

CHAPITRE 26

Champ magnétique

Le **magnétisme** est la branche de la physique qui a pour objet d'étude les propriétés des aimants et les phénomènes qui s'y rattachent. Le concept central en magnétisme et celui de **champ magnétique**, dont nous allons évoquer certaines propriétés.

Le nom commun magnétisme et l'adjectif magnétique tireraient leur nom de l'antique cité grecque de Magnésie (aujourd'hui Manisa en Turquie) près de laquelle on trouvait un minerai naturellement magnétique : la magnétite (Fe_3O_4). Les Chinois sont les premiers à mentionner l'utilisation de magnétite pour repérer le Nord, mais la paternité de l'invention de la boussole pour la géographie et la navigation est controversée.



En 1600, William Gilbert publie *De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure* (À propos du magnétisme et des corps magnétiques, et du Grand Aimant Terre). En s'appuyant sur des expériences, il propose d'assimiler la Terre à un aimant et justifie ainsi que la boussole indique le Nord.

L'expérience fondamentale qui a permis de mieux comprendre le magnétisme est celle de Hans Christian Ørsted, physicien Danois, en 1820 : il met en évidence que l'aiguille d'une boussole est déviée par la présence d'un courant électrique circulant à proximité, donc que celui-ci agit comme un aimant.

Les quelques décennies suivantes ont permis de bâtir une théorie englobant à la fois l'**électricité** et le **magnétisme** : l'**électromagnétisme**, sous l'impulsion notamment de Faraday et Maxwell (voir programme de TSI2).



FIGURE 1 – De gauche à droite : William Gilbert(1544-1603), André-Marie Ampère (1775-1836), Hans Christian Ørsted (1777-1851), Nikola Tesla (1856-1943)

Ce chapitre a pour but d'introduire la notion de champ magnétique, dans le cas particulier du **régime stationnaire** (on parle alors de champ **magnétostatique**). Un tel champ est produit par un courant stationnaire ou un aimant permanent.

1 Notion de champ magnétique

1.1 Sources de champ magnétique

Expérimentalement, on constate l'existence d'interactions à distance entre des aimants, un aimant et un matériau magnétique, et/ou entre des charges électriques en mouvement les unes par rapport aux autres (interactions aimant/aimant, aimant/matériau aimanté, courant/courant, aimant/courant).

Par exemple, un aimant attire un autre aimant ou dévie la trajectoire d'une bille ayant des propriétés magnétiques ; un circuit électrique ou un aimant dévie un faisceau d'électrons qui passe à proximité.

Pour caractériser ces **interactions magnétiques** (qui ne sont ni de nature gravitationnelle, ni électrostatique), on introduit la notion de **champ magnétique**, par analogie avec un **champ de gravitation** ou un **champ électrique** :

▷ une source de champ magnétique (charge électrique en mouvement ou aimant par exemple) modifie les propriétés de l'espace, en créant un champ magnétique en tout point de ce dernier ;

▷ une autre charge en mouvement ou un autre aimant qui baigne dans ce champ magnétique subit une action mécanique qui dépend du champ magnétique local.

Le champ magnétique, noté \vec{B} , est un **champ vectoriel** qui permet de caractériser les effets magnétiques. Sa norme, qu'on appelle intensité ou valeur du champ magnétique, a pour unité le **tesla** (T). Elle se mesure avec un **teslamètre**. Un teslamètre (ou magnétomètre) à sonde de Hall peut mesurer chacune des trois composantes du champ vectoriel séparément.



FIGURE 2 – Photographie d'un teslamètre

Les valeurs de champ mesurées s'étalent sur plusieurs ordres de grandeur. Un champ d'intensité $B = 1\text{T}$ est très intense.

Situation	Champ magnétique (en T)
Champ magnétique terrestre (à la surface de la Terre, en France)	$5 \cdot 10^{-5}$
Courants dans les circuits	10^{-4} à 10^{-1}
Aimants usuels et électroaimants	0,1 à 2
Électroaimants et bobines supraconductrices dans un appareil d'IRM	5

On retiendra que les sources de champ magnétique sont les courants électriques et les matériaux magnétiques (en particulier les aimants). Les charges électriques sont

sensibles au champ magnétique, à l'échelle macroscopique les matériaux qui y sont sensibles sont qualifiés de matériaux magnétiques.

1.2 Cartes de champ magnétique

1.2.1 Mise en évidence expérimentale

L'aiguille d'une boussole s'aligne avec la composante horizontale du champ magnétique au niveau de son axe de rotation. En l'absence de source de champ à proximité de la boussole, c'est le champ magnétique terrestre qui prédomine et oriente l'aiguille.

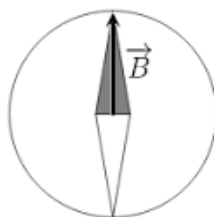


FIGURE 3 – Aiguille d'une boussole vue du dessus et direction de la composante horizontale du champ magnétique local

Cette constatation permet une visualisation approximative du champ magnétique \vec{B} qui règne dans une zone de l'espace : on saupoudre de la limaille de fer sur une plaque de verre (ou de plexiglas). Les grains de limaille de fer s'aimantent et se comportent comme autant d'aiguilles de minuscules boussoles : ils s'alignent, en chaque point, parallèlement au champ magnétique qui y règne. La géométrie particulière formée par ces petits aimants est un **spectre magnétique**.

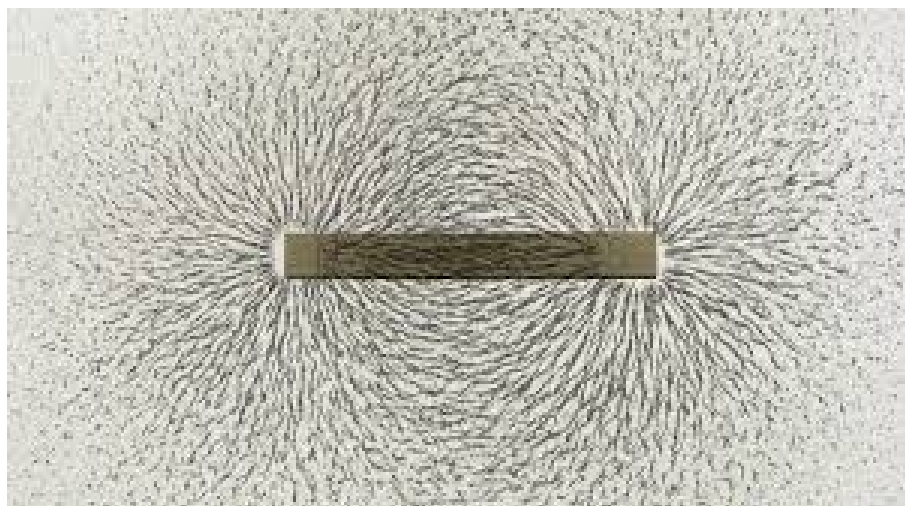
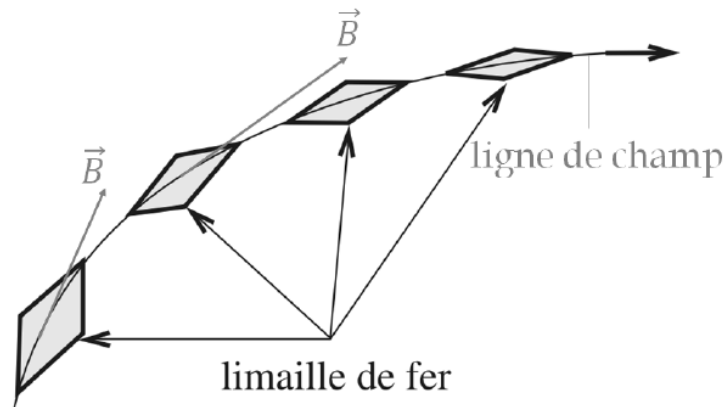


FIGURE 4 – Effet d'un aimant droit sur de la limaille de fer

On appelle **ligne de champ** une courbe telle que le champ magnétique est tangent à cette courbe en chacun de ses points.



La limaille de fer permet de matérialiser approximativement certaines lignes de champ, mais le sens du champ magnétique n'est pas accessible par cette méthode.

1.2.2 Exemples de cartes de champ magnétique

Une **carte de champ magnétique** représente à un instant donné quelques lignes de champ magnétique dans une zone d'espace délimitée. Ces lignes de champ sont éventuellement fléchées afin de conserver l'information sur le sens du champ local.

On donne ci-dessous des exemples de cartes de champ planes associées aux sources de champ statique les plus classiques.

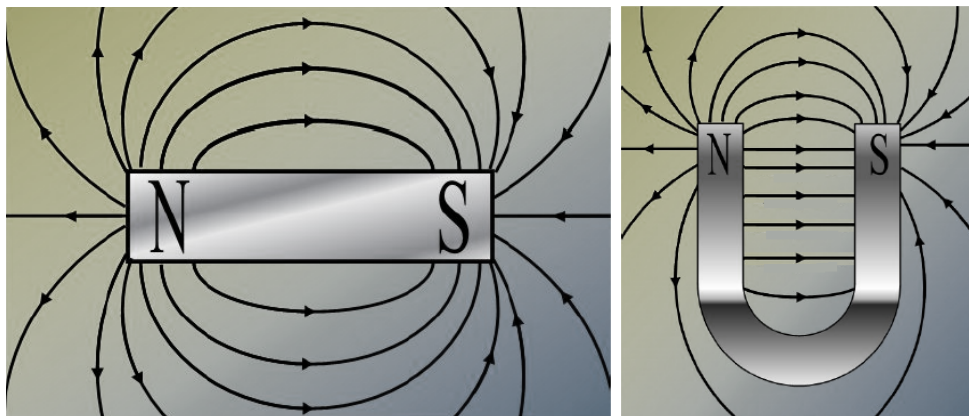


FIGURE 5 – Gauche : carte de champ d'un aimant droit. Droite : carte de champ d'un aimant en U. N désigne le pôle Nord, S le pôle Sud de l'aimant.

On peut aussi décider de faire apparaître sur une carte de champ quelques vecteurs champ magnétique en différents points de l'espace, figurés par des flèches donnant la direction, le sens et l'intensité de ce champ.

Par exemple, si la source de champ magnétique est un fil rectiligne parcouru par un courant d'intensité constante, cela permet de voir que l'intensité du champ magnétique décroît lorsqu'on s'éloigne de l'axe du fil.

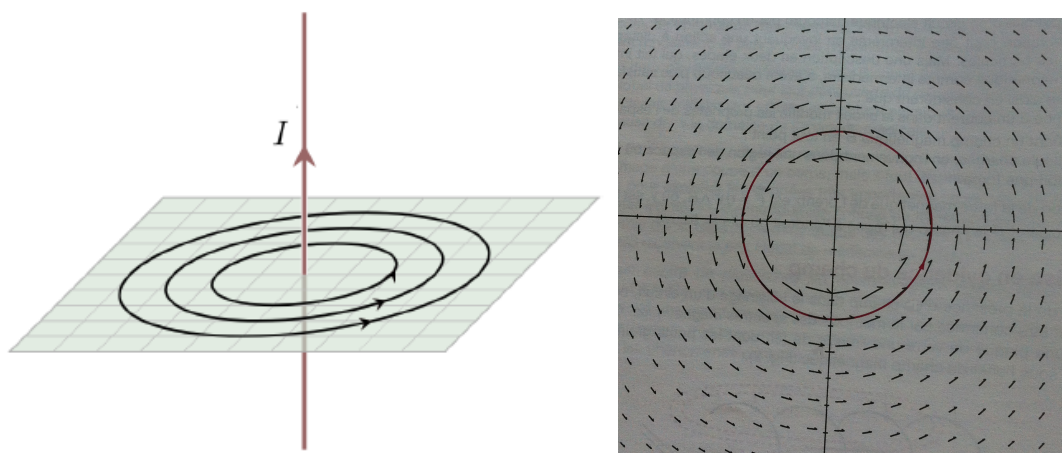


FIGURE 6 – Gauche : Carte de champ d'un fil rectiligne infini parcouru par un courant continu, dans le plan perpendiculaire à l'axe du fil. Droite : représentation de vecteurs champ magnétique sur la carte de champ vue de dessus

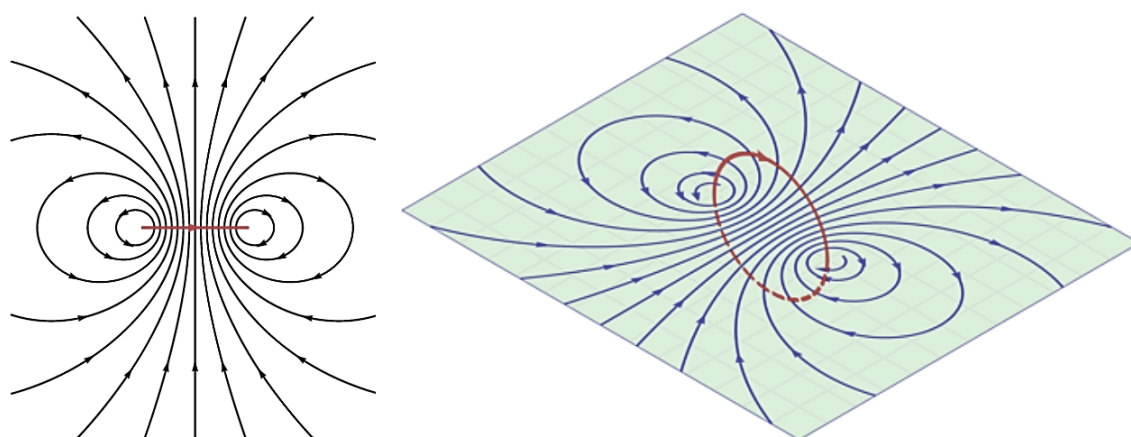


FIGURE 7 – Carte de champ d'une boucle de courant circulaire (spire) vue de dessus (gauche) et de biais (droite)

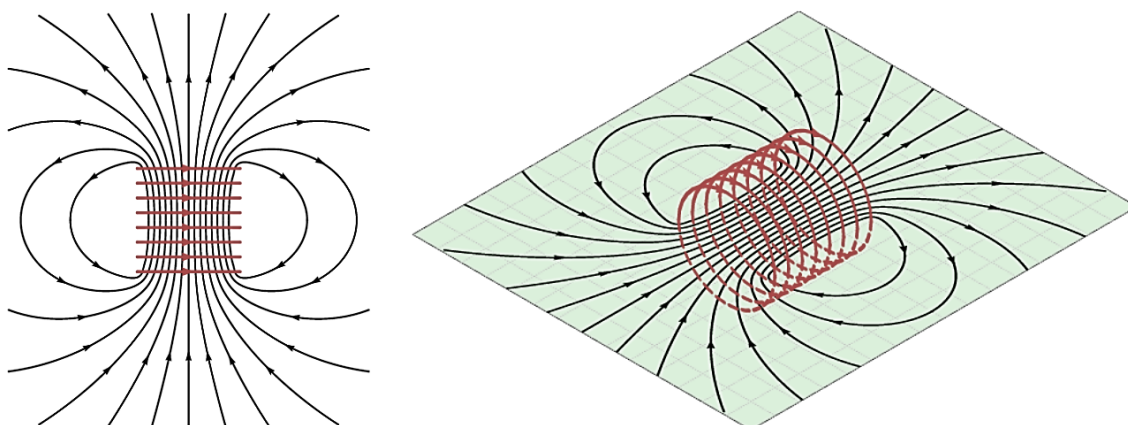


FIGURE 8 – Carte de champ d'un solénoïde à spires non jointives, parcourues par un courant de même intensité

Sur la carte de champ d'une **spire** (boucle de courant circulaire) parcourue par un courant d'intensité constante, on constate que les lignes de champ sont quasiment circulaires au voisinage immédiat de la spire. On peut l'interpréter ainsi : la spire qui ressemble localement à un fil rectiligne, dont les lignes de champ sont circulaires.

La carte du champ magnétique créé par un **solénoïde**, constitué de nombreuses spires enroulées dans une géométrie cylindrique, partage nécessairement certaines caractéristiques de la carte du champ créé par une seule spire. Le champ est canalisé à l'intérieur de cette **bobine** longue.

1.2.3 Sens du vecteur champ magnétique

Dans le cas d'un aimant, par définition les lignes de champ magnétique divergent à partir d'un pôle Nord magnétique (N) et convergent vers un pôle Sud magnétique (S).

À grande distance d'une spire, les lignes de champ rappellent celles d'un aimant droit. Cela permet de définir par analogie des faces magnétiques Nord et Sud pour une spire ou un solénoïde parcourus par un courant continu : le champ magnétique **sort** de la face **Nord**.

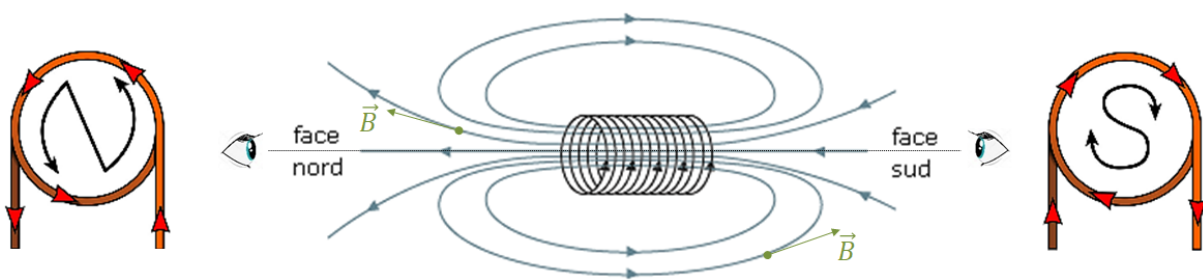


FIGURE 9 – Face Nord et Sud d'un solénoïde

Dans le cas de circuits parcourus par un courant, lorsque les lignes de champ magnétique sont connues, le sens du courant se déduit par la **règle de la main droite** : en plaçant la main droite de façon à suivre la ligne de champ orientée, de la paume de la main jusqu'au bout des doigts, le pouce tendu donne le sens du courant. Réciproquement, si on attrape avec sa main droite un fil électrique en mettant le pouce dans la direction du courant, les autres doigts s'enroulent dans le sens du champ magnétique.

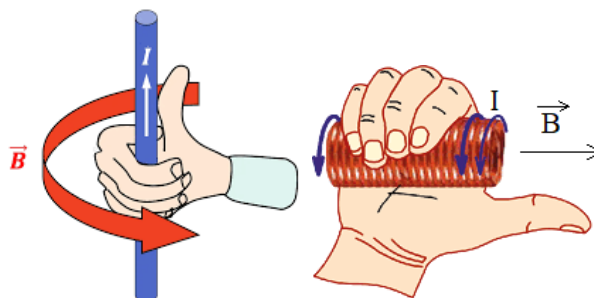
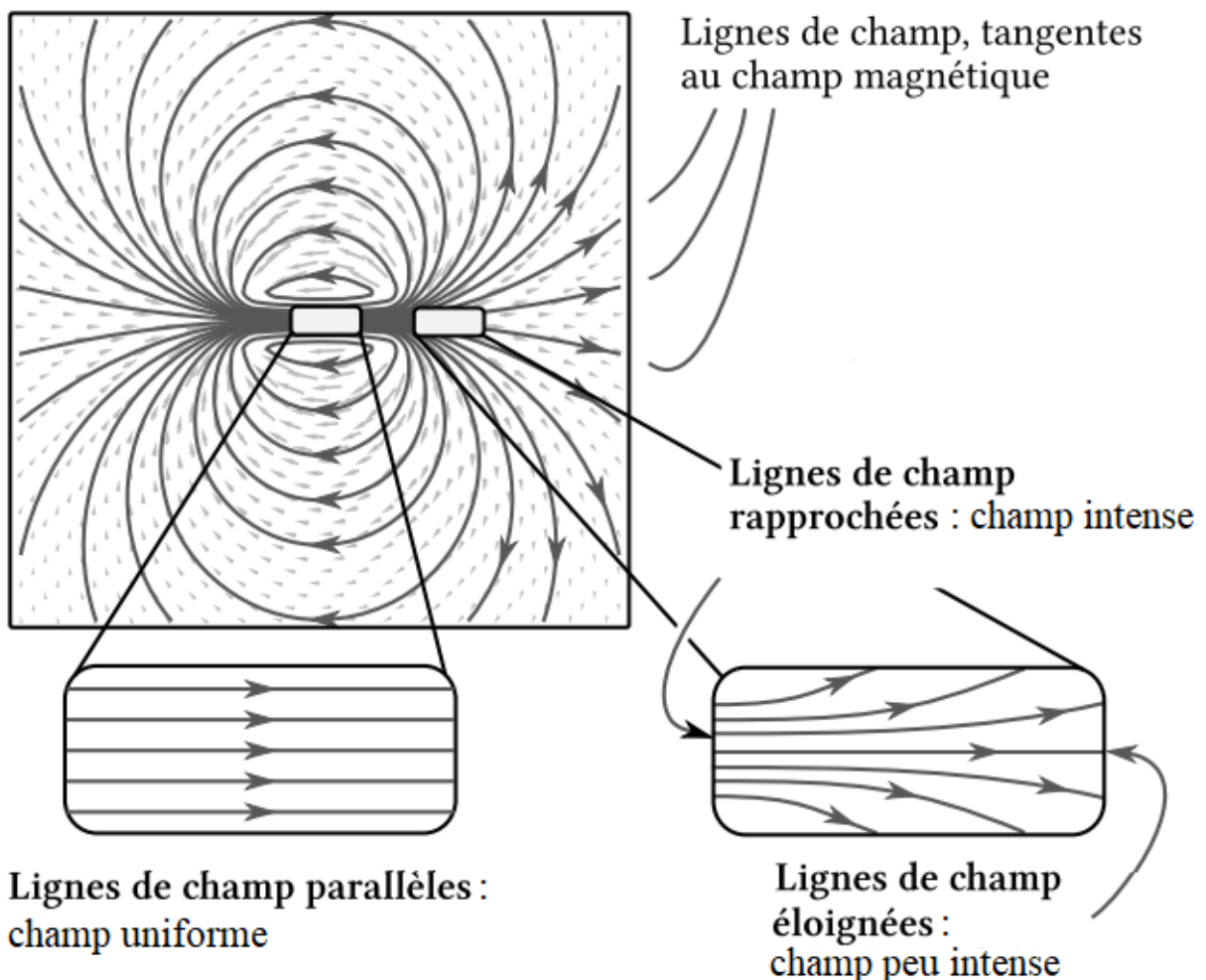


FIGURE 10 – Illustrations de la règle de la main droite

1.2.4 Propriétés des cartes de champ

Outre le sens du champ qui est déduit de la règle de la main droite ou de la donnée des pôles magnétiques, l'analyse des cartes de champ permet de dégager des propriétés générales, dont nous admettrons la validité.

- ▷ Les lignes de champ magnétique sont des courbes fermées qui enlacent les fils parcourus par des courants. Réciproquement, une ligne de courant enlace un champ.
- ▷ Le champ est d'autant plus intense que les lignes de champ s'approchent les unes des autres. En corollaire, une zone de champ uniforme se traduit par des lignes de champ parallèles les unes aux autres.



▷ Enfin, en règle générale, plusieurs plans de représentation sont nécessaires pour visualiser les propriétés du champ. Dans le cas du fil rectiligne infini, l'**invariance de la distribution de courant par translation** selon l'axe du fil permet d'affirmer que les propriétés du champ magnétique obtenues dans un plan qui lui est perpendiculaire sont valables dans tout plan parallèle à ce dernier.

On retiendra cette propriété très générale : les invariances de la **distribution de courant** se retrouvent dans le champ magnétique.

1.3 Explication microscopique du magnétisme (H.P.)

À l'échelle macroscopique, les courants formant des boucles ont une carte de champ sensiblement identique à un aimant droit, et ce d'autant plus qu'on se place à grande distance de la source. Cette similitude entre les cartes de champ d'un aimant droit et d'une spire est la clé pour proposer une explication à l'origine du magnétisme. En théorie classique du magnétisme, les boucles de courant sont en fait plus fondamentales que les aimants.

Toute la matière est constituée d'atomes. Le noyau est entouré d'électrons. Dans le modèle classique de l'atome, les électrons tournent autour du noyau. Leurs trajectoires forment des boucles de courant, qui dotent l'atome d'un petit champ magnétique. À cause de l'agitation thermique, les champs magnétiques des différents atomes d'un matériau ont des directions aléatoires, ce qui rend les matériaux non magnétiques en général car la résultante des champs magnétiques générés est (quasi-)nulle. Néanmoins, si les interactions magnétiques entre atomes sont ou deviennent plus fortes que l'agitation thermique, les champs générés ont tendance à s'aligner, leur résultante peut prendre une valeur élevée, et le matériau a alors des propriétés magnétiques.

En 1895, Pierre Curie montre qu'un aimant chauffé perd son aimantation à partir d'une certaine température, mais qu'on peut le réaimanter en le plaçant dans un solénoïde alimenté par un courant électrique, ce qui semble corroborer la théorie exposée qualitativement ci-dessus.

Néanmoins, pour décrire le magnétisme des aimants correctement et quantitativement, il est nécessaire d'utiliser la théorie quantique, qui s'applique à l'échelle microscopique. Dans ce cadre, c'est la notion de spin quantique qui joue le rôle d'aimant à l'échelle microscopique et qui s'avère plus fondamentale que les boucles de courant.

1.4 Propriétés du champ magnétique

1.4.1 Lien entre sens du champ magnétique et sens du courant

Comme évoqué plus haut, lorsque la source d'un champ magnétique est une distribution de courant, la direction du champ magnétique et son sens découlent de celui du courant, en suivant la règle de la main droite.

1.4.2 Intensité du champ magnétique, principe de superposition

La présence de courants électriques crée un champ magnétique en tout point de l'espace vide. La relation entre le champ et l'intensité du courant fait intervenir les propriétés de l'espace, c'est-à-dire les caractéristiques du vide, qui est un milieu linéaire. De ce fait, il y a proportionnalité entre le champ magnétique et l'intensité du courant qui le crée. Cette propriété reste vraie dans l'air en excellente approximation.

L'avantage d'utiliser des boucles de courant en tant que source plutôt que des aimants droits est qu'on peut faire varier l'intensité du champ magnétique en faisant varier le courant électrique, du fait de la proportionnalité entre B et I :

$$B \propto I.$$

C'est sur cette relation que repose le fonctionnement de l'électroaimant, utilisé dans les portes d'entrée des résidences, ou dans les décharges pour soulever de grandes

masses métalliques et les lâcher à la demande.

Pour obtenir un champ plus intense, on peut augmenter l'intensité du courant qui parcourt un fil, ou enrouler ce fil plusieurs fois pour obtenir une bobine. Les champs magnétiques produits par les spires s'additionnent, donc le champ d'une bobine plate est le même que celui d'une spire, à un facteur multiplicatif près égal au nombre d'enroulements.

Le **principe de superposition**, qui découle de la linéarité du milieu, décrit le caractère additif du champ magnétique :

$$\vec{B}_{\text{total}} = \sum_i \vec{B}_i.$$

1.4.3 Expressions de quelques champs magnétiques

Le champ magnétique créé par un fil rectiligne infini parcouru par un courant d'intensité I est orthoradial. En coordonnées cylindriques en prenant pour axe (Oz) celui du cylindre, le champ magnétique à une distance r de l'axe a pour expression :

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

avec $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$ la **perméabilité magnétique du vide**.

À l'intérieur d'un solénoïde infini d'axe (Oz), comportant n spires identiques par unité de longueur, parcourues par un courant d'intensité I , le champ magnétique est :

$$\vec{B}_{\text{int}} = \mu_0 n I \vec{u}_z,$$

Le champ magnétique créé par ce solénoïde est nul à l'extérieur de ce dernier :

$$\vec{B}_{\text{ext}} = \vec{0}.$$

1.4.4 Obtention d'un champ quasi-uniforme

Outre le fait d'obtenir des champs magnétiques intenses, on aimerait pouvoir obtenir des champs magnétiques uniformes dans une zone de l'espace, par exemple pour étudier le mouvement de particules chargées dans un accélérateur de particules, qui est beaucoup plus simple à analyser dans une telle configuration.

Sur une carte de champ, l'uniformité du champ se traduit par des lignes de champ parallèles les unes aux autres. Nous avons déjà vu deux exemples de dispositifs où un champ quasi-uniforme peut être obtenu :

- ▷ un solénoïde long, à l'intérieur duquel le champ est quasi-uniforme dans une zone proche du centre ;
- ▷ un aimant en U, à condition de se placer dans son **entrefer**.

Un autre dispositif possible est celui des **bobines de Helmholtz**, formées de deux bobines (quasi-)plates de même rayon R et coaxiales, dans la configuration où elles sont espacées d'une distance $d = R$. Le champ est quasi-uniforme au voisinage du centre de la zone comprise entre les deux bobines.

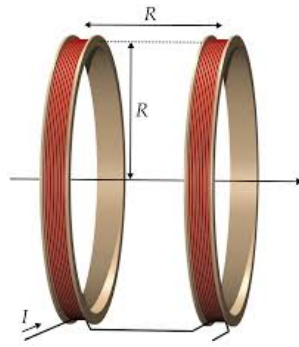


FIGURE 11 – Bobines de Helmholtz dans la configuration où elles créent un champ quasi-uniforme sur l'axe au voisinage du milieu des deux bobines

2 Notion de moment magnétique

2.1 Moment magnétique d'une spire

De nombreuses sources naturelles ou artificielles de champ magnétique présentent un spectre analogue à grande distance (par rapport à la taille de la source), on les qualifie de **dipôles magnétiques**.

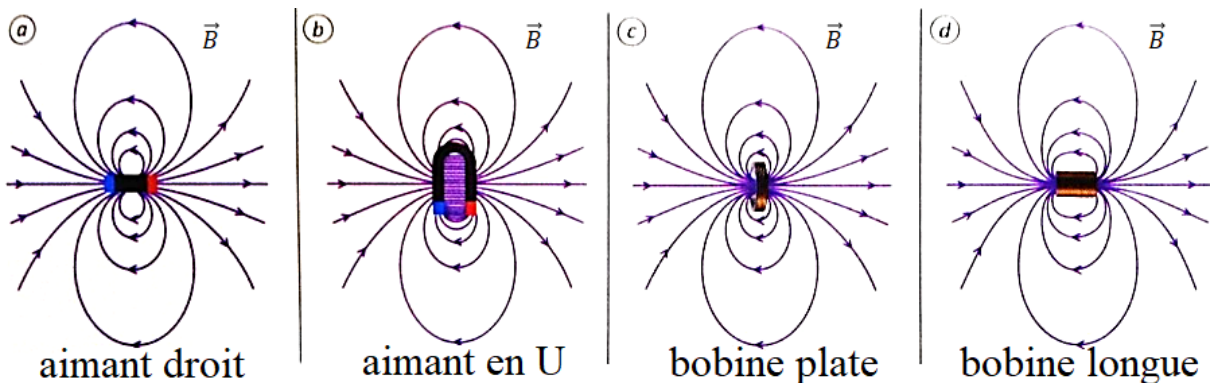


FIGURE 12 – Exemples de dipôles magnétiques

L'exemple paradigmatique de dipôle magnétique est la **boucle de courant**. L'expression du champ créé sur l'axe (Oz) d'une spire circulaire à grande distance de son centre est donnée par :

$$B(z) \simeq \frac{\mu_0 I R^2}{2|z|^3},$$

qui est proportionnel à la surface $S = \pi R^2$ de cette spire, et donc au produit IS .

Par définition, une boucle de courant plane, de surface S , parcourue par un courant d'intensité I possède un **moment magnétique** (ou moment dipolaire magnétique)

$$\vec{m} = I\vec{S} = IS\vec{n},$$

avec \vec{n} un vecteur unitaire normal à la surface, orienté selon la règle de la main droite.

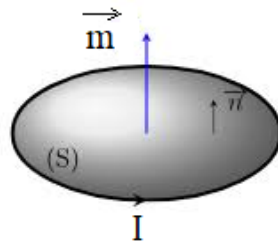


FIGURE 13 – Figure permettant de définir le moment magnétique d’une spire

De cette définition découlent quelques propriétés :

- ▷ L’unité du moment magnétique est l’ampère-mètre carré ($A \cdot m^2$).
- ▷ Le moment magnétique est toujours dirigé du pôle magnétique Sud vers le pôle magnétique Nord. En effet, si $I > 0$, alors la face supérieure de la boucle de courant est la face magnétique Nord (et l’autre face la face magnétique Sud).
- ▷ Le moment magnétique est une grandeur additive.

2.2 Moment magnétique d’un aimant

Comme à grande distance d’observation la carte de champ d’un aimant est identique à celle d’une boucle de courant plane, par analogie un aimant possède un moment magnétique \vec{m} orienté du pôle magnétique Sud vers le pôle magnétique Nord, bien que \vec{m} ne s’écrive pas en fonction d’une surface et d’un courant.

Il est bon d’avoir en tête quelques ordres de grandeur :

- ▷ Les atomes possèdent un moment magnétique de l’ordre de $10^{-23} A \cdot m^2$.
- ▷ Un aimant Néodyme-Fer-Bore possède un moment magnétique m_{aimant} typiquement compris entre $0,1 A \cdot m^2$ et $10 A \cdot m^2$.
- ▷ Du point de vue du magnétisme, la planète Terre se comporte comme un dipôle magnétique qui serait situé en son centre, de moment magnétique $m_{\text{Terre}} = 10^{23} A \cdot m^2$.

