

Champ magnétique - Force de Laplace

Ce qu'il faut connaître

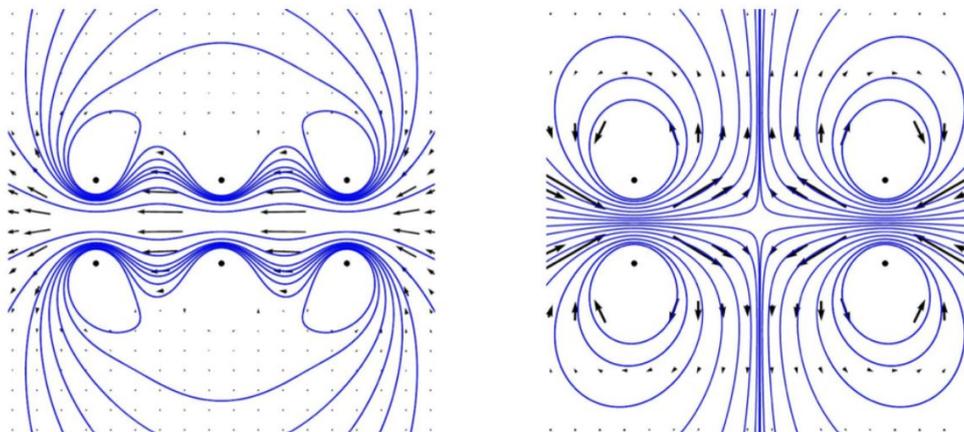
- Quelle est la propriété des lignes de champ magnétique qui permet de repérer les zones de champ faible ou fort ?
- On considère un fil droit parcouru par un courant I : schématiser l'allure des lignes de champ qu'il produit (attention à l'orientation).
- Même question pour une unique spire, puis pour une bobine, puis pour un aimant rectangulaire.
- Décrire un dispositif permettant de produire un champ magnétique quasi uniforme (les bobines de Helmholtz).
- Quel est l'ordre de grandeur d'un champ magnétique au voisinage d'un aimant ? dans un appareil d'IRM ? du champ magnétique terrestre ?
- Comment est défini le moment magnétique d'une spire de courant ? Préciser en particulier comment on obtient son orientation à partir d'un exemple.
- Quelle est l'expression de la force de Laplace s'exerçant sur une tige rectiligne de longueur L , parcourue par un courant I , placée dans un champ uniforme \vec{B} ? (on définira l'orientation des vecteurs introduits)
- Quel est son point d'application ?
- Comment s'exprime la puissance de cette force si la tige est en translation rectiligne à la vitesse \vec{v} ?
- Quelle est l'expression du couple des actions de Laplace sur un moment magnétique \vec{m} placé dans un champ uniforme \vec{B} ?

Ce qu'il faut savoir faire

- Analyser une carte de lignes de champ.
- Exprimer et utiliser la résultante des forces de Laplace sur une tige rectiligne dans un champ uniforme.
- Exprimer et utiliser le couple des actions de Laplace sur un moment magnétique.

Exercice C1 - Analyse de cartes de champ

Les cartes de champ magnétique ci-dessous sont des vues en coupe du champ produit par des spires de courant circulaires. Dans les deux cas, indiquer 1 / la position des sources, 2 / le sens du courant, 3 / les zones de champ fort et faible, et 4 / le cas échéant s'il existe une zone de l'espace où le champ magnétique est uniforme.



I. Champ magnétique \vec{B}

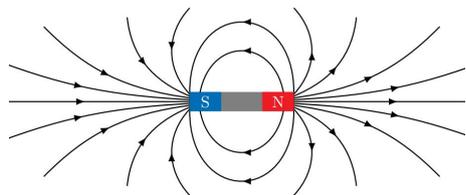
1. Sources du champ magnétique

- ⇒ **Les aimants** : Possèdent un pôle Nord et un pôle Sud. Si un aimant est brisé, chacun des éclats aura à nouveau deux pôles.
- ▷ le pôle Nord d'un aimant et le pôle Sud d'un autre aimant s'attirent ;
- ▷ les deux pôles de même polarité de deux aimants se repoussent.
- ⇒ **Le courant électrique** Expérience d'Oersted : un courant électrique dévie une boussole

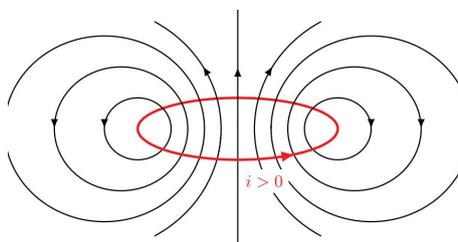
2. Ordres de grandeurs

Champ...	Ordre de grandeur
▷ magnétique terrestre	$\simeq 5 \times 10^{-5}$ T
▷ créé une bobine de 1000 spires parcourue par un courant de 1 A	$\simeq 10$ mT
▷ créé par un aimant	$\simeq 0.1$ à 1 T
▷ dans un moteur électrique	$\simeq 0.5$ T
▷ créé par un électroaimant	$\simeq 1$ à 10 T
▷ créé par un appareil IRM	$\simeq 5$ T

3. Quelques cartes de champ à reconnaître

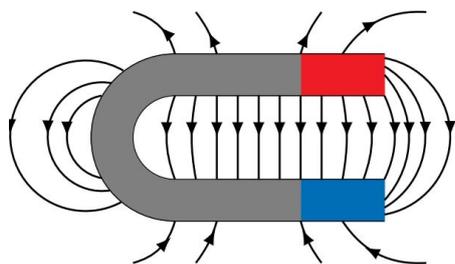
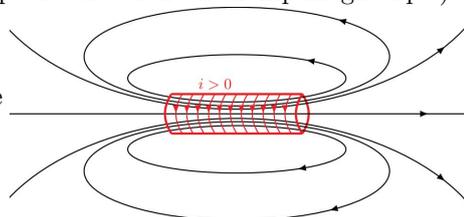


Aimant droit : Le champ est orienté **du nord vers le sud** à l'extérieur de l'aimant

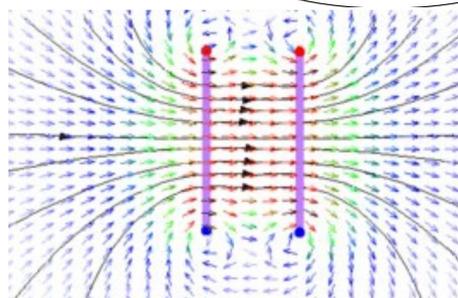


Boucle de courant. Le champ est orienté selon la règle de la main droite ou du tire-bouchon (les doigts suivent le sens du courant et le pouce indique la direction du champ magnétique).

Solénoïde (c'est-à-dire un ensemble de spires les unes contre les autres, autrement dit une bobine ou inductance). Le champ est orienté selon la règle de la main droite.



Aimant en U



Bobines de Helmholtz
(2 bobines espacées de leur rayon)

4. Propriétés des lignes de champ magnétique

Propriétés

- ▷ Les lignes de champs sont dirigé du pôle Nord vers le pôle Sud des aimants.
- ▷ Si deux lignes de champ se coupent en un point, alors le champ est nul en ce point.
- ▷ Si les lignes de champ sont parallèles entre elles et régulièrement espacées alors le champ est uniforme.
- ▷ Les lignes de champ sont toujours des courbes fermées (dans un aimant, les lignes de champ se bouclent à l'intérieur de l'aimant).
- ▷ Les boucles de champ enroulent les courants électriques en respectant la règle de la main droite.
- ▷ Lorsque les lignes de champ se resserrent, la norme de B augmente. Les zones où le champ est le plus intense se trouvent au voisinage de la source du champ magnétique.

⇒ On constate que l'**aimant en U**, le **solénoïde** et les **bobines de Helmholtz** créent des zones où le champ est **quasi uniforme** (lignes de champ parallèles)

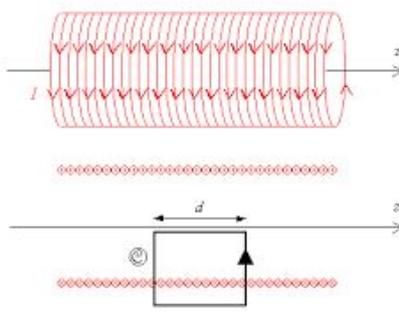
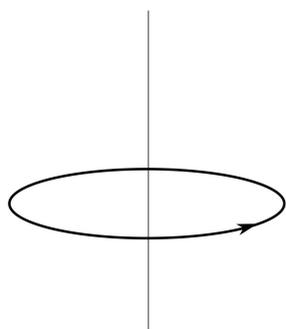
→EC1

5. Symétries et invariances du champ magnétique (→2^e année)

Soit M un point de l'espace :

- ▷ si P est un plan de symétrie des courants **passant par M** alors le champ en M est orthogonal à P ;
- ▷ si P' est un plan d'antisymétrie des courants **passant par M** alors le champ en M est contenu dans P' .
- ▷ Si le système de courants est invariant par rotation ou translation, alors le champ magnétique aura les mêmes invariances.

Application : Dédure de ce qui précède le sens et la dépendance en les coordonnées adaptées du champ magnétique dans les cas suivants : sur l'axe d'une spire, dans une bobine infinie, en tout point autour d'un fil infini.



6. Les courants électriques et le champ magnétique (→2^e année)

Exemple : Le champ magnétique uniforme à l'intérieur d'un solénoïde de $N = 1000$ spires, de longueur $L = 10$ cm et parcouru par un courant $i = 0.1$ A est donné par $B = \mu_0 \frac{N}{L} i$ (du type plus général $B \propto \mu_0 \frac{I}{L}$).
Que vaut le champ magnétique ?

II. Les moments magnétiques

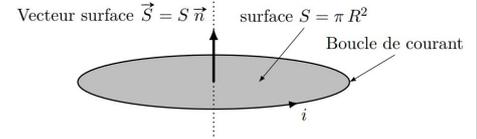
1. Moment magnétique d'une boucle de courant

Définition

Pour une spire :

$$\vec{m} = i\vec{S} \quad \text{en A.m}^2$$

- Attention, \vec{S} orienté en accord avec i !!!
- Pour N spires, $\vec{m} = iN\vec{S}$



2. Moment magnétique d'un aimant

Il n'est pas facile de mettre en évidence des boucles de courant. En effet, l'origine du champ magnétique dans la matière est quantique mais en première approche, 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 \vec{m}_i et le moment magnétique total est $\vec{m} = \sum_i \vec{m}_i$

Dans la majorité des matériaux les \vec{m}_i s'annulent deux à deux mais dans certains cas, un moment magnétique non nul persiste donnant naissance à un champ magnétique.

On associe donc à un aimant/matériau magnétique son moment magnétique macroscopique \vec{m} .

Moment magnétique...	Ordre de grandeur
▷ d'un aimant droit usuel	$\simeq 1 \text{ A} \cdot \text{m}^2$
▷ d'un petit aimant néodyme fer bore	$\simeq 10 \text{ A} \cdot \text{m}^2$
▷ de la Terre	$\simeq 8 \times 10^{22} \text{ A} \cdot \text{m}^2$

III. Action d'un champ magnétique

1. Force de Laplace

Force de Laplace élémentaire

Soit \vec{dl} une portion infinitésimale d'un conducteur parcouru par I , et placée dans \vec{B} extérieur (non créé par le fil). (\vec{dl} orienté par I)

Il s'exerce sur le conducteur une force de Laplace d'expression $\vec{dF} = I \vec{dl} \wedge \vec{B}$.

Pour obtenir la résultante totale qui s'exerce sur un conducteur, il faut sommer : $\vec{F} = \int_A^B \vec{dF} = \int_A^B I \vec{dl} \wedge \vec{B}$.

conducteur rectiligne dans un champ uniforme

Résultante $\vec{F} = I\vec{L} \wedge \vec{B}$.

Point d'application : le centre de la tige.

Puissance associée

La puissance de la force de Laplace se calcule simplement comme

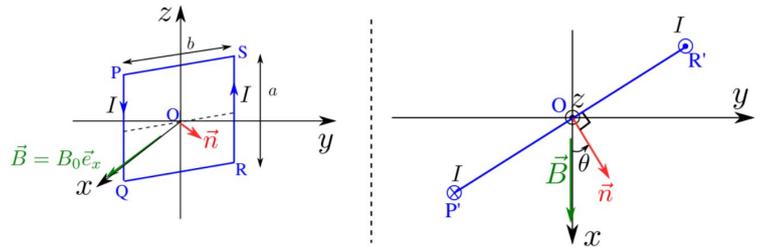
$$\mathcal{P}(\vec{F}) = \vec{v}(A) \cdot \vec{F}$$

où A est le point d'application de la force (le milieu de la tige).

2. Couple exercé sur un moment magnétique

a. Cas d'une spire rectangulaire

On considère la spire rectangulaire ci-contre, de dimensions $a \times b$, parcourue par un courant I constant. Elle peut tourner autour de l'axe Oz . Il y a présence d'un champ externe \vec{B}_0 uniforme et stationnaire. On se pose la question de l'action des forces de Laplace sur cette spire.



Résultante :

$$\begin{aligned}\vec{F} &= I\vec{PQ} \wedge \vec{B}_0 + I\vec{QR} \wedge \vec{B}_0 + I\vec{RS} \wedge \vec{B}_0 + I\vec{SP} \wedge \vec{B}_0 \\ &= I(\vec{PQ} + \vec{QR} + \vec{RS} + \vec{SP}) \wedge \vec{B}_0 \\ &= I\vec{PP} \wedge \vec{B}_0 = \vec{0}.\end{aligned}$$

Le centre de masse du cadre ne bouge pas.

Moment selon Oz :

b. Expression générale

On admet que ce qui précède reste vrai pour une spire de forme quelconque, indéformable, dans un champ \vec{B} uniforme à l'échelle de la spire.

Action des forces de Laplace sur une spire

Soit un moment magnétique $\vec{m} = IS\vec{n}$ (qui peut être une spire ou un aimant), placé dans un champ magnétique extérieur \vec{B} uniforme.

L'action des forces de Laplace est $\left\{ \begin{array}{l} \text{de résultante nulle,} \\ \text{de couple } \vec{\Gamma} = \vec{m} \wedge \vec{B} \end{array} \right.$

La puissance reçue par le moment magnétique de la part des forces de Laplace est donnée par $\mathcal{P} = \vec{\Gamma} \cdot \vec{\omega}_{\vec{x}}$.

Remarque : la formule pour la puissance est la formule générale pour un couple Γ agissant sur un solide en rotation à la vitesse angulaire ω autour de \vec{e}_x .

→ Faire l'EC3.

c. Action d'un champ uniforme sur un dipôle magnétique

Le couple résultant de l'action de \vec{B} tend à aligner le moment magnétique \vec{m} avec \vec{B} .