

1 Introduction

1.1 Interaction entre aimants

Observations expérimentales.

- Deux aimants peuvent s'attirer ou se repousser selon la façon dont on les oriente.
- Le champ magnétique peut être mis en évidence avec un petit aimant en forme d'aiguille (boussole).
- Loin de toute perturbation, une aiguille s'oriente toujours sensiblement dans la direction du sud vers le nord géographique.

Pour quantifier ces effets, on va introduire la notion de champ magnétique.

Définition. Une boussole est une aiguille aimantée libre de tourner. On appelle nord magnétique l'extrémité qui pointe vers le nord géographique.

1.2 Le vecteur champ magnétique

La direction de l'aiguille aimantée en un point indique la direction du champ magnétique.

Le **champ magnétique** est caractérisé par un vecteur, noté en général $\vec{B}$:

- sa direction est celle d'une aiguille aimantée ;
- son sens va du pôle Sud au pôle Nord de l'aiguille ;
- sa norme s'exprime en tesla (T).

1.3 Notion de champ en physique

Nous verrons de plus en plus souvent la notion de champ, omniprésente en physique.

Exemple

- On peut également définir des champs de pression $p(x, y)$ ou de température $T(x, y)$ sur une carte météorologique.
- On peut définir un champ de vitesse du vent $\vec{v}(x, y)$ où un vecteur est défini en tout point d'une carte : sa **direction** autant que sa norme importent.
- Nous utilisons en mécanique le champ de pesanteur $\vec{g}$. À notre échelle, il est uniforme et constant : c'est un vecteur vertical dirigé vers le bas de norme $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.
- On peut aussi définir un champ de force gravitationnel $\vec{F}(x, y, z)$ dans tout l'espace, qui pointe toujours vers le centre de la Terre.

Définition. Un **champ** est une grandeur physique définie en tout point de l'espace. Sa valeur dépend en général d'où on se place et du temps.

- Lorsque la grandeur physique est un scalaire (température, pression, etc.) on parle de **champ scalaire**.
- Lorsqu'elle est un vecteur (force, vitesse, champ magnétique, etc.), on parle de **champ vectoriel**.

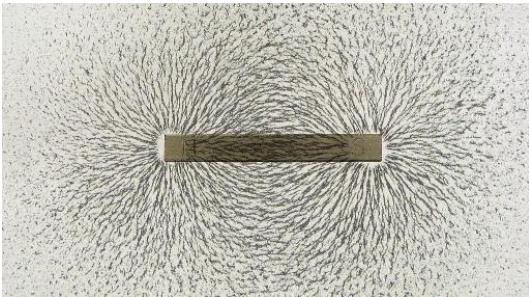
2 Sources et cartes de champ magnétique

2.1 Aimant droit

Tout aimant possède un pôle Nord **et** un pôle Sud magnétique. Deux pôles de même nature se repoussent, deux pôles différents s'attirent.

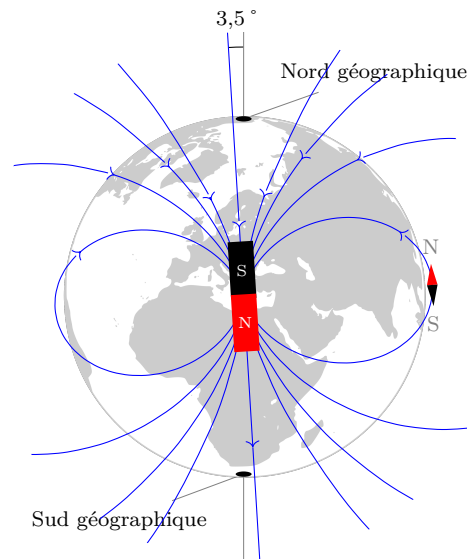
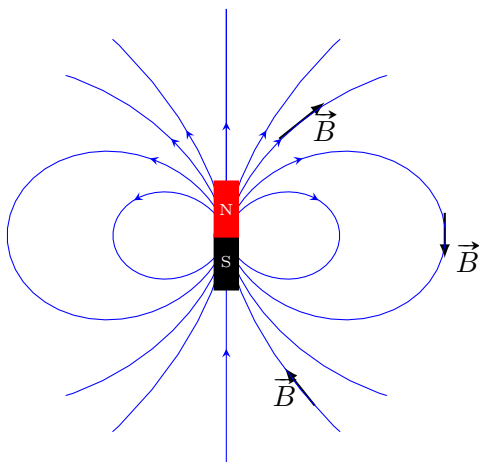
Définition. Les **lignes de champ** sont des courbes tangentes en tout point au champ magnétique. Elles donnent la direction du champ magnétique en tout point.

Visualisation du champ magnétique à partir d'un aimant.



Les grains de limaille, de forme allongée, se transforment en petits aimants sous l'action du champ magnétique. Ils se comportent ainsi comme de petites boussoles qui s'orientent parallèlement au champ magnétique. On constate que les grains de limaille forment des courbes particulières allant d'un pôle de l'aimant vers l'autre.

Les lignes de champ sont des courbes fermées qui sortent de l'aimant par le pôle Nord et rentrent dans l'aimant par le pôle Sud.

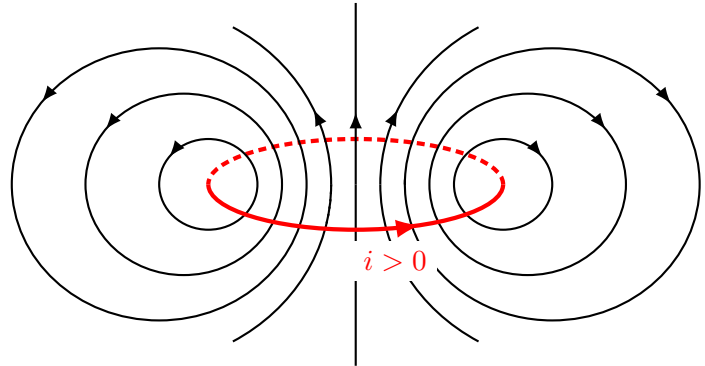
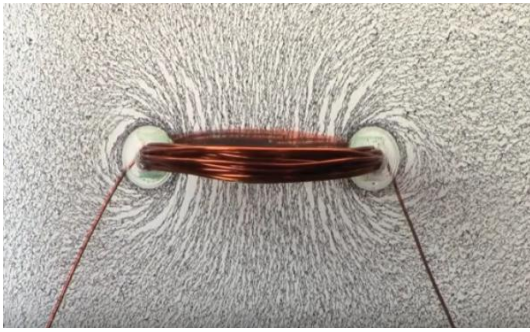


La Terre se comporte comme un gigantesque aimant. Son sud magnétique se situe au nord géographique, de sorte à ce que les nords magnétiques des boussoles s'orientent vers le nord géographique.

2.2 Champ magnétique créés par des courants

Expérience d'Ørsted. En 1820, Ørsted découvre qu'un fil parcouru par un courant dévie une aiguille aimantée. C'est la première preuve historique qu'un courant électrique crée un champ magnétique. Nous pouvons mettre en évidence cet effet expérimentalement assez facilement. Si on change le sens du courant, on change le sens de l'aiguille.

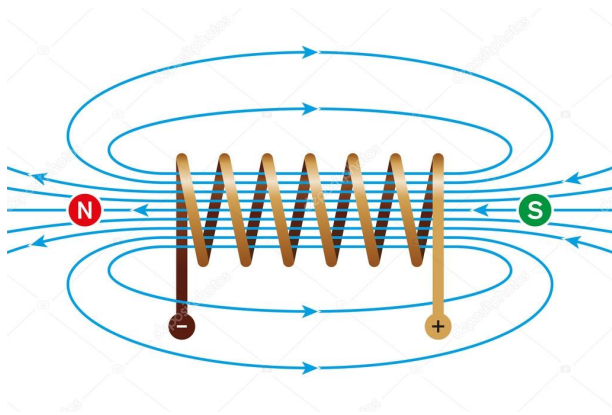
Bobine plate. Une bobine plate est un fil électrique de forme circulaire. On refait une expérience avec de la limaille de fer. On retrouve des lignes qui sont analogues à celles créées par l'aimant, si on le plaçait perpendiculairement à la spire (vertical ici).



Les lignes de champ d'une bobine plate s'apparentent à celle d'un aimant.

Bobine longue ou solénoïde.

Définition. En enroulant un fil le long d'un cylindre, on fabrique un **solénoïde**.



Les lignes de champ sont parallèles dans le solénoïde. En dehors, les lignes de champ se referment de façon assez analogue encore une fois à celle de l'aimant.

3 Intensité du champ magnétique

Expérience. Plus la boussole est proche de l'aimant, plus elle s'aligne rapidement sur le champ magnétique.

On mesure le champ magnétique par son effet sur les courants, les aimants, etc., que nous verrons aux prochains chapitres. Le champ magnétique est mesuré en tesla (T).

- ▷ champ magnétique terrestre $\approx 5 \times 10^{-5}$ T ;
- ▷ champ créé par un électroaimant ≈ 1 à 10 T ;
- ▷ champ créé par un aimant $\approx 0,01$ à 0,5 T ;
- ▷ champ créé par un appareil IRM ≈ 10 T.

3.1 Lien entre intensité du champ magnétique et cartes de champ

Sur le schéma ci-dessus. Le champ magnétique est uniforme dans le solénoïde. Lorsque l'on s'en éloigne :

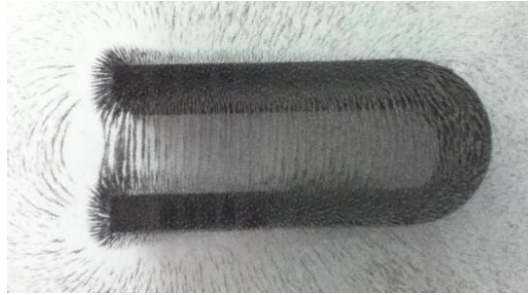
- l'intensité du champ magnétique décroît ;
- les lignes de champ s'écartent les unes des autres.

Cette caractéristique est liée à une propriété fondamentale du champ magnétique qui sera vue en deuxième année.

Deux lignes de champ voisines dans une zone où le champ est intense s'éloignent l'une de l'autre lorsque l'intensité décroît. Si des lignes de champ sont parallèles entre elles, alors le champ magnétique est uniforme.

3.2 Dispositif pour créer un champ magnétique uniforme

- Nous avons vu que dans un solénoïde, les lignes de champ sont parallèles : c'est une première façon de générer un champ magnétique uniforme.
- Ensuite, regardons les lignes de champ d'un aimant en U :



Entre les deux pôles, le champ magnétique est uniforme. Cette zone est appelée l'**entrefer**.

- On peut également créer un champ magnétique uniforme avec deux bobines ; en effet on pourra manipuler l'animation https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Elec/Champs/Helmholtz_FJ.php
Lorsque l'on place deux bobines de rayon R , parcourues par un même courant, à une distance R l'une de l'autre, le champ est à peu près uniforme entre les bobines.

Pour obtenir un champ magnétique uniforme, on peut utiliser :

- un solénoïde, en se plaçant assez loin des bords ;
- des bobines de Helmholtz (deux bobines plates de rayons R séparées d'une distance R et parcourues par le même courant) : le champ est uniforme entre les bobines ;
- un aimant en U, en se plaçant dans l'entrefer.

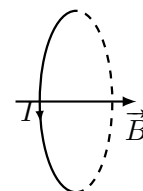
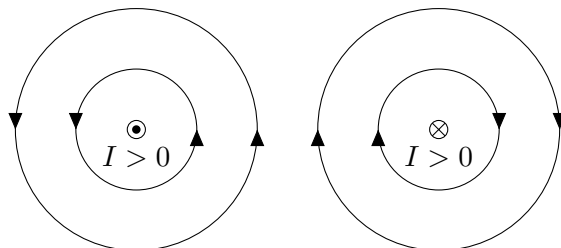
3.3 Lien entre courant et champ magnétique

3.3.1 Direction du champ magnétique

Règle de la main droite.

1. Le champ magnétique créé par un fil est orienté ainsi : en fermant le poing de la main droite, les doigts indiquent l'orientation des lignes de champ et le pouce le courant.
2. Le champ magnétique créé par une bobine est orienté ainsi : en fermant le poing de la main droite, les doigts indiquent le sens du courant et le pouce le champ magnétique.

Application



3.3.2 Proportionnalité

Dans le vide, le champ magnétique créé par un courant i est de l'ordre de :

$$\|\vec{B}\| = \mu_0 \frac{i}{L}$$

où $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ est une constante nommée **perméabilité magnétique du vide** et L est une longueur « typique » du problème.

Par exemple, le champ créé par un solénoïde est $\vec{B} = \mu_0 n i(t) \vec{u}_z$ où $\vec{u}_z$ est l'axe du solénoïde orienté selon la règle de la main droite par rapport au courant et n le nombre de spires par mètre.

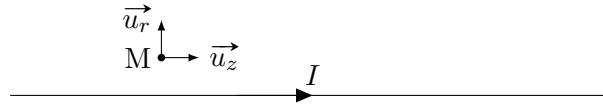
3.3.3 Symétries de la distribution de courant

Soit M un point.

- Si le plan $\mathcal{P}$ passant par M est un plan de **symétrie** de la distribution de courant, alors le champ $\vec{B}$ en M est **orthogonal** à $\mathcal{P}$.
- Si le plan $\mathcal{P}'$ passant par M est un plan d'**antisymétrie** de la distribution de courant, alors le champ $\vec{B}$ en M est **contenu** dans $\mathcal{P}'$.

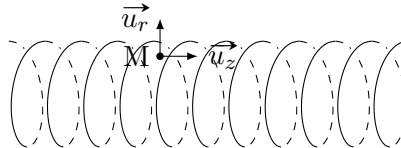
Exemple

Considérons un fil doté des coordonnées cylindriques.



- Le plan $\mathcal{P} = (M, \vec{u}_r, \vec{u}_\theta)$ orthogonal au fil et à la feuille est un plan d'**antisymétrie** : les courants sont opposés par rapport à ce plan. Le champ $\vec{B}$ appartient à ce plan.
- Le plan de la feuille $\mathcal{P}' = (M, \vec{u}_r, \vec{u}_z)$ est un plan de **symétrie**. Le champ $\vec{B}$ y est orthogonal.

Considérons un solénoïde doté des coordonnées cylindriques.



- Si M est loin des bords, on peut considérer que le plan $\mathcal{P} = (M, \vec{u}_r, \vec{u}_\theta)$ orthogonal au solénoïde et à la feuille est un plan de **symétrie**. Le champ $\vec{B}$ y est orthogonal.
- Le plan de la feuille $\mathcal{P}' = (M, \vec{u}_r, \vec{u}_z)$ est un plan d'**antisymétrie**. Le champ $\vec{B}$ appartient à ce plan.

3.3.4 Invariances de la distribution de courant

Le champ $\vec{B}$ possède les mêmes invariances que la distribution de courant.

Exemple

Dans le cas du fil, il y a une invariance par rotation autour du fil, le champ magnétique ne dépend pas de θ . Si le fil est très long, il y a également une invariance du système par translation selon l'axe du fil : le champ magnétique ne dépend pas de z .

Dans le cas du solénoïde, nous retrouvons les mêmes invariances.

⚠ Attention

Il ne faut pas confondre symétries et invariances.

- Les propriétés de symétries sont **spécifiques** au champ magnétique, elle donne sa **direction**.
- Les propriétés d'invariances sont beaucoup plus larges, et donne les **coordonnées** dont dépend $\vec{B}$.

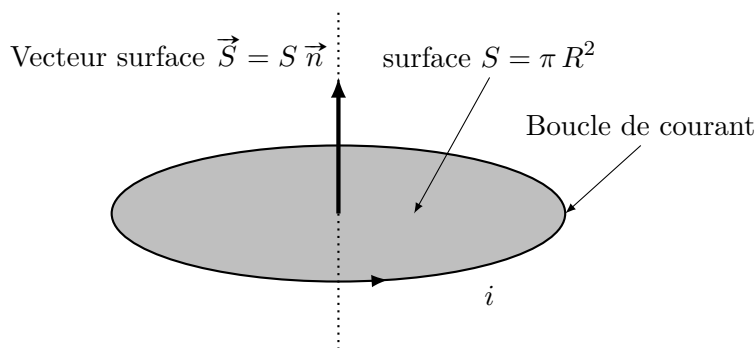
4 Le moment magnétique

Définition. On considère une spire de rayon R parcourue par un courant i . La normale à la surface est notée $\vec{n}$, orientée dans le sens de la main droite par rapport au courant.

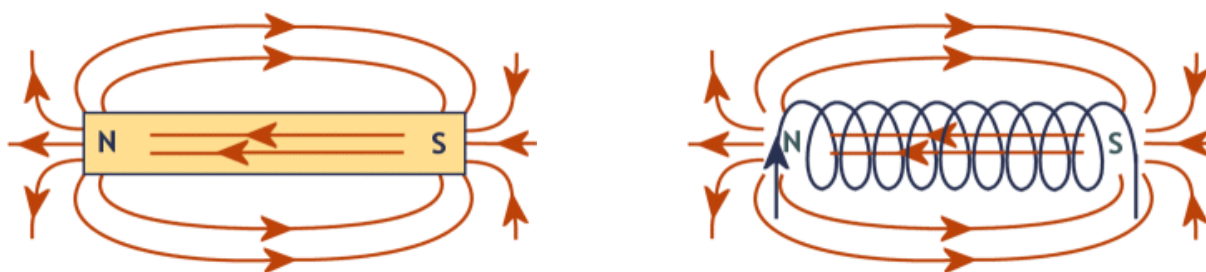
Le **moment magnétique** $\vec{\mathcal{M}}$ de la spire plane (en $\text{A} \cdot \text{m}^2$) est :

$$\vec{\mathcal{M}} = i \vec{S} = i\pi R^2 \vec{n}$$

$\vec{S} = \pi R^2 \vec{n}$ est appelé vecteur surface, d'unité le m^2 .



Cas des aimants. La notion de moment magnétique s'applique aussi aux aimants. L'origine du champ magnétique est le déplacement de particules chargées. Ces courants sont équivalents à un moment magnétique $\vec{\mathcal{M}}$ qui peut donc être considéré également comme l'origine du champ magnétique. À moment magnétique identique, le champ magnétique à grande distance est le même pour un aimant ou une boucle de courant.



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