

LFSM1105 – Physique

# Principes du magnétisme

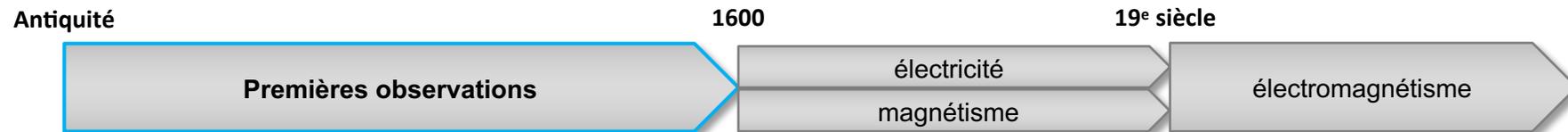
*ANNEE ACADEMIQUE 2024-2025*

*PROF. LAURENT A. FRANCIS*

*LAURENT.FRANCIS@UCLouvain.BE*

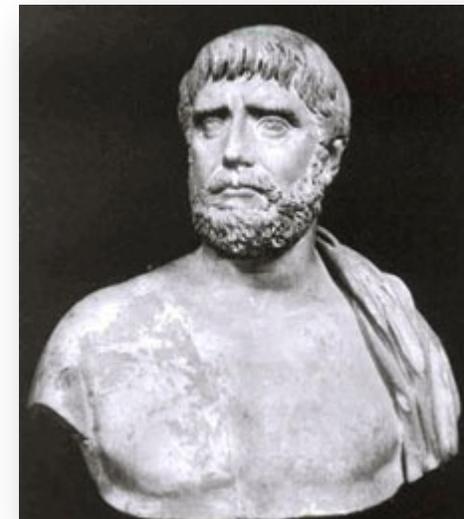
# Un peu d'histoire

## Premières observations des phénomènes magnétiques



### Vers 500 avant notre ère

- Thalès rapporte que certaines pierres découvertes à Magnésia en Thessalie sont capables d'exercer des forces entre elles et sur des morceaux de fer.
- Les grecs les appelèrent *μαγνης* (magnès) selon le nom de la région où elles furent trouvées.
- C'étaient les ancêtres de nos aimants et l'origine du nom magnétisme.
- Autour du 1<sup>er</sup> siècle avant J.C. : « cuillère montre sud », boussole chinoise ...

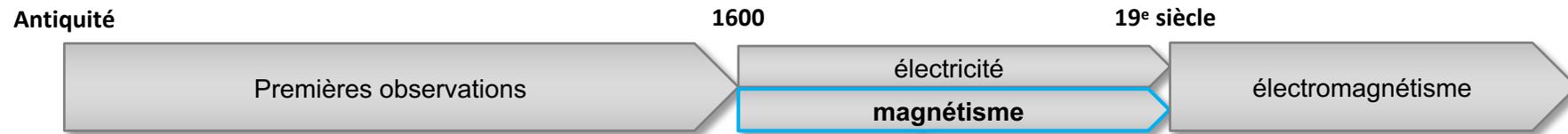


Thalès de Milet



# Un peu d'histoire

## Premières études systématiques des phénomènes magnétiques

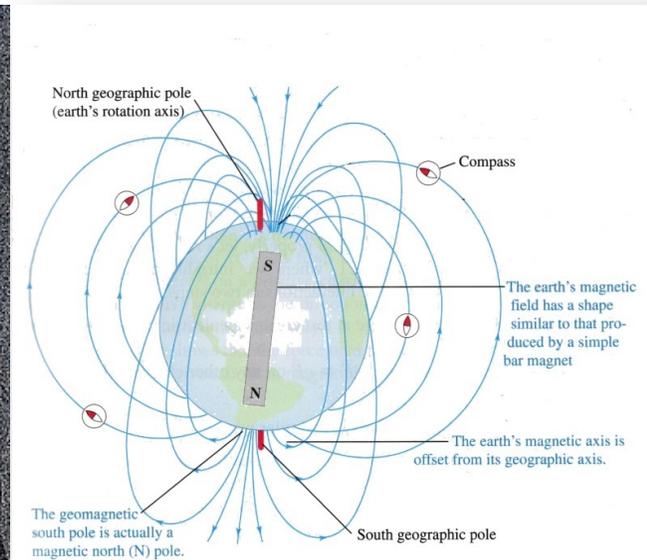


### En 1600

- **William Gilbert** poursuit ces travaux et suggéra que la terre elle-même était un gigantesque aimant.
- L'extrémité nord d'une aiguille aimantée est celle qui tend à s'orienter approximativement vers le nord géographique.
- On constate que deux nords (ou deux suds) se repoussent, tandis qu'un nord et un sud s'attirent.



- Fun fact : le pôle nord géographique terrestre est donc ... un pôle sud magnétique !



<https://youtu.be/n7EWhEYOa0o>

Expériences de Physique à main levée

Magnétisme

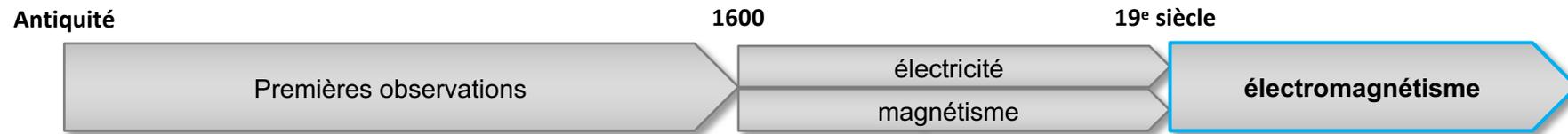
Une expérience à la façon d'Ørsted

uni  
sciel

Université  
Lille1

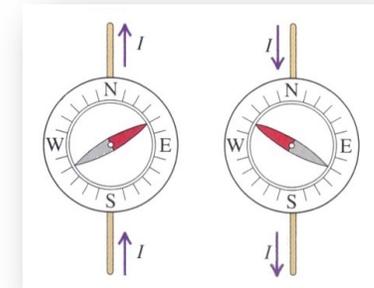
# Un peu d'histoire

## L'expérience d'Ørsted lie phénomènes électriques et magnétiques



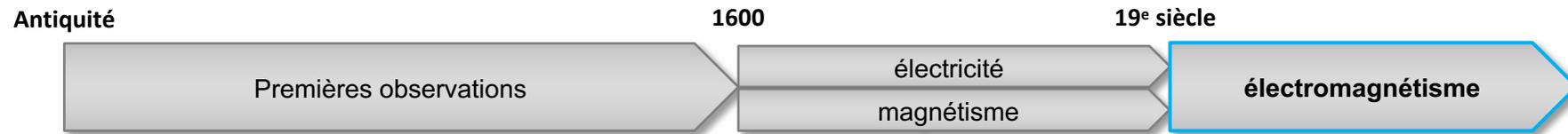
### En 1820

- Ørsted découvre qu'un courant électrique peut produire un effet magnétique.
- Il découvre également qu'un aimant exerce une force sur un fil conducteur traversé par un courant.
- Ces résultats établirent le lien existant entre l'électricité et le magnétisme.
- Ces travaux intéresseront en particulier **Karl Friedrich Gauss** qui formalisera, entre autres choses, les principes du magnétisme



# Un peu d'histoire

## L'expérience d'Ørsted lie phénomènes électriques et magnétiques



Les effets magnétiques sont essentiellement attribués à des **charges électriques en mouvement** :

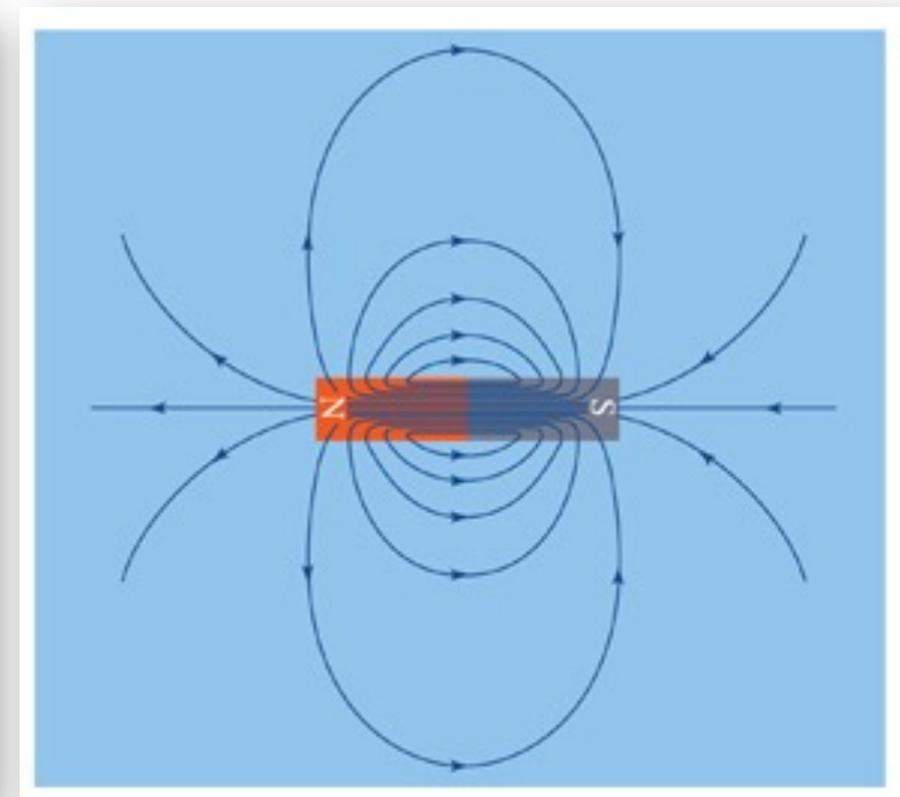
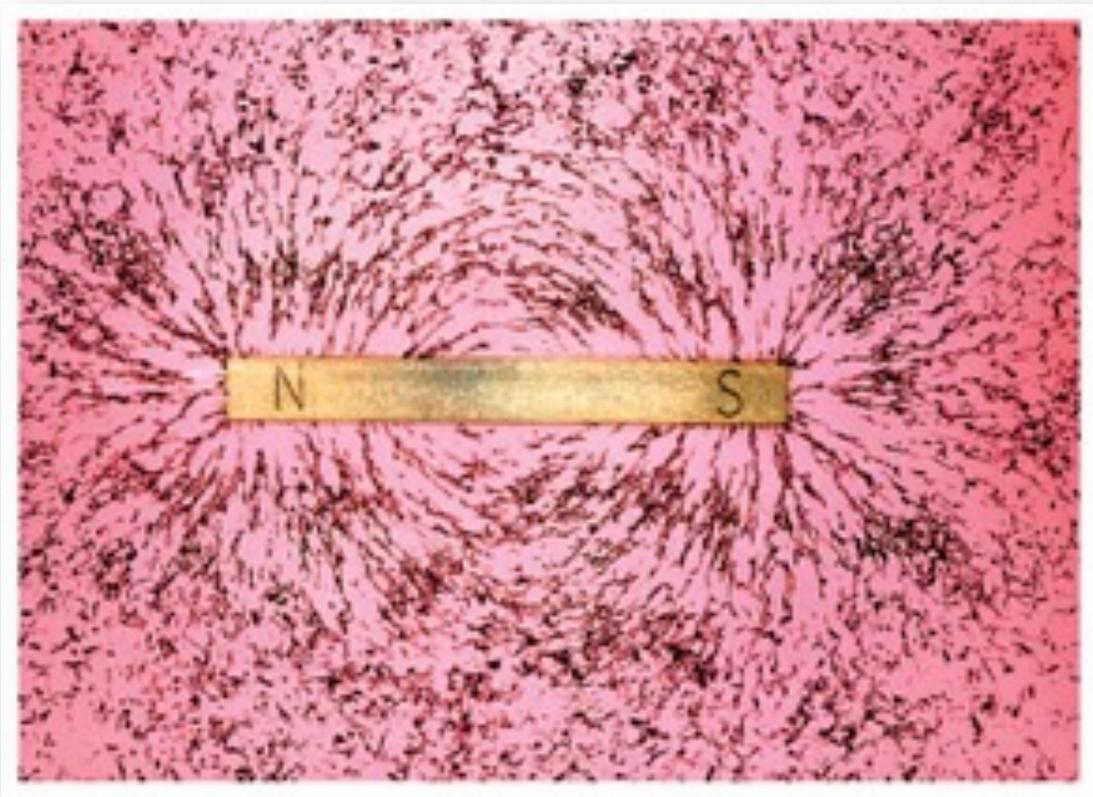
- Dans un courant électrique, ce mouvement est macroscopique.
- Dans un aimant permanent, il est microscopique : il se produit au sein de chaque atome, en raison de la rotation des électrons autour du noyau (moment cinétique orbital) et sur eux-mêmes (spin), selon l'interprétation de la mécanique quantique.



# Le champ magnétique

## Les lignes de champ

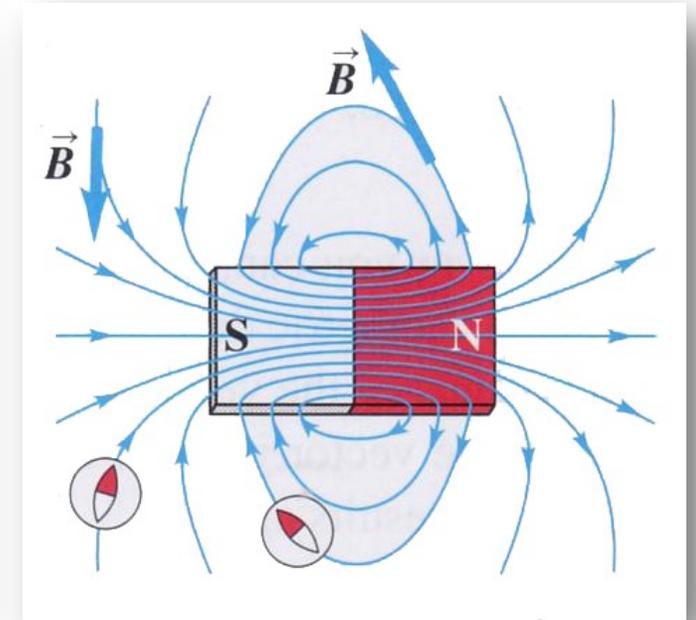
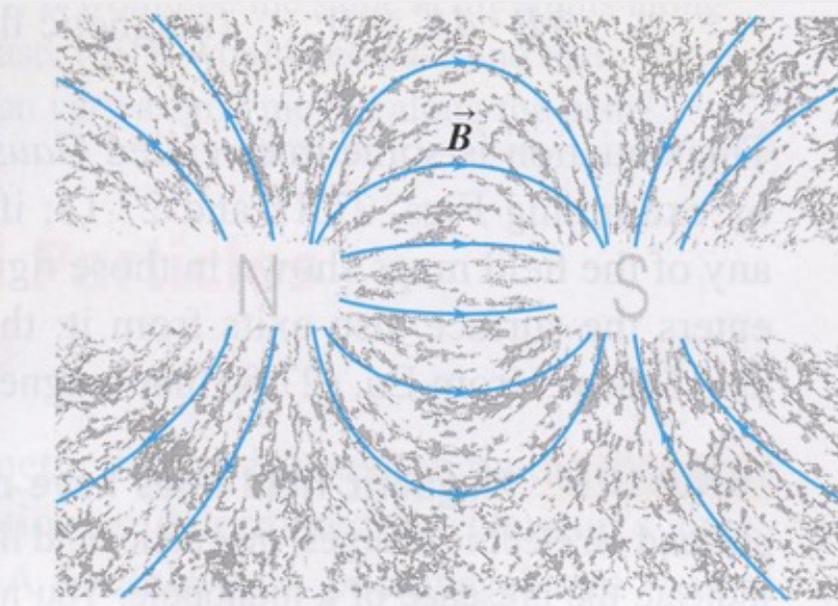
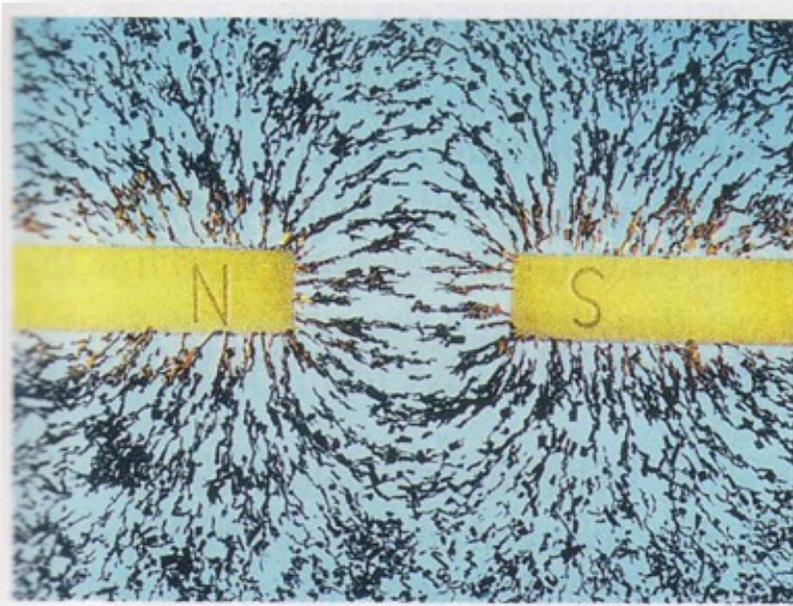
- De la limaille de fer ou de petites boussoles forment une configuration caractéristique au voisinage d'un barreau aimanté.
- A partir de ces configurations, Michael Faraday introduisit les concepts de **champ magnétique** et de **lignes de champ magnétiques**.



# Le champ magnétique

## Orientation du champ magnétique

- Pour définir l'orientation du champ magnétique, on se base sur l'orientation prise par la limaille de fer ou les boussoles.
- Cette orientation est celle des lignes de champ.

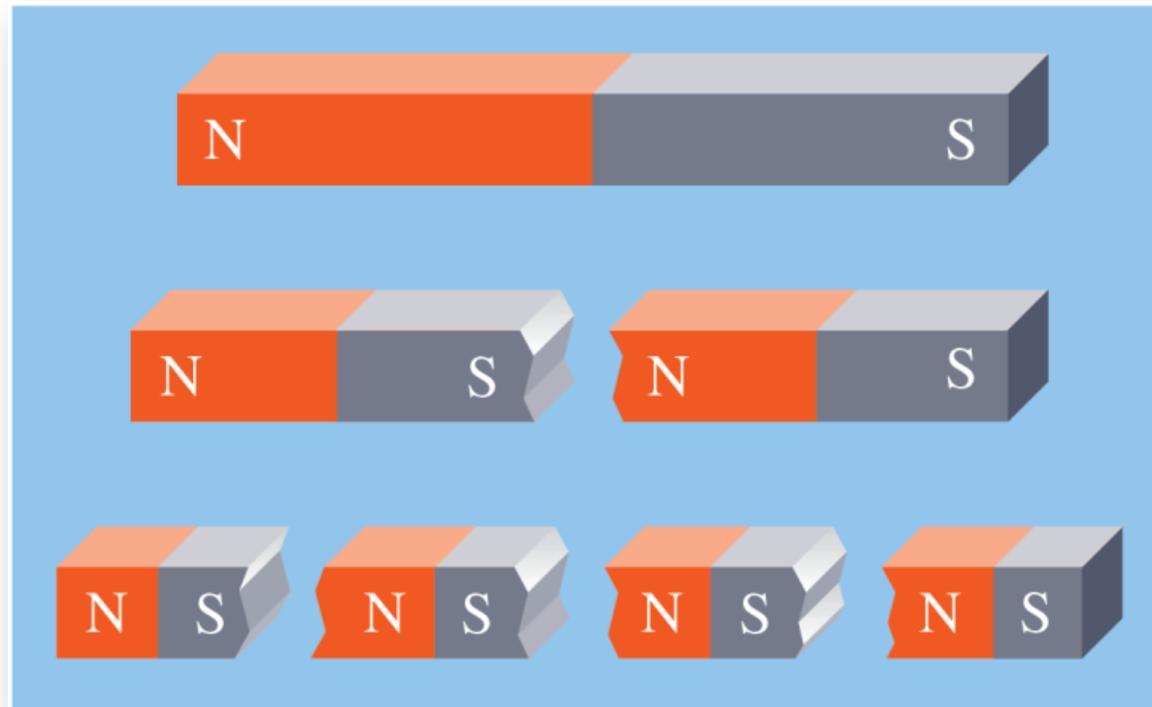


- Le champ magnétique  $\vec{B}$  en un point est orienté selon la tangente à une ligne de champ.
- Le pôle nord de l'aiguille d'une boussole placée sur une telle ligne de champ indique par définition le sens de  $\vec{B}$ .

# Le champ magnétique

## Un aimant comporte toujours un pôle nord et un pôle sud

- Lorsqu'on coupe un aimant, on obtient toujours deux aimants plus petits.
- Contrairement aux charges électriques, **les pôles magnétiques viennent toujours par paire** et ne peuvent être séparés
- Il n'est pas possible d'obtenir un « monopôle » magnétique sud ou nord seul !
- Cette observation est vérifiée jusqu'à l'échelle atomique



# Unité SI du champ magnétique

## Le Tesla et quelques ordres de grandeur.

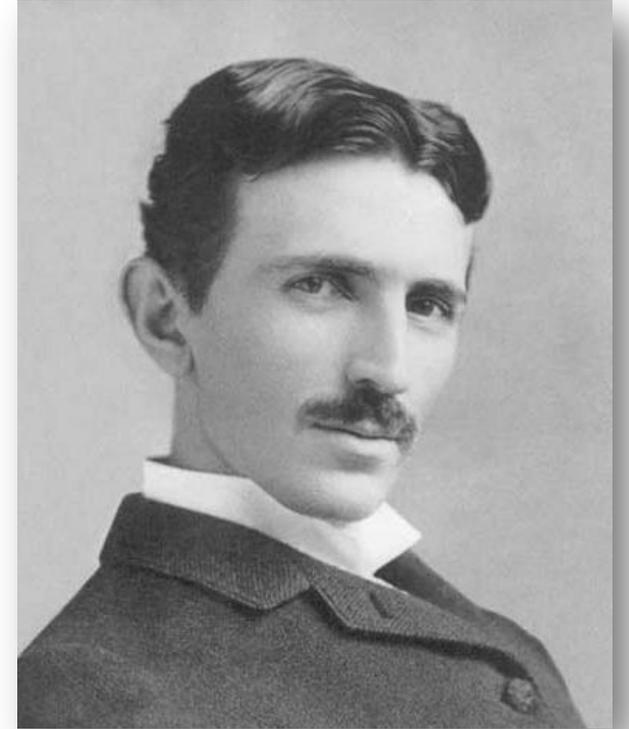
L'unité SI du champ magnétique est le **Tesla** (T).

Le Tesla est une unité de très grande taille.

- Le champ magnétique terrestre près du sol n'est que de  $50 \mu\text{T}$ .
- Le champ magnétique produit par les aimants supraconducteurs larges de plusieurs mètres est de l'ordre de 2 ou 3 T et ne dépasse pas 30 T.
- Le champ magnétique le plus intense produit à ce jour en laboratoire est de 100 T.

On lui préférera souvent le **gauss** (G) :  $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$ .

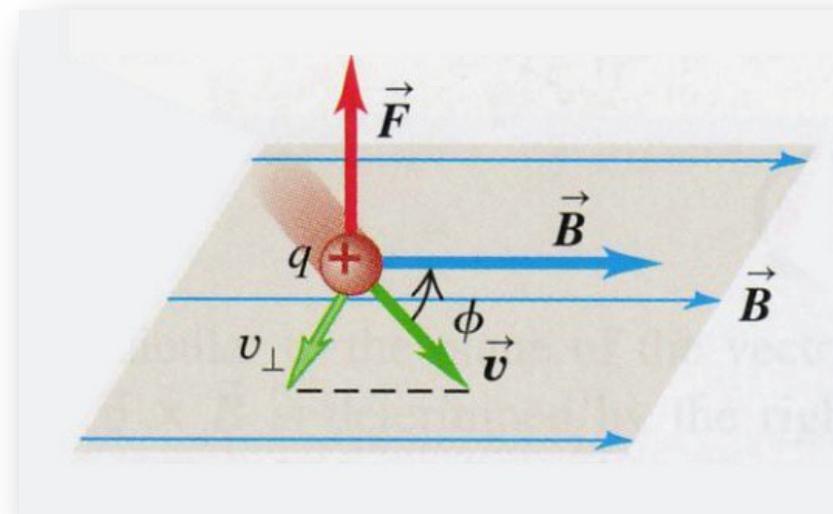
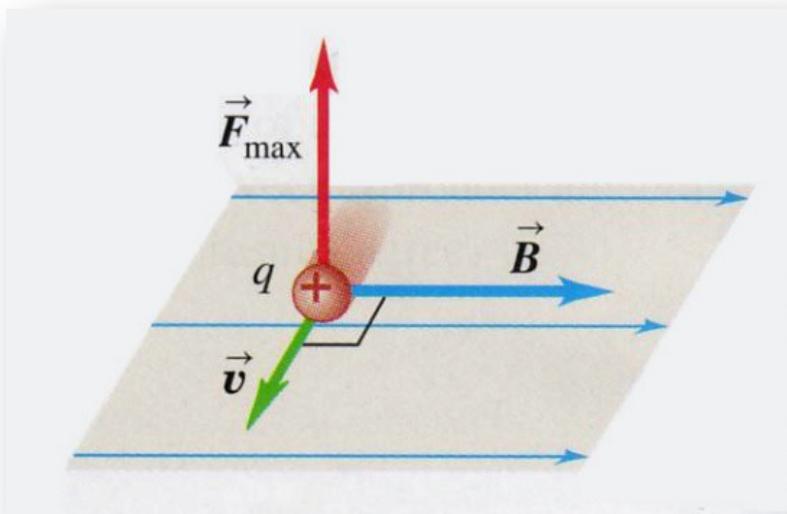
- Exprimé dans cette unité, le module du champ magnétique terrestre près du sol est voisin de 0,5 G.



Nikola Tesla (1856-1943)

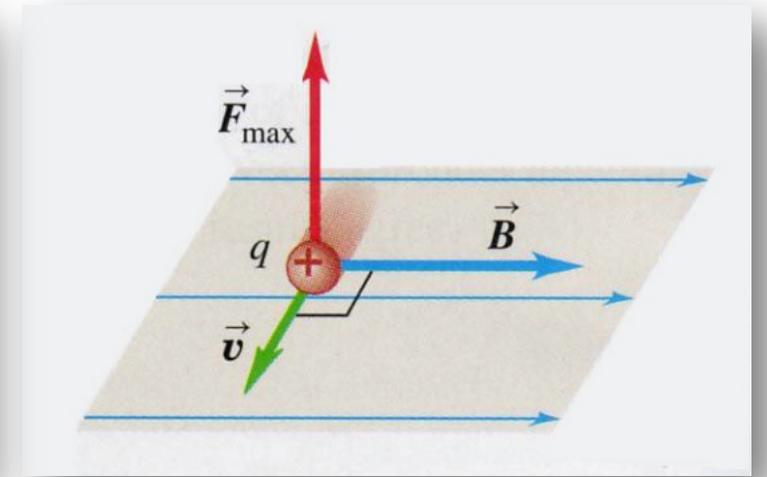
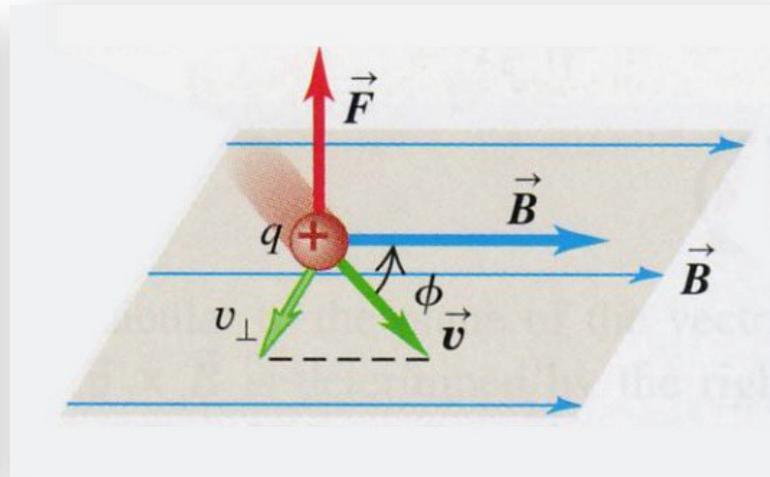
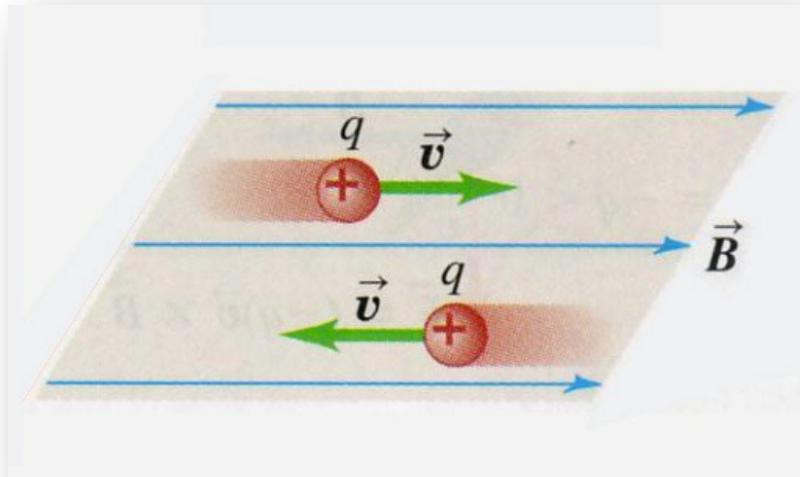
# La force magnétique... sur une particule chargée en mouvement

- La force magnétique  $\vec{F}_B$  sur une charge d'essai  $q$  dépend du champ magnétique  $\vec{B}$  mais aussi de l'état de mouvement de la charge, c'est-à-dire de sa vitesse  $\vec{v}$ .
- En mesurant cette force  $\vec{F}_B$ , on constate :
  - **1<sup>e</sup> observation** : La force agissant sur une particule chargée est directement proportionnelle à la charge  $|q|$  et au module de la vitesse  $v$ , c'est-à-dire :  
 $F_B \propto |q|v$ .
  - **2<sup>e</sup> observation** : Si la vitesse  $\vec{v}$  de la particule fait un angle  $\theta$  avec les lignes de  $\vec{B}$ , on trouve  $F_B \propto \sin \theta$ .



# La force magnétique... sur une particule chargée en mouvement

- La force magnétique est d'autant plus grande que l'angle  $\theta$  formé par  $\vec{v}$  et  $\vec{B}$  est proche de  $90^\circ$ .

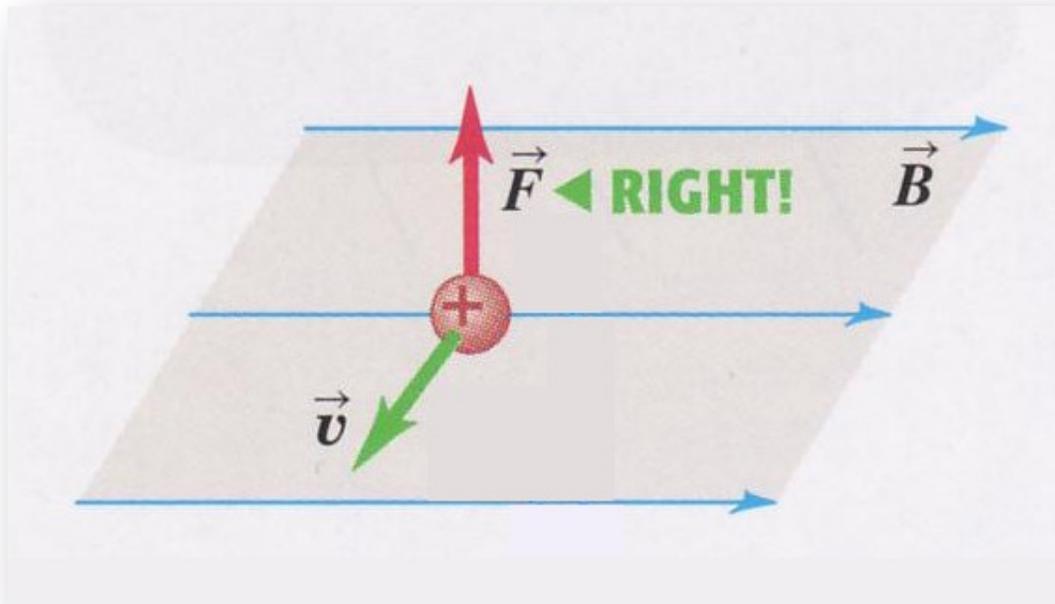


- En combinant ces deux résultats, on obtient :

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

# La force magnétique... sur une particule chargée en mouvement

- L'observation de la force nous amène également à constater :
  - **3<sup>e</sup> observation** :  $\vec{F}_B$  est perpendiculaire à la fois à  $\vec{B}$  et à  $\vec{v}$ , donc au plan défini par  $\vec{B}$  et  $\vec{v}$ .



**Les lignes de champ magnétique ne sont pas des lignes de force :**

La force exercée sur une particule chargée en mouvement n'est pas orientée selon les lignes de champ.  
Il s'agit d'une différence majeure par rapport à l'électricité.

# La force magnétique... sur une particule chargée en mouvement

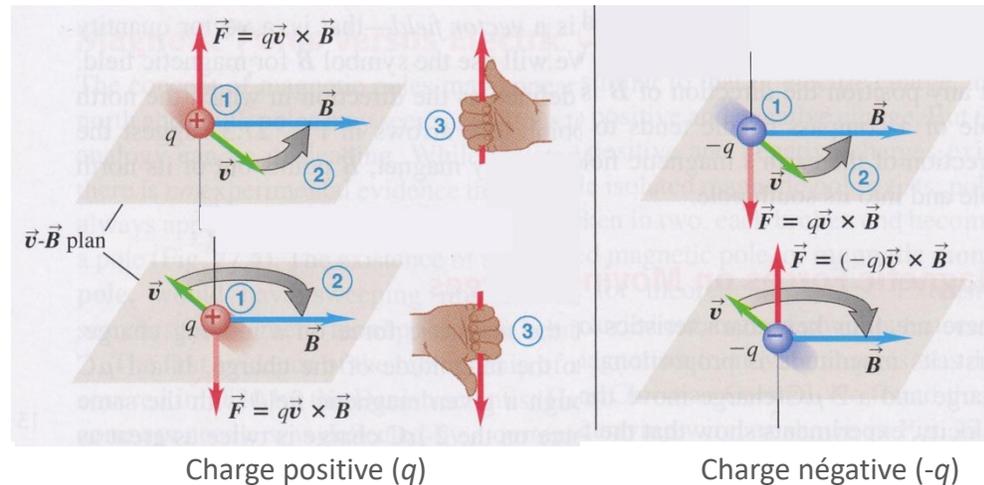
➤ En observant la force, on constate également:

- **4e observation** : L'orientation de  $\vec{F}_B$  dépend du signe de la charge en mouvement.

Règle pour trouver l'orientation de la force magnétique :

## Règle de la main droite :

1. Placer les vecteurs  $\vec{v}$  et  $\vec{B}$  au même point d'origine.
2. Orienter les doigts de la main droite selon  $\vec{v}$  et les replier pour qu'ils soient dirigés vers  $\vec{B}$ .
3. Le pouce pointe maintenant selon  $\vec{F}_B$  si la charge est positive ( $q$ ).
4. Pour une charge négative ( $-q$ ),  $\vec{F}_B$  est orientée dans le sens opposé au pouce.



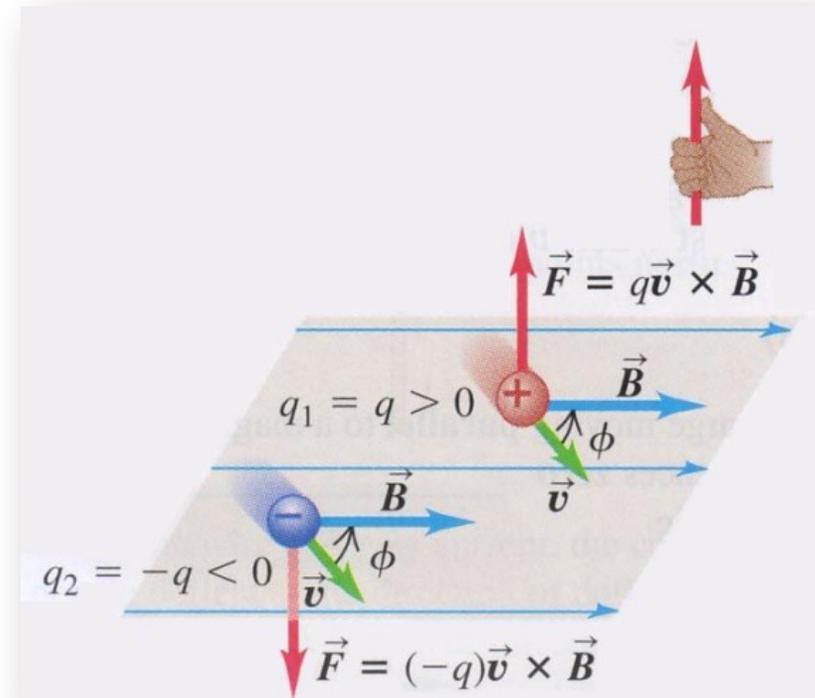
# La force magnétique... sur une particule chargée en mouvement

- Ces quatre observations nous conduisent à la définition opérationnelle suivante :

Force magnétique agissant sur une charge en mouvement :

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

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



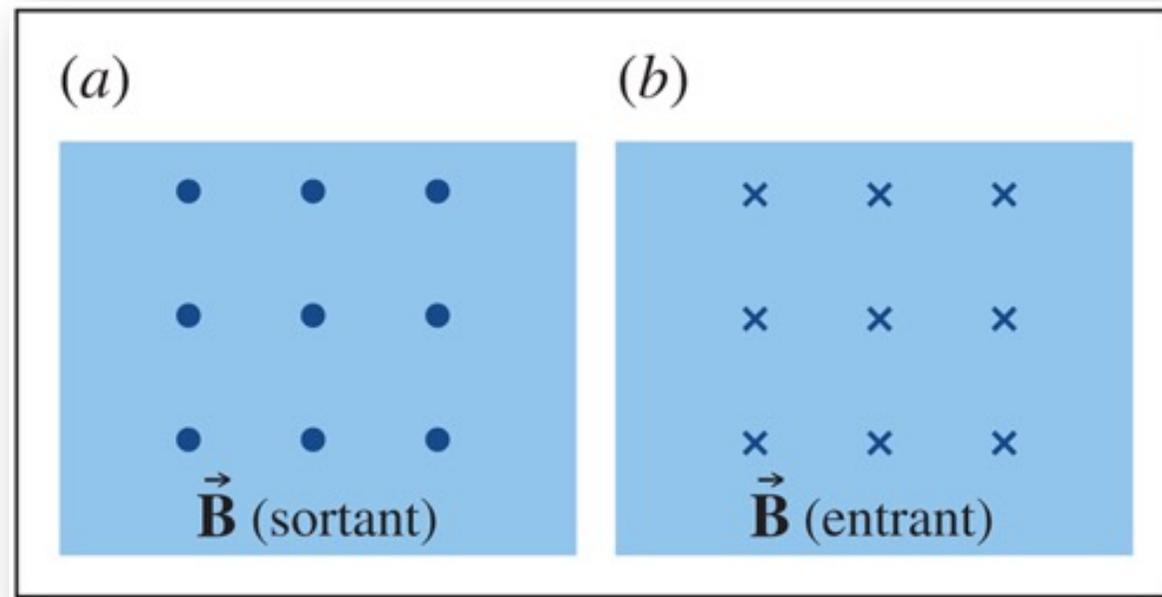
- On remarque que lorsque la charge est négative ( $-q < 0$ ), le signe moins inverse le sens du vecteur  $\vec{\mathbf{F}}_B$ .
- Notons que, puisque  $\vec{\mathbf{F}}_B$  est toujours perpendiculaire à  $\vec{\mathbf{v}}$ , une force magnétique n'effectue aucun travail ( $\delta W = \vec{\mathbf{F}} \cdot d\vec{\mathbf{s}}$ ) sur une particule libre et ne peut servir à faire varier son énergie cinétique.

# Conventions de représentation graphique

La représentation de ces trois vecteurs, dont un ( $\vec{\mathbf{F}}_B$ ) est perpendiculaire au plan formé par les deux autres ( $\vec{\mathbf{B}}$  et  $\vec{\mathbf{v}}$ ), devra se faire dans les trois dimensions.

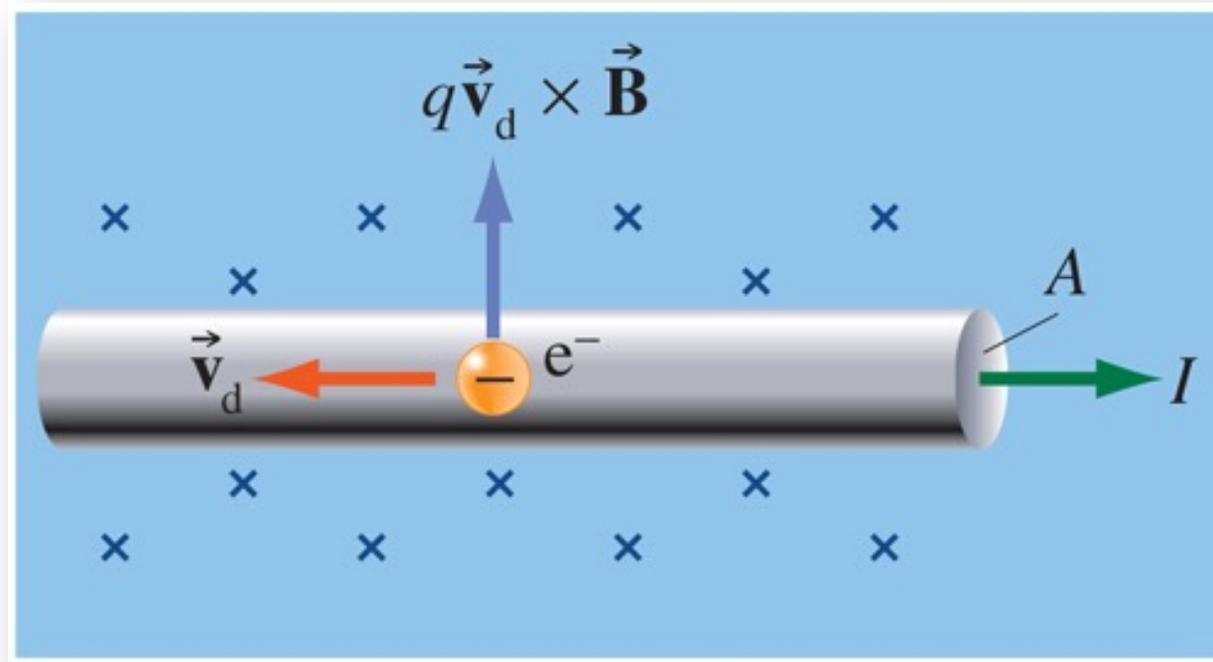
➤ La convention utilisée sera la suivante :

- Un point représente la pointe d'un vecteur « sortant » du support servant à la représentation.
- Une croix représente l'extrémité d'un vecteur « s'enfonçant » dans le support servant à la représentation.



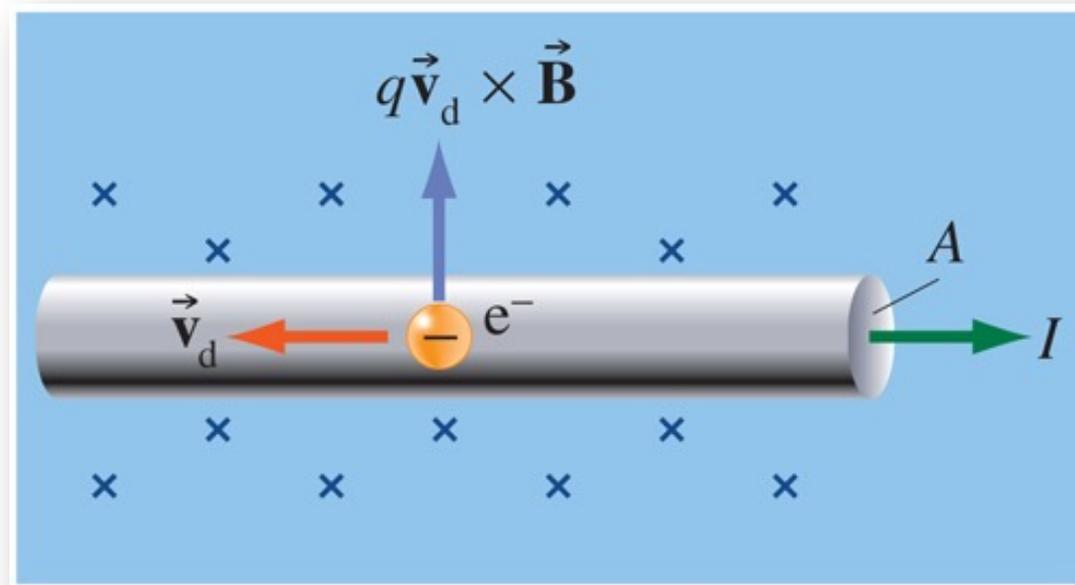
# La force magnétique... agissant sur un fil conducteur parcouru par un courant

- Un fil conducteur dans un champ magnétique n'est soumis à aucune force lorsqu'il n'est parcouru par aucun courant.
- Par contre, lorsqu'il est parcouru par un courant, les électrons acquièrent une faible vitesse de dérive et sont donc soumis à une force magnétique qui est ensuite transmise au fil.



# La force magnétique... agissant sur un fil conducteur parcouru par un courant

- Considérons un segment rectiligne de fil de longueur  $l$  et de section  $A$  parcouru par un courant  $I$  perpendiculaire à un champ magnétique uniforme.
- Si  $n$  est le nombre d'électrons de conduction par unité de volume, le nombre de ces électrons dans ce segment de fil est  $nAl$ .
- Selon l'équation du module de la force magnétique, chaque électron est soumis à une force de module  $ev_d B \sin 90^\circ = ev_d B$  et dont la direction est perpendiculaire à la fois à la vitesse de dérive (donc au fil) et au champ.



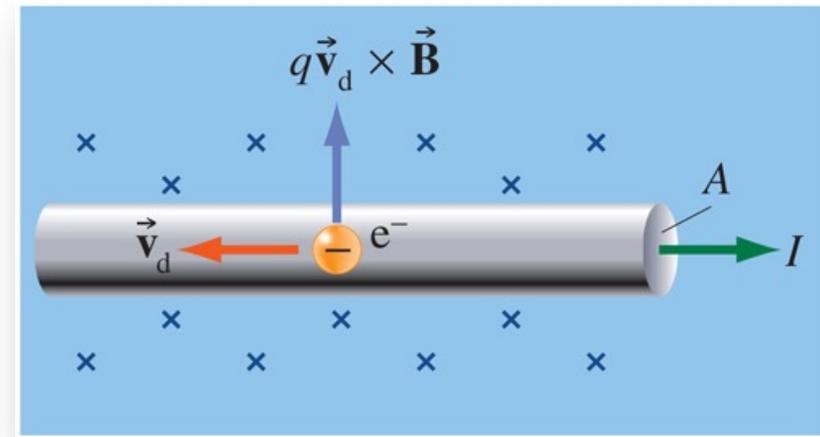
# La force magnétique... agissant sur un fil conducteur parcouru par un courant

- En multipliant cette force par le nombre d'électrons de conduction ( $nAl$ ) que contient le segment de fil, on obtient que le module de la force magnétique totale exercée sur les électrons dans ce segment est :

$$F_B = (nAl)ev_d B$$

- Nous avons vu précédemment que  $I = nAev_d$ .
- L'expression précédente devient :

$$F_B = IlB$$



- Si le conducteur parcouru par un courant n'est pas perpendiculaire au champ, la force subie par chaque électron de conduction demeure perpendiculaire à la fois au fil et au champ, mais n'a plus le même module.
- Le module de la force totale exercée sur le segment de fil conducteur parcouru par un courant devient :

$$F_B = IlB \sin \theta$$

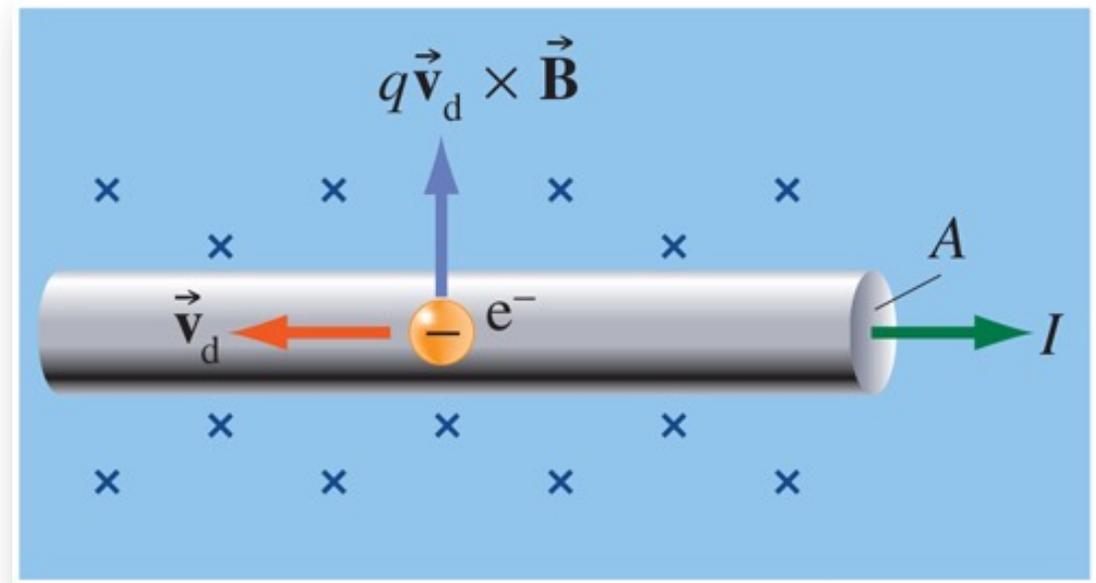
où  $\theta$  est l'angle entre le sens du courant et le champ.

# La force magnétique... agissant sur un fil conducteur parcouru par un courant

- En définissant un vecteur longueur  $\vec{l}$  dont le sens est celui du courant (et dont le module est la longueur du fil),  $\theta$  l'angle entre ce vecteur longueur  $\vec{l}$  et le champ magnétique  $\vec{B}$ ,
- En utilisant la définition du module du produit vectoriel, la force magnétique s'exerçant sur un conducteur parcouru par un courant est

$$\vec{F}_B = I\vec{l} \times \vec{B}$$

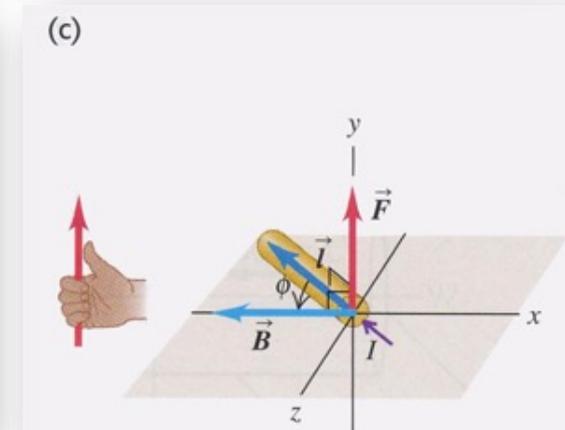
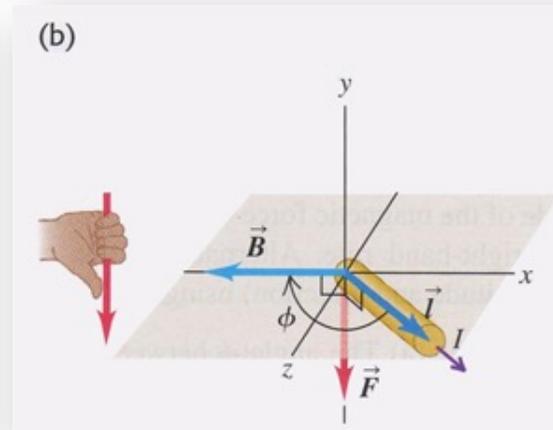
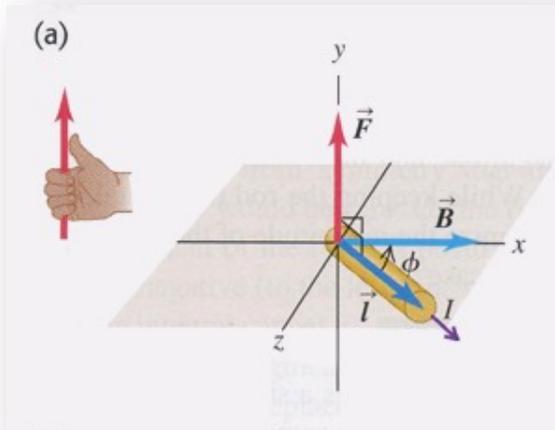
- Cette force se dénomme la **force de la Laplace**
- Cette équation n'est valable que pour un tronçon de fil rectiligne plongé dans un champ magnétique uniforme.
- Si l'une de ces deux conditions n'est pas respectée, il faut passer au calcul infinitésimal.



# La force magnétique... agissant sur un fil conducteur parcouru par un courant

## Règle de la main droite :

1. Placer les vecteurs  $\vec{l}$  et  $\vec{B}$  au même point d'origine
2. Orienter les doigts de la main droite selon  $\vec{l}$  et les replier pour qu'ils soient dirigés vers  $\vec{B}$
3. Le pouce pointe maintenant selon  $\vec{F}_B$
4. Attention au sens du courant !



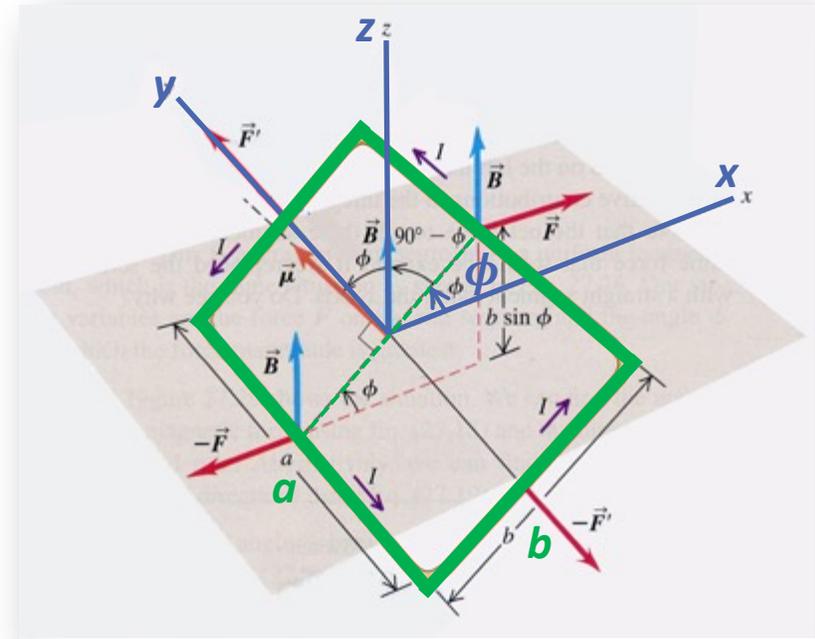
# Moment de force sur une boucle de courant

Considérons :

- une boucle de courant en forme de cadre rectangulaire de côtés  $a$  et  $b$ .
- un repère orthonormé  $xyz$  placé comme illustré sur la figure de telle sorte que la boucle de courant soit libre de pivoter autour de l'axe  $y$ .
- le champ magnétique  $\vec{B}$  est dirigé selon l'axe  $z$ .

Le plan de ce cadre forme un angle avec le champ magnétique  $\vec{B}$ .

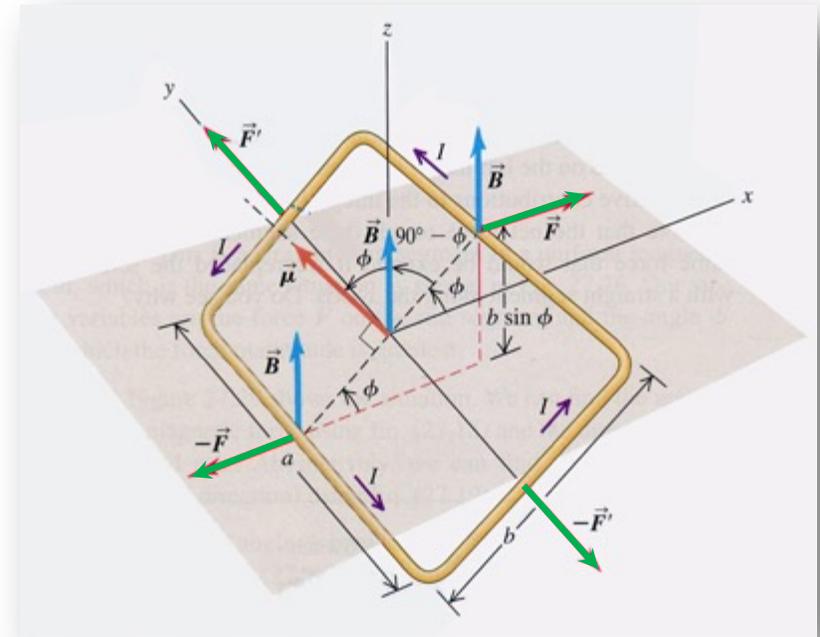
Pour décrire cette situation, on considère l'angle  $\phi$  formé par le cadre et le plan  $xy$  normal au vecteur champ magnétique  $\vec{B}$ .



# Moment de force sur une boucle de courant

Chaque côté de la boucle de courant subit une force magnétique.

- En appliquant la règle de la main droite, nous constatons que les côtés de longueur  $b$  subissent une force selon l'axe  $y$  qui tend à les écarter l'un de l'autre.
- Les côtés de longueur  $a$  subissent quant à eux une force opposée selon l'axe  $x$  qui tend à faire pivoter la boucle autour de l'axe  $y$  jusqu'à faire coïncider la boucle avec le plan  $xy$ .
- On dit que ces deux forces produisent des moments de force de même sens par rapport à l'axe central.
- Le module du moment de force total produit par ces deux forces par rapport à l'axe est :  $\tau = IAB \sin \phi$



# Moment de force sur une boucle de courant

## Applications pratiques : moteurs électriques



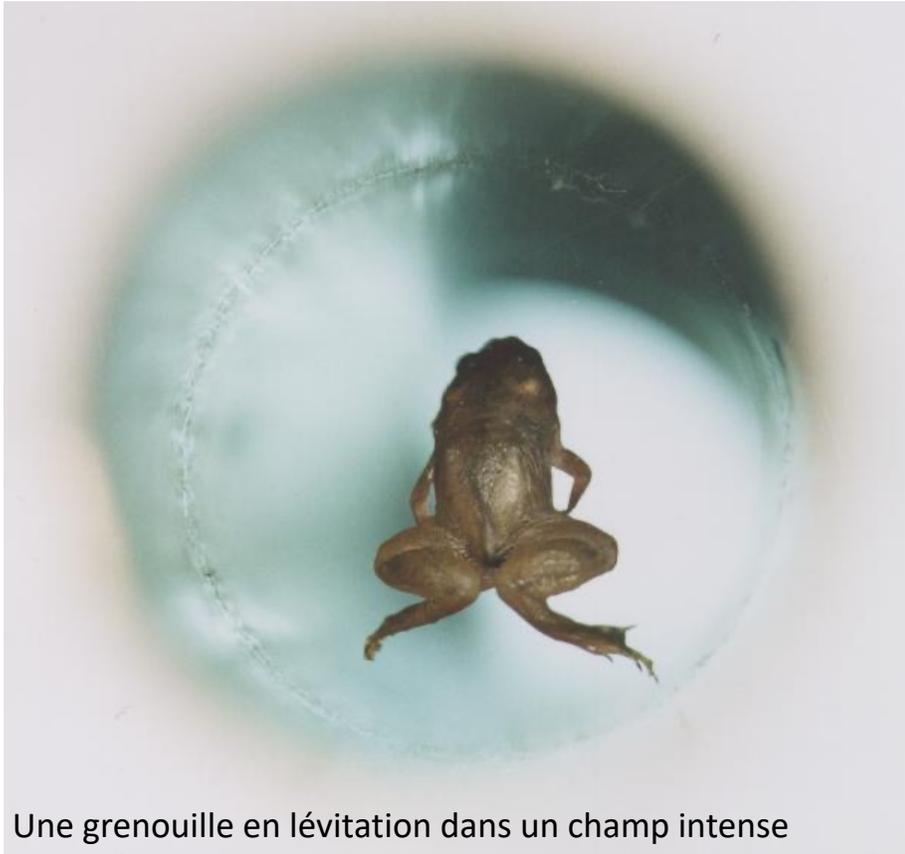
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine\\_électrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_électrique)

- Moteur à courant continu (CC)
- Moteur CC « brushless » (sans balai)
- Moteurs en courant alternatif AC synchrone/asynchrone
- Moteur universel (fonctionne en CC ou en AC)
- Moteur pas à pas

# Réponse des matériaux aux champs magnétiques et aimants

- Il existe des matériaux **naturellement magnétiques** : aimants
- Les matériaux ne se comportent pas tous de la même manière lorsqu'ils sont plongés dans un champ magnétique :
  - certains matériaux **renforcent plus ou moins fortement** le champ magnétique en leur sein, il agissent comme amplificateur du champ magnétique → **matériaux ferromagnétiques** (fer, cobalt, nickel, alliages tels que l'acier ou le néodyme-fer-bore)
  - certains matériaux **ne changent pas** le champ magnétique en leur sein  
→ **matériaux paramagnétiques** (aluminium, titane, ...)
  - certains matériaux **diminuent** légèrement le champ magnétique en leur sein  
→ **matériaux diamagnétiques** (argent, or, eau, ...)

# Comportement des matériaux diamagnétiques



Une grenouille en lévitation dans un champ intense

Par Lijnis Nelemans — English Wikipedia, CC BY-SA 3.0

Les matériaux diamagnétiques tels que l'eau répondent à une stimulation magnétique externe en générant un très faible champ magnétique opposé.

Si le champ magnétique externe est suffisamment puissant, il peut entraîner la lévitation du matériau.

Cet effet est trop faible pour faire léviter par ex. un humain, les champs nécessaires seraient importants et auraient d'autres impacts potentiels.

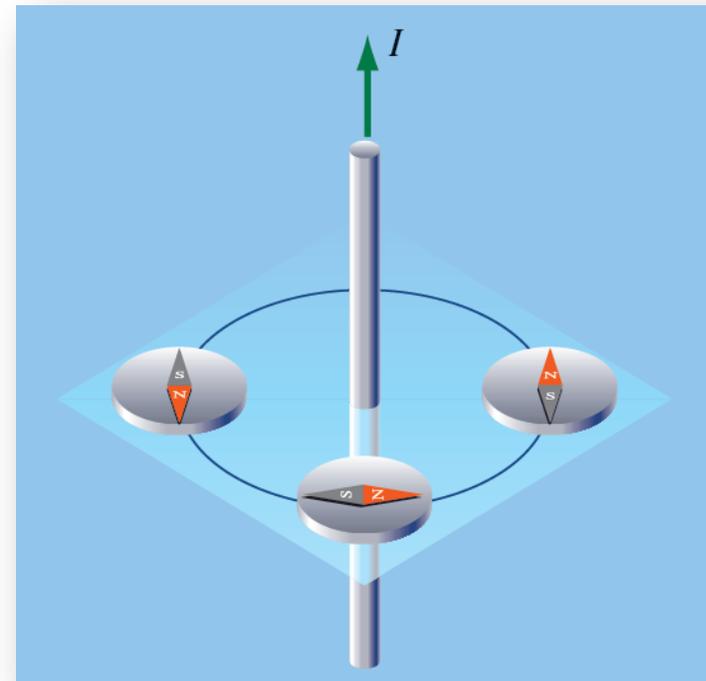
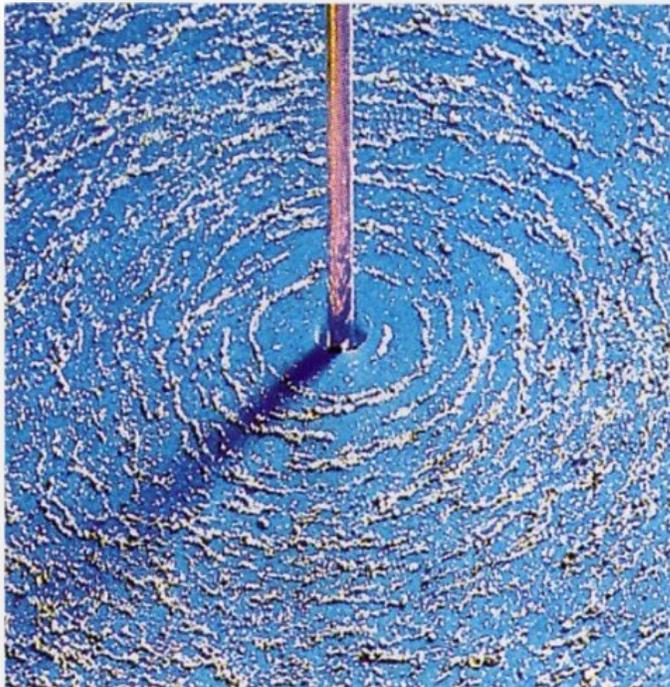
De plus petits objets par contre peuvent être mis en lévitation sans risques majeurs ...

Vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=A1vyB-O5i6E>

# Fil conducteur rectiligne

## Lignes de champ magnétique

- Pour déterminer la configuration du champ magnétique au voisinage d'un long fil conducteur parcouru par un courant, saupoudrons de limaille de fer une feuille traversée perpendiculairement par un fil conducteur.
- Nous pouvons également utiliser l'aiguille d'une boussole.
- Nous constatons que les lignes de champ forment des cercles concentriques situés dans des plans perpendiculaires au fil.



# Fil conducteur rectiligne

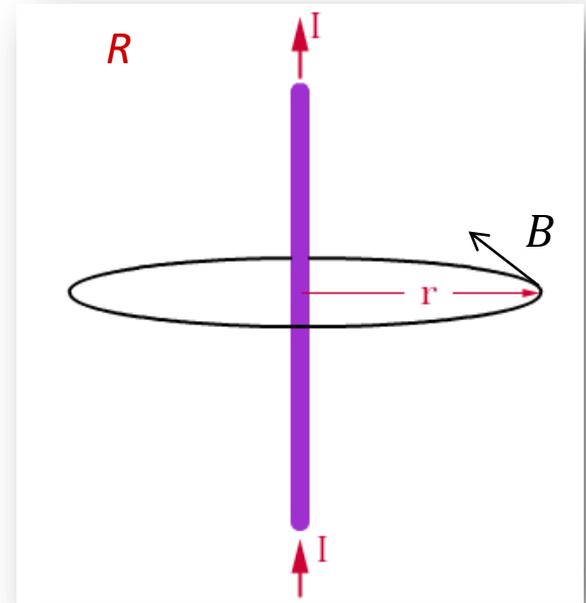
## Module du champ magnétique

- En 1820, Biot et Savart annoncèrent que le module du champ magnétique est inversement proportionnel à la distance  $R$  au fil.
- Par la suite, on put déterminer que le champ est directement proportionnel au courant  $I$ .
- En unités SI, ces résultats s'expriment sous la forme :

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

où  $\mu_0$  est la constante de perméabilité du vide, par définition de valeur

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

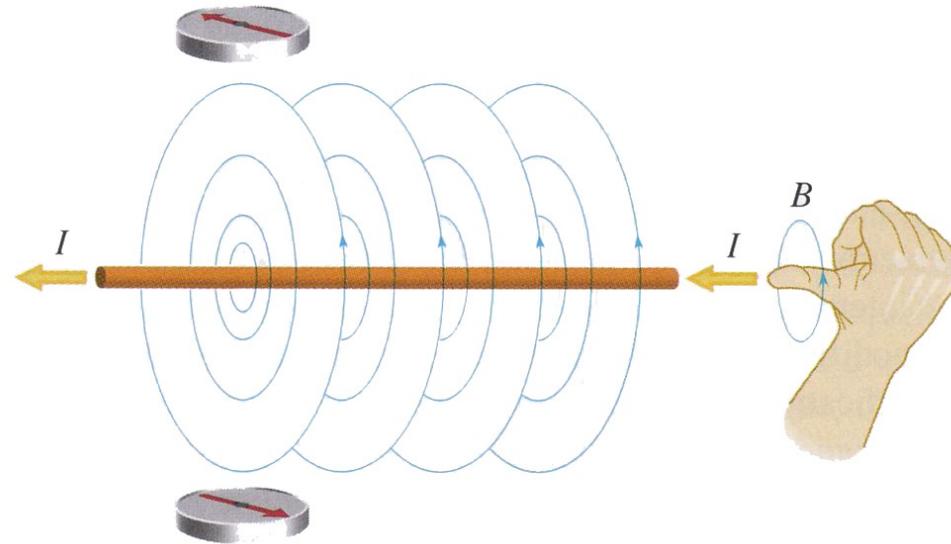


# Fil conducteur rectiligne

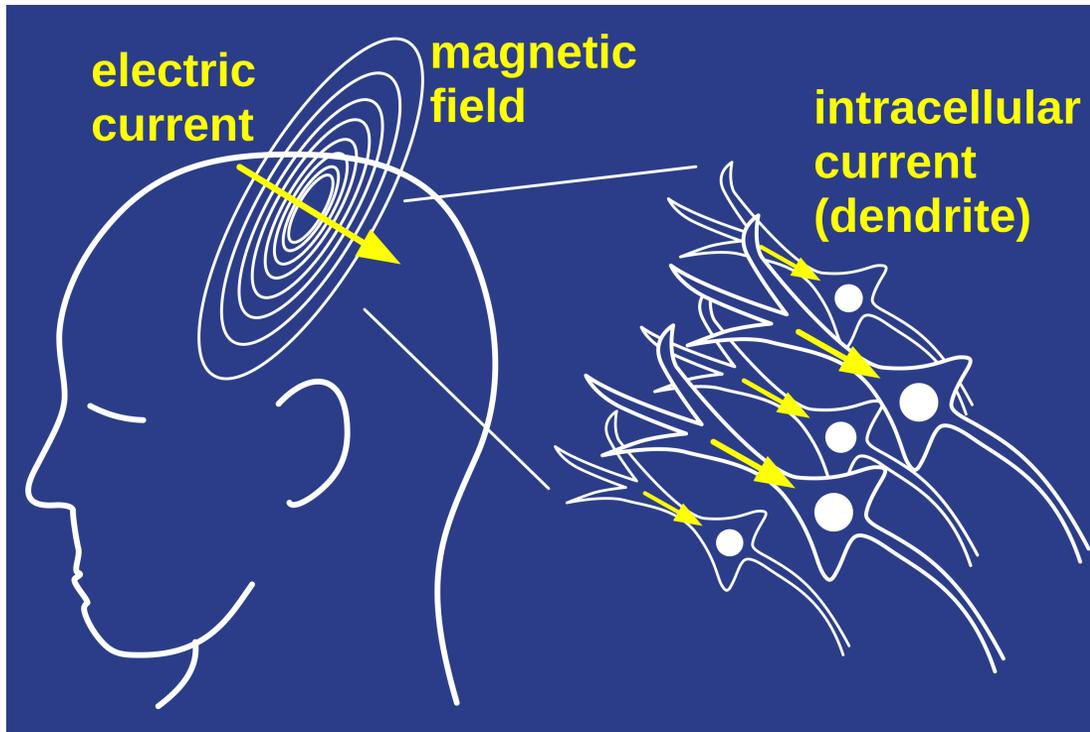
## Sens du champ magnétique

### Règle de la main droite :

1. Orienter le pouce de la main droite dans le sens du courant.
2. Les autres doigts s'enroulent dans le sens du champ magnétique  $\vec{B}$ .



# Application biomédicale : la magnéto-encéphalographie (MEG)



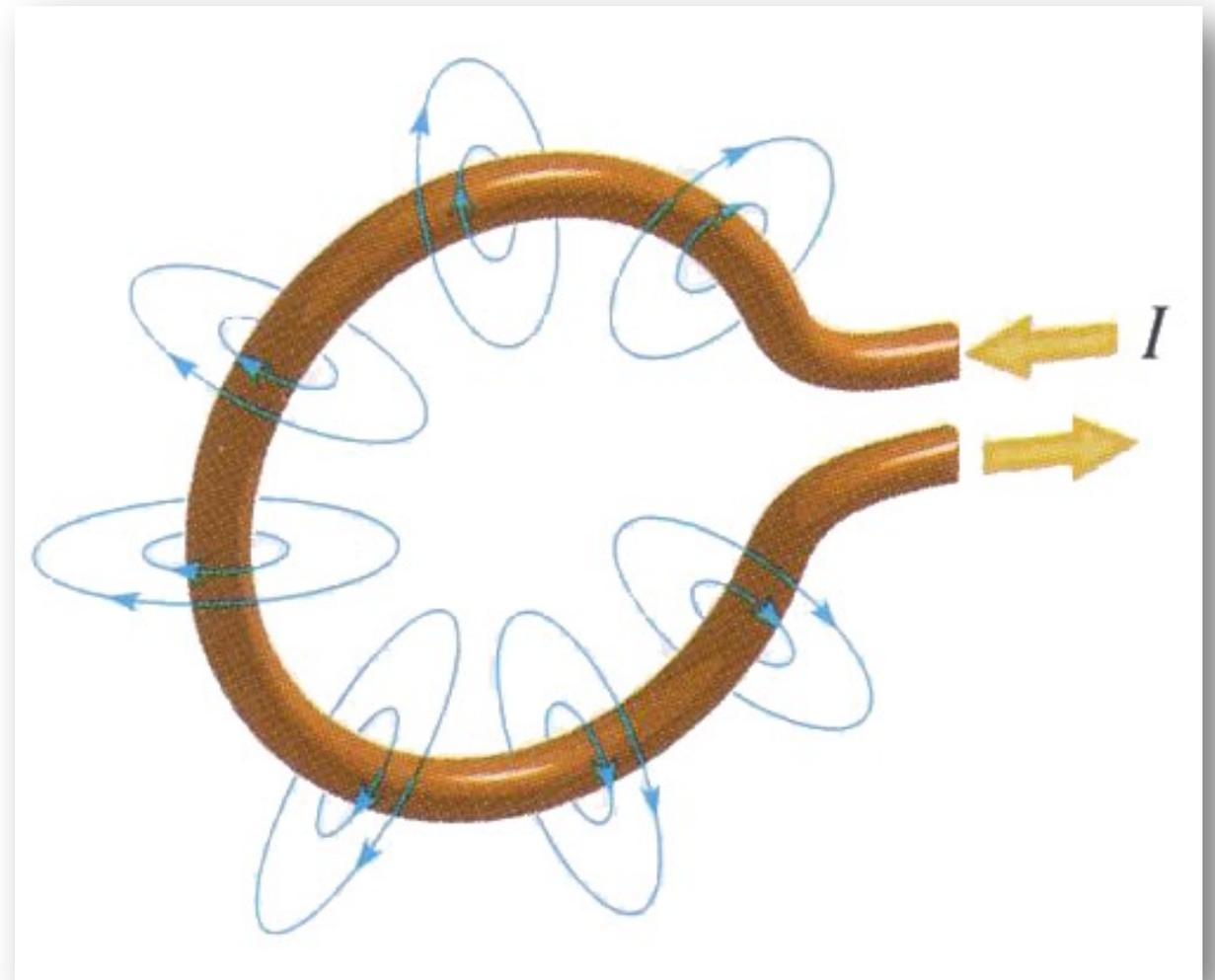
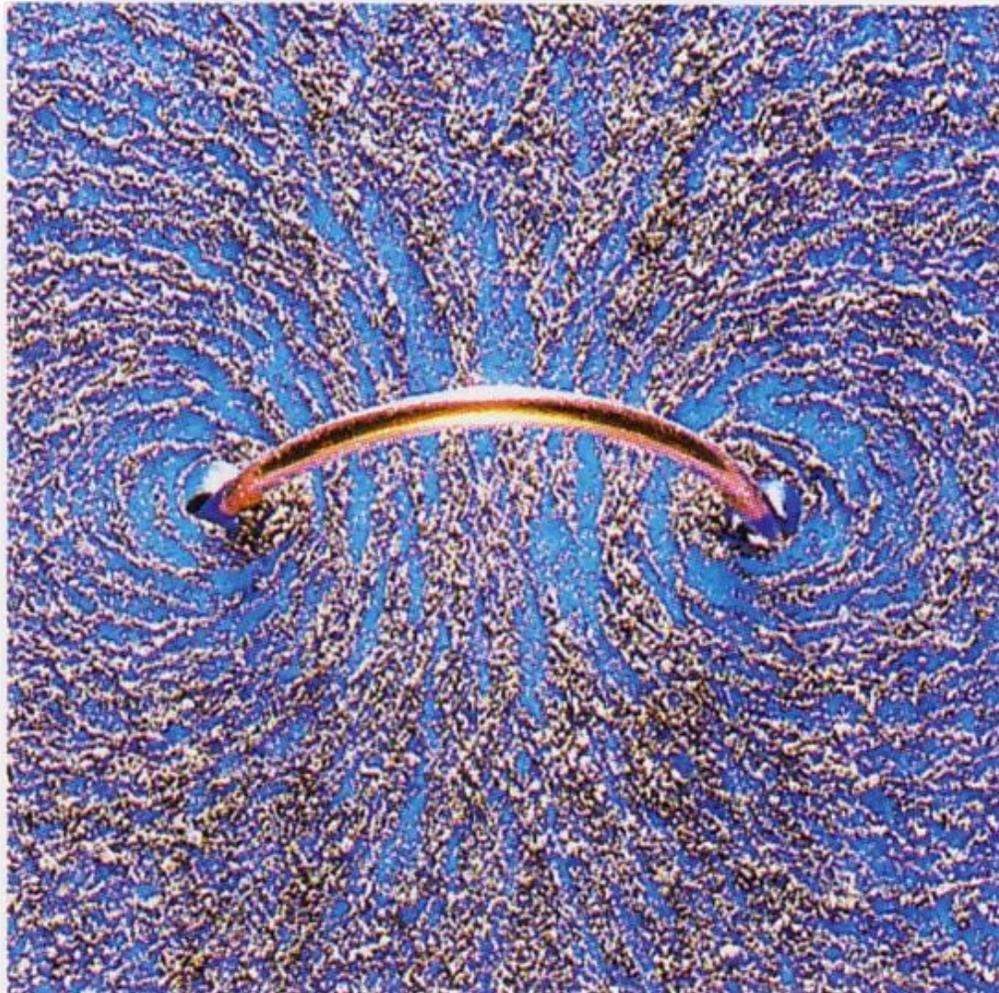
Source Tom Holroyd - English Wikipedia. - Public Domain



Source NIMH Image library, Public Domain

# Boucle de courant

## Configuration du champ magnétique

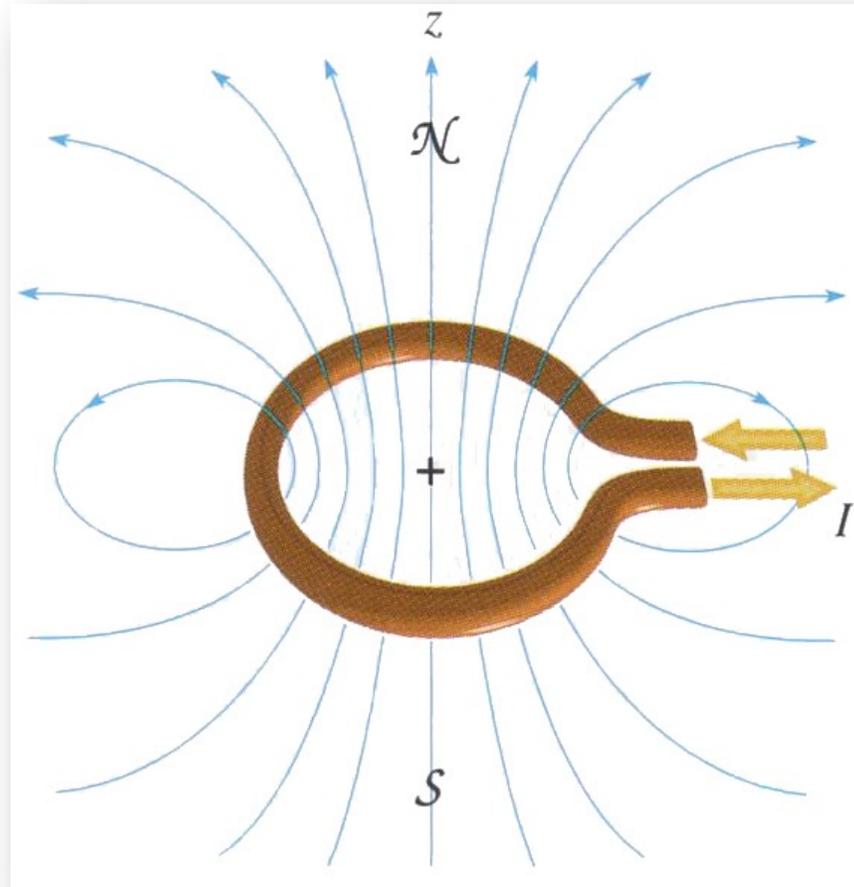


# Boucle de courant

## Module du champ magnétique au centre de la boucle

- Le module du champ magnétique au **centre** d'une boucle de courant est avec  $a$  le rayon de la boucle de courant.

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

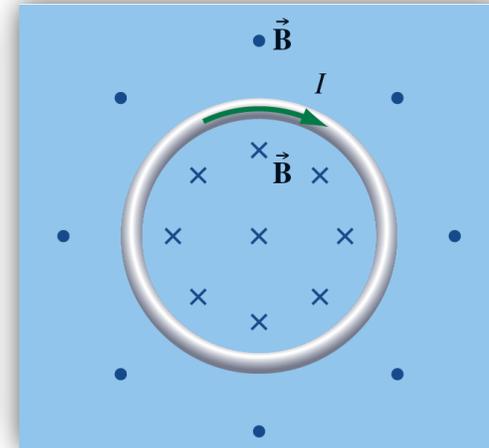
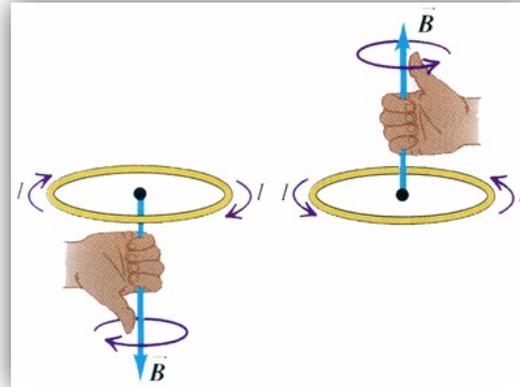


# Boucle de courant

## Sens du champ magnétique

*Variante de la règle de la main droite :*

1. Enrouler les doigts de la main droite dans le sens du courant.
2. Le pouce donne le sens dans lequel  $\vec{B}$  traverse la région intérieure de la boucle.

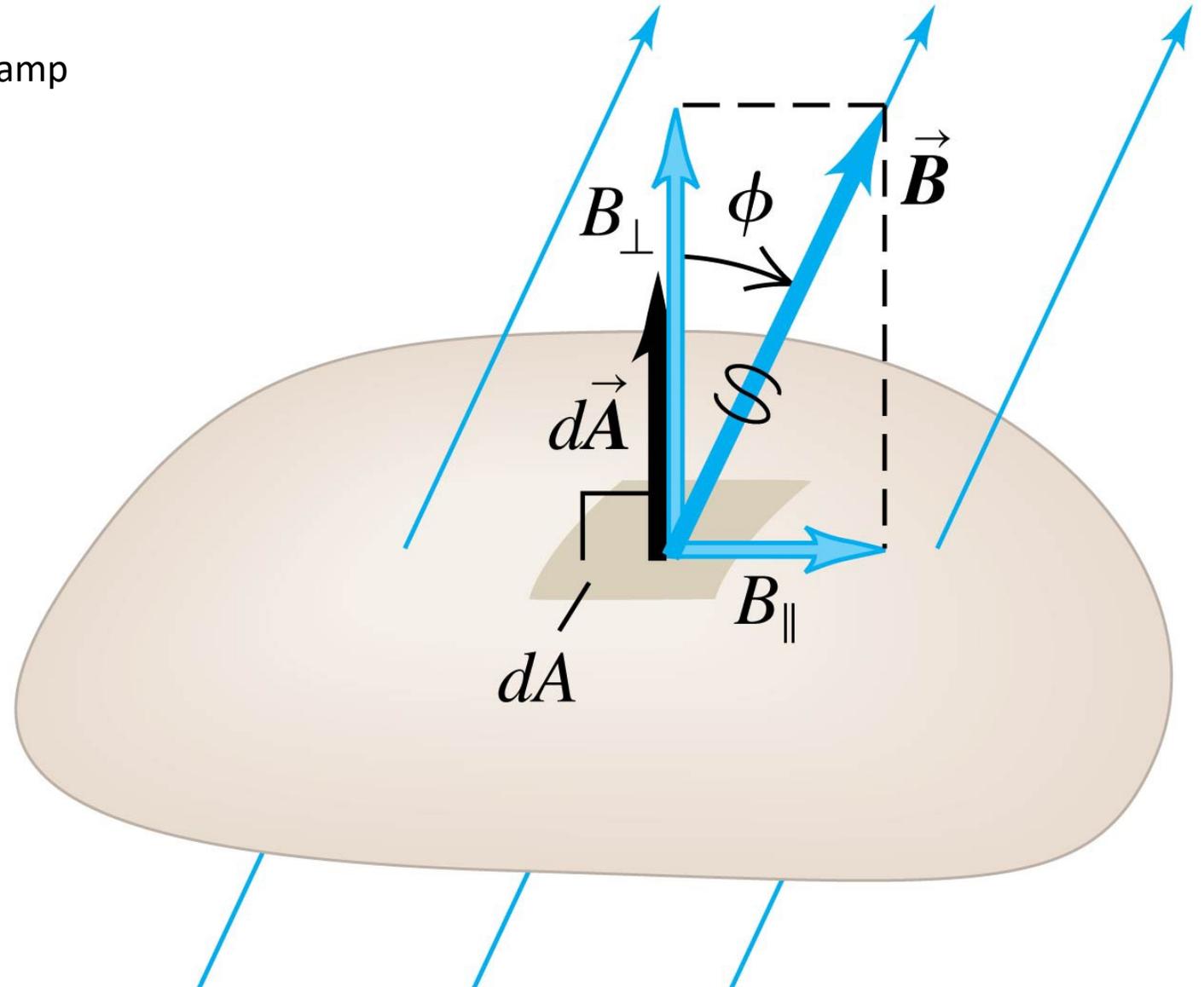


# Le flux magnétique $\Phi_B$

Le flux magnétique est l'ensemble des lignes de champ traversant une surface donnée

Unités: Weber (= T.m<sup>2</sup>)

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$



# Loi de l'induction de Lenz-Faraday

Quand le flux magnétique change sur **une boucle conductrice fermée**, on note la présence d'une force électromotrice permettant l'existence d'un courant sur la boucle

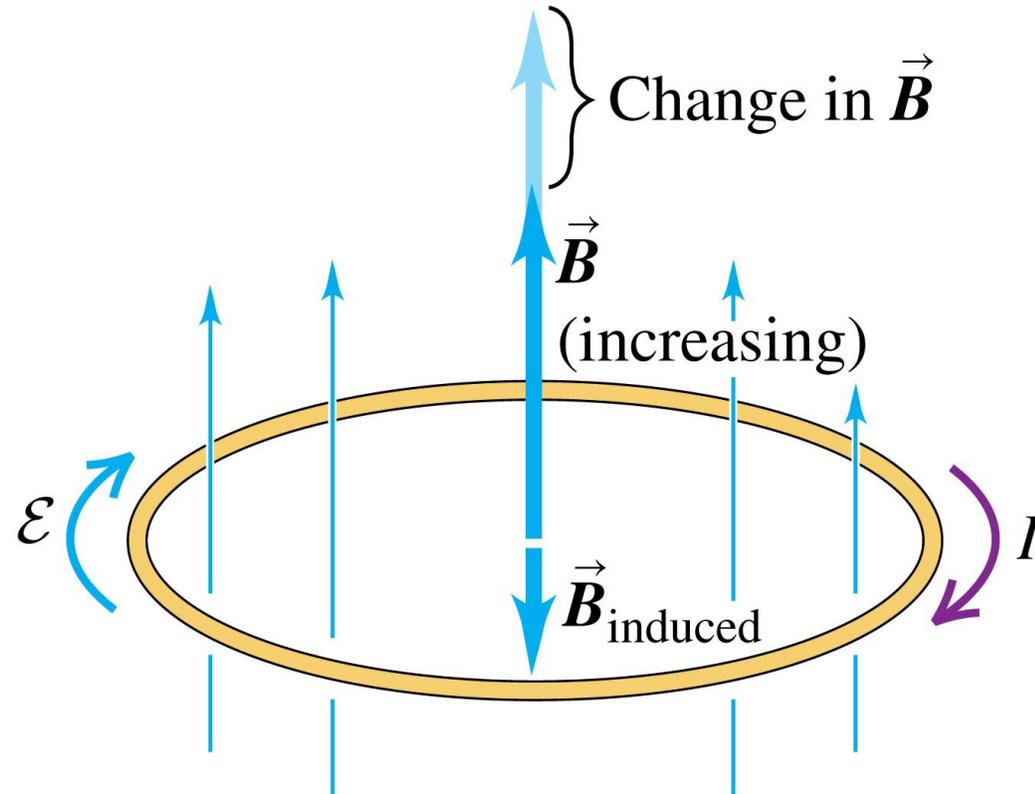
Unités : flux magnétique  $1 \text{ T} \cdot \text{m}^2 = 1 \text{ Wb} \rightarrow 1 \text{ V} = 1 \text{ Wb/s}$

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

# Détermination de la direction de la f.e.m.

La méthode permettant de déterminer la direction de la f.e.m. est fournie par la loi de Lenz-Faraday :

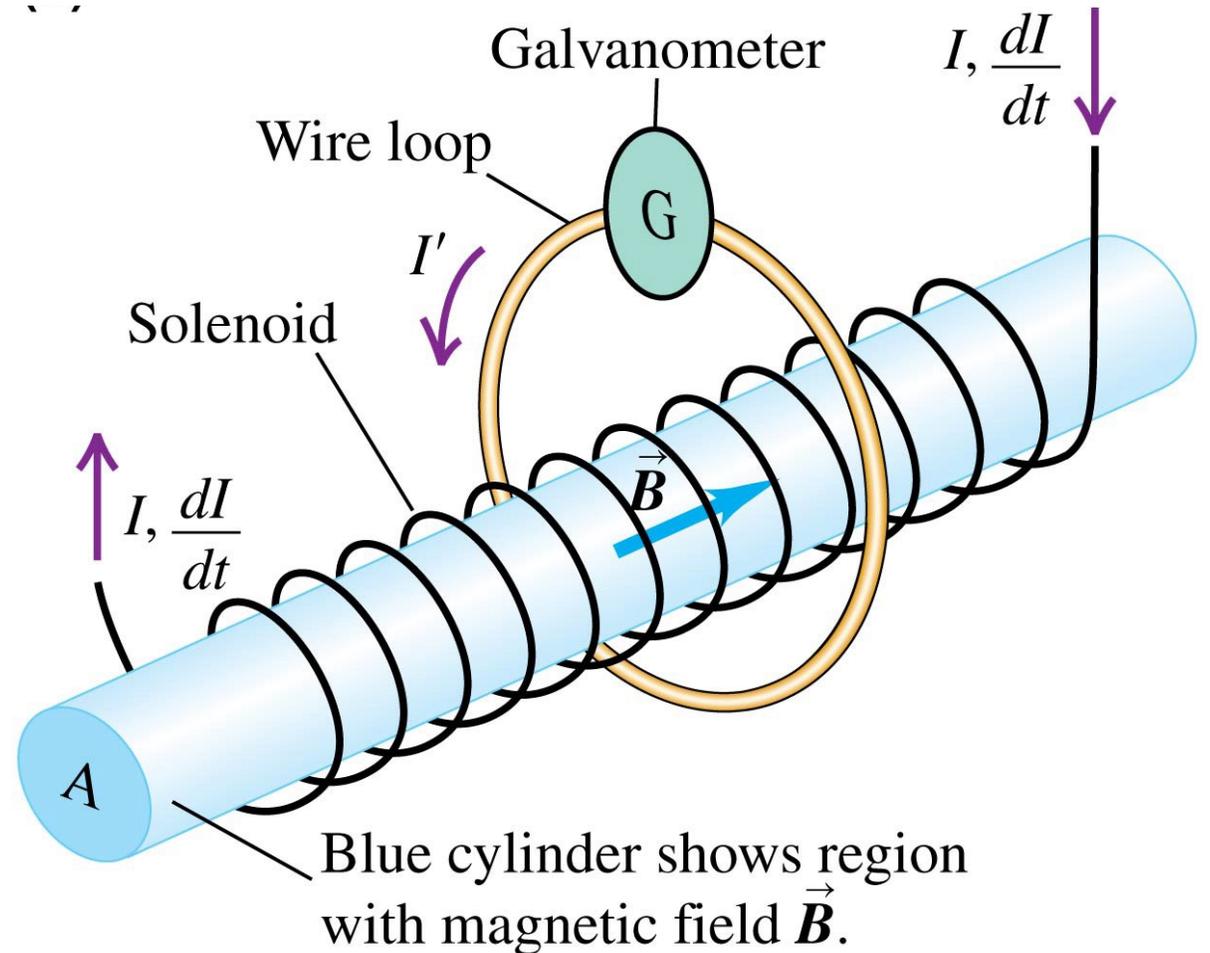
**la direction de tout effet d'induction magnétique est telle qu'elle s'oppose à la cause de cet effet.**



# Champ électrique induit (cas général)

Une variation du flux magnétique dans le temps produit un champ électrique (induit)

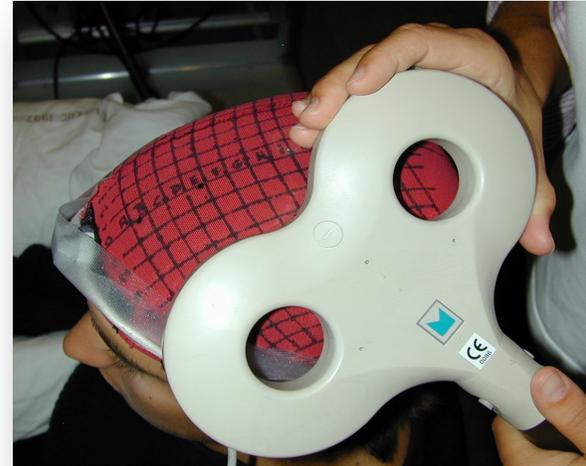
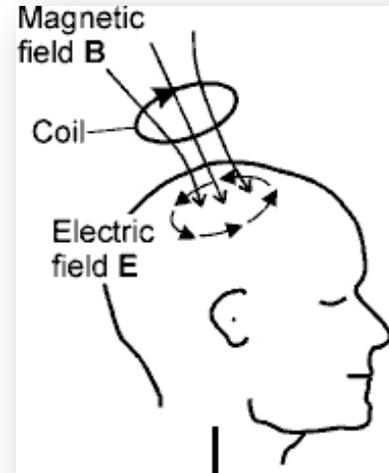
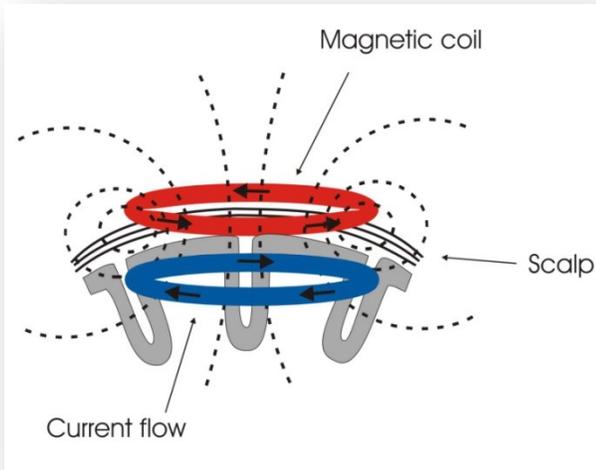
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$



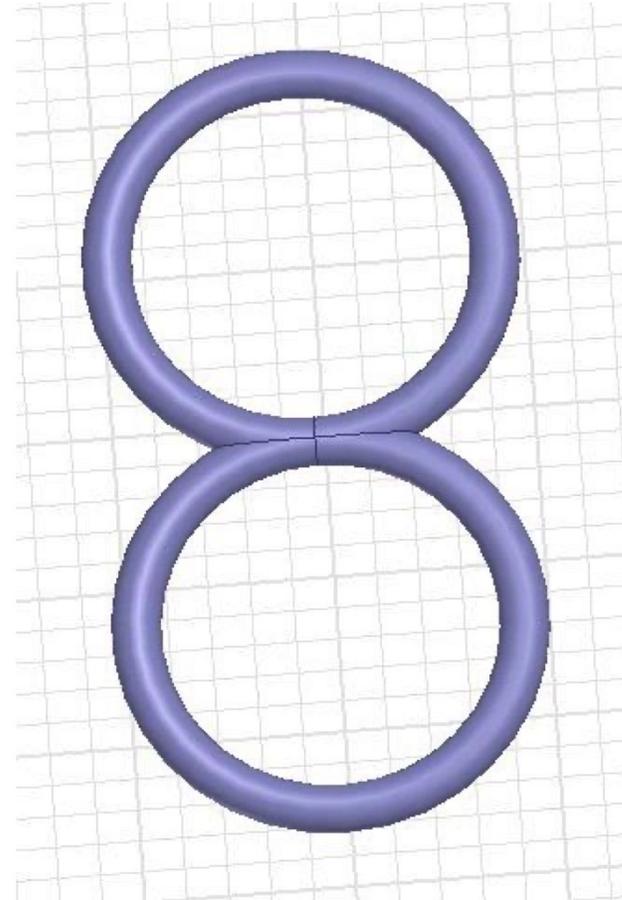
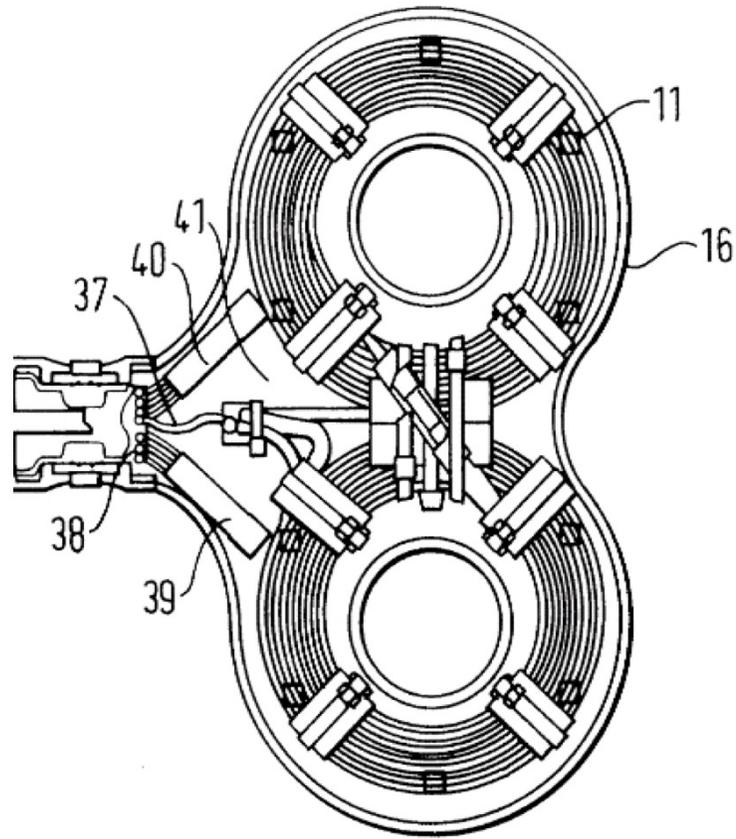
# Application

## Stimulation magnétique transcrânienne (TMS)

- Un champ magnétique est généré au moyen d'une bobine de stimulation

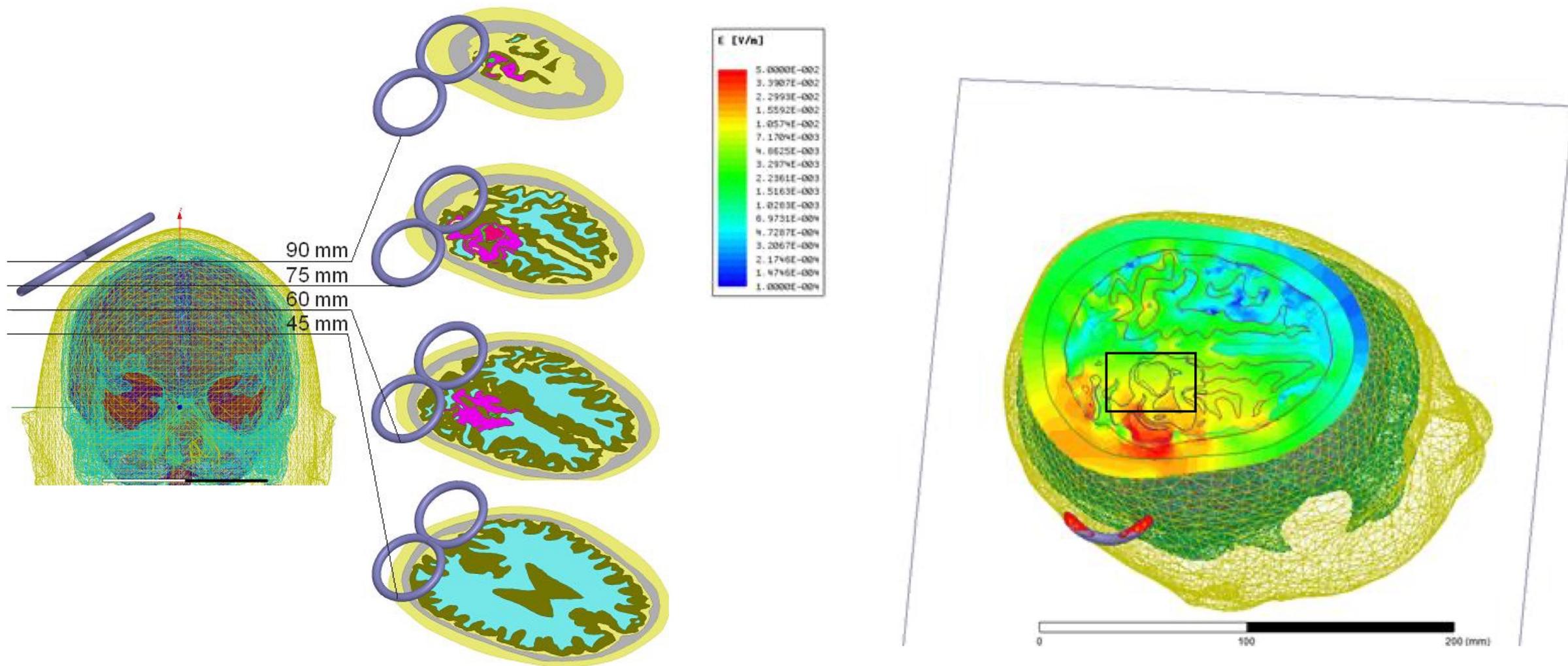


# Stimulation magnétique transcrânienne



Source Burnham, Edward H.. "Finite Element Analysis of a Transcranial Electromagnetic Stimulation Case Study." (2017).

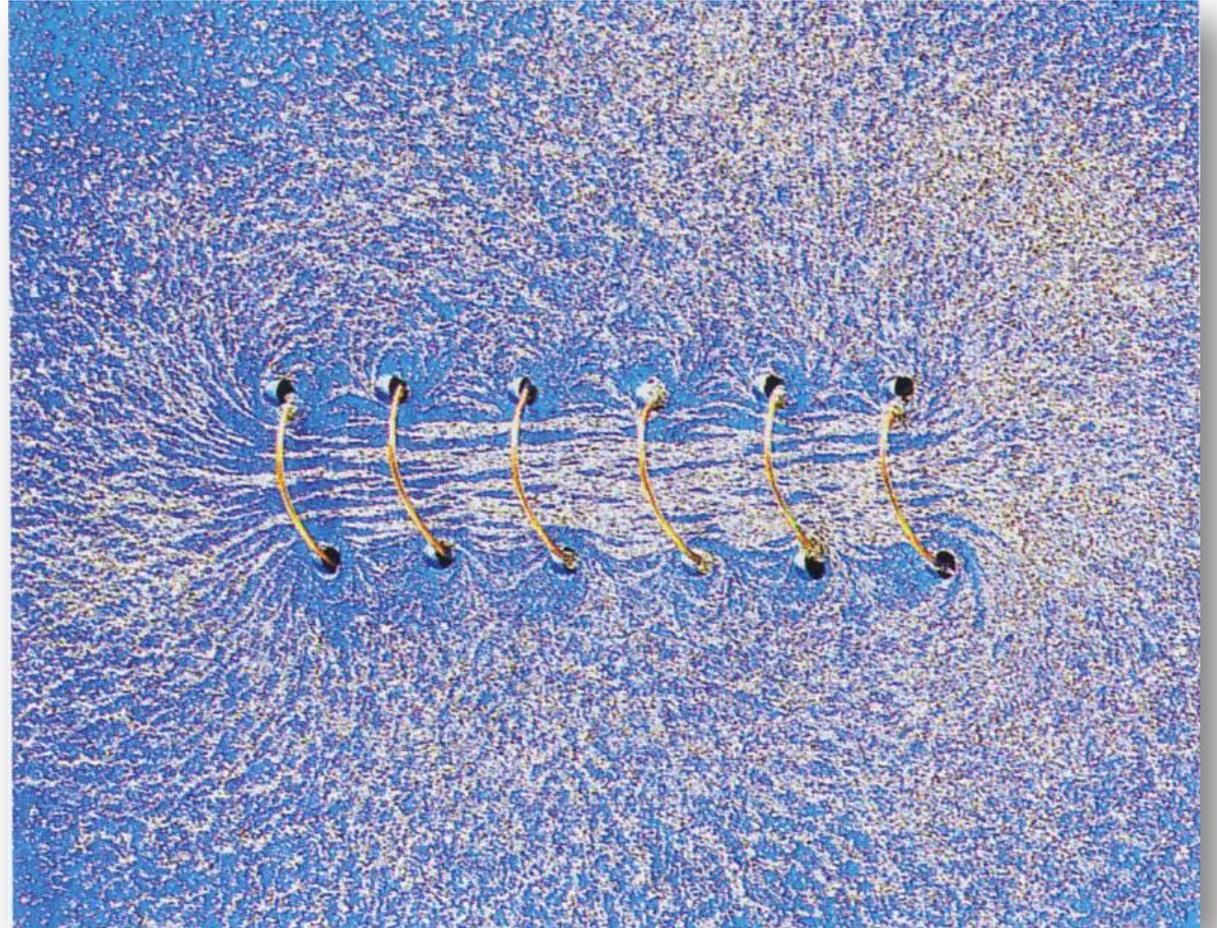
# Stimulation magnétique transcrânienne



Source Burnham, Edward H.. "Finite Element Analysis of a Transcranial Electromagnetic Stimulation Case Study." (2017).

# Solénoïde

- Un solénoïde (ou une bobine) est constitué de spires très serrées et en très grand nombre mais non superposées.
- A l'intérieur du solénoïde, les contributions de chaque spire s'additionnent et le champ magnétique est donc intense.  
Près de l'axe, il est pratiquement uniforme.
- A l'extérieur de la bobine, les contributions des divers éléments de courant ont tendance à s'annuler mutuellement et le champ est donc beaucoup plus faible.

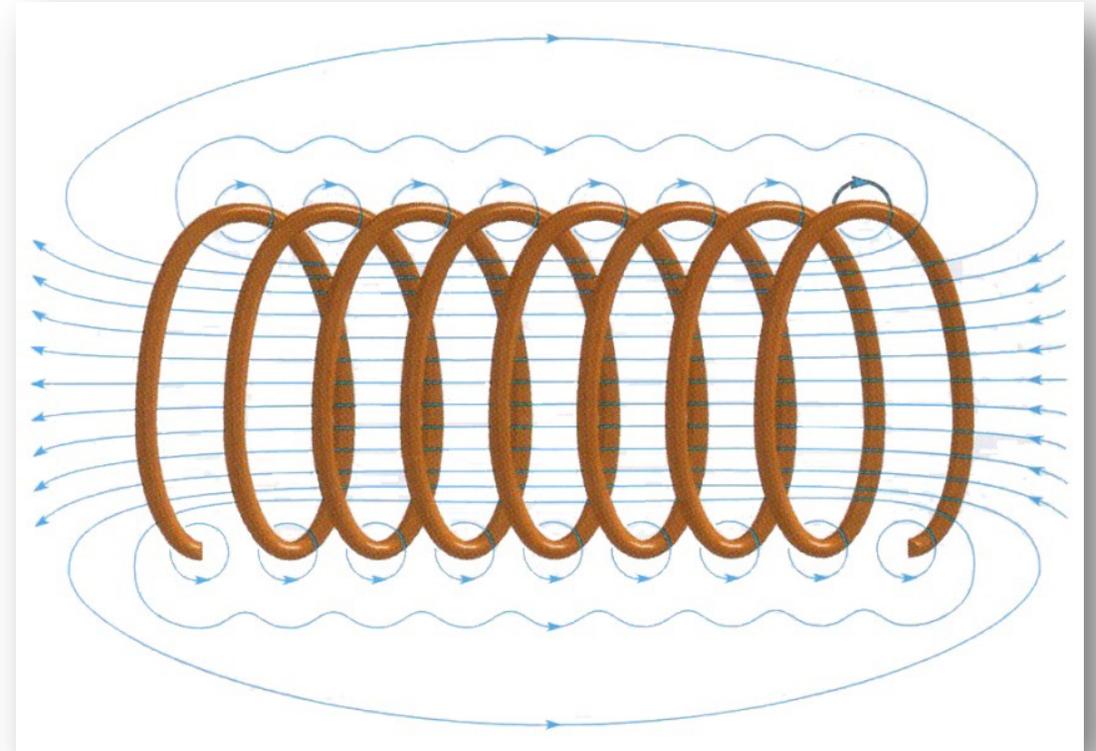
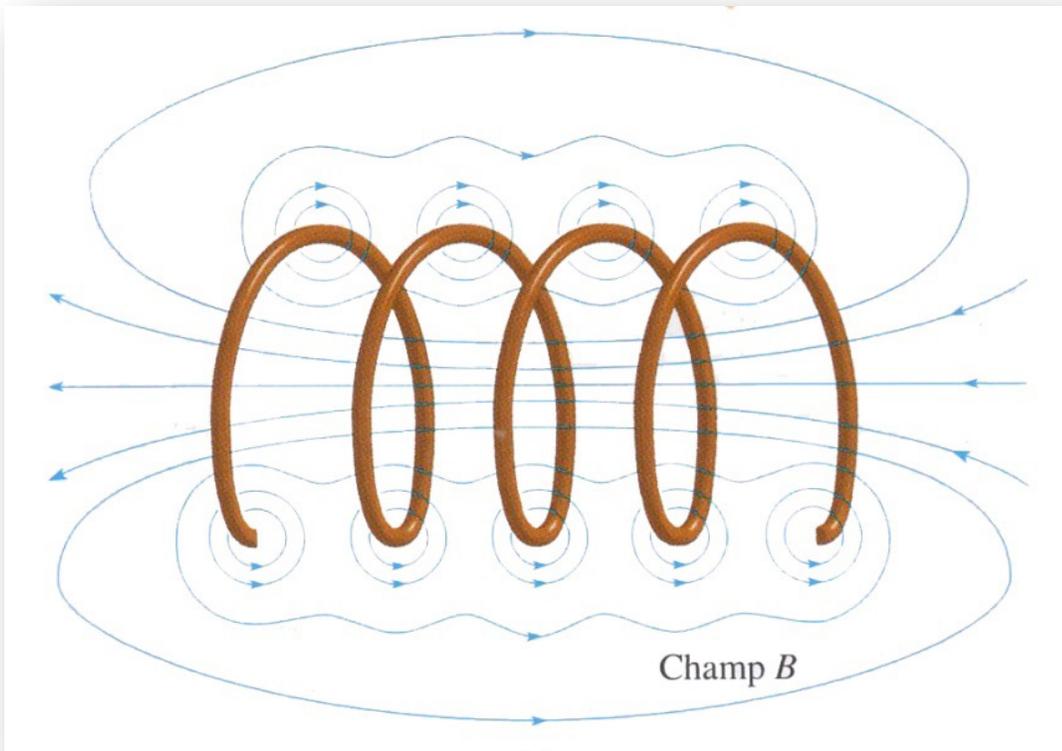


# Solénoïde

- A l'intérieur d'un solénoïde très long comportant  $N$  spires réparties sur une longueur  $L$  et loin des extrémités, le module du champ magnétique est

$$B = \mu_0 n I$$

avec  $n = N/L$ , le nombre de spires par unité de longueur.



# Application : champ magnétique pour l'imagerie (IRM)

L'IRM (imagerie par résonance magnétique) nécessite un champ magnétique d'au moins 1,5 T.

Un champ plus élevé augmente la résolution.

Ces champs sont obtenus à l'aide de matériaux supraconducteurs devenant très conducteur à basse température (hélium liquide 4.2 K) ...

la faible résistance permet d'atteindre des champs importants avec une faible dissipation thermique par effet Joule.



# Imagerie par résonance magnétique (IRM)

---



<https://youtu.be/tm20fhK-VAg>

# Electroaimants

- Une boucle (ou un solénoïde) parcourue par un courant est appelé un **électroaimant**, c'est-à-dire un dispositif qui tire son aimantation du courant électrique qui le traverse.

