

B-Champ magnétique

Les différentes sources de champ magnétique sont les aimants permanents, le courant électrique (c'est-à-dire le déplacement d'ensemble de charges électriques), ainsi que la variation temporelle d'un champ électrique (par induction électromagnétique).

En présence d'un champ magnétique, on peut observer divers phénomènes sur les matériaux :

- Paramagnétisme: désigne en magnétisme le comportement d'un milieu matériel;
- Ferromagnétisme: (est le mécanisme fondamental par lequel certains matériaux (fer, cobalt, nickel...) sont attirés par des aimants).

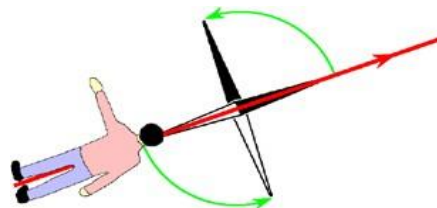
Les applications du champ magnétique sont nombreuses. Elles vont de l'attraction des aimants et l'orientation des boussoles au *stockage d'information sur les disques durs* en passant par les *accélérateurs de particules*.

Sources de l'interaction magnétique

❑ Les aimants:

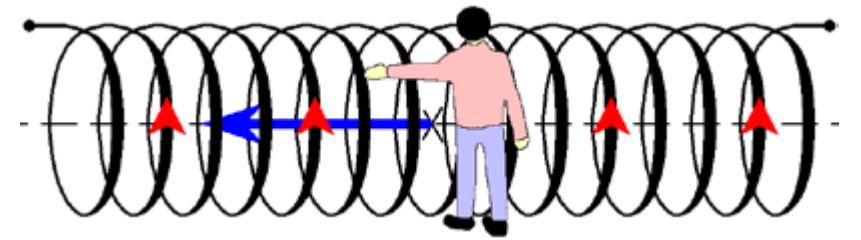
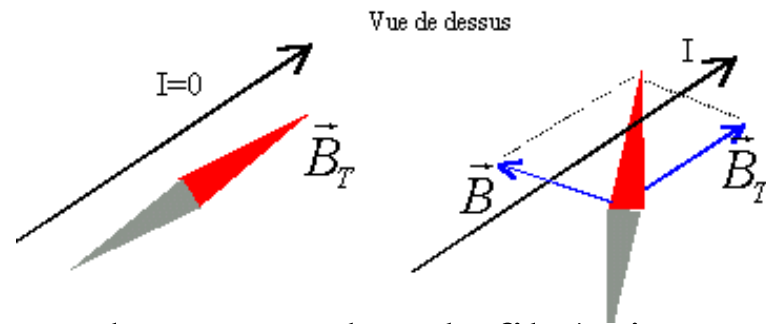
Les aimants sont des sources permanentes de champ magnétique. Ils sont constitués d'alliages à base de fer ou de certains oxydes de fer de cobalt ou de nickel. Les formes des aimants sont liées à leur utilisation. L'action magnétique exercée par un aimant est plus importante au niveau de certaines régions appelées pôles de l'aimant.

Les pôles d'un aimant ne sont pas séparables : **il n'existe pas de monopôle magnétique: la plus petite entité magnétique est le dipôle magnétique (association d'un pôle Nord et d'un pôle Sud).**



❑ Les courants:

Plaçons une aiguille aimantée au dessous d'un fil conducteur rectiligne de telle façon que cette aiguille soit parallèle au fil lorsqu'aucun courant ne le parcourt. Lorsqu'un courant électrique circule, l'aiguille tend à s'orienter perpendiculairement au conducteur. Un conducteur parcouru par un courant électrique crée un champ magnétique en son voisinage. Le sens du champ dépend du sens du courant. **Règle du bonhomme d'Ampère** : Un observateur, disposé le long du conducteur de façon que le courant électrique circule de ses pieds vers sa tête, et regardant vers un point M, voit en M le champ magnétique \vec{B} orienté vers sa gauche.

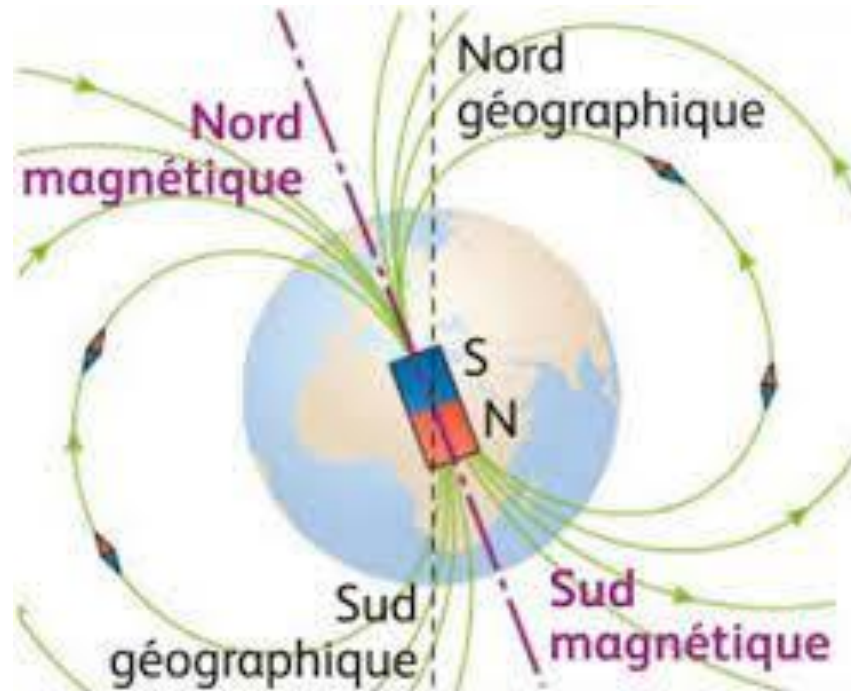


L'aiguille aimantée en l'absence de courant dans le fil s'oriente suivant la composante horizontale du champ magnétique terrestre.

❑ La terre:

La terre et pratiquement tous les astres actifs (dont le noyau est en fusion) sont source de champ magnétique. Le "vent solaire", qui est constitué de particules chargées éjectées à très grande vitesse par le Soleil, modifie la topographie du champ magnétique terrestre.

Remarque : Les lignes de champ « entrent du pôle Nord terrestre ou Sud magnétique et sortent par le pôle "sud" du point de vue du géographique !!



Unité et mesure du champ magnétique :

❖ Unité légale :

Dans le système international (S.I.) l'unité légale fondamentale de mesure du champ magnétique est le tesla (symbole T),

❖ Le tesla-mètre :

Nous étudierons le principe de fonctionnement de la sonde à effet Hall dans la suite. La sonde elle-même est constituée d'un petit parallélépipède formé d'un semi-conducteur parcouru par un courant. Lorsque la sonde est "plongée" dans un champ magnétique, il apparaît entre deux de ces faces une faible tension qui est mesurée par un millivoltmètre. L'ensemble formé de la sonde et du millivoltmètre constitue un tesla-mètre.

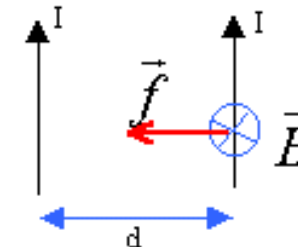
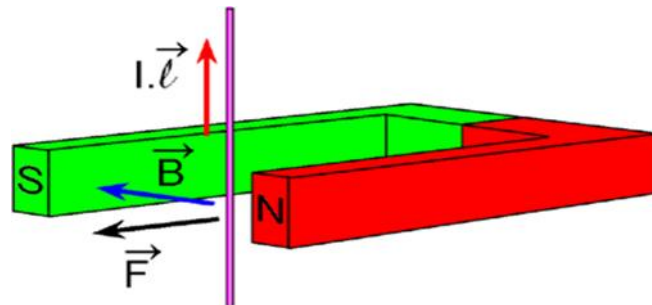
❖ Ordre de grandeur :

- La composante horizontale du champ magnétique terrestre vaut $B_H \approx 2 \cdot 10^{-5}$ T.
- Un aimant permanent produit un champ magnétique de 0,01 T à 0,1 T.
- Une bobine de 1000 spires sur 10 cm parcourue par un courant de quelques ampères produit en son centre un champ magnétique $B_{\text{centre}} \approx 0,1$ T.
- Un électroaimant de même type peut donner un champ de quelques teslas.
- Le champ produit par un électroaimant est limité par l'effet Joule. A très basse température (quelques K) certains métaux ou alliages deviennent supraconducteurs. Grâce à la supraconductivité on peut produire des champs magnétiques intenses (10 à 100 T). Par champ "pulsé" on obtient des valeurs de 1000 T.

Action du champ magnétique sur un courant, force de Laplace :

Expérience de Laplace :

On peut mettre en évidence l'action d'un champ magnétique sur un fil conducteur parcouru par un courant par l'expérience de Laplace : le champ magnétique est généré par à un aimant en U et a pour sens d'avant ou en arrière de la figure. Quand le courant circule de bas en haut dans le conducteur, celui-ci est dévié vers la gauche, la force de Laplace s'exerce donc vers la gauche. Lorsqu'on inverse le sens du courant, la force de Laplace s'inverse. Lorsqu'on inverse le sens du champ magnétique, la force de Laplace s'inverse.



$$d\vec{f} = I d\vec{l} \wedge \vec{B} \Rightarrow f = I l B$$

$$f = \frac{\mu_0 I^2 l}{2\pi d}$$

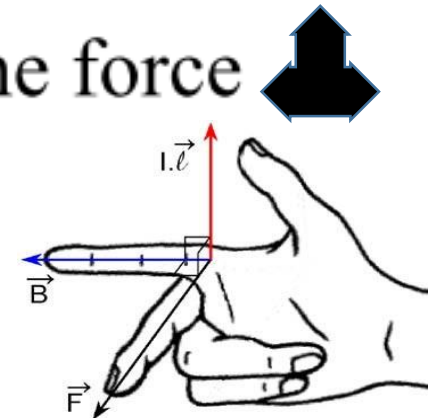
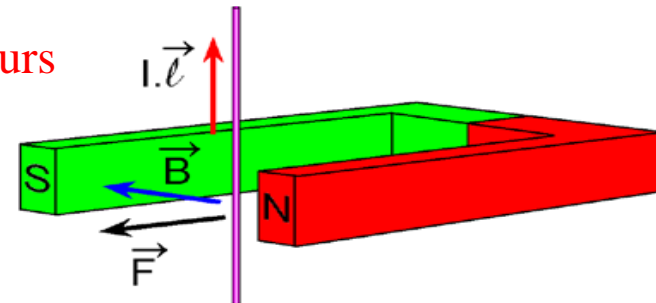
Soit un circuit filiforme parcouru par une intensité I . Les porteurs de charges de ce circuit subissent la force exprimée au paragraphe précédent soit, compte tenu de la distribution linéique de charges envisagée ici :

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \wedge \vec{B}$$

On justifiera à partir de l'effet Hall que cette force subie par les porteurs de charges d'un circuit filiforme se transmet à l'élément de circuit. Cette force dite force de Laplace : $d\vec{F} = I d\vec{l} \wedge \vec{B}$

Permet d'expliquer l'expérience du même nom. Une barre constituant un élément du circuit est parcourue par un courant d'intensité I . La présence d'un champ magnétique conduit à l'existence d'une force

- la direction est orthogonale au plan défini par les vecteurs $I\vec{l}$ et \vec{B} ,
- le sens est défini par la règle des trois doigts de la main droite :
- la mesure est donnée par : F



Caractérisation du vecteur champ magnétique :

Une direction,

Un sens,

Et une norme,

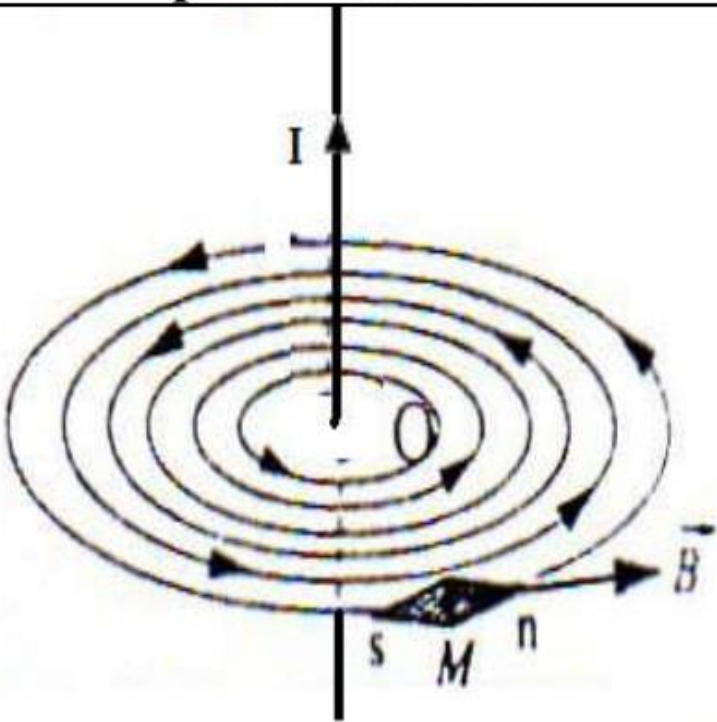
(T) →

$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{d}$

(A)

(m)

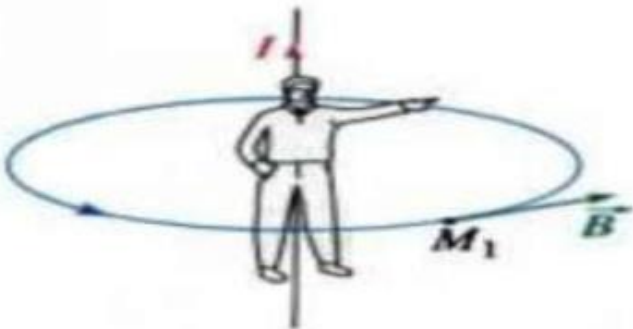
**Spectre de champ magnétique
créé par un fil infini parcouru
par un courant**



Comment déterminer le sens du champ magnétique ?

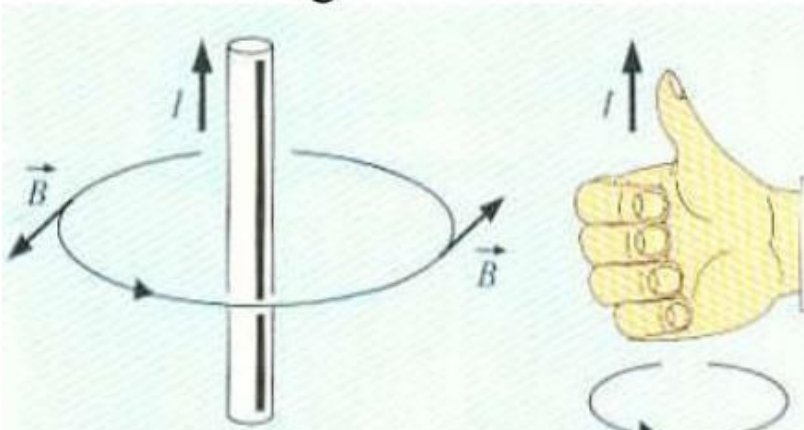
Règle du bonhomme d'Ampère

Lorsqu'un bonhomme d'Ampère placé sur le fil, le courant entrant par ses pieds et sortant par sa tête, regarde le point M, son bras gauche indique le sens du champ \vec{B}



La règle de la main droite.

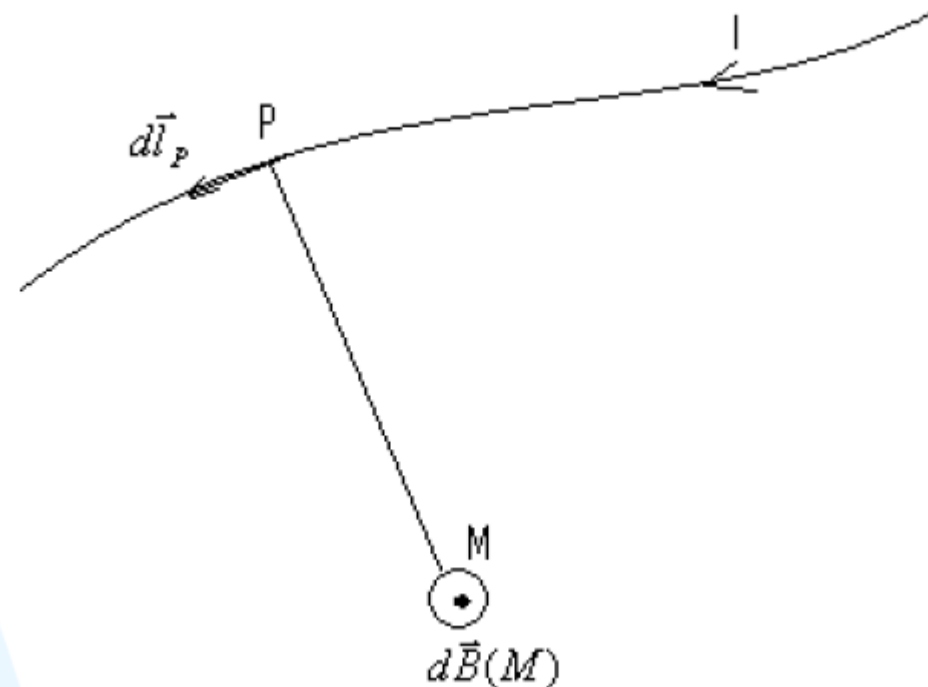
Le courant sort du pouce de la main droite, paume vers le fil.
Les doigts donnent le sens de B, sortant des ongles.



Loi de Biot et savart

Enoncé de la loi de Biot et Savart

La loi de Biot et Savart a été postulée puisqu'elle permettait de rendre compte de la réalité du champ magnétique observé. Elle sera admise sans démonstration pour un circuit filiforme comme la stipule le programme. Soit un circuit filiforme parcouru par un courant d'intensité I . Une longueur dl_P de ce circuit a une densité linéique de courant $I d\vec{l}_P$ dans le sens de parcours du courant.



Le champ magnétique élémentaire créé par cet élément de courant s'écrit :

$$d\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} I(P) d\vec{l}_P \wedge \frac{\vec{PM}}{PM^3}$$

La quantité μ_0 est une constante universelle portant le nom de perméabilité du vide. Elle vaut : $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$

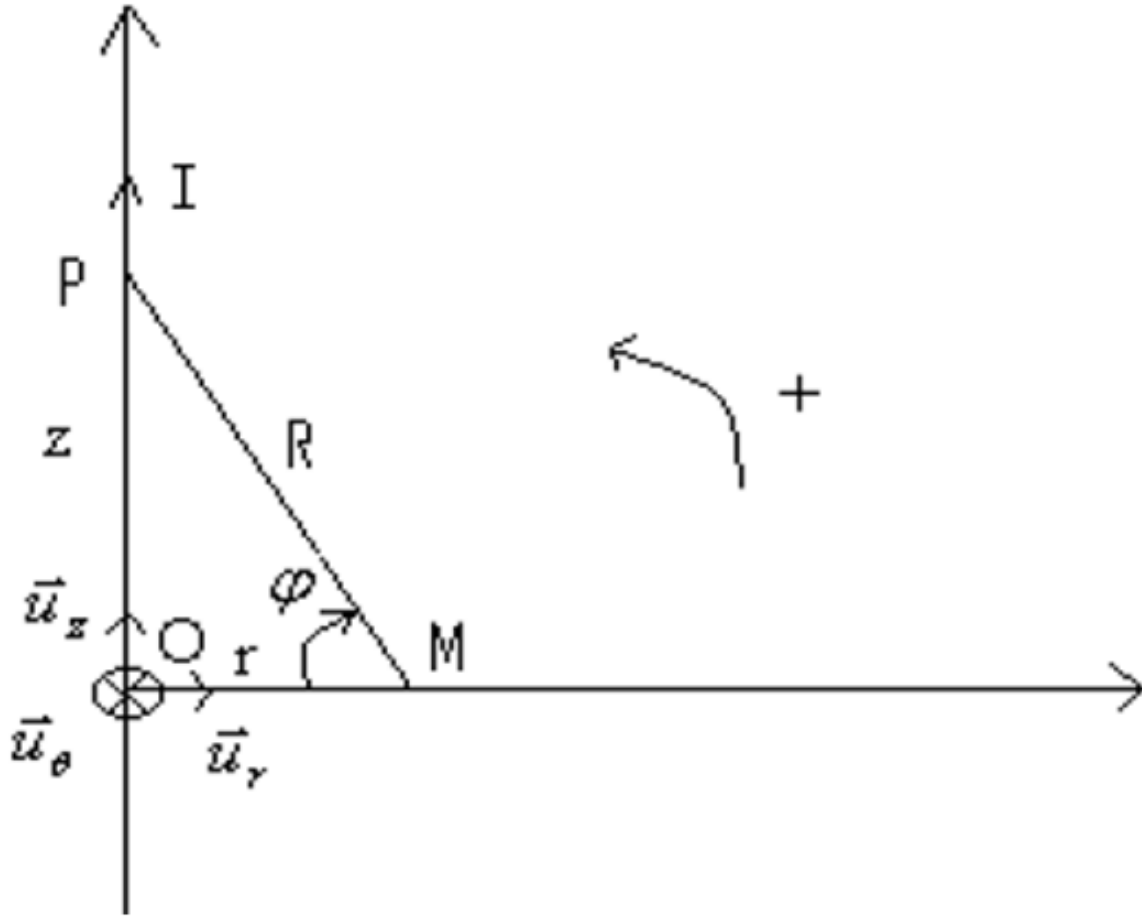
Elle est liée à la permittivité du vide ϵ_0 et à la vitesse de la lumière dans le vide c par la relation : $\epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{P \in \text{circuit}} I(P) d\vec{l}_P \wedge \frac{\vec{PM}}{PM^3}$$

Cas d'une charge en mouvement d'élément de courant $I d\vec{l}_P$ s'écrit $q\vec{v}$ en notant q la valeur de la charge située au point P et \vec{v} sa vitesse

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \wedge \vec{PM}}{PM^3}$$

Exemple de calcul de champ magnétique créé par une charge sur un fil infini rectiligne:



$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} I d\vec{l} \wedge \frac{\overrightarrow{PM}}{PM^3}$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} Idz \vec{u}_z \wedge \frac{\overrightarrow{PM}}{PM^3}$$

Or $\overrightarrow{PM} = r\vec{u}_r - z\vec{u}_z$

Donc $\vec{u}_z \wedge PM = r\vec{u}_\theta$ et en utilisant les notations de la figure ci-dessus :

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} Idz \frac{r}{R^3} \vec{u}_\theta$$

On a deux variables non indépendantes z et R (r est une constante puisqu'elle repère le point où on calcule le champ et non les points de la distribution sur lesquels on intègre).

On va effectuer un changement de variables et utiliser φ comme nouvelle et unique variable. On notera qu'il s'agit d'un angle orienté comme indiqué sur le schéma (pour lequel $\varphi < 0$).

On a :

$$\cos \varphi = \frac{r}{R} \quad \text{donc} \quad R = \frac{r}{\cos \varphi}$$

$$\tan \varphi = -\frac{z}{r} \quad \text{donc} \quad z = -r \tan \varphi \quad \text{et} \quad dz = -r(1 + \tan^2 \varphi) d\varphi = -\frac{r}{\cos^2 \varphi} d\varphi$$

φ varie de $+\frac{\pi}{2}$ à $-\frac{\pi}{2}$ quand z varie $-\infty$ à $+\infty$

Donc:

$$\begin{aligned}\vec{B}(M) &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{+\frac{\pi}{2}}^{-\frac{\pi}{2}} \frac{-r}{\cos^2 \varphi} d\varphi \frac{r \cos^3 \varphi}{r^3} \vec{u}_\theta \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \varphi}{r} d\varphi \vec{u}_\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} [\sin \varphi]_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \vec{u}_\theta\end{aligned}$$

Soit finalement:

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

Définition légale de l'Ampère:

Elle est basée sur l'interaction entre deux fils conducteurs infinis et parallèles. D'après le calcul effectué plus haut, le fil 1 crée un champ magnétique :

$$\vec{B}_1(M) = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} \vec{u}_\theta$$

En notant r la distance du point M au fil rectiligne et en utilisant les coordonnées cylindriques.

Une longueur l du fil 2 subit donc une force magnétique :

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = I_2 l \vec{u}_z \wedge \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1}{d} \vec{u}_\theta = -\frac{\mu_0}{2\pi} I_1 I_2 \frac{l}{d} \vec{u}_r$$

L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs rectilignes, infinis, parallèles, de section circulaire négligeable et distants de 1 m produit une force d'interaction entre ces deux conducteurs égale à $2 \cdot 10^{-7}$ N par mètre de conducteurs.

On fixe en même temps la constante μ_0 ou valeur de la perméabilité du vide à $4\pi 10^{-7} \text{H.m}^{-1}$

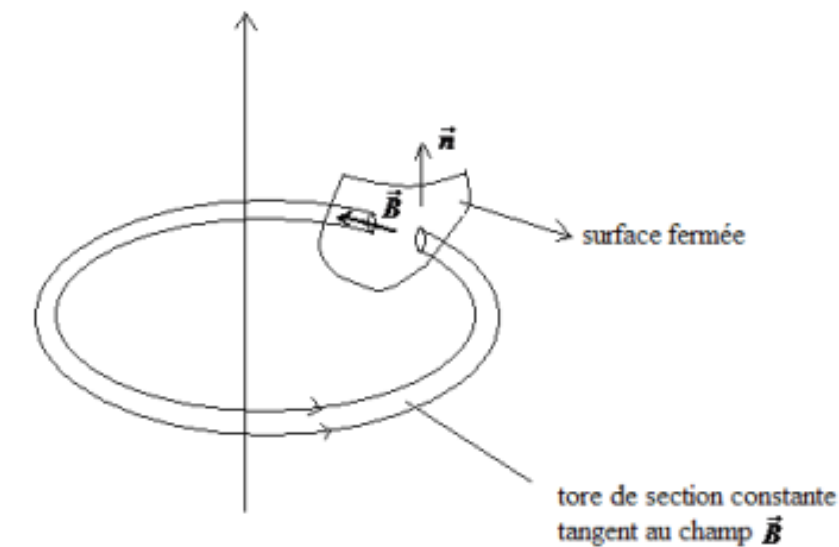
Propriétés du champ magnétique

A- conservation du flux

On a établi précédemment à partir de la loi de Biot et Savart que le champ magnétique créé par un fil pouvait s'écrire en coordonnées cylindriques :

$$\vec{B}_1(M) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{u}_\theta$$

Soit un tore de section S constante centré sur l'axe du fil parcouru par un courant. Le flux du champ magnétique à travers toute section du tore est le même: le champ est colinéaire au vecteur surface orienté et la valeur du champ ne dépend que de la distance au fil qui est constante.



Le tore intercepte une surface fermée un nombre pair de fois, le flux étant alternativement entrant et sortant. Les contributions au flux sur la surface fermée sont donc opposées et au total s'annulent.

Pour décrire la totalité d'une surface fermée, il suffit de faire la même chose avec d'autres tores.

Le flux du champ magnétique créé par un fil infini à travers une surface fermée est donc nul.