

## Chapitre IV : ELECTROMAGNETISME

La magnétostatique est l'étude des champs magnétiques stationnaires. C'est le deuxième phénomène de base de l'électromagnétisme. Autrefois, on pensait que l'électricité et le magnétisme étaient deux phénomènes indépendants. Cependant, on sait maintenant qu'ils sont reliés. Le champ magnétique est représenté par  $\vec{H}$  (unité : Henry par mètre [H/m]), tandis que la densité de flux magnétique est représenté par  $\vec{B}$  (unité : Tesla [T]). On verra que plusieurs des relations développées pour l'électrostatique ont une forme similaire pour la magnétostatique.

On peut résumer les cas où sont produits les champs électriques et magnétiques :

**Charge stationnaire :** Une charge stationnaire ne produit qu'un champ électrique.

Donc,  $\vec{u} = 0$ ,  $\vec{E} \neq 0$  et  $\vec{B} = 0$ .

**Charge en mouvement :** Une charge en mouvement produit un champ électrique et un champ magnétique. Dans ce cas-ci,  $\vec{u} \neq 0$ ,  $\vec{E} \neq 0$  et  $\vec{B} \neq 0$ . La vitesse de mouvement est constante.

**Charge en accélération :** Une charge qui accélère produit un champ électrique, un champ magnétique, et un champ électromagnétique radiant. Dans ce cas-ci,  $\vec{u} \neq 0$ ,  $\vec{E} \neq 0$  et  $\vec{B} \neq 0$

## 1. INTRODUCTION.

Les aimants sont connus depuis l'Antiquité, sous le nom de magnétite, pierre trouvée à proximité de la ville de Magnesia (Turquie). C'est de cette pierre que provient le nom actuel de champ magnétique.

Dès l'antiquité :

- observation de forces d'interaction entre matériaux dits aimantés.
- Utilisation de la boussole dès le 12<sup>ème</sup> siècle.
- En 1820, observation par OERSTED (1777-1851) de l'action d'un courant électrique sur un petit aimant.
- Étude des phénomènes par AMPÈRE (1775-1836), LAPLACE (1749-1827), BIOT (1774,1862), SAVART (1791-1841). Mise en évidence de l'action sur un aimant sur un circuit.
- Mise en évidence de l'action d'un aimant ou d'un courant sur un faisceau de particules : THOMPSON (1856-1940).

## 2. Phénomènes fondamentaux:

### 2.1. Aimants naturels

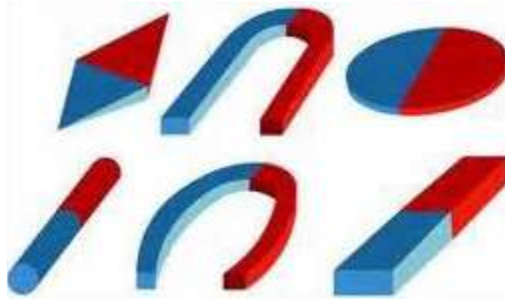
Ce sont des oxydes de fer qui ont la propriété naturelle d'attirer le fer et d'autres substances,



**Aimant naturel**

### 2.2. Aimants artificiels

En frottant un barreau d'acier avec un aimant naturel, on obtient un aimant artificiel.



Les aimants permanents fabriquent avec des matériaux ferromagnétiques durs, qui sont ceux qui, après avoir été magnétisés, conservent leurs propriétés magnétiques jusqu'à ce qu'ils soient démagnétisés, ce qui est le phénomène qui se produit quand on applique un champ magnétique contrairement à celui du début.

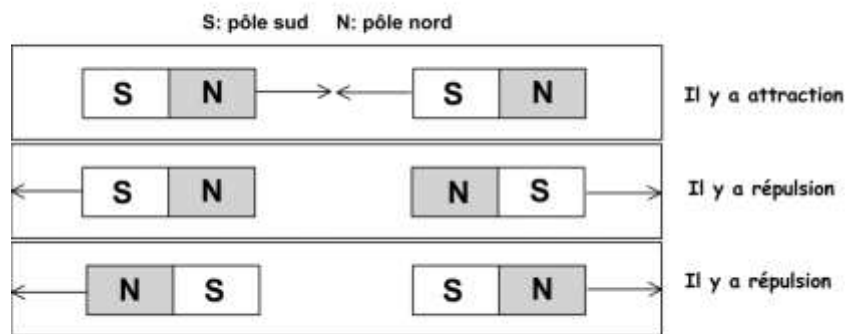
Les matériaux utilisés pour la fabrication d'un aimant permanent sont :

- L'alliage de néodyme, de fer et de bore est utilisé pour la fabrication des célèbres NdFeB, NIB et Neo.
- C'est l'alliage d'aluminium, de nickel et de cobalt et parfois de cuivre, de fer et de titane sont utilisés.
- Cobalt-Samarium. Comme son nom l'indique, il est fabriqué à partir de l'alliage de samarium et de cobalt.
- C'est le fer cristallisé en système cubique.

### 2.3. Propriétés magnétiques des substances

- Substances paramagnétiques : faiblement attirées par un aimant (oxygène, air, ....),
- Substances diamagnétiques : faiblement repassés (tout les gazes, le plomb, le zinc, l'or,...),
- Substances ferromagnétiques : fortement attirés (fer, acier, fonte, ...),

## 2.4. Actions naturelles des pôles



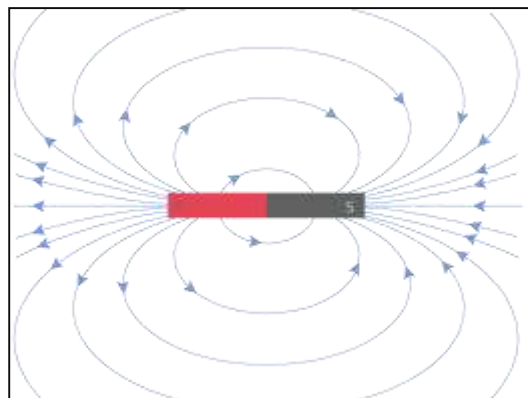
- Les pôles de mêmes noms se repoussent,
- Les pôles de noms contraires s'attirent,
- Les actions magnétiques décroissent très vite lorsque la distance croît,

## 3. Définition d'un champ magnétique.

Dans toute la suite de ce cours, le champ magnétique sera indépendant du temps, donc créé par une distribution de courants indépendante du temps : Magnétostatique.

### 3.1. Description du champ magnétique:

Un aimant produit un champ vectoriel c'est le champ magnétique  $\vec{B}$ . Un aimant est une pierre noire qui a la propriété d'attirer des objets en fer. Il est constitué de deux types de pôles différents. Par exemple, l'extrémité d'une aiguille aimantée qui pointe vers le Nord est appelée pôle nord et l'autre extrémité pôle sud.



Champ magnétique créé par un aimant droit

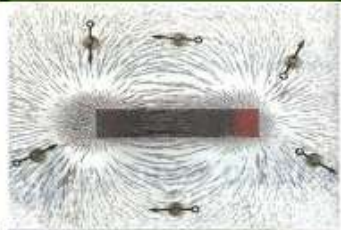
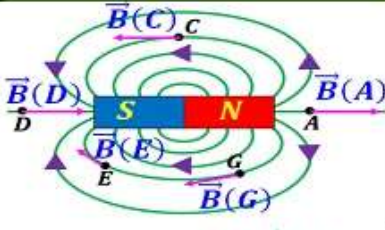
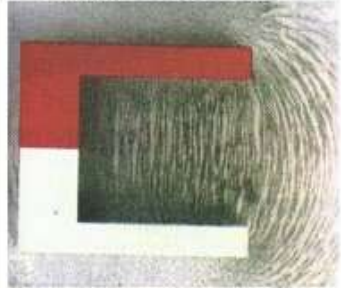
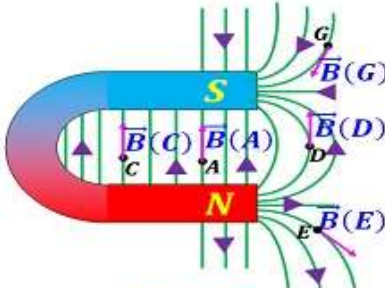

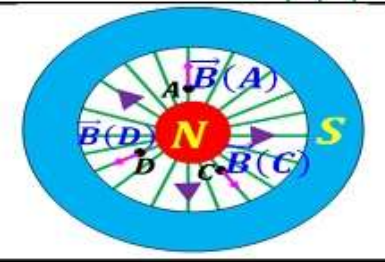
- Le champ magnétique de l'aimant c'est l'espace autour de l'aimant et dans lequel de manifeste son influence,
- Le champ est une région de l'espace où il existe un état magnétique susceptible de se manifester par des forces,
- Le champ magnétique est représenté par un vecteur.

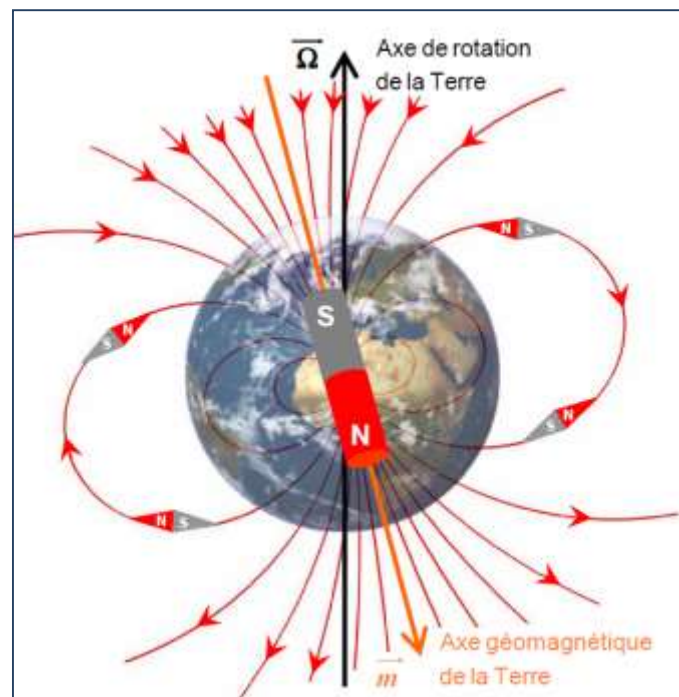
### 3.2. Caractérisation du champ magnétostatique :

Le vecteur champ magnétique en chaque point de l'espace est défini par l'action subie par une petite aiguille aimantée (boussole) placée en ce point. (Équivalent de la charge d'essai pour le champ électrostatique) :  $\mathbf{B}$  a la direction et le sens de l'axe Sud-Nord de la petite aiguille aimantée. (Remarque : Le pôle nord terrestre géographique est proche du pôle sud magnétique.)

Les éléments du vecteur champ magnétique en un point :

- Son origine est le point considéré,
- Sa direction est tangente à la ligne de champ qui passe par le point,
- Son sens est celui dans lequel cette ligne de champ est orientée,
- Sa valeur (module ou norme du vecteur) dépend de la distance du point à la source de magnétisme et des caractéristiques de celle-ci,

Type de l'aimant	Figure obtenu	Représentation
Aimant droit		
Aimant en forme U		
Aimant de haut-parleur		



Représentation du champ magnétique terrestre.

L'utilisation des aiguilles aimantées comme boussole nous indique que la Terre se comporte comme un aimant. Indiquer sur le schéma les pôles N et S de l'aimant. Ainsi, on

constate que le pôle **Sud** de l'aimant équivalent correspond à peu près au Nord géographique équivalent.

### 3.3. Ordres de grandeur

- Unité du champ magnétique : Le tesla T.
- Champ magnétique terrestre : environ  $10^{-5}$  T.
- Champ magnétique usuel au labo : environ  $10^{-4}$  T.
- Champ magnétique maximal jamais atteint: quelques dizaines de teslas.

### 3.4. Spectre magnétique d'un aimant

Les lignes d'induction sont dirigées :

- A l'extérieur : du pôle Nord au pôle Sud,
- A l'intérieur : du pôle Sud au pôle Nord,

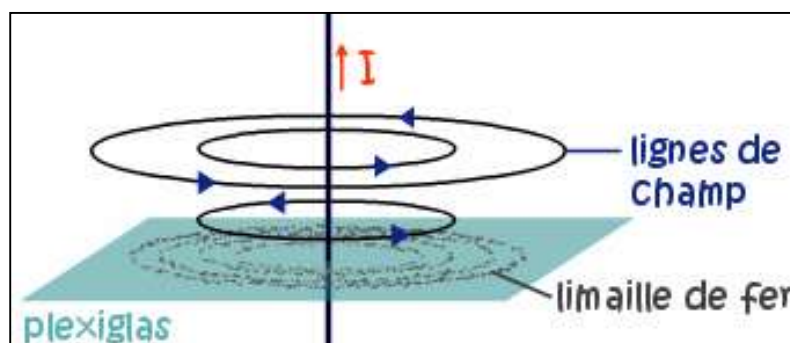
## 4. Le champ magnétique crée par un courant:

Le problème consiste à déterminer B dans le cas d'un conducteur dont la longueur et la forme géométrique sont parfaitement définies,

### 4.1. Champ magnétique créé au voisinage d'un fil rectiligne

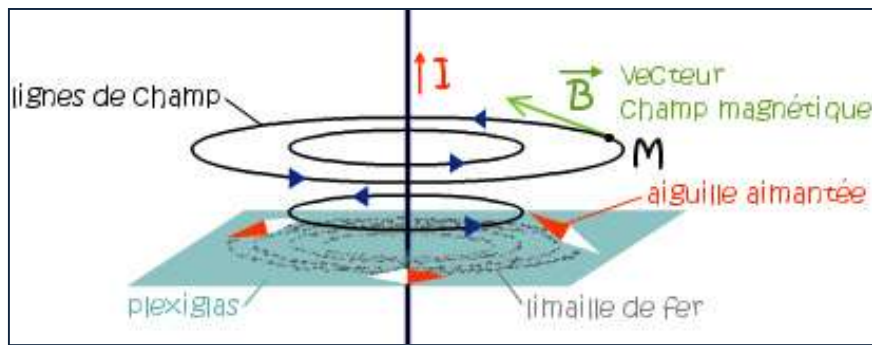
#### 4.1.1. Spectre magnétique

Plaçons un peu de limaille de fer sur une plaque en plexiglas posée perpendiculairement à un fil électrique rectiligne. Lorsqu'aucun courant ne circule dans le fil, la limaille ne prend pas de direction particulière. **Lorsqu'un courant circule dans le fil, la limaille s'aimante** et se dispose en lignes fermées, appelées lignes de champ.



Spectre magnétique d'une tige rectiligne





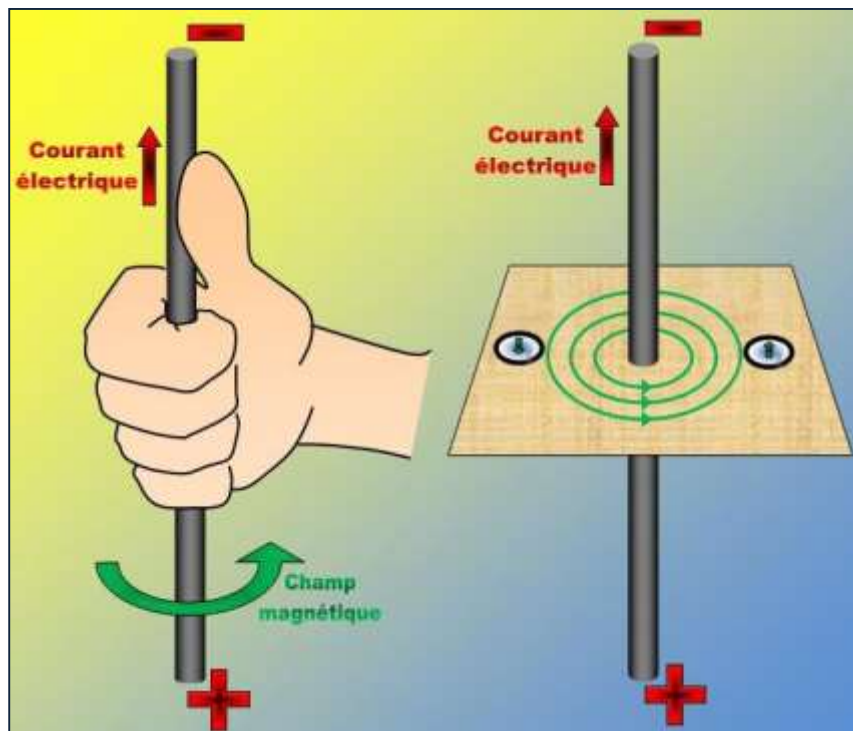
Orientation des lignes de champ magnétique

Les lignes de champ sont des cercles concentriques.

Le sens du vecteur champ magnétique.

Le vecteur champ magnétique est contenu dans un plan perpendiculaire au fil. Les boussoles nous indiquent que le sens du champ magnétique est déterminé par le sens du courant qui traverse le fil rectiligne.

Le sens du champ magnétique peut être déterminé, sans boussole, par la règle de la main droite. Si le courant est orienté pour sortir du pouce, le vecteur champ magnétique est dirigé de la paume de la main vers le bout des doigts.



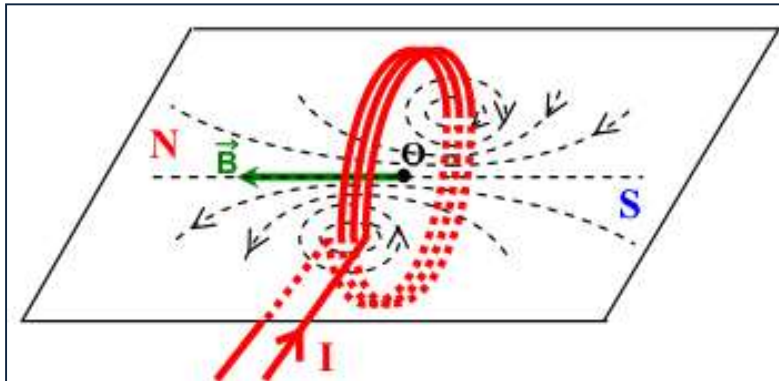
Règle de la main droite



### c. Valeur du champ magnétique

La valeur du champ magnétique est mesurée à l'aide d'un téslamètre. A intensité constante, la valeur du champ magnétique est d'autant plus faible que l'on est loin du fil électrique. A une distance donnée du fil, la valeur du champ magnétique est d'autant plus élevée que l'intensité du courant qui traverse le fil est élevée.

#### 4.2. Champ magnétique créé au voisinage d'une bobine

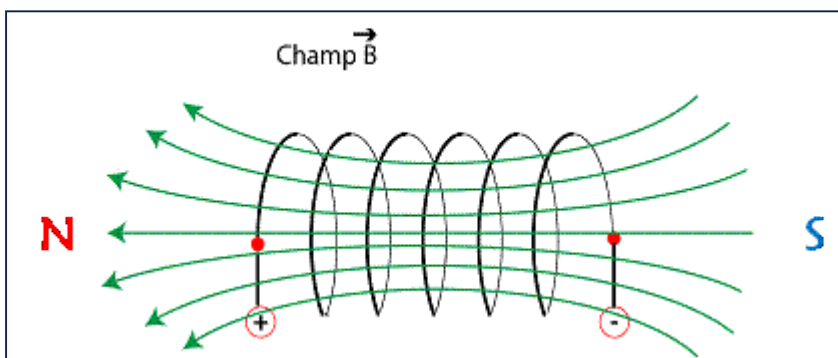


champ magnétique au voisinage d'une bobine

#### 4.3. Champ magnétique créé au voisinage d'un solénoïde:

Un solénoïde est une bobine de N spires, dont la longueur L est nettement plus grande que le rayon. A l'intérieur, les lignes de champ sont parallèles entre elles : le champ B est donc **uniforme**.

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I$$



Champ magnétique au voisinage d'un solénoïde.

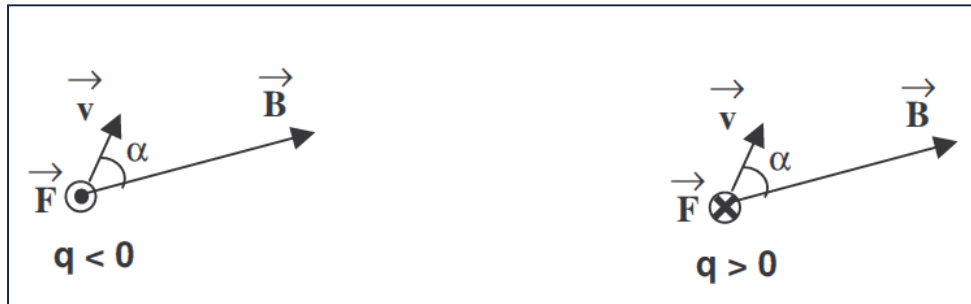
La valeur du champ magnétique est mesurée à l'aide d'un teslamètre. A l'intérieur du solénoïde, la valeur du champ magnétique est constante. On dit que le champ est uniforme.

### 5. Champ magnétique créé par une charge en mouvement

Le champ magnétique créé en un point M par une particule de charge  $q$  située en un point P animée d'une vitesse  $\vec{v}$  dans un référentiel galiléen est défini comme

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \vec{v} \wedge \overrightarrow{PM}}{\|\overrightarrow{PM}\|^3}$$

$\mu_0$  est la perméabilité du vide,  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$  (SI)



#### Champ magnétique créé par une charge mobile

De même que pour le champ électrostatique, le principe de superposition s'applique au champ magnétique. Si on considère deux particules  $q_1$  et  $q_2$  alors le champ magnétique créé en un point M quelconque de l'espace sera la somme vectorielle des champs créés par chaque particule est :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{v} \wedge \overrightarrow{PM}}{\|\overrightarrow{PM}\|^3}$$

Si le nombre de particules est très grand dans un volume  $V$  donné et qu'on s'intéresse à des échelles spatiales bien plus grandes que la distance entre ces particules on utilisera une description continue comme nous l'avons fait en électrostatique.

### 6. Forces magnétiques:

Lorsqu'une particule chargée se déplace dans un champ magnétique on peut déterminer expérimentalement si une force provenant du champ agit sur cette particule. Dans ce chapitre, nous étudierons la relation entre cette force et le champ magnétique.

### 6.1. Force de Lorentz.

Considérons un ensemble de particules de charge  $q_i$  appelées **charges agissantes**, supposons que ces charges sont en **mouvement**.

Plaçons en un point P une **charge d'essai ponctuelle**  $q$  au repos, cette charge est soumise à une force proportionnelle à  $q$  que nous appellerons force électrique et que nous écrivons sous la forme :

$$\vec{F}_e = q \vec{E}$$

$\vec{F}_e$  La force électrique.

$\vec{E}$  : Le champ électrique crée par des charges qui sont en mouvement et qui est une généralisation du champ électrostatique créé par les charges qui sont essentiellement immobiles. Le champ électrique est en général fonction du temps.

Maintenant supposons que la charge d'essai ponctuelle placée en P est animée à l'instant  $t$  d'une vitesse  $\vec{V}$ .

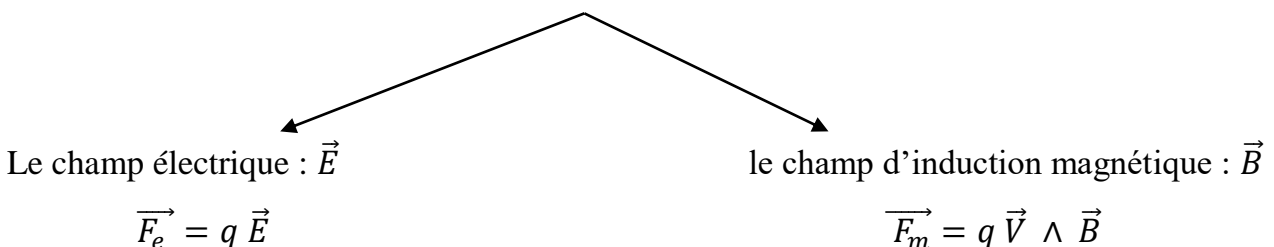
Cette charge est encore soumise à la force électrique  $\vec{F}_e = q \vec{E}$  ( $\vec{F}_e$  ne dépend pas du fait que  $q$  soit en mouvement ou au repos).

Lorsque la charge d'essai ponctuelle  $q$  est animée d'une vitesse  $\vec{V}$  elle est sollicitée par une force supplémentaire appelée **force magnétique** que nous la noterons  $\vec{F}_m$ . Nous associons à cette force magnétique le champ d'induction magnétique  $\vec{B}$

Donc la relation entre  $\vec{F}_m$  et  $\vec{B}$  est :

$$\vec{F}_m = q \vec{V} \wedge \vec{B}$$

Les charges agissantes en mouvement créent en tout point de l'espace un double champ



Donc la force totale  $\vec{F}$  qui s'exerce sur une charge  $q$  en mouvement est :

$$\vec{F} = q \vec{E} + q \vec{V} \wedge \vec{B}$$

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B}) \quad \text{C'est la formule de Lorentz}$$

En présence du seul champ magnétique  $\vec{B}$  ( $\vec{E}=0$ ), la force de Lorentz devient :

$$\vec{F}_m = q \vec{V} \wedge \vec{B}$$

Cette nouvelle définition du champ magnétique est obtenue à partir de la force de Lorentz. Cette force

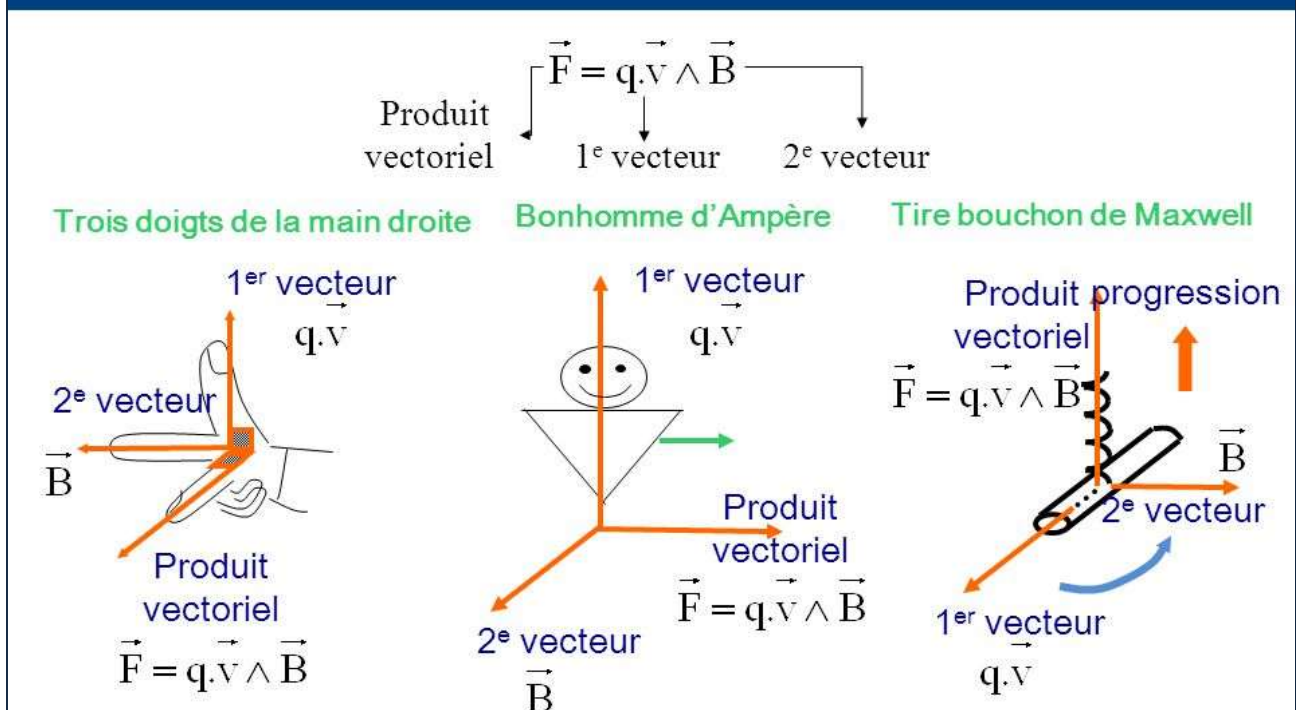
- a pour module:

$$F = q VB |\sin(\vec{V}, \vec{B})|$$

- sa direction est la perpendiculaire au plan formé par  $\vec{V}$  et  $\vec{B}$ ,

- Son sens est tel que, dans le cas d'une charge positive, les vecteurs  $\vec{V}$ ,  $\vec{B}$  et  $\vec{F}$  forment un trièdre direct (règle de la main droite). Lorsque la charge est négative la force change de sens.

## Règles d'orientation



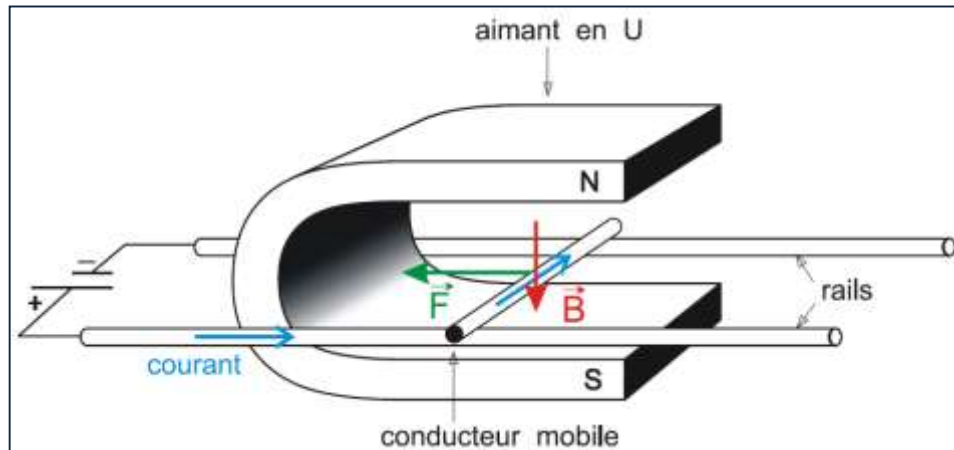
Le sens de cette force est également donné par la règle du bonhomme d'Ampère :

*Le bonhomme d'Ampère, traversé des pieds vers la tête par la charge (+q) animée d'une vitesse V, voit fuir les lignes de champ, et a la force à sa gauche*

## 7. Loi de Laplace.

### a) Dispositif expérimental

Un conducteur mobile est placé sur deux rails horizontaux connectés à un accumulateur, et dans le champ magnétique d'un aimant en U.



Expérience des rails de Laplace

### b) Observations

Lorsque le courant passe le conducteur mobile roule vers la gauche ou vers la droite selon le sens du courant et selon le sens du champ magnétique.

### c) Interprétation

D'après un modèle simplifié on peut considérer que le courant électrique est constitué d'innombrables électrons qui se déplacent tous avec la même vitesse  $\vec{V}$  dans le sens opposé au sens conventionnel du courant.

Ces électrons se déplacent donc dans un champ magnétique  $\vec{B} \perp \vec{V}$  de sorte que chaque électron est soumis à une même force de Lorentz. Comme les électrons sont retenus par les atomes du réseau cristallin constituant le conducteur, c'est finalement le conducteur tout entier qui est sollicité par une force appelée **force électromagnétique de Laplace**. Cette force est égale à la résultante de toutes les innombrables forces de Lorentz qui s'exercent sur les électrons qui constituent le courant électrique.

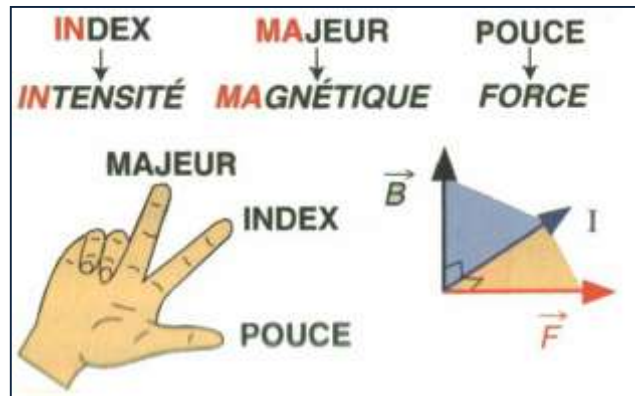
La force subie par un élément de circuit de longueur  $dL$  parcouru par un courant d'intensité  $I$  et placé dans un champ magnétique  $\vec{B}$  est appelée force de Laplace.

$$\vec{dF} = I \vec{dL} \wedge \vec{B}$$

où  $\vec{dL}$  est parallèle à l'élément de circuit et dans le sens du courant.

Remarque :

- $\vec{dF}$  est perpendiculaire à la fois à  $\vec{dL}$  et  $\vec{B}$ .
- Le module de  $\vec{dF}$  est  $dF = I dL B \sin \alpha$
- Le sens de  $\vec{dF}$  est donné par la règle de « la main droite »



Règle des trois doigts de la main droite

## 8. Loi de Faraday.

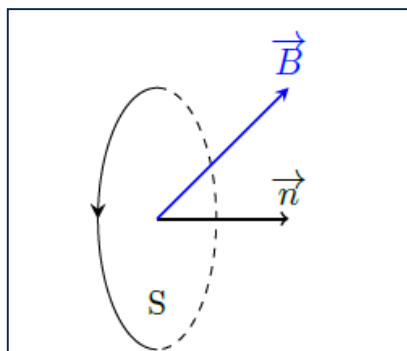
### 8.1. Flux magnétique

Nous avons déjà vu la notion de flux en électrostatique.

Soit une surface orientée  $S$  (grâce à la règle de la main droite), soit un champ  $\vec{B}$  qui traverse cette surface. Alors le flux du champ  $\vec{B}$  à travers la surface  $S$  s'écrit :

$$\phi = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS$$

Le flux s'exprime en  $T.m^2$  ou en Weber (Wb)



Flux d'un champ à travers une surface orientée

Jusqu'à maintenant, nous nous sommes intéressés essentiellement à la création d'un champ magnétique à partir d'un courant permanent. Ceci fut motivé par l'expérience d'Oersted. A la même époque, le physicien anglais Faraday était préoccupé par la question inverse : puisque ces deux phénomènes sont liés, comment produire un courant à partir d'un champ magnétique ?

Il fit un certain nombre d'expériences qui ont amené Faraday à écrire ceci : « *Quand le flux du champ magnétique à travers un circuit fermé change, il apparaît un courant électrique.* »

***On peut obtenir un flux magnétique variable dans les deux cas suivant :***

- Cas de Neumann : le champ magnétique varie au cours du temps
- Cas de Lorenz : le circuit C se déplace dans le champ  $\vec{B}$  constant et la surface S varie.

***Loi de Faraday : la variation temporelle du flux magnétique à travers un circuit fermé y engendre une fém (force électromotrice) induite***

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

*e : force électromotrice induite en Volt (V)*

*$\phi$  : flux du champ magnétique à travers la surface du circuit en Weber (Wb)*

Le signe - qui apparaît dans la loi de Faraday montre qu'il y a opposition entre la fem induite et la variation de flux, ceci est la traduction de la loi de Lenz : les effets s'opposent aux causes.

**Loi de Lenz :**

***Le sens du courant induit est tel que le champ magnétique qu'il produit s'oppose à la variation de flux qui le produit.***

***Enoncé : l'induction produit des effets qui s'opposent aux causes qui lui ont donné naissance.***

## 9. Loi de Biot et Savart

Un champ magnétique  $B$  statique en un point de l'espace peut avoir deux origines :

- un courant constant
- un aimant permanent

Nous traiterons ici le champ magnétique  $B$  créé par un courant constant.



En 1820, les travaux **d'Oersted** montrant qu'on pouvait produire un champ magnétique à partir d'un courant électrique et juste quelque semaine plus tard, **Jean Baptiste Biot** (1774) et **Félix Savart** (1791-1841) réussirent à obtenir une expression du champ magnétique produit par un élément de courant infinitésimal.

Soit un élément de circuit linéaire  $\vec{dl}$  placé dans le vide et parcouru par un courant  $I$ .

Conventionnellement le sens du vecteur  $\vec{dl}$  sera toujours pris dans le même sens que le courant  $I$ .

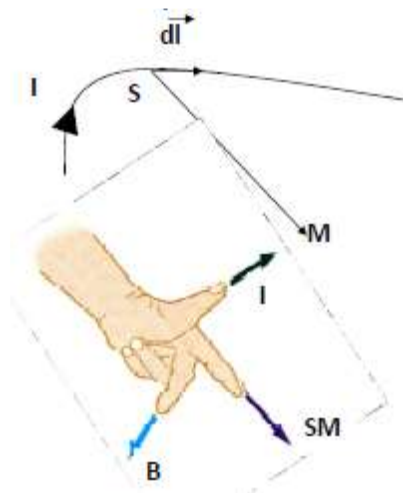
Soit un point  $M$  situé à une distance  $r$  de l'élément de circuit  $\vec{dl}$ .

Le champ magnétique élémentaire  $\vec{dB}_S$  créé en  $M$  par l'élément de courant  $I \vec{dl}$  ( $S$ ) situé en  $S$  est :

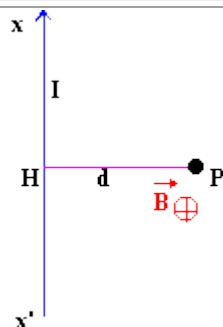
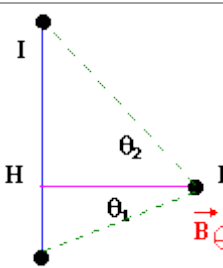
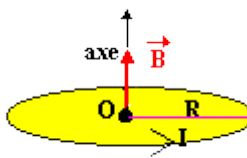
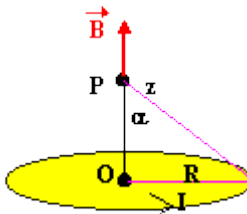
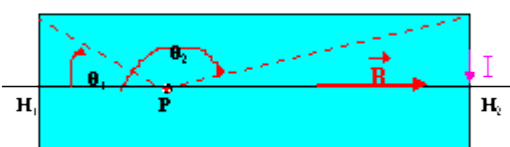
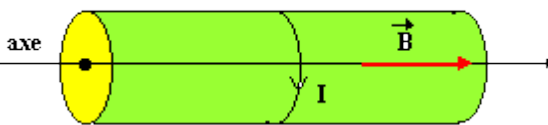
$$\vec{dB}_S(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \vec{dl} \wedge \vec{SM}}{SM^3}$$

D'où :

$$\vec{B}_S(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\text{conducteur}} \frac{I \vec{dl} \wedge \vec{SM}}{SM^3}$$



## Exemples de calculs du champ magnétique

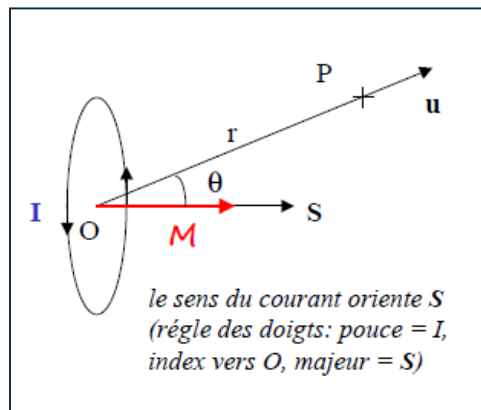
<b>Fil rectiligne infini</b>		$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$ <p><math>d = HP</math> en m ; <math>B</math> en tesla (T) ; <math>I</math> en A et <math>\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}</math> SI</p>
<b>Fil rectiligne fini</b>		$B = \frac{\mu_0}{4\pi d} I (\sin \theta_2 - \sin \theta_1)$ <p><math>d = HP</math> en m ; <math>B</math> en tesla (T) ; <math>I</math> en A et <math>\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}</math> SI</p>
<b>Spire circulaire de rayon R</b> (Au centre O)		$B_o = \frac{\mu_0 I}{2R}$ <p><math>B</math> en tesla (T) ; <math>I</math> en A ; <math>R</math> en m et <math>\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}</math> SI</p>
<b>Spire circulaire de rayon R</b> (En un point de son axe)		$B_P = \frac{\mu_0 I}{2R} \sin^3 \alpha$ <p><math>B</math> en tesla (T) ; <math>I</math> en A ; <math>R</math> en m et <math>\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}</math> SI</p>
<b>Bobine plate</b> (bobines de HELMHOLTZ)	<p>N spires</p> <p>circulaires concentriques</p>	$B_N = N B_o$ <p>N nombre total de spires</p>
<b>Solénoïde fini</b>		$B_P = \frac{n\mu_0 I}{2} (\cos \vartheta_1 - \cos \vartheta_2)$ <p><math>B_P</math> en tesla (T) ; <math>n</math> nombre de spires par mètre (<math>m^{-1}</math>) et <math>\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}</math> SI</p> <p>(n nombre de spires par mètre)</p>
<b>Solénoïde infini</b>		$B_x = \mu_0 n I$ <p><math>B_x</math> en tesla (T) ; <math>n</math> nombre de spires par mètre (<math>m^{-1}</math>) et <math>\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}</math> SI</p>

## 10. Dipôle magnétique

Soit une spire plane, de centre d'inertie **O**, parcourue par un courant permanent **I**. Nous allons calculer le champ magnétique créé par cette spire en tout point **P** de l'espace, situé à grande distance de la spire (précisément, à des distances grandes comparées à la taille de la spire).

- **Moment magnétique** d'une spire de courant :

$$\mathbf{M} = I \mathbf{S} \text{ (A m}^2\text{)}$$



A grande distance, la spire de courant constitue un dipôle magnétique.

Le champ magnétique **B** en **P** avec  $r = OP$  :

$$\mathbf{B}(\mathbf{P}) = (\mu_0/4\pi) \mathbf{M} / r^3 (2 \cos\theta, \sin\theta)$$

$$B_r = \frac{\mu_0 M \cos\theta}{2 \pi r^3}$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0 M \sin\theta}{4 \pi r^3}$$