I1 Champ magnétique

Plan du chapitre

I Carte de champ magnétique
- I.1 Le champ magnétique : un champ vectoriel
  - I.1.a) Champ vectoriel
  - I.1.b) Définition du champ magnétique
- I.2 Le champ magnétique autour de nous
  - I.2.a) Aimant permanent
  - I.2.b) Champ magnétique créé par un courant
  - I.2.c) Ordres de grandeur
- I.3 Notion de carte de champ magnétique
  - I.3.a) Définition
  - I.3.b) Propriétés
  - I.3.c) Quelques exemples
- I.4 Lien entre propriétés de la distribution de courant et champ magnétique
  - I.4.a) Plan de symétrie et d'antisymétrie d'un champ
  - I.4.b) Liens entre symétries du champ magnétique et les symétries de la distribution de courants qui le crée

II Étude de quelques distributions de courants
- II.1 Fil rectiligne infini
  - II.1.a) Expression du champ magnétique
  - II.1.b) Carte de champ
  - II.1.c) Description de la carte de champ
- II.2 Spire circulaire de courant / Bobine plate
  - II.2.a) Carte de champ
  - II.2.b) Description de la carte de champ
- II.3 Bobines de Helmholtz
  - II.3.a) Description
  - II.3.b) Carte de champ
  - II.3.c) Description de la carte de champ
- II.4 Bobine longue ou solénoïde
  - II.4.a) Description
  - II.4.b) Carte de champ
  - II.4.c) Description de la carte de champ

III Dipôle magnétique - Moment magnétique
- III.1 Boucle de courant
  - III.1.a) Vecteur surface d'un circuit filiforme plan
  - III.1.b) Moment magnétique
  - III.1.c) Bobine
- III.2 Approximation dipolaire
- III.3 Moment magnétique d'un aimant
  - III.3.a) Moment magnétique d'un aimant droit
  - III.3.b) Quelques ordres de grandeur de moment magnétique

I1 Champ magnétique

I Carte de champ magnétique

I.1 Le champ magnétique : un champ vectoriel

I.1.a) Champ vectoriel

Un champ est la donnée, en tout point de l'espace et à tout instant, d'une grandeur physique permettant de caractériser une propriété locale de l'espace. On parle de champ scalaire si la grandeur physique est scalaire (champ de température ou de pression par exemple), et de champ vectoriel si la grandeur physique a un caractère vectoriel (champ électrique ou magnétique par exemple).
Le champ est dit :

- stationnaire ou permanent s'il prend en un point donné la même valeur à tout instant ;
- uniforme s'il prend à un instant donné la même valeur en tout point de l'espace.

I.1.b) Définition du champ magnétique

On a défini le champ magnétique dans le chapitre M4. En présence d'une source de champ électromagnétique, on constate que la force subie par une particule chargée est séparée en deux parties :

- Une composante quelconque qui ne dépend pas de la vitesse de la particule : il s'agit de la force électrique $\vec{F} = q\vec{E}$ qui définie le champ $\vec{E}$.
- Une composante proportionnelle à la norme de la vitesse de la particule et orthogonale au vecteur vitesse : il s'agit de la force magnétique : $\vec{F}_m = q\,\vec{v} \wedge \vec{B}$ qui définie le champ $\vec{B}$.

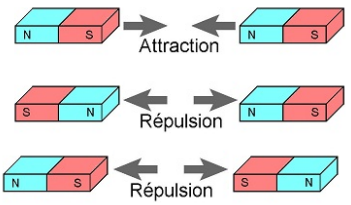
Propriétés :

- Dans le système international (SI), la norme de $\vec{B}$ s'exprime en tesla (T). Le gauss est une autre unité du champ magnétique 1 $gauss = 10^{-4}\ T$.
- $\vec{B}$ est un pseudovecteur ou vecteur axial, c'est à dire qu'il dépend d'une convention d'orientation, puisqu'il est défini à partir d'un produit vectoriel.

I.2 Le champ magnétique autour de nous

I.2.a) Aimant permanent

On connaît depuis l'antiquité le pouvoir attracteur de la magnétite (Fe_3O_4) sur les objets en fer ordinaire. Ce phénomène caractérise les aimants. Au cours du moyen-âge, on a constaté qu'un aimant libre à la surface de la Terre prenait une orientation privilégiée proche de celle d'un méridien ce qui a conduit à l'appellation nord et sud des extrémités d'un aimant. D'autres expériences ont montré la répulsion des pôles de même nom et l'attraction de ceux de nom différent.



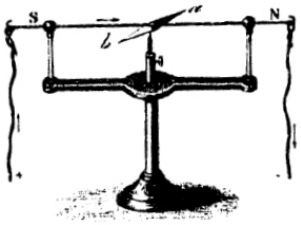
I.2.b) Champ magnétique créé par un courant

Le phénomène de conduction électrique naît au début du XIXe siècle, grâce à l'invention de la pile électrochimique. Avant cela, l'électricité se résumait à l'étude des phénomènes d'électricité statique.

En 1820, alors qu'il tente de mettre en évidence le dégagement de chaleur associé au passage d'un courant électrique dans un fil conducteur, le danois Hans Christian Oersted observe la

déviation d'une aiguille aimantée au voisinage du fil : il est ainsi le premier à montrer qu'un fil parcouru par un courant électrique produit des effets magnétiques.

Plus tard, des expériences montreront que, réciproquement, les circuits électriques sont mis en mouvement à l'approche d'un aimant. Il existe donc une forte analogie de propriétés magnétiques entre aimants et circuits électriques (l'origine du magnétisme des aimants est elle-même liée à la présence de boucles microscopiques de courants au sein des aimants).



I.2.c) Ordres de grandeur

Source du champ magnétique	Intensité	Commentaires
Champ magnétique terrestre	5.10^{-5} T	Historiquement, ce champ était mesuré en gauss (1 G=10^{-4} T)
Champ à 5 cm d'un fil rectiligne infini parcouru par un courant de 1 A	4.10^{-6} T	Le champ créé par un circuit non bobiné est indétectable sans dispositif spécifique du fait du champ magnétique terrestre.
Champ au centre d'une spire circulaire de rayon 5 cm parcourue par un courant de 1 A	10^{-5} T	
Champ sur l'axe d'un solénoïde de longueur 10 cm, constitué de 1000 spires alimentés par un courant de 1 A.	10^{-2} T	L'intensité d'un courant dans un solénoïde peut difficilement dépasser 10 A en raison d'un effet Joule qui serait trop important.
Champ à la surface d'un aimant	0,1 à 1 T	Les aimants les plus puissants sont des alliages de Néodyne-Fer-Bore.
Champ au voisinage d'un électroaimant	1 à 10 T	électroaimant : bobinage de cuivre réalisé autour d'un matériau ferromagnétique. Les effets magnétiques des courants et du matériau se cumulent.
Appareil d'IRM à champ fort	7 T	Ces champs magnétiques intenses sont obtenus à l'aide d'électroaimants refroidis
Accélérateur de particules	8 T	
Champ au voisinage d'un électroaimant supraconducteur	$<$45 T	Refroidi à quelques kelvin, le courant circule dans l'électroaimant sans effet Joule.

I.3 Notion de carte de champ magnétique

I.3.a) Définition

- Les lignes de champ sont tangentes en chaque point au vecteur champ magnétique. Elles sont orientées par $\vec{B}$.
- Une carte de champ est un ensemble de ligne de champ.

I.3.b) Propriétés

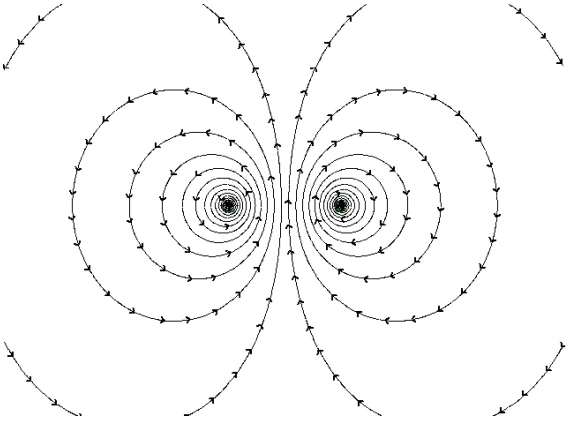
- Deux lignes de champ ne peuvent se croiser qu'en un point où le champ est nul.
- Les lignes de champ magnétique sont fermées et tournent autour des courants qui le créent.

- L'équation d'une ligne de champ se déduit de $\overrightarrow{B(M)} \wedge \overrightarrow{dOM} = \vec{0}$ ou $\overrightarrow{B(M)} = k(M)\overrightarrow{dOM}$ où $\overrightarrow{dOM}$ est une portion de ligne de champ.
- Deux lignes de champ voisines s'éloignent l'une de l'autre dans une zone où l'intensité du champ magnétique diminue.
- Le champ magnétique est uniforme dans toute zone où les lignes de champ sont parallèles.
- Les lignes de champ sortent par la face nord de l'aimant et rentre par la face sud.

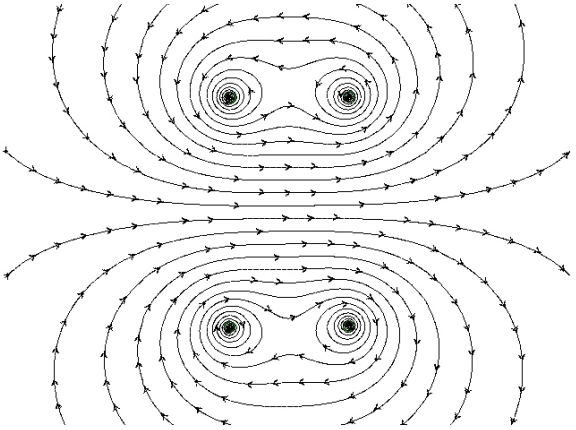
I.3.c) Quelques exemples

Les lignes de champ peuvent être obtenue expérimentalement (à partir de la limaille de fer) où numériquement en connaissant l'expression du champ magnétique en tout point de l'espace.

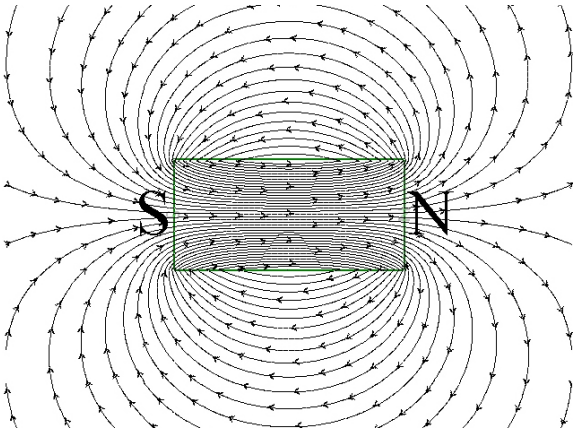
Spire



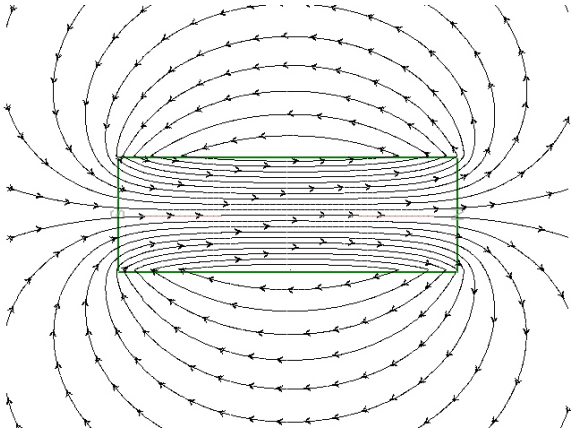
Bobine de Helmholtz



Aimant permanent



Solénoïde

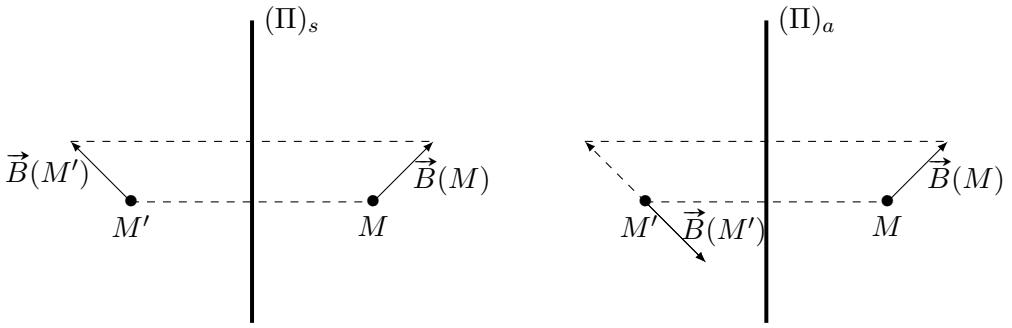


I.4 Lien entre propriétés de la distribution de courant et champ magnétique

I.4.a) Plan de symétrie et d'antisymétrie d'un champ

Définition :

- Un plan Π sera dit plan de symétrie d'un champ magnétique si, quel que soit M, le vecteur $\vec{B}(M')$ au point M' symétrique de M par rapport à Π est le symétrique de $\vec{B}(M)$.
- Un plan Π' sera dit plan d'antisymétrie pour $\vec{B}$ si, quel que soit M, le vecteur $\vec{B}(M')$ au point M' symétrique de M par rapport à Π est l'antisymétrique de $\vec{B}(M)$.



Par exemple sur la carte de champ relative au champ magnétique créé par une spire circulaire, on remarque que tous les plans contenant l'axe de la spire sont des plans de symétrie du champ magnétique et que le plan perpendiculaire à l'axe (Oz) contenant le point O $(z = 0)$ est un plan d'antisymétrie du champ magnétique.

I.4.b) Liens entre symétries du champ magnétique et les symétries de la distribution de courants qui le crée

On peut également définir des plans de symétries et d'antisymétries de la distribution de courant. Par exemple dans le cas de la spire, tous les plans contenant l'axe de la spire sont des plans d'antisymétrie de la distribution de courant, puisque pour un point M appartenant à la spire, le sens du courant au point M est opposé à celui au point M' symétrique de M par rapport au plan contenant l'axe.

Pour le solénoïde, tous les plans contenant l'axe du solénoïde sont des plans de symétrie de la distribution de courant. Les liens entre les propriétés de symétrie et d'antisymétrie de la distribution de courant et celles du champ magnétique sont présentés ci-dessous.

- Un plan de symétrie de la distribution de courant est un plan d'antisymétrie du champ magnétique. En un point M d'un plan de symétrie de la distribution de courant, le champ magnétique est perpendiculaire à ce plan.
- Un plan d'antisymétrie de la distribution de courant est un plan de symétrie du champ magnétique. En un point M d'un plan d'antisymétrie de la distribution de courant, le champ magnétique appartient à ce plan.

L'identification des plans de symétrie et d'antisymétrie d'une distribution de courants permet d'en déduire les conséquences sur le champ magnétique créé.

II Étude de quelques distributions de courants

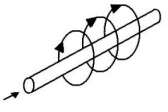
II.1 Fil rectiligne infini

II.1.a) Expression du champ magnétique

On considère un fil rectiligne parcouru par un courant I de grande longueur par rapport à la distance d'observation. L'expression du champ magnétique en un point de l'espace s'écrit : $\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}\vec{u_\theta}$.

La constante μ_0 est appelée perméabilité du vide et vaut dans le système d'unités internationales : : $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H.m^{-1}.

II.1.b) Carte de champ



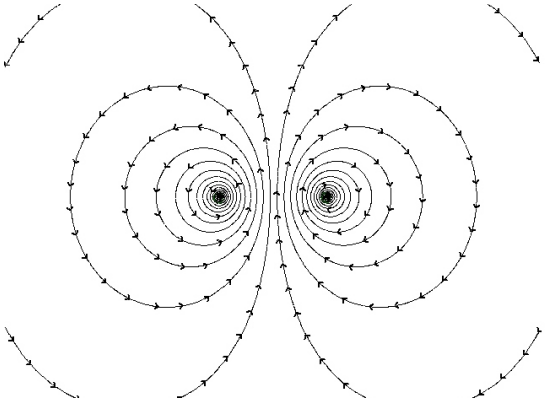
II.1.c) Description de la carte de champ

Le sens du champ magnétique est défini par la règle de la main droite : en fermant la main droite le pouce indique le sens du courant et les autres doigts indiquent le sens du champ magnétique.

II.2 Spire circulaire de courant / Bobine plate

On considère une spire circulaire parcourue par un courant I. Cette représentation permet également d'étudier une bobine plate constituée de N spires lorsque la distance sur laquelle est bobinée le fil est négligeable devant le rayon de la bobine.

II.2.a) Carte de champ



II.2.b) Description de la carte de champ

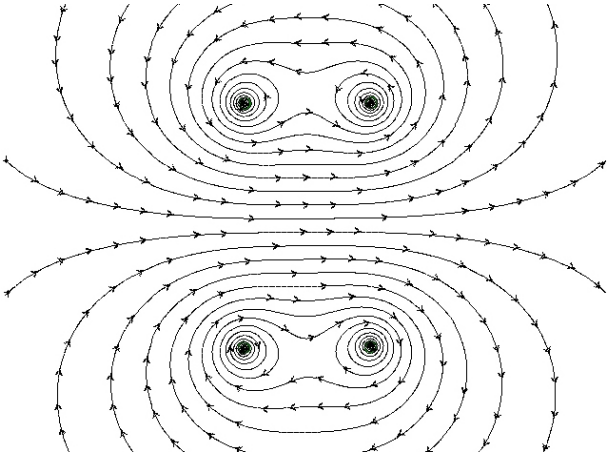
- Le sens du champ magnétique peut être donné par la règle de la main droite : On appose la main sur une spire le courant allant de la base à l'extrémité des doigts ; le sens du champ magnétique est alors donné par le pouce.
- On constate que les deux faces de la bobine jouent le même rôle que les pôles d'un aimant.

II.3 Bobines de Helmholtz

II.3.a) Description

On considère deux bobines circulaires plates identiques de rayon R alignées sur un même axe telle que la distance entre les deux bobines soit égale à R.

II.3.b) Carte de champ



II.3.c) Description de la carte de champ

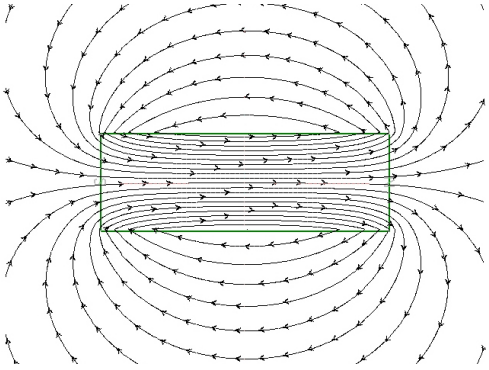
- Le champ magnétique est la somme des champs créés par les deux bobines.
- On constate que le champ créé par ses deux bobines est quasiment uniforme sur l'axe des bobines.

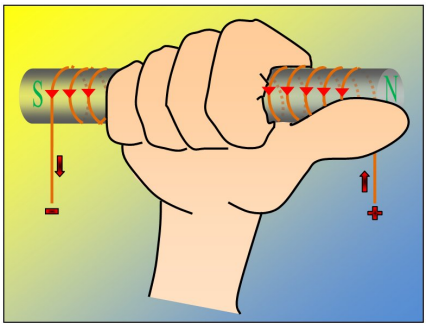
II.4 Bobine longue ou solénoïde

II.4.a) Description

Une bobine longue ou solénoïde est constituée de N spires jointives de rayon r, de même axe alignées sur une distance ℓ et parcourues par un courant I. On définit le nombre de spires par unités de longueurs n par $n = \frac{N}{\ell}$.

II.4.b) Carte de champ





II.4.c) Description de la carte de champ

- Le sens du champ magnétique est donné par la règle de la main droite : les doigts indiquent le sens du courant et le pouce indique le sens du champ magnétique.
- On retrouve la même carte de champ que celle d'un aimant permanent.
- On constante que le champ est uniforme à l'intérieur d'un solénoïde.
- L'expression du champ magnétique s'écrit $\boxed{\vec{B} = \mu_0 n I \vec{u_z}}$.
- Le champ magnétique est directement proportionnel à l'intensité du courant qui circule dans le solénoïde.

III Dipôle magnétique - Moment magnétique

La notion de dipôle magnétique permet d'établir des analogies entre les deux types de sources du champ magnétique : les circuits parcourues par des courants électrique, d'une part, et des pièces aimantées d'autre part.

III.1 Boucle de courant

III.1.a) Vecteur surface d'un circuit filiforme plan

Soit un circuit filiforme plan dont le contour délimite une aire S. On oriente ce circuit à partir du sens du courant. Le vecteur surface est définie comme $\vec{S} = S\vec{n}$, où $\vec{n}$ est le vecteur unitaire :

- orthogonal au plan contenant le circuit ;
- orienté par le sens d'orientation du courant et la règle de la main droite.

III.1.b) Moment magnétique

Soit un circuit filiforme de vecteur surface $\vec{S}$ parcouru par un courant d'intensité I. Le moment magnétique $\vec{m}$ du circuit est défini par $\vec{m} = I\vec{S}$.

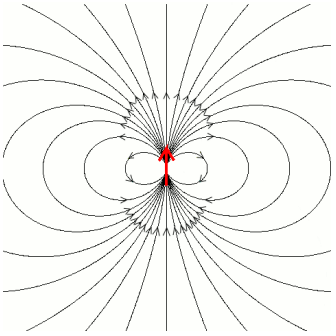
Par exemple dans le cas d'une spire circulaire de rayon a : $\vec{m} = I\pi a^2\vec{u_z}$

III.1.c) Bobine

Un enroulement de N spires jointives parcourues par un courant d'intensité i est équivalent à une spire parcourue par l'intensité Ni. Le moment magnétique de la bobine de N spires est $\vec{m} = NI\vec{S}$.

III.2 Approximation dipolaire

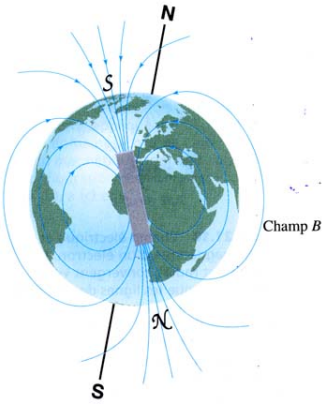
A des distances grandes devant la taille des sources de champ magnétique, la carte de champ magnétique est imposée essentiellement par le moment magnétique du circuit et non par le détail du circuit.



III.3 Moment magnétique d'un aimant

III.3.a) Moment magnétique d'un aimant droit

Puisqu'un aimant droit et un solénoïde génèrent des champs magnétiques de même géométries, on peut définir le moment magnétique d'un aimant droit comme le moment magnétique $\vec{m} = NI\vec{S}$ du solénoïde de même taille que l'aimant et qui produirait le même champ que l'aimant.

III.3.b) Quelques ordres de grandeur de moment magnétique

- Boussole : de l'ordre de 10 A.m^2
- Aimant permanent : 10^3 A.m^2
- Terre : 7,5.10^{22} A.m^2
- Magnéton de Bohr : $\mu_B = 9,27.10^{-24}$ A.m^2
- Magnéton nucléaire : $\mu_N = 5,05.10^{-27}$ A.m^2