

Le champ magnétique

26

De la relativité générale à la physique quantique, en passant par les moteurs électriques, la physique moderne travaille sur des champs. Ils sont omniprésents. Ce chapitre en introduit un, le champ magnétique, qui permet de comprendre certains principes de fonctionnement des appareils de haute technologie actuelle.

1 Carte de champ

1.1 Les champs en physique

Un **champ** est une grandeur physique qui dépend de la position et du temps.

Par exemple, à la surface du globe, on définit le champ de température : en tout point M , $T(M,t)$ est la température à la date t . On définit aussi le champ de pression $P(M,t)$. Ces deux champs sont des champs scalaires, car la température et la pression sont des scalaires, c'est-à-dire qu'ils ne sont définis que par un unique nombre.

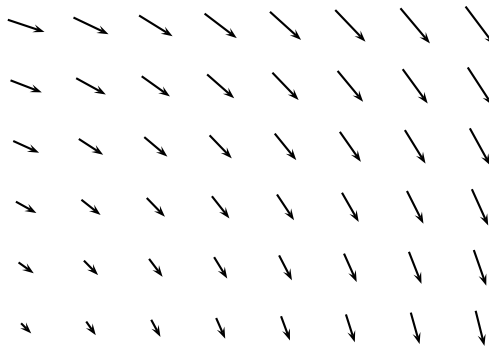


Figure 26.1 – Exemple de champ vectoriel

Un champ vectoriel est, quant à lui, défini par trois nombres, les coordonnées d'un vecteur dans un espace à trois dimensions. Toujours dans le cas météorologique, on définit le champ des vitesses $\vec{v}(M,t)$, qui représente la vitesse de l'atmosphère au point M , à la date t . On

représente graphiquement ce champ vectoriel en traçant, en de nombreux points de l'espace, le vecteur vitesse des particules.

On passe aux **lignes de champ** en traçant les courbes qui sont en tout point tangentes aux vecteurs. Si une ligne de champ montre bien la direction que prend le champ dans l'espace, l'information relative à la norme du vecteur semble perdue. Toutefois, on peut prendre la convention que plus la norme est importante, plus on dessine des lignes de champ serrées, convention qui est appliquée sur la figure 26.2 pour le champ de la figure 26.1.

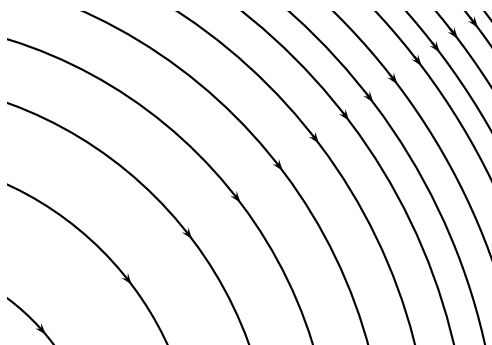


Figure 26.2 – Exemple de lignes de champ vectoriel.

1.2 Un champ vectoriel permet de décrire une interaction à distance

Lorsqu'on approche un aimant d'une pièce de 1, 2 ou 5 centimes d'euro, la pièce est attirée par l'aimant. Mais comment? Il n'y a rien qui relie les deux objets, aucun fil visible. On utilise le concept de champ pour interpréter cette action à distance : l'aimant crée un **champ magnétique** en tout point de l'espace autour de lui et c'est ce champ qui a une influence sur la pièce métallique.

On interprète de la même l'attraction gravitationnelle avec un champ gravitationnel (par exemple, le Soleil crée dans tout le système solaire un champ gravitationnel qui agit sur les planètes) ou l'interaction électrostatique de deux corps électrisés avec la notion de champ électrique. Dans ces théories les champs (électrique, magnétique, de gravitation) sont les intermédiaires qui transmettent les actions mécaniquement observables. Ils contiennent une certaine énergie, fournie à l'objet qui se met en mouvement. Le calcul de cette énergie relève du programme des classes de seconde année.

1.3 Unités et ordres de grandeur

Quelle est la dimension du champ magnétique? Raisonnons sur des équations aux unités, avec l'expression de la force magnétique et le lien entre l'intensité du courant et la charge :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{f} = q \vec{v} \wedge \vec{B} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \\ i = \frac{dQ}{dt} \end{array} \right. \quad \text{donc} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{N} = \text{C.m.s}^{-1} [B] = \text{kg.m.s}^{-2} \\ \text{A} = \text{C.s}^{-1} \end{array} \right.$$

Au final, l'unité du champ magnétique est le $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-1}$, qu'on nomme usuellement **Tesla**¹, symbolisé par un T majuscule.

L'unité du champ magnétique est le **Tesla**, de symbole T.

Les champs magnétiques existent tout autour de nous, mais leur valeur dépend de leur utilisation et de leur source.

	ordre de grandeur (en T)
champ terrestre	$4,7\cdot 10^{-5}$
aimant usuel	0,1 à 1
appareil d'IRM	3

1.4 Topographie du champ magnétique

La topographie du champ magnétique est l'étude de ses lignes de champ. On admettra ici deux propriétés importantes qui sont illustrées par les exemples qui suivent et qui seront justifiées dans le cours de deuxième année.

a) Première propriété

Un manière de créer un champ magnétique est de faire passer un courant, continu ou variable, dans un circuit. Le champ magnétique a des lignes de champ fermées qui tournent autour des fils parcourus par du courant, toujours dans le même sens par rapport sens du courant dans les fils.

Les lignes de champ du champ magnétique sont, dans la plupart des cas, des courbes fermées qui entourent les fils dans lesquels le courant électrique qui crée le champ passe. L'orientation de la ligne de champ et le sens du courant dans les fils sont liés par la **règle de la main droite** : si l'on met la main droite le long de la ligne de champ orientée de la base des doigts vers le bout des doigts, le pouce donne le sens du courant.

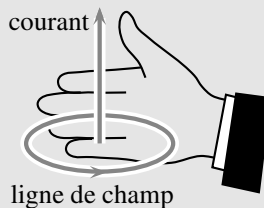


Figure 26.3 – Règle de la main droite.

Cette propriété permet de savoir immédiatement, à l'observation d'une carte des lignes de champ magnétique, en quel lieu il y a un courant qui passe et dans quel sens ce courant est.

1. En l'honneur de Nikola Tesla, 1856 – 1943, ingénieur serbe naturalisé américain, dont les travaux portèrent sur l'électromagnétisme et ses applications.

b) Deuxième propriété

Dans une carte de champ magnétique, si l'on se déplace le long d'une ligne de champ, l'évolution de l'écartement de cette ligne avec les lignes de champ voisines est liée à l'évolution de la norme du champ magnétique. Si la norme du champ magnétique augmente, les lignes de champ voisines se rapprochent et inversement, si la norme du champ magnétique diminue, elles s'écartent. Ainsi, le champ magnétique est le plus intense, là où les lignes de champ sont les plus serrées.

Sur une carte de ligne de champ magnétique, le champ magnétique est le plus intense là où les lignes de champ se resserrent.

1.5 Quelques cartes de champ magnétique

Les champ magnétiques pris pour exemples dans ce paragraphe sont créés par un courant électrique qui circule ou bien un aimant.

a) Spire circulaire de courant

On examine les lignes de champ créé par le circuit le plus simple : une spire circulaire, parcourue par un courant d'intensité constante, dû à un générateur non représenté.

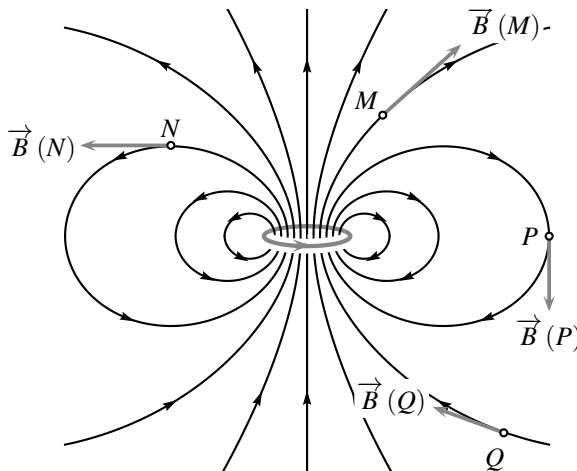


Figure 26.4 – Lignes de champ magnétique (en noir) d'une spire circulaire (en gris) parcourue par un courant dans le sens de la flèche.

On observe que le champ magnétique n'est pas uniforme en tout point de l'espace, les lignes de champ sont resserrées sur la surface de la spire : c'est là que la norme du champ est la plus importante.

D'autre part, on constate que les lignes de champ s'enroulent autour du courant et sont orientées selon la règle de la main droite donnée ci-dessus.

On observe de plus que le champ traverse la spire en respectant une autre **règle de la main droite** :

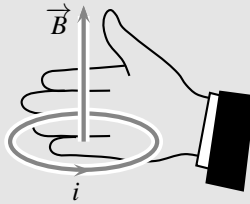


Figure 26.5 – Règle de la main droite.

Si on appose la main sur la spire avec les doigts qui épousent la courbe, le courant allant de la base vers le bout des doigts, le pouce indique alors le sens du vecteur champ magnétique.

Cette propriété est générale et elle permet d'orienter systématiquement le champ magnétique par rapport au courant qui le crée.

D'autre part, la mesure de la norme du champ magnétique en un point pour différentes valeurs de l'intensité i permet d'établir que :

La norme du champ magnétique est proportionnelle à l'intensité du courant qui traverse la spire.

b) Bobine longue

Une bobine est constituée de N de spires jointives, de rayon r , de même axe, alignées sur une distance ℓ , toutes parcourues par le même courant d'intensité i . On définit le nombre de spires par unité de longueur n par : $n = \frac{N}{\ell}$.

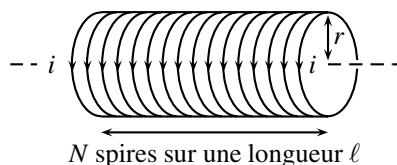


Figure 26.6 – Bobine (chaque spire est parcourue par le même courant).

Les lignes de champ magnétique, créé par la bobine, sont représentées sur la figure 26.7. Elles vérifient la règle de la main droite quant à leur orientation par rapport aux spires de la bobine.

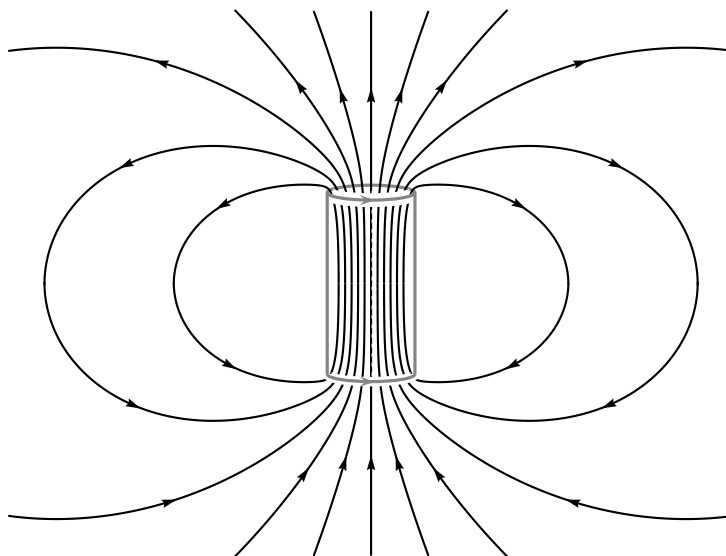


Figure 26.7 – Lignes de champ magnétique, en noir, d'une bobine, en gris (seules les spires extrêmes sont représentées, afin de voir les lignes de champ dans la bobine).

On observe que le champ magnétique est quasi-uniforme à l'intérieur de la bobine. En effet, les lignes de champ restent parallèles, sans se resserrer ni s'éloigner.

À l'intérieur d'une bobine longue, le champ magnétique est quasiment uniforme, parallèle à l'axe de la bobine et sa direction est reliée au sens du courant par la règle de la main droite. Sa norme est donnée par :

$$B = \mu_0 n i,$$

où n est le nombre de spires par unité de longueur et $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$ la perméabilité du vide.

Par exemple, pour une bobine formée de $N = 1000$ spires sur une longueur $\ell = 10 \text{ cm}$, parcourue par un courant d'intensité $i = 0,5 \text{ A}$, la norme du champ magnétique intérieur est :

$$B = 4\pi \cdot 10^{-7} \times \frac{1000}{10 \cdot 10^{-2}} \times 0,5 = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ T}.$$

Une bobine longue est aussi nommée **solénoïde**, du grec $\sigma\omega\lambda\eta\nu$, *solen*, qui signifie tuyau.

Effets de bords (PTSI) Il faut noter toutefois, que la zone où la norme du champ magnétique est uniforme ne couvre pas l'intégralité de la bobine. Elle n'est valable que loin des bords, là où la courbure des lignes de champ reste imperceptible.

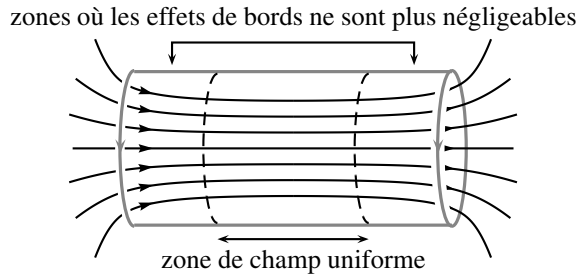


Figure 26.8 – Zoom des lignes de champ magnétique, en noir, d'une bobine, en gris.

On parle d'**effet de bord** pour nommer le phénomène où les lignes de champ s'évasent à proximité des bords de la bobine. On conçoit que plus la bobine est longue, par rapport à son rayon, plus la zone touchée par les effets de bord est étroite. Cet effet est visible sur la figure 26.9, où est tracé la norme du champ magnétique, sur l'axe de la bobine, pour des bobines de plus en plus longues par rapport à leur rayon. Le nombre n de spires par unité de longueur, le rayon r , ainsi que l'intensité i du courant, sont identiques dans chaque bobine ; seule la longueur ℓ varie. $B(x)$ est la norme du champ magnétique à l'abscisse x , repérée par rapport au centre de la bobine.

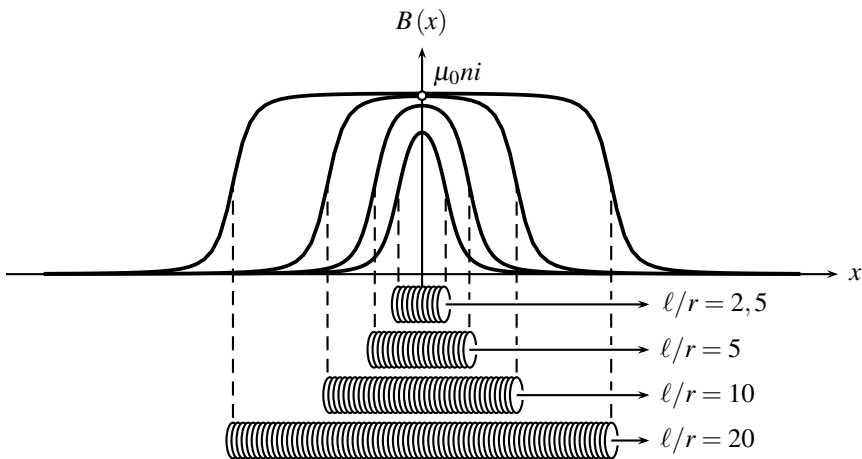


Figure 26.9 – Norme du champ magnétique sur l'axe de diverses bobines : effets de bord.

Pour les deux bobines les plus longues, $\ell/R = 10$ ou 20 , la norme du champ magnétique vaut $\mu_0 n i$ presque partout, sauf proche des bords. Mais pour les deux bobines les plus courtes, $\ell/R = 2,5$ ou 5 , la norme du champ est inférieure à $\mu_0 n i$; la zone où les effets de bord ne sont pas négligeables occupe l'intégralité de la bobine.

Remarque

Le lecteur pourra voir, dans la suite de ses études, que la norme du champ magnétique sur l'axe, avec les notations de ce paragraphe, est donnée par la formule :

$$B(x) = \frac{\mu_0 ni}{2} \left(\frac{x + \frac{\ell}{2}}{\sqrt{r^2 + (x + \frac{\ell}{2})^2}} - \frac{x - \frac{\ell}{2}}{\sqrt{r^2 + (x - \frac{\ell}{2})^2}} \right).$$

Finalement, on observe sur le graphe de la figure 26.9 que la norme du champ magnétique sur l'axe d'une bobine décroît fortement à l'extérieur de celle-ci. Ce résultat est cohérent avec les lignes de champ, représentées sur la figure 26.7, qui s'écartent nettement au sortir de la bobine.

c) Aimant

La carte de champ d'un aimant est similaire à celle d'une spire ou d'une bobine. Par convention, on appelle pôle nord la face de l'aimant d'où les lignes de champ sortent et pôle sud la face de l'aimant dans laquelle les lignes de champ entrent.

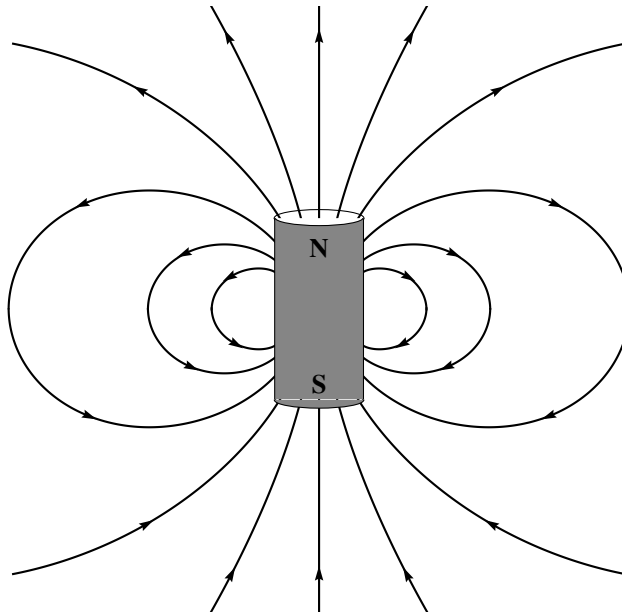


Figure 26.10 – Lignes de champ magnétique d'un aimant. **N** est le pôle nord et **S** le pôle sud.

2 Moment magnétique

Une spire, une bobine longue, un aimant, admettent tous trois des lignes de champ magnétique de même allure à grande distance, c'est-à-dire en un point M tel que, si on note O le centre de la spire, de la bobine ou de l'aimant, la distance OM est très supérieure à la taille de la spire, de la bobine ou de l'aimant. Afin de comparer leur effets magnétiques, on introduit le **moment magnétique**.

2.1 Vecteur surface

Avant de caractériser le moment magnétique, il convient de définir le **vecteur surface** associé à une spire de courant plane. C'est un vecteur normal à la spire, de norme égale à sa surface S . Si la direction du vecteur surface est orthogonale à la spire, il y a deux possibilités pour son sens. Laquelle choisir ? Une fois le sens de parcours de l'intensité du courant explicité, on appose la main sur la courbe, avec les doigts qui épousent la courbe, dans le sens de l'orientation. Le pouce indique alors le sens du vecteur surface. C'est encore une **règle de la main droite**.

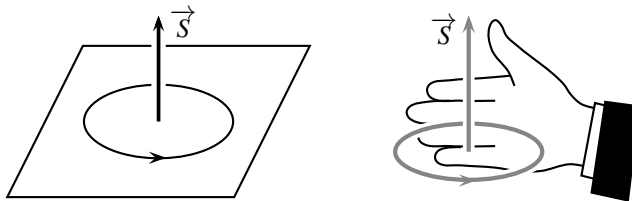


Figure 26.11 – Surface orientée et vecteur surface.

Cette méthode est applicable pour des boucles de courant de toute forme.

Pour une surface orientée, de surface S , le vecteur surface \vec{S} est un vecteur de norme S , orthogonal à la surface, de sens donné par la règle de la main droite.

Remarque

On définit aussi le vecteur normal à la surface \vec{n} , par $\vec{S} = S\vec{n}$. Ce vecteur normal est unitaire, c'est à dire que sa norme vaut 1.

2.2 Définition du moment magnétique

Le **moment magnétique** d'une boucle de courant plane, de surface S , parcourue par un courant d'intensité i , est le vecteur $\vec{\mathcal{M}} = i\vec{S}$. Il s'exprime en $A.m^2$.

2.3 Moment magnétique d'un aimant

Attendu que les lignes de champ d'une boucle de courant et d'un aimant sont identiques à grande distance, on étend la notion de moment magnétique aux aimants. Toutefois, ceux-

ci ne sont parcourus par aucun courant interne. Le moment magnétique d'un aimant, bien qu'exprimé en $A.m^2$, ne représente plus le produit de deux termes.

Le moment magnétique d'un aimant dépend de sa taille. L'ordre de grandeur du moment magnétique d'un aimant usuel est d'environ $10 A.m^2$. Le moment magnétique de la Terre vaut $7,9.10^{22} A.m^2$.

2.4 Lignes de champ d'un moment magnétique

Un moment magnétique représente tout aussi bien une boucle de courant qu'un aimant. Il présente de manière unifiée le champ magnétique créé à grande distance.

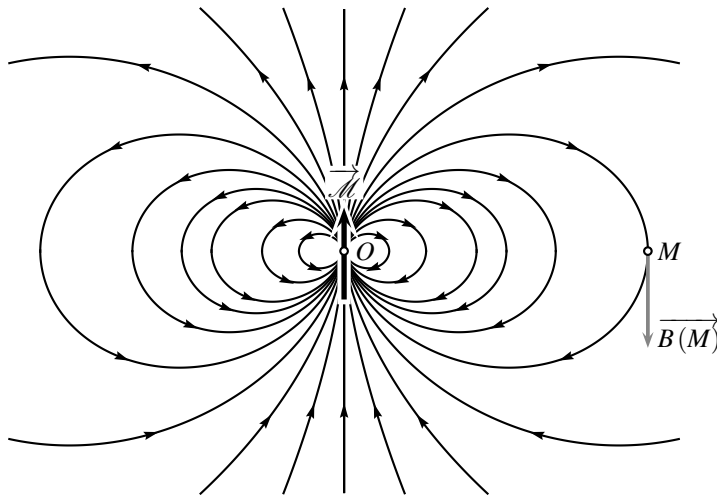


Figure 26.12 – Lignes de champ magnétique d'un moment magnétique.

La distance OM est très supérieure à la largeur caractéristique de la source modélisée par le moment magnétique \vec{M} , comme le rayon d'une spire, le rayon ou la longueur d'une bobine longue ou d'un aimant. Ainsi, la source n'est pas représentée, car totalement concentrée au point O .

SYNTHÈSE*SAVOIRS*

- allure des cartes de champ d'une spire, d'une bobine longue, d'un aimant
- dispositif réalisant un champ magnétique quasi uniforme
- ordres de grandeurs de champs magnétiques (aimant, IRM, Terre)
- moment magnétique d'une boucle de courant
- ordre de grandeur du moment magnétique d'un aimant

SAVOIR-FAIRE

- identifier sur une carte de champ les zones de champ uniforme, fort ou faible
- identifier sur une carte de champ l'emplacement des sources
- orienter le champ magnétique d'une bobine longue

MOTS-CLÉS

- | | | |
|--------------------|------------------------------|---------------------|
| • champ vectoriel | • spire ou boucle de courant | • moment magnétique |
| • ligne de champ | • bobine longue | |
| • champ magnétique | • aimant | |