

Chapitre 23

Le champ magnétique

I. Description d'un champ magnétique : rappels et compléments

1. Les aimants et le magnétisme
2. Courant et champ magnétique
3. Superposition de champ magnétique
4. Etude du caractère vectoriel : lignes de champ et carte de champ
5. Intensité du champ magnétique
6. Production d'un champ magnétique uniforme

II. Dipôle magnétique

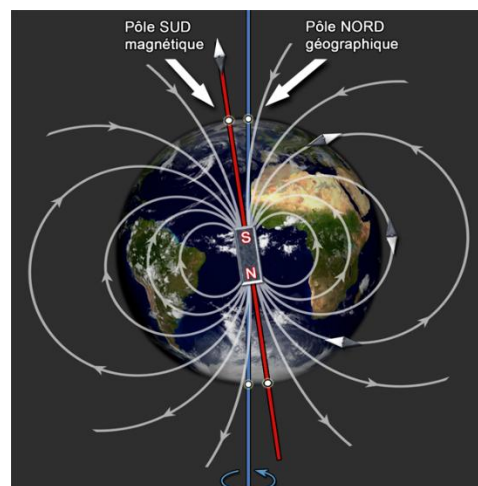
1. Etude de dispositifs similaires à grande distance

2. Dipôle magnétique

3. Moment magnétique d'une spire de courant

III. Action d'un champ magnétique

1. Action sur un conducteur parcouru par un courant : force de Laplace
2. Couple de Laplace sur une spire
3. Energie potentielle magnétique
4. Equilibre d'un dipôle magnétique dans un champ uniforme
5. Applications
 - 5.1 La boussole
 - 5.2 Le moteur synchrone



Le cours

Nous avons rencontré le champ magnétique dans le cours de mécanique. Son action sur une charge électrique en mouvement à la vitesse \vec{v} dans le référentiel galiléen dans lequel est défini le champ magnétique \vec{B} se traduit par la composante magnétique de la force de Lorentz : $\vec{F}_m = q \vec{v} \wedge \vec{B}$.

Nous allons dans ce chapitre décrire quelques propriétés du champ magnétique.

I. Description d'un champ magnétique : rappels et compléments

1. Les aimants et le magnétisme

Le magnétisme se manifeste par exemple lorsqu'un aimant attire un clou en fer.

Les premiers aimants, découverts en Chine puis en Grèce, sont des pierres noires constituée de magnétite (minerai de fer composé principalement d'oxyde de fer Fe_3O_4) qui ont la propriété d'attirer certains objets comme des objets en fer.

L'intensité de la force attractive exercée par un aimant diminue rapidement lorsqu'on éloigne le corps de l'aimant mais est particulièrement intense aux extrémités de l'aimant.

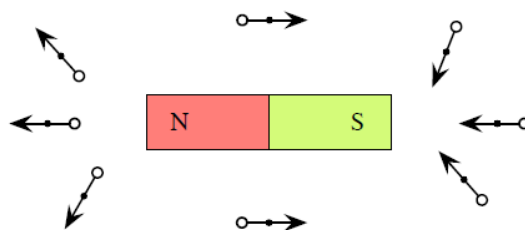
Au voisinage d'un aimant, certains corps s'aimantent et deviennent eux-mêmes des aimants. C'est le cas pour le fer, comme le nickel ou encore le cobalt. Ces matériaux sont dits ferromagnétiques.

En étudiant les interactions entre deux barres aimantées, on constate qu'il y a des forces attractives et répulsives. On en conclut qu'il y a deux types de pôles différents.

L'étude des interactions magnétiques nécessite l'introduction de la notion de champ magnétique.

On sait qu'une **boussole**, constituée d'une aiguille aimantée libre de tourner autour d'un axe de vertical, **permet de détecter la présence d'un champ magnétique** et que l'aiguille s'aligne selon la direction du champ magnétique.

Approchons une boussole d'un aimant droit.

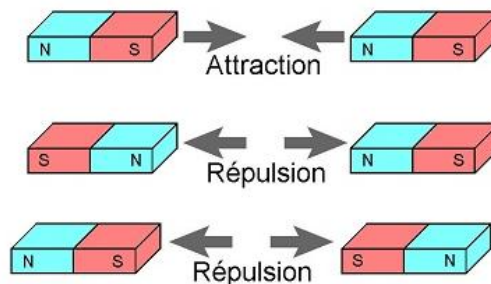


Observations : Lorsque nous approchons la boussole de l'aimant, l'orientation de l'aiguille change. Cette orientation dépend de l'endroit où se situe la boussole.

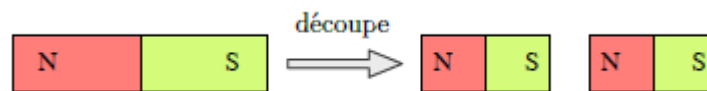
Interprétation : L'aiguille de la boussole subit une force exercée par l'aimant. Cette force dépend du point de l'espace et conduit à des orientations différentes. Un aimant crée un champ magnétique.

Les aimants, quelle que soit leur forme et leur taille, sont **polarisés**. Ils possèdent à leurs extrémités un **pôle Nord** et un **pôle Sud**. On sait que :

- Le pôle Nord d'un aimant et le pôle Sud d'un autre aimant s'attirent
- Deux pôles de même polarité de deux aimants se repoussent



- Si un aimant est brisé, chacun des éclats aura à nouveau deux pôles : **il est impossible de séparer un pôle nord magnétique d'un pôle sud magnétique**.

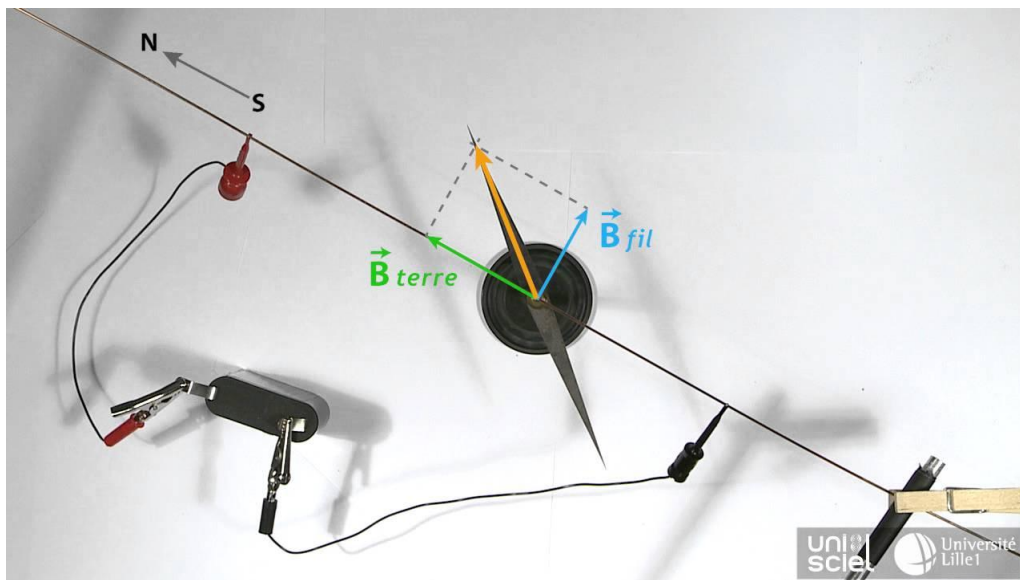


2. Courant et champ magnétique

L'effet magnétique du courant électrique fut découvert par Christian Ørsted.

Approchons une boussole d'un fil conducteur parcouru par un courant électrique.

Observations : Lorsque nous approchons la boussole du fil, son orientation change. Cette orientation dépend de l'endroit où se situe la boussole et du sens du courant.



Interprétation : Un courant électrique crée un champ magnétique.

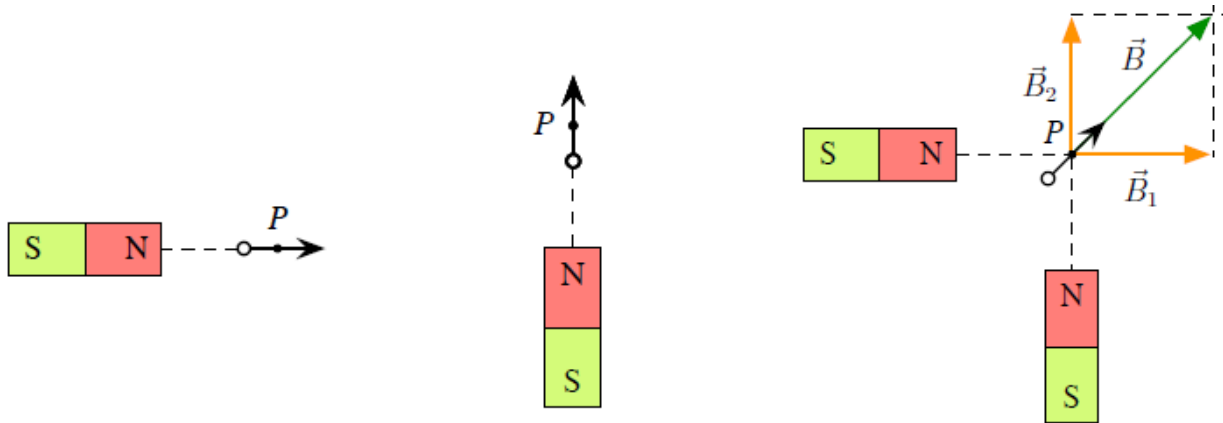
Les expériences précédentes incitent à représenter le champ magnétique en un point par une **grandeur vectorielle**.

Le champ magnétique apparaît comme une grandeur vectorielle définie en tout point de l'espace et permettant de décrire les effets d'un courant ou de certains matériaux, les aimants.

En chaque point de l'espace, le champ magnétique \vec{B} est donc représenté par un vecteur défini par une direction, un sens et une norme.

3. Superposition de champ magnétique

En présence de plusieurs sources, le vecteur champ magnétique résultant en un point est égale à la somme vectorielle des vecteurs champs magnétiques que l'on observerait en présence de chacune des sources seules.



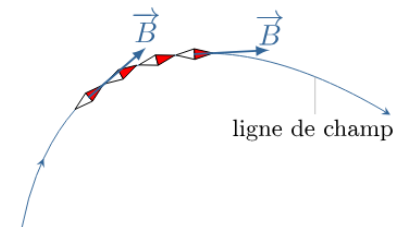
(a) en présence du 1^{er} aimant (b) en présence du 2^e aimant (c) en présence des deux aimants

4. Etude du caractère vectoriel : lignes de champ et carte de champ

Une façon simple de visualiser la direction du champ magnétique est de tracer les lignes de champ.

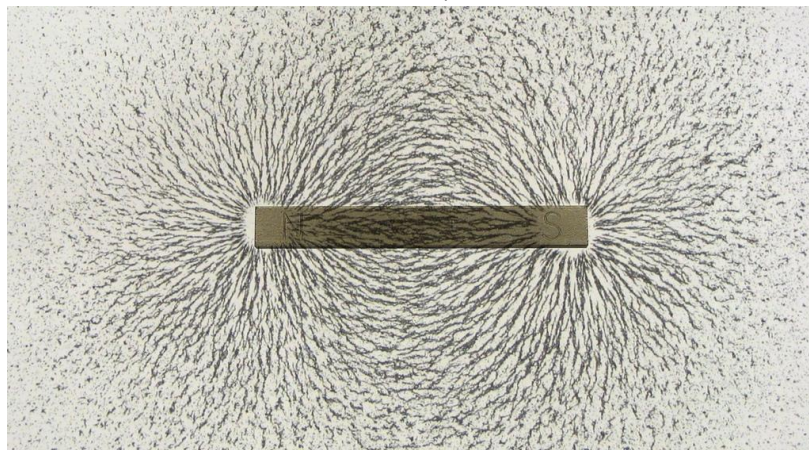
Par définition, une ligne de champ est une courbe orientée en toute point tangente au champ vectoriel étudié. On oriente la ligne de champ dans le sens du vecteur.

Deux lignes de champ ne peuvent pas se croiser, sauf si le vecteur est nul au point d'intersection.



L'ensemble des lignes de champ est appelé **carte de champ**.

En présence du champ magnétique, la limaille de fer s'aimante et tend à s'orienter dans le sens du champ, elle se comporte comme une multitude de boussoles. On peut obtenir ainsi l'allure des lignes de champ.



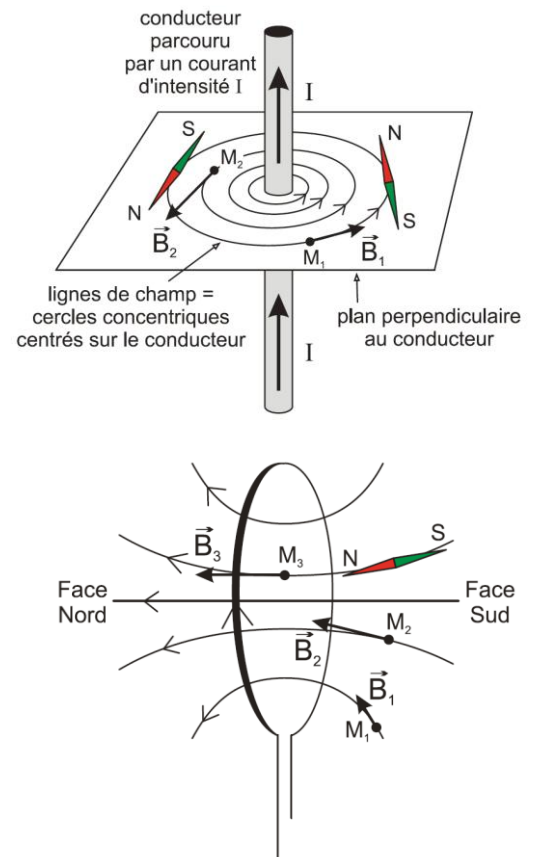
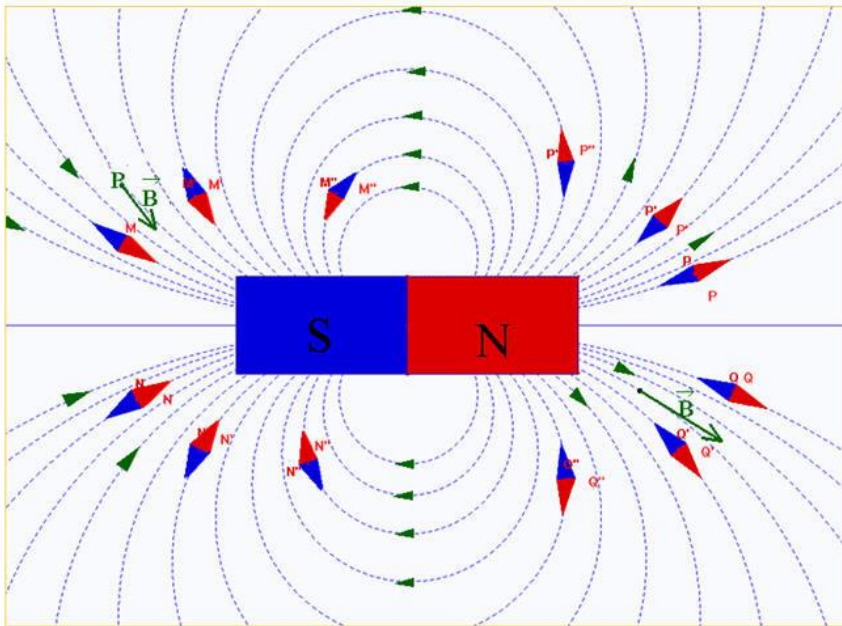
Comment orienter une ligne de champ ?

→ 1^{ère} méthode : avec une boussole ou la connaissance des pôles magnétiques

Un pôle magnétique est un point de « convergence » des lignes de champ magnétique.

Les lignes de champ magnétiques divergent du pôle nord et convergent vers le pôle sud. Elles sont ainsi orientées du pôle nord vers le pôle sud.

La direction du champ magnétique détecté est celle de l'aiguille et son sens est celui du pôle sud vers le pôle nord de l'aiguille.



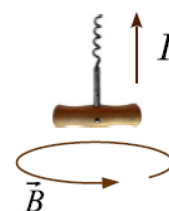
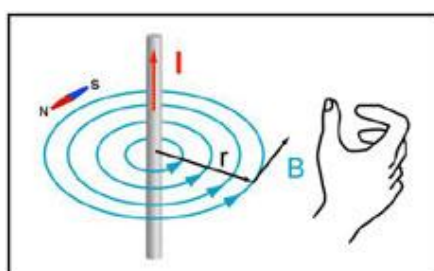
→ 2^{ème} méthode : avec la règle du tire-bouchon ou de la main droite.

Applicable pour orienter une ligne de champ magnétique créé par un courant électrique,

Exemple 1 : fil rectiligne

Tire-Bouchon : le sens de rotation permettant une avancée du tire-bouchon dans le sens de I , indique le sens d'enroulement de \vec{B}

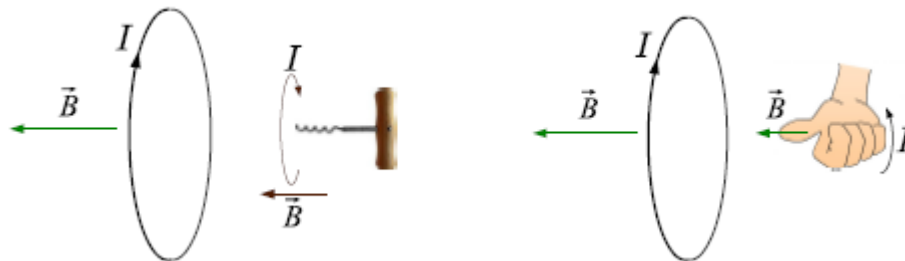
Main droite : lorsque le pouce pointe dans le sens de I les autres doigts se replient dans le sens de \vec{B} .



Exemple 2 : spire circulaire parcourue par un courant

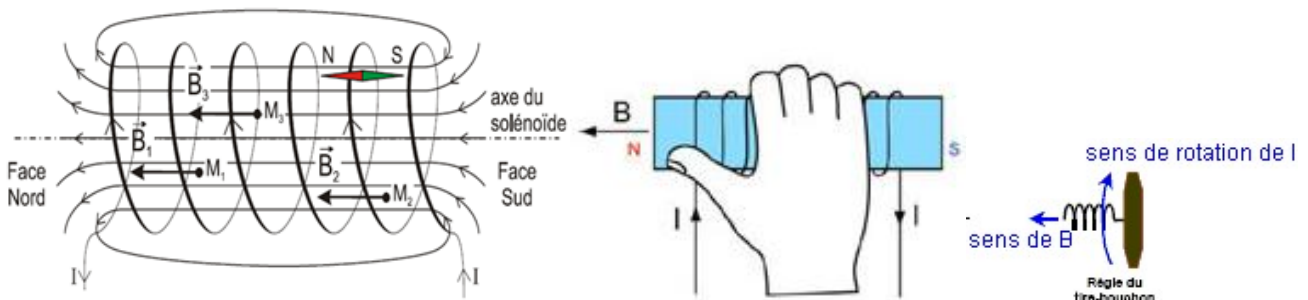
Tire-Bouchon : si on tourne le tire-bouchon dans le sens du courant il avance dans le sens de \vec{B}

Main droite : si les doigts s'enroulent dans le sens de I alors le pouce pointe dans le sens de \vec{B}



Exemple 3 : Solénoïde parcouru par un courant électrique

Un **solénoïde** est un dispositif constitué d'un fil électrique enroulé régulièrement en hélice de façon à former une bobine longue. Il est assimilable à la juxtaposition de N spires parcourues par un courant



De manière générale, on observe que les lignes de champ magnétique sont des courbes fermées qui enlacent les courants qui les créent.

5. Intensité du champ magnétique

La norme du champ magnétique dans le vide est proportionnelle à l'intensité du courant qui le crée.

Elle s'exprime en Tesla (T).

Ordre de grandeurs :

Champ magnétique terrestre : $50 \mu T$

Champ créé par un aimant usuel : de 0.1 à 1 T

Champ dans un appareil IRM : 3 T

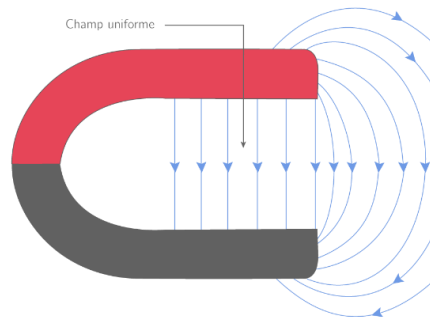
Bobines supraconductrices : jusqu'à 45 T

On admet une propriété importante du champ magnétique : l'intensité du champ augmente dans les zones où les lignes de champ se resserrent et diminue dans les zones où les lignes de champ s'écartent.

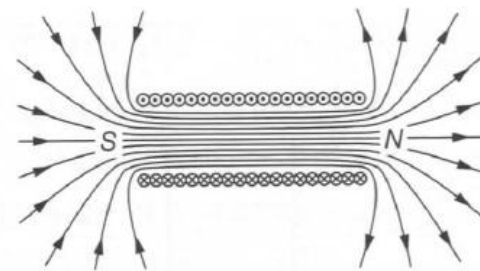
6. Production d'un champ magnétique uniforme

Si les lignes de champ sont parallèles entre elles et régulièrement espacées alors le champ est uniforme.

Exemple 1 : dans l'entrefer d'un aimant en U



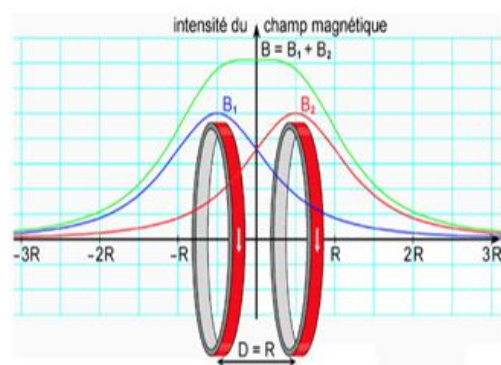
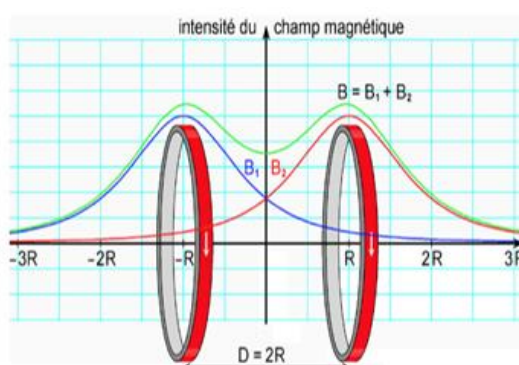
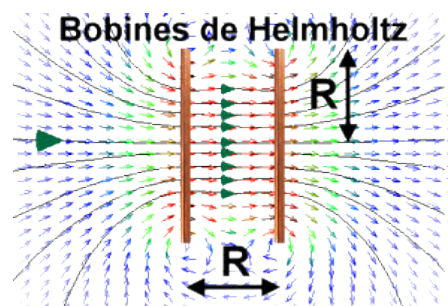
Exemple 2 : A l'intérieur d'un solénoïde infini (« long » suffit si on néglige les effets de bords) parcouru par un courant électrique I, dont le nombre de spires par unité de longueur est n.



A l'intérieur du solénoïde infini : $\|\vec{B}_{int}\| = \mu_0 n I$

A l'extérieur : $\vec{B}_{ext} = \vec{0}$

Exemple 3 : entre des bobines de Helmholtz (Bobines plates identiques parcourues par des courants identiques et de même sens, distantes du rayon des bobines)

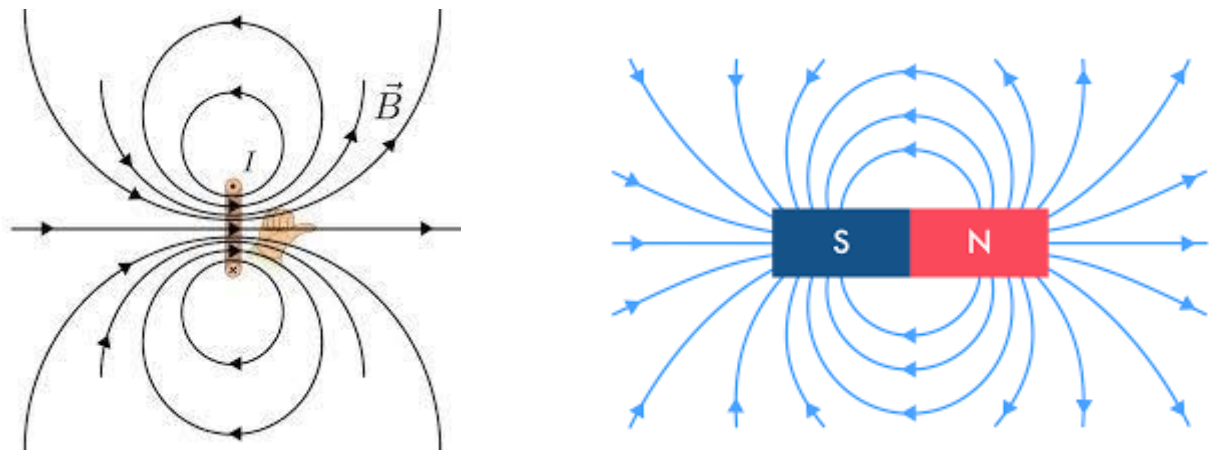


II. Dipôle magnétique

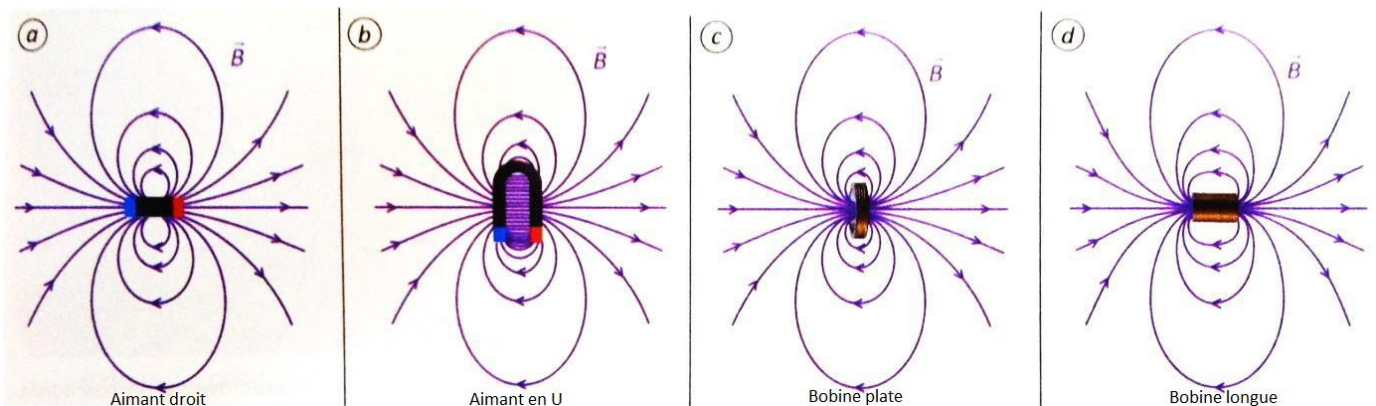
1. Etude de dispositifs similaires à grande distance

Considérons une spire de rayon R parcourue par un courant I .

On remarque que le champ produit à grande distance de la spire ($r \gg R$) est comparable à celui produit par un aimant.



Il en est de même pour un aimant en U, une bobine plate ou encore un solénoïde.

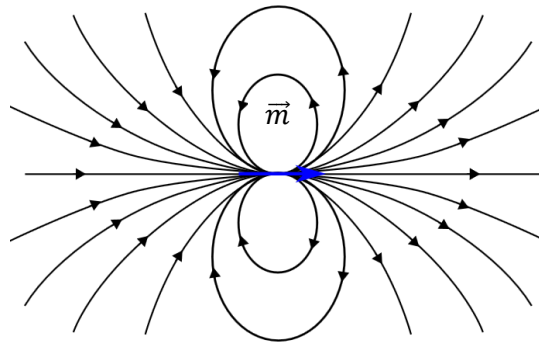


2. Dipôle magnétique

À grande distance de la source, les dispositifs précédents sont tous équivalents. On peut leur attribuer un pôle nord et un pôle sud. Ce sont des **dipôles magnétiques**. **Pour caractériser cette polarité et décrire ces dispositifs de manière unique, on introduit un vecteur \vec{m} appelé moment dipolaire magnétique, orienté comme les lignes de champ, du sud vers le nord.**

De manière plus générale, toute distribution de courant localisée dans l'espace est caractérisée par un moment dipolaire magnétique.

Celui-ci permet de déterminer non seulement le champ créé à grande distance mais aussi l'action subie par le dipôle placé dans champ extérieur, comme on va le faire dans la suite de ce cours.



L'intérêt du dipôle magnétique est donc qu'à grande distance (grande devant les dimensions du circuit), le champ magnétique créé est indépendant de la forme exacte du circuit et ne dépend plus que du moment magnétique.

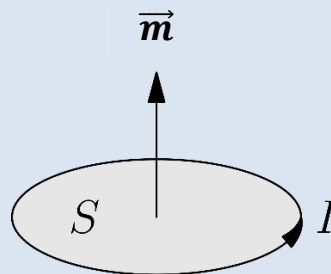
En revanche, lorsqu'on se place à proximité de la source, les cartes de champ diffèrent, et dépendent en particulier de la géométrie de la source, et de sa nature macroscopique ou microscopique.

3. Moment magnétique d'une spire de courant

Pour définir le moment magnétique d'une spire plane quelconque, on introduit le **vecteur surface \vec{S}** de la surface plane s'appuyant sur la boucle de courant tel que :

- Sa direction est orthogonale au plan défini par la boucle plane.
- Son sens est donné par la règle de la main droite ou du tire-bouchon selon le sens de I .
- Sa norme : la surface S .

Le moment magnétique d'une spire plane orientée est $\vec{m} = I\vec{S}$, avec I et \vec{S} , le vecteur surface



Il s'exprime en $A.m^2$.

Pour une spire de 10 cm de diamètre parcourues par 1 A, on a $\|\vec{m}\| \approx 8 \text{ mA} \cdot m^2$.

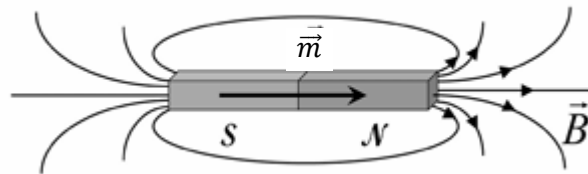
Et dans le cas d'un aimant ?

Le moment magnétique d'un aimant ne s'écrit pas en fonction d'une surface et d'un courant, car aucun courant électrique ne circule dans un aimant.

L'origine du champ magnétique dans la matière est quantique mais dans une approche classique, il peut être associé à des boucles de courant microscopiques résultant du « déplacement » des électrons autour des atomes. Chaque boucle de courant microscopique crée un moment magnétique et le moment magnétique total est la somme vectorielle de tous les moments individuels. Dans la majorité des matériaux, ils s'annulent deux à deux mais pour certains matériaux, ce n'est pas le cas et un moment magnétique non nul persiste, donnant naissance à moment magnétique macroscopique. Les matériaux magnétiques sont définis grâce à leur moment magnétique macroscopique. Dans le cas des aimants, il est constant.

Le moment magnétique est une propriété macroscopique et que tout le matériau est aimanté, on introduit **l'aimantation, qui est le moment magnétique par unité de volume**

Le moment magnétique \vec{m} d'un aimant part du pôle Sud et va au pôle Nord de l'aimant.



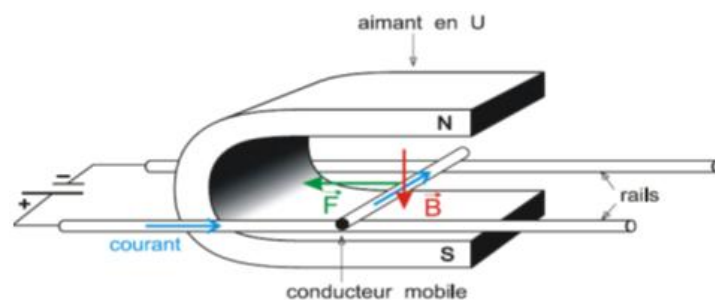
Pour un aimant permanent usuel, la norme de son moment magnétique est de quelques $A \cdot m^2$, elle dépend du matériau et de son volume.

Le magnétisme terrestre est dû aux matériaux ferromagnétiques (fer et nickel) présents dans le noyau. Du point de vue magnétique, la Terre se comporte comme un dipôle magnétique qui serait situé en son centre, de moment $m_{Terre} = 8.10^{22} A \cdot m^2$.

III. Action d'un champ magnétique

1. Action sur un conducteur parcouru par un courant : force de Laplace

Les rails de Laplace : Un conducteur mobile est placé sur deux rails horizontaux connectés à une source de tension continue, et dans le champ magnétique d'un aimant en U



Observations : La tige mobile se déplace parallèlement aux rails, le sens du déplacement dépend du sens du courant et change si les pôles de l'aimant sont permutés.

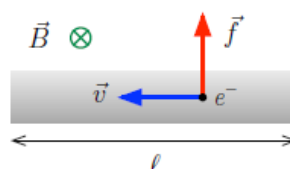
Interprétation : La tige a subi une force liée à la présence du champ magnétique et du courant qui la traverse.

Si la composante magnétique de la force de Lorentz agit sur chaque particule chargée, la force de Laplace en est une conséquence et agit sur le matériau conducteur de ces particules.

Soit un conducteur filiforme de section S parcouru par un courant i et plongé dans **un champ magnétique extérieur \vec{B}** .

Appelons $d\vec{\ell}$ un élément de longueur du conducteur orienté dans le sens du courant i . Intéressons-nous à la force magnétique subie par une portion de conducteur de volume $dV = S d\ell$. On doit sommer toutes les forces magnétiques de Lorentz \vec{f} subies par toutes les particules chargées en mouvement (ici les électrons).

On note n le nombre d'électrons (de charges $-e$) par unité de volume et \vec{v} est leur vitesse moyenne par rapport au conducteur.



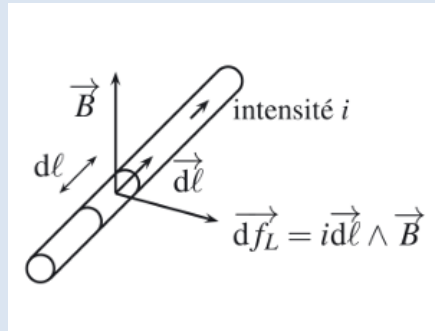
La force exercée sur un électron est : $\vec{f} = -e \vec{v} \wedge \vec{B}$

La force résultante sur l'ensemble des électrons de la portion étudiée est : $\overrightarrow{dF_L} = -n S d\ell e \vec{v} \wedge \vec{B}$.

On rappelle que l'intensité du courant correspond à la charge δq qui traverse la section S pendant dt . Les électrons traversant S entre les instants t et $t + dt$ se trouvent dans le cylindre de section S et de longueur $v \cdot dt$. L'expression du courant est donc $i = \frac{n S v dt e}{dt} = n S v e$.

Les vecteurs \vec{v} et $\overrightarrow{d\ell}$ sont opposés donc : $\overrightarrow{dF_L} = n S e v \overrightarrow{d\ell} \wedge \vec{B}$.

L'élément $\overrightarrow{d\ell}$ du conducteur subit la force de Laplace : $\overrightarrow{dF_L} = i \overrightarrow{d\ell} \wedge \vec{B}$.



Une portion de conducteur plongé dans un champ magnétique extérieur \vec{B} est soumise à la résultante des forces de Laplace : $\vec{F}_L = \int_{\text{conducteur}} i \overrightarrow{d\ell} \wedge \vec{B}$

Les forces de Lorentz et de Laplace décrivent donc le même phénomène, mais pas à la même échelle ! On peut se demander comment les porteurs de charge libres réussissent à transmettre la force magnétique à l'ensemble du conducteur. En fait, en présence d'un champ magnétique, ces porteurs de charge sont déviés. Toutefois, si un électron se trouve à proximité immédiate des bords de l'échantillon, il ne peut pas en sortir et se trouve bloqué dans son mouvement. Ainsi se crée une accumulation d'électrons d'un côté et un déficit de l'autre, créant un champ électrique appelé champ de Hall. Ce champ agit sur les cations fixes du réseau cristallin. C'est par ce processus que la force magnétique est transmise au conducteur.

La force de Lorentz ne travaille pas alors que la force de Laplace, qui entraîne tout le conducteur, peut travailler. C'est le cas dans l'expérience des rails de Laplace.

Cas particulier d'une portion de conducteur rectiligne :

La force de Laplace s'exerçant sur une portion rectiligne de conducteur, de longueur ℓ , plongé dans un champ magnétique extérieur, uniforme et parcouru par un courant i identique en tout point :

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

Le vecteur $\vec{\ell}$ est parallèle au conducteur, de norme ℓ et dirigé dans le sens du courant i .

2. Couple de Laplace sur une spire

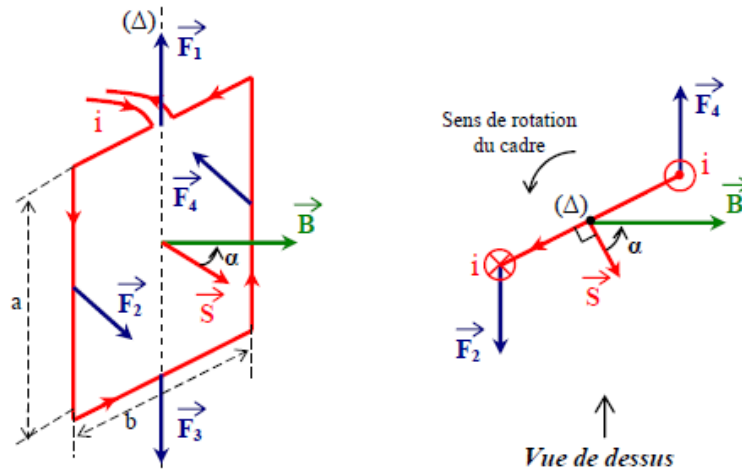
Dans le cas d'un conducteur fermé plongé dans un champ magnétique extérieur uniforme (ex : boucle de courant), $\oint \overrightarrow{d\ell} = \vec{0}$, la résultante des forces de Laplace est nulle.

$$\vec{F}_L = \oint i \overrightarrow{d\ell} \wedge \vec{B} = \vec{0}$$

La seule action que les forces de Laplace peuvent avoir est un couple.

On étudie une spire rectangulaire parcourue par un courant i et plongée dans un champ magnétique uniforme. La largeur de la spire est b et sa hauteur de la spire est a .

On peut montrer que le moment de la force de Laplace sur un conducteur rectiligne dans un champ magnétique uniforme calculé en un point O quelconque est obtenu en considérant que la force de Laplace sur le conducteur s'applique au milieu du conducteur.



Exprimons le moment par rapport à l'axe de rotation Δ des forces de Laplace de résultante \vec{F}_L s'exerçant sur la cadre :

- $M_{\Delta}(\vec{F}_1) = 0$ et $M_{\Delta}(\vec{F}_2) = 0$
- $M_{\Delta}(\vec{F}_2) = M_{\Delta}(\vec{F}_4)$

Le bras de levier est $d = \frac{b}{2} \sin\alpha$ et $\|\vec{F}_2\| = iaB$. On obtient : $M_{\Delta}(\vec{F}_2) = iaB \frac{b}{2} \sin\alpha$

Le moment résultant est : $M_{\Delta}(\vec{F}_L) = iabB \sin\alpha$.

Le couple résultant des forces de Laplace n'étant que selon l'axe Δ : $\vec{\Gamma}(\vec{F}_L) = iabB \sin\alpha \vec{u}_{\Delta}$

Or on remarque que : $\vec{S} \wedge \vec{B} = abB \sin\alpha \vec{u}_{\Delta}$ et on reconnaît le moment magnétique du cadre $\vec{m} = I\vec{S}$.

$$\vec{\Gamma}(\vec{F}_L) = iabB \sin\alpha \vec{u}_{\Delta} = \vec{m} \wedge \vec{B}$$

Lorsqu'un dipôle magnétique est plongé dans un champ magnétique \vec{B} , on considère que les actions qu'il subit sont les mêmes que celles qui s'appliquent sur une spire parcourue par un courant.

Ce résultat, montré pour une spire rectangulaire, reste vrai dans le cas d'un circuit de forme quelconque ou encore d'un aimant, placés dans un champ uniforme. On généralise donc à tout dipôle magnétique :

Un dipôle magnétique plongé dans un champ magnétique uniforme subit un couple de Laplace ou couple magnétique, de moment : $\vec{\Gamma} = \vec{m} \wedge \vec{B}$.

La puissance du couple de Laplace est : $P_L = \Gamma\omega$.

3. Energie potentielle magnétique

Un dipôle magnétique placé dans un champ magnétique extérieur possède une énergie potentielle :

$$E_{p,mag} = -\vec{m} \cdot \vec{B}$$

En particulier, il existe une force magnétique subie par l'aimant dérivant de cette énergie potentielle :

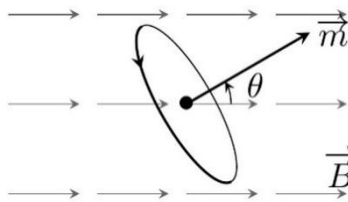
$$\vec{F}_{mag} = -\overrightarrow{grad}(E_{p,mag}) = \overrightarrow{grad}(\vec{m} \cdot \vec{B}).$$

Si le champ magnétique est uniforme, la quantité $\vec{m} \cdot \vec{B}$ l'est aussi et donc le gradient est nul : le moment magnétique ne ressent aucune force, l'action mécanique magnétique est un couple.

Dans le cas d'un champ non uniforme, un dipôle se déplace vers les zones de champ intense.

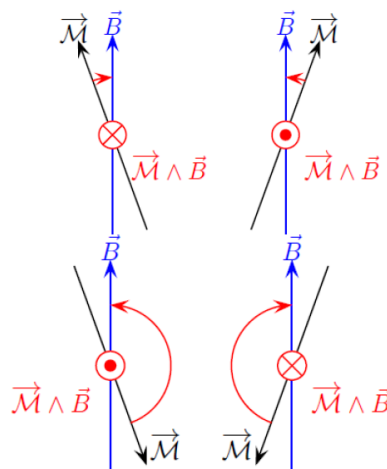
4. Equilibre d'un dipôle magnétique dans un champ uniforme

Considérons un moment magnétique \vec{m} placé dans un champ magnétique uniforme \vec{B} .



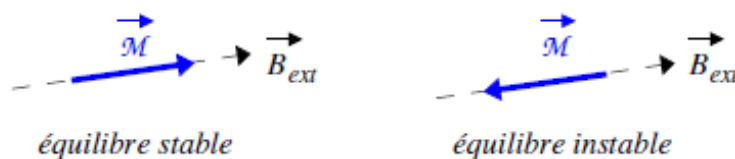
Le moment des forces de Laplace est nul pour \vec{m} et \vec{B} alignés. Il existe donc 2 types de positions d'équilibre : $\theta = 0$ et $\theta = \pi$.

Etudions leur stabilité.



Conclusion :

- Equilibre stable $\theta = 0$: \vec{m} et \vec{B} alignés dans le même sens.
- Equilibre instable $\theta = \pi$: \vec{m} et \vec{B} alignés dans des sens opposés.



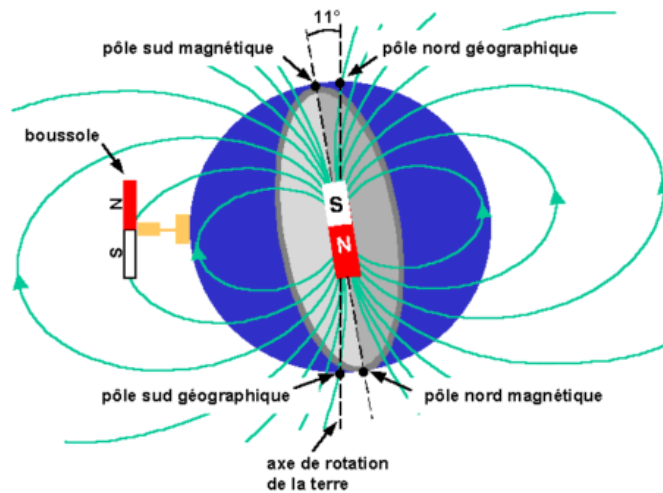
Sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, le vecteur moment magnétique a tendance à s'orienter dans le sens du champ.

5. Applications

5.1 La boussole

L'aiguille d'une boussole s'oriente dans le sens du champ magnétique.

La direction pointée par le pôle Nord de l'aiguille d'une boussole, qui définit le pôle Nord géographique, coïncide donc avec le pôle Sud magnétique terrestre.



5.2 Le moteur synchrone

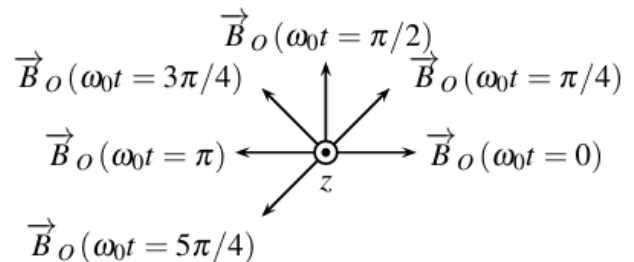
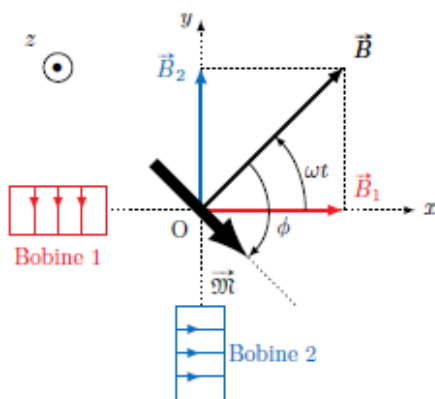
Le moment magnétique d'un dipôle magnétique tend à s'aligner sur le champ magnétique. En présence d'un champ magnétique tournant, l'aimant, poursuivant le champ, est entraîné par celui-ci.

Un champ tournant est un champ magnétique de norme constante, dont la direction décrit un cercle parcouru à vitesse angulaire ω constante.

Un champ tournant peut être produit par superposition de champs créés par des bobines décalées dans l'espace et parcourues par des courants sinusoïdaux de même amplitude. Le déphasage entre les courants d'alimentation des bobines doit être égal au décalage angulaire entre les bobines.

On place par exemple deux bobines fixes (stator) à 90° l'une de l'autre parcourue par des courants en quadrature.

$$\vec{B}_1(t) = B \cos(\omega t) \vec{u}_x \text{ et } B_2(t) = B \sin(\omega t) \vec{u}_y$$



Le champ magnétique total en O est un champ tournant.

Si on place en O un système que l'on nomme rotor caractérisé par son moment magnétique, étant soumis à un couple qui tend à l'aligner avec le champ magnétique, celui-ci va se mettre en rotation. C'est le principe d'un moteur synchrone : le champ et l'aiguille tournent à la même vitesse.

En pratique : EDF délivre du courant triphasé, c'est-à-dire qu'un câble électrique contient en fait trois câbles, appelés phases, parcourus par des courants déphasés de $2\pi/3$. Dans un usage domestique, les phases sont réparties entre les différentes habitations. Dans un usage industriel, les trois phases peuvent être reliées à une même machine. Schématiquement, les champs tournants industriels sont produits par trois bobinages décalés de $2\pi/3$, chaque bobine étant alimentée par une phase de la tension d'alimentation de la machine.

