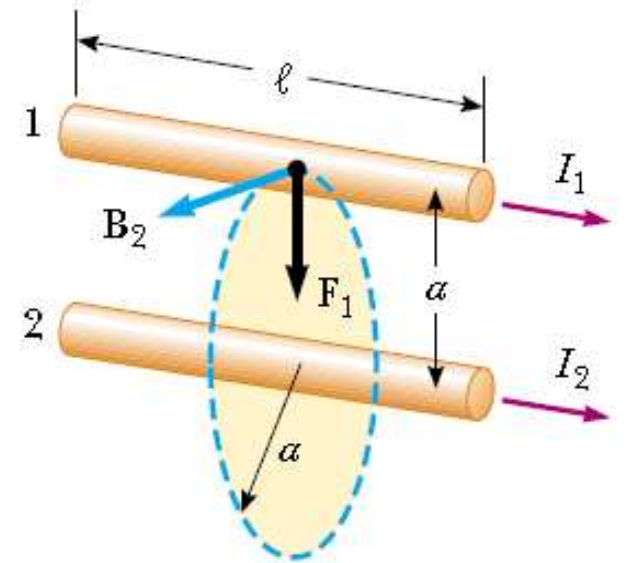
$$f_1 = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} l \quad (6)$$

La direction de  $\vec{f}_1$  est vers le fil 2 car  $\vec{l} \wedge \vec{B}_2$  est dans cette direction.

➤ Si l'on calcule le champ électrique créé par le fil **1** au niveau du fil **2**, on constate que la force  $\vec{f}_2$  agissant sur le fil **2** est égale en intensité et de direction opposée à  $\vec{f}_1$ . Ce résultat est conforme aux attentes, car la troisième loi de Newton doit être respectée.

➤ Lorsque les courants sont de sens opposés (c'est-à-dire lorsque l'un des courants est inversé), les forces s'inversent et les fils se repoussent.

➤ Par conséquent, *les conducteurs parallèles parcourus par des courants de même sens s'attirent, et les conducteurs parallèles parcourus par des courants de sens opposés se repoussent.*



➤ Comme les forces s'exercent en même intensité sur les deux fils, on note simplement  $f_B$  l'intensité de la force magnétique entre les fils. On peut exprimer cette intensité en fonction de la force par unité de longueur :

$$\frac{f_B}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \quad (7)$$

La force entre deux fils parallèles est utilisée pour définir l'ampère comme suit :

*Lorsque l'amplitude de la force par unité de longueur entre deux longs fils parallèles qui transportent des courants identiques et sont séparés par 1 m est de  $2 \cdot 10^{-7} \text{ N/m}$ , le courant dans chaque fil est défini comme étant de 1 A.*

## Exemple 08

Quelle est la force par unité de longueur qui s'exerce sur chacun des deux fils parallèles très longs, séparés par une distance de  $1\text{ m}$  dans le vide et dans lesquels circulent des courants de même intensité,  $1\text{ A}$ , dans des sens opposés ?