

D. ELECTROMAGNETISME

Chapitre 16 : Magnétisme

*L'étrange pouvoir de la **Pierre d'aimant** [Magnetisenstein] de se plaquer aux outils de fer est connue depuis l'antiquité. La pierre d'aimant est un minerai appelé magnétite ; c'est un oxyde de fer (Fe_3O_4). Le mot magnétisme vient du mot grec "magnítis líthos" (μαγνήτης λίθος), qui veut dire "pierre de Magnésie". Il a peut-être son origine dans l'ancienne colonie appelée Magnésie en Asie Mineure, où l'on extrayait ce minerai il y a environ 2500 ans. D'après une légende chinoise, l'Empereur Hwang-ti (~ 2600 avant notre ère) fut guidé au cours d'une bataille à travers un épais brouillard par une petite figurine tournante, qui se dirigeait toujours vers le Sud : elle avait un morceau de pierre d'aimant caché dans son bras. Vers 1100 la boussole fut connue en Europe.*

I. Généralités

1. Les aimants

Aimants naturels : Plongeons un échantillon de **magnétite** (voir ci-contre) dans de la limaille de fer. En le retirant, on observe que la limaille reste attachée au bloc de magnétite en certaines régions appelées **pôles**. La plupart des aimants ont 2 pôles, où la force magnétique est clairement la plus forte.



Aimants artificiels : a) Introduisons un barreau de fer doux dans une bobine constituée par un fil conducteur dans lequel nous lançons un courant. Dès que le courant passe, les extrémités du barreau deviennent capables d'attirer des clous de fer. Le barreau se comporte alors comme un aimant. Lorsque le courant est coupé, les clous tombent : l'aimantation du barreau a disparu. On a affaire à un **aimant artificiel temporaire**.

b) Si nous recommençons l'expérience avec un barreau d'acier, l'aimantation reste après avoir coupé le courant. L'acier comme certaines autres substances conservent une **aimantation rémanente**. On a obtenu un **aimant artificiel permanent**. Les aimants permanents se présentent sous diverses formes : aimant droit, aimant en U, aimant circulaire.

Tous les aimants attirent de la limaille de fer, des clous de fer, Tous les corps qui sont attirés par un aimant s'appellent **corps ferromagnétiques**.

Parmi les éléments quelques-uns sont ferromagnétiques : Fe, Co, Ni, Gd (gadolinium), Dy (dysprosium) et les alliages de ces métaux tels que l'acier et l'alnico (Al+Ni+Co). En revanche il

existe aussi de nombreux composés ferromagnétiques, pouvant ne contenir aucun de ces éléments.

Tous les corps ferromagnétiques attirent également les aimants (Action - réaction).

Le ferromagnétisme disparaît lorsque le corps est porté à une température supérieure à une température caractéristique appelée **température de Curie** θ_C . (Expérience du clou chauffé).

Températures de Curie $\theta_C(^{\circ}C)$:

Fe	Ni	Co	Gd	Dy
770	358	1121	20	-186

2. Les pôles et leurs actions réciproques

a) **Pôles nord et sud.** Un petit aimant droit parfaitement libre, placé loin de tout autre aimant et de tout courant, oriente l'une de ses extrémités sensiblement vers le pôle nord géographique. On appelle cette extrémité le **pôle nord** de l'aimant, l'autre s'appelle le **pôle sud**. (Habituellement le pôle nord est coloré en rouge ou en bleu, le pôle sud en vert.)

b) **Actions réciproques.** 2 aimants, approchés l'un de l'autre, exercent l'un sur l'autre des forces d'**attraction** ou de **répulsion** dont l'intensité décroît rapidement quand la distance des pôles augmente. L'expérience montre :

Des pôles identiques se repoussent.

Des pôles différents s'attirent.

3. Constitution des aimants

a) **Expérience de l'aimant brisé.** En brisant successivement un barreau aimanté en son milieu, on obtient tour à tour de nouveaux aimants, plus petits, mais montrant toujours les pôles habituels Nord et Sud.

Les pôles magnétiques ne peuvent pas être isolés et se présentent toujours par paires.

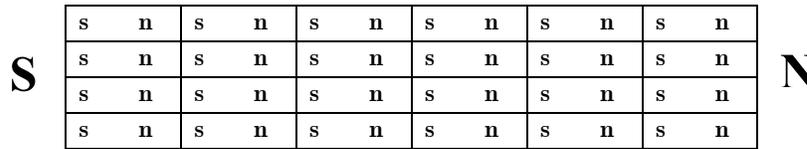
Les aimants sont donc des dipôles magnétiques, dont les pôles sont inséparables; l'existence d'un monopôle magnétique étant exclue jusqu'à preuve du contraire.

En réunissant tous les morceaux avec soin on peut reconstituer l'aimant primitif. On constate que les pôles intermédiaires ont disparu et que des clous de fer se maintiennent presque exclusivement aux extrémités.

b) **Aimantation de toute la matière.** L'expérience de l'aimant brisé peut nous suggérer une *hypothèse* sur la constitution des aimants.

On se représente un barreau aimanté sous la forme d'un assemblage de tiges aimantées microscopiques (aimants élémentaires), comme l'indique, très schématiquement, la figure ci-dessous. Les pôles différents de deux tiges consécutives se touchent et se neutralisent sauf aux extrémités. Quand on coupe l'aimant en deux, deux pôles

différents apparaissent, un pôle nord et un pôle sud.



Ce comportement peut s'expliquer si on admet que l'électron, lui-même, est un **dipôle magnétique fondamental**.

Le moine et ingénieur Pierre de Maricourt avait décrit en 1269 des expériences sur les aimants, mettant en évidence l'existence et les propriétés des pôles magnétiques. Si on laisse flotter un aimant librement sur l'eau, il s'oriente dans la direction Nord-Sud, une partie de l'aimant se tournant vers le Nord, la partie opposée vers le Sud. Les aimants possèdent donc deux sortes de pôles. De Maricourt remarque aussi que si l'on approche deux aimants l'un de l'autre, leurs pôles se repoussent ou s'attirent selon qu'ils sont ou non de même nature. Enfin il tente d'isoler un pôle en coupant en deux un aimant. Mais chaque morceau présente à son tour les deux sortes de pôles !

II. Le champ magnétique

1. Définition qualitative

On appelle **champ magnétique** la région de l'espace où des actions magnétiques se font sentir.

Le champ magnétique est caractérisé en tout point de l'espace champ par le **vecteur champ magnétique** \vec{B} .

2. Caractéristiques du vecteur champ magnétique



Tout aimant témoin droit très petit (aiguille de boussole), monté sur un pivot permet d'explorer un espace champ magnétique.

Le *vecteur champ magnétique* a les *caractéristiques* suivantes :

- \vec{B} { direction: celle indiquée par le grand axe de l'aiguille aimantée
- sens: S → N (sur l'aiguille)
- intensité: B est d'autant plus grand que l'aiguille oscille plus rapidement au voisinage de sa position d'équilibre

3. Unité de l'intensité du champ magnétique B dans le SI

Le **tesla (T)**^[1] mesuré à l'aide d'un *teslamètre*

Ordres de grandeurs :

Source	Champ magnétique $B(T)$
Etoile à neutrons à la surface	$\approx 10^8$
Champ le plus intense produit en laboratoire durant plusieurs ms (sans destruction de l'aimant) en 2011 (NL Los Alamos, USA)	97,4
Champ le plus intense produit en laboratoire durant plusieurs μs (avec destruction de l'aimant) en 2011 (id.)	150-250

^[1] **TESLA, Nikola** (1856-1943), ingénieur électricien américain d'origine croate.

Grand électroaimant de laboratoire	5
Appareil classique d'IRM	3
Petits aimants permanents (près des pôles)	≈ 0,02
Soleil à la surface	≈ 0,01
Téléviseur couleur (à proximité)	≈ 10 ⁻⁴
Terre à la surface	≈ 5×10 ⁻⁵
Espace interstellaire	≈ 10 ⁻¹⁰

4. Champ magnétique uniforme

Un champ magnétique est **uniforme** quand le vecteur \vec{B} a

même direction	}	en tout point de l'espace champ.
même sens		
même intensité		

5. Superposition de plusieurs champs magnétiques

Soient $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \vec{B}_3, \dots$ des champs magnétiques qui existent simultanément au même point M de l'espace.

Le champ magnétique résultant en M est égal à la somme vectorielle des champs donnés :

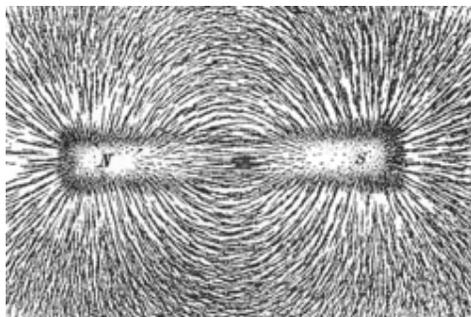
$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots = \sum_i \vec{B}_i$$

6. Spectres magnétiques

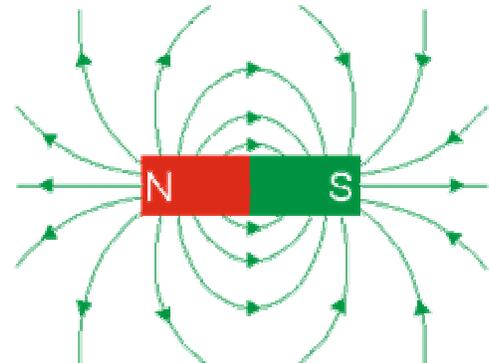
En déplaçant une aiguille de boussole au voisinage d'un aimant on peut déterminer l'orientation du vecteur champ magnétique \vec{B} en chaque point. Une **ligne de champ** est obtenue en traçant la courbe tangente en chacun de ses points au vecteur champ local. Elle est orientée dans le sens de celui-ci.

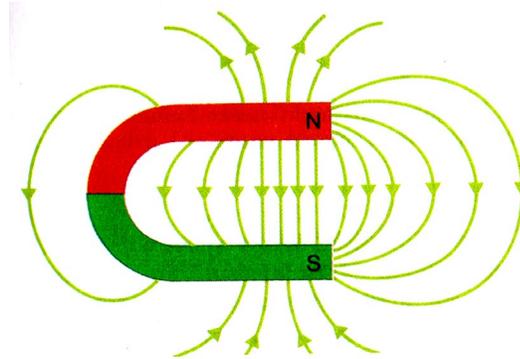
Les lignes de champ semblent sortir du pôle nord de l'aimant et rentrer par le pôle sud. Elles se resserrent au voisinage des pôles de l'aimant où le champ est plus intense. L'ensemble des lignes de champ forme le **spectre magnétique**.

La visualisation du spectre peut être réalisée à l'aide de grains de limaille de fer. Chaque grain de limaille se comporte comme une petite aiguille aimantée qui s'aligne dans la direction du champ magnétique local.



Spectre d'un aimant droit



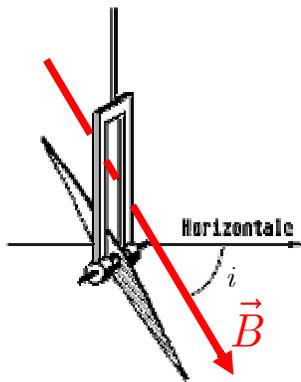
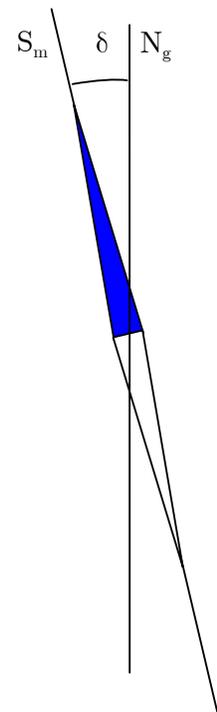


Spectre d'un aimant en U

7. Le champ magnétique terrestre

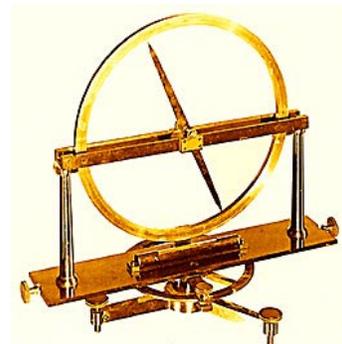
Les chinois du XI^e siècle savaient déjà que l'aiguille d'une boussole ne s'aligne pas partout exactement dans la direction nord-sud géographique. Ce fait a été connu en Europe vers 1436, mais même de nos jours, beaucoup de gens sont surpris d'apprendre qu'une boussole indique rarement le vrai nord géographique.

L'angle formé entre la direction passant par les pôles géographiques et la direction indiquée par une aiguille aimantée disposée horizontalement en un point donné sur la surface de la Terre s'appelle **déclinaison magnétique δ** . La valeur de cet angle varie avec le lieu et au cours du temps. Au 1^{er} janvier 2003 la déclinaison mesurait dans notre région $-20'$. Elle diminue chaque année de $7'$.



Considérons une aiguille aimantée mobile autour d'un axe horizontal et placée dans le méridien magnétique (plan vertical passant par les pôles magnétiques terrestres). Sa position d'équilibre n'est pas horizontale. Le vecteur \vec{B} pointe vers le sol et fait un angle d'environ 60° avec le plan horizontal.

Cet angle, appelé **inclinaison magnétique i** , varie suivant le lieu et avec le temps.



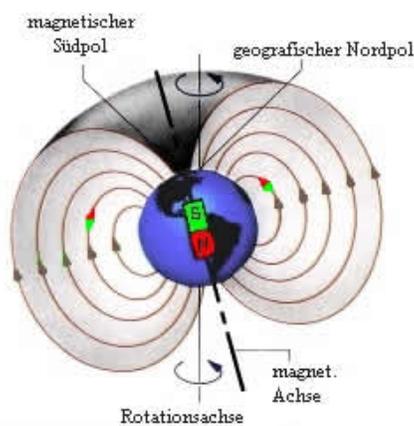
Une idée essentielle dans l'étude du magnétisme fut avancée en 1600 par **William Gilbert** (1540-1603), alors médecin de la reine Elisabeth I^{re}, dans l'ouvrage « De Magnete, Magneticisque Corporibus et Magno Magnete Tellure ». Il y décrit nombre de ses expériences avec un modèle de terre appelé *terrella*. De ces expériences, il conclut que la Terre était magnétique et que cela était la raison pour laquelle la boussole indique le nord. Il étudia dans le même ouvrage également l'électricité statique en utilisant l'ambre ; l'ambre se nomme *elektron* en grec. Gilbert parla dans ce contexte de « *Vis electrica* », d'où le terme d'électricité.

According to Dr. David P. Stern of NASA: "William Gilbert was fascinated by magnets. Britain was a major seafaring nation in 1588 when the Spanish Armada was defeated, opening the

way to British settlement of America. British ships depended on the magnetic compass, yet no one understood why it worked. Did the pole star attract it (as Columbus once speculated), or was there a magnetic mountain at the pole, which ships should never approach, because the sailors thought its pull would yank out all their iron nails and fittings? Did the smell of garlic interfere with the action of the compass, which is why helmsmen were forbidden to eat it near a ship's compass? For nearly 20 years William Gilbert conducted ingenious experiments (among others, making sure that garlic had no effect on compasses) to understand magnetism. Until then, scientific experiments were not in fashion: instead, books relied on quotes of ancient authorities that was where the myth about garlic started."

Exercice : Déterminer en un point O de la surface de la Terre la valeur B_v de la composante verticale du champ géomagnétique. L'inclinaison $i = 60^\circ$ et l'intensité de la composante horizontale $B_h = 20 \mu\text{T}$.

Explication du champ magnétique terrestre



L'axe de rotation de la terre définit les pôles géographiques ; l'axe du champ magnétique terrestre les pôles magnétiques. Ces deux axes ne coïncident pas et le pôle magnétique au Nord est ainsi distinct du pôle nord géographique. Ceci explique que la déclinaison magnétique varie d'un point à un autre sur la surface de la terre. Elle varie également dans le temps car l'axe du champ magnétique terrestre se modifie au cours du temps au gré des mouvements du noyau terrestre.

S'il est relativement aisé de produire un champ magnétique au moyen de solides aimantés ou d'un champ électrique, comprendre l'origine et le comportement d'un tel phénomène produit par une planète, une étoile ou même une galaxie relève du défi. Non par manque d'explications théoriques, mais bien parce qu'il était à peu près impossible, jusqu'à ce jour, de

reproduire un tel processus au départ de matière dans un état autre que solide.

L'étape cruciale vient d'être franchie par un groupe de chercheurs français, qui viennent de reproduire pour la première fois en laboratoire le champ magnétique terrestre en conditions réelles, et démontrer ce qui n'était qu'hypothèse invérifiée à ce jour : *il est provoqué par les mouvements turbulents de liquides conducteurs à l'intérieur de la Terre.*

Ces travaux sont le fruit d'une collaboration qui regroupe des chercheurs du CNRS, de l'Ecole Normale Supérieure de Paris, de celle de Lyon et du CEA, qui ont consisté à créer en laboratoire un champ magnétique dans un écoulement très turbulent de sodium liquide. Et si toutes les conditions extrêmes rencontrées au sein des étoiles ou des noyaux planétaires ne peuvent être reproduites, le champ mis en évidence présente des similarités remarquables avec les champs magnétiques planétaires ou stellaires.

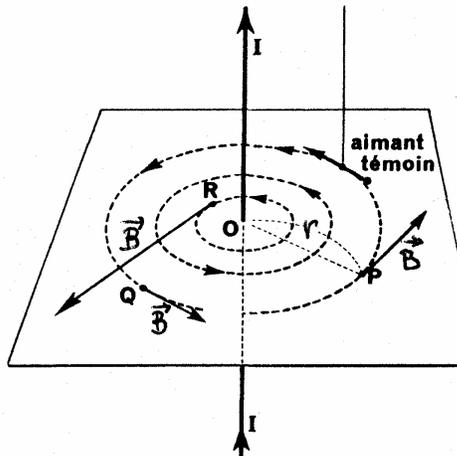
Si l'hypothèse que le champ magnétique de la Terre est engendré par un *effet dynamo*, c'est-à-dire par les mouvements d'un fluide conducteur de l'électricité, avait déjà été émise dès 1919 par le physicien anglais Sir Joseph Larmor, *il aura cependant fallu attendre 2007* pour en obtenir une confirmation expérimentale. Et cela n'est pas anodin, car non seulement ce phénomène aligne les aiguilles des boussoles, mais il nous protège aussi des effets nuisibles des rayons cosmiques et des particules solaires, qui rendraient toute vie impossible sur Terre en son absence.

III. Champs magnétiques de quelques circuits parcourus par un courant

1. Champ magnétique d'un fil rectiligne très long

Considérons un fil droit très long parcouru par un courant d'intensité I .

a) Spectre magnétique



Les lignes de champ sont **circulaires**, centrées sur le fil.



Un petit aimant témoin, se trouvant en un point P, indique le vecteur champ magnétique \vec{B} en ce point. La ligne de champ passant par P est alors orientée dans le sens de \vec{B} .

Cette orientation des lignes de champ peut être retrouvée par la **règle de la main droite** :

Si le pouce indique le sens du courant, les doigts s'enroulent dans le sens des lignes de champ.



b) Influence de l'intensité I du courant sur l'intensité B du champ magnétique

Lorsque nous doublons, triplons, ... l'intensité I , tout se passe comme si nous superposions 2, 3, ... circuits identiques, chacun étant responsable du même champ. Le champ créé va donc lui aussi doubler, tripler, ...

Cette hypothèse est confirmée par l'expérience et on a :

$$B \sim I \quad (1)$$

c) Influence de r sur B

Des mesures expérimentales montrent que le champ B est inversement proportionnel à la distance r du point envisagé au conducteur.

$$B \sim \frac{1}{r} \quad (2)$$

d) Expression de B

(1) et (2) $\Rightarrow B \sim \frac{I}{r} \Leftrightarrow B = k \frac{I}{r}$ (3)

Le facteur de proportionnalité k dépend du système d'unités choisi.

Dans le SI on a : $k = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$.

Il est d'usage de faire intervenir la longueur $p = 2\pi r$ d'une ligne de champ dans la formule en posant $k = \frac{\mu_0}{2\pi}$. On a alors $\mu_0 = 2\pi k = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$ et (3) s'écrit :

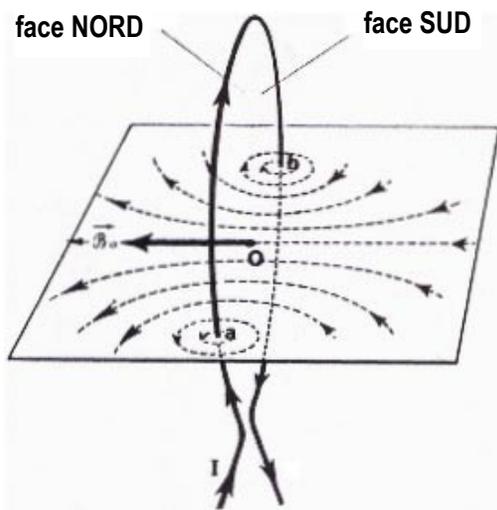
$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}$$

La constante μ_0 est appelée **PERMÉABILITÉ** (ABSOLUE) du vide.

Pour l'air on a : $\mu_{\text{air}} \simeq \mu_0$.

2. Champ magnétique d'un conducteur circulaire (Bobine plate)

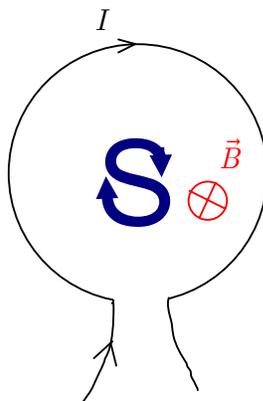
a) Spectre magnétique



Chacune des lignes d'induction est une courbe fermée formant une boucle autour du courant. Les lignes d'induction s'épanouissent en éventail de chaque côté du plan de la spire. Une seule ligne d'induction est rectiligne; elle est confondue avec l'axe de symétrie du dispositif. Le sens des lignes d'induction est déterminé par la règle de la main droite.

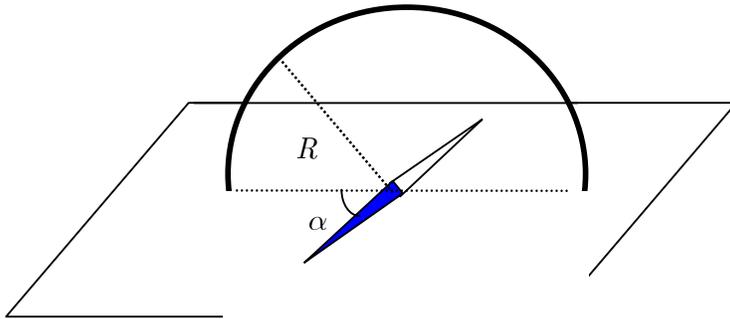
Si on regarde une **face sud** on voit **fuir** les lignes d'induction devant soi; si on regarde une **face nord** on voit les lignes d'induction **venir** vers soi.

Règle d'orientation :



b) Détermination du champ magnétique B au centre de la spire

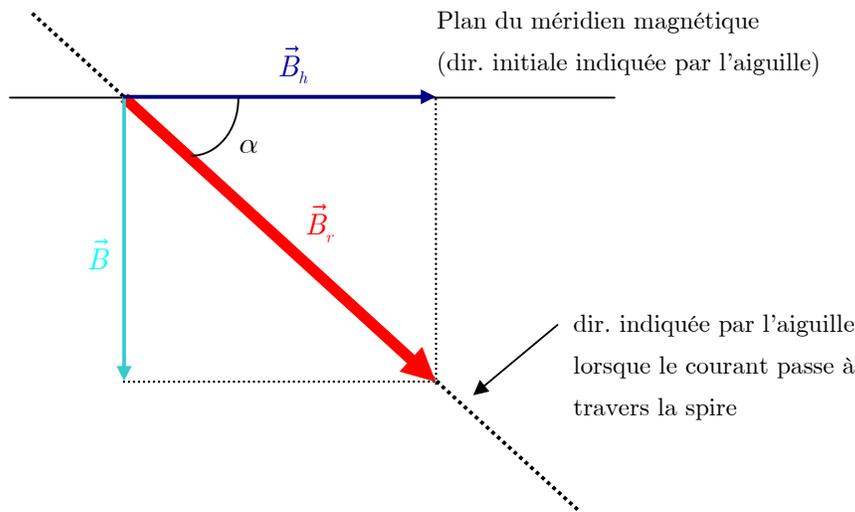
Méthode indirecte : Boussole des tangentes



• Remarque :

Soit un conducteur circulaire placé dans un plan méridien magnétique. Lorsque le conducteur est traversé par un courant I , l'aiguille aimantée, qui se trouve au centre de la spire, dévie d'un angle α et les variations du champ magnétique B peuvent être mesurées par ces

variations angulaires.



- \vec{B}_h : composante horizontale du champ magnétique terrestre
- \vec{B} : champ magnétique créé par le courant circulant dans le conducteur
- \vec{B}_r : champ magnétique résultant
- $\vec{B}_r = \vec{B} + \vec{B}_h$
- Or $B = B_h \cdot \text{tg } \alpha$

Comme $B_h = c^{te}$, on a :

$B \sim \text{tg } \alpha$

• Mesures

Soient R et N respectivement le rayon et le nombre de spires des différentes bobines plates et I l'intensité du courant qui les traverse. On modifie successivement un des 3 paramètres (tout en gardant les 2 autres constants) et on mesure l'angle α .

* Influence de N ($R = 16 \text{ cm}$; $I = 3\text{A}$)

N	$\alpha(^{\circ})$	$\text{tg } \alpha$	
2	28		
4	46		
6	57		
8	64		
10	69		

Conclusion :

* Influence de R ($N = 10$, $I = 3$ A)

$R(\text{cm})$	$\alpha(^{\circ})$	$tg \alpha$	
8	28,0		
10	23,0		
12	19,5		
14	17,0		
16	15,0		

Conclusion :

* Influence de I ($R = 16$ cm ; $N = 10$)

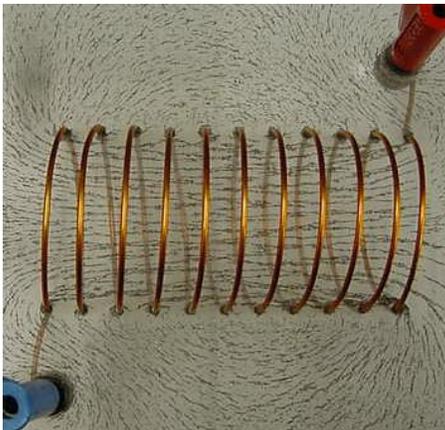
$I(\text{A})$	$\alpha(^{\circ})$	$tg \alpha$	
0,5	23		
1,0	41		
1,5	53		
2,0	60		
2,5	65		
3,0	69		

Conclusion :

* Résumé

3. Champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde long (Bobine longue)

Un solénoïde^[2] est une bobine, constituée par un certain nombre de spires enroulées régulièrement en hélice sur un cylindre dont la longueur est au moins 5 fois plus grande que le diamètre : $\ell > 5 \cdot d$.

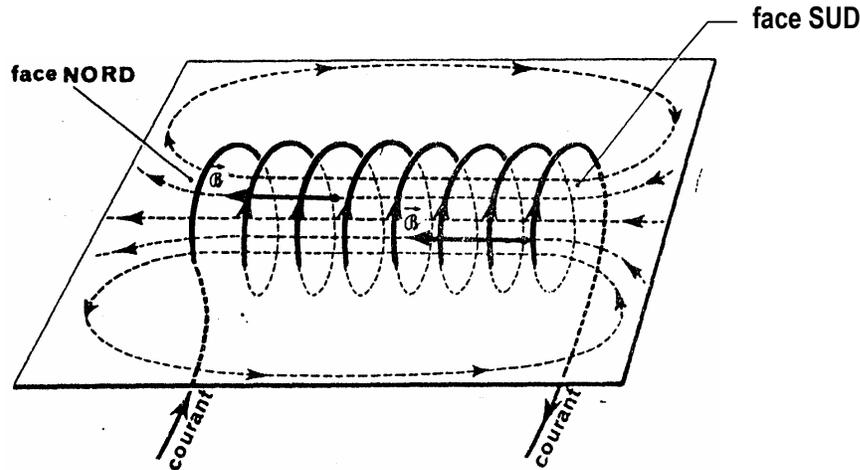


a) Spectre magnétique

La figure montre le spectre de limaille obtenu dans un plan passant par l'axe du cylindre. Les lignes d'induction sont des courbes fermées. Aux extrémités du solénoïde, elles s'épanouissent. Dans toute la région intérieure aux spires elles sont parallèles et équidistantes : le champ

^[2] Le solénoïde [du grec solen, tuyau] a été imaginé et réalisé par A. M. Ampère en 1820.

magnétique y est uniforme. Le sens est donné par la règle de la main droite.



b) Valeur du champ magnétique B à l'intérieur du solénoïde

Pour un solénoïde idéal infiniment long la théorie donne :

$$B = \mu_0 n_1 I$$

où $n_1 = \frac{N}{L}$ désigne le nombre de spires par unité de longueur ; N et L étant respectivement le nombre de spires et la longueur du solénoïde.

En pratique on s'approche plus ou moins de ce cas idéal.

IV. Applications des électroaimants

Les électroaimants sont principalement utilisés dans :

- les appareils de levage pour matériaux ferromagnétiques;
- les moteurs et générateurs électriques, où ils créent le champ magnétique nécessaire à leur fonctionnement;
- les relais électromécaniques de commande des circuits électriques;
- les laboratoires de recherche de physique nucléaire pour focaliser les faisceaux de particules et courber leur trajectoire;
- les laboratoires d'étude des structures chimiques par "résonance magnétique électronique et nucléaire" (RMEN);
- les laboratoires d'imagerie médicale par résonance magnétique nucléaire (IRM).

V. Exercices

1. Solénoïde

Une aiguille aimantée est disposée au point O à l'intérieur d'une bobine très longue. En l'absence de courant électrique, la direction horizontale nord-sud de l'aiguille est perpendiculaire à l'axe $x'x$ horizontal de la bobine. L'aiguille tourne d'un angle $\alpha = 30^\circ$ quand un courant électrique d'intensité I circule dans la bobine.

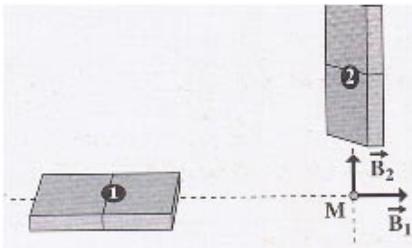
- a) Quelle est en O la direction du champ magnétique terrestre ?
- b) Déterminer le champ magnétique \vec{B} créé par la bobine et le champ magnétique résultant \vec{B}_r , sachant que la composante horizontale du champ magnétique terrestre $B_h = 20 \mu\text{T}$.
- c) Déterminer le sens du courant dans la bobine. Quelle est la face nord de cette dernière ?
- d) Quelle est la nouvelle valeur de l'angle α quand l'intensité du courant est $I' = 2I$?

2. Solénoïde

Une bobine de longueur 20 cm comporte 1000 spires de 3 cm de diamètre. Elle est traversée par un courant d'une intensité de 200 mA.

- a) Peut-on considérer ce solénoïde comme long ?
- b) Quelle est la valeur du champ magnétique à l'intérieur ?
- c) Pour quelle valeur de l'intensité du courant, l'intensité du champ est-elle égale à B_h ?

3. Superposition de champs magnétiques



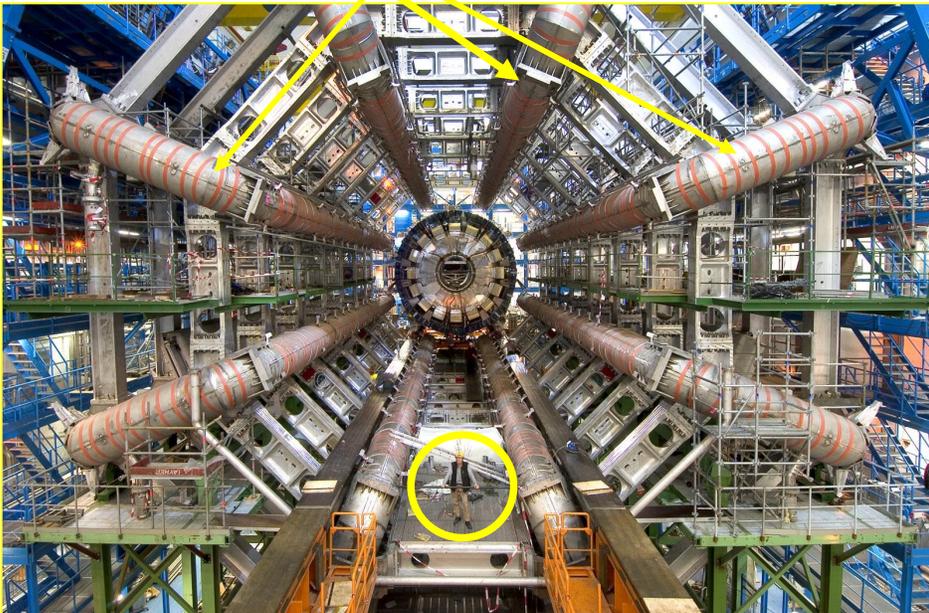
En un point M de l'espace, on superpose deux champs magnétiques créés par deux aimants droits dont les axes sont perpendiculaires.

- a) Déterminer les pôles des aimants.
- b) Quelle est la direction prise par une aiguille de boussole placée au point M ?
- c) Quelle est la valeur du champ résultant ?

On donne : $B_1 = 10 \text{ mT}$; $B_2 = 20 \text{ mT}$.

Le plus gros aimant du monde

est constitué d'un ensemble de 8 bobines supraconductrices de forme rectangulaire de 25 m de long sur 5 m de



de long sur 5 m de large. 30 km de câbles supraconducteurs ont été nécessaires pour fabriquer ses bobines, qui sont refroidies à la température de l'He liquide (-271,3°C ou 1,9 K). Les 8 bobines, positionnées en étoile, et à quelques mm près, occupent un volume équivalent à la moitié de Notre-Dame à Paris.

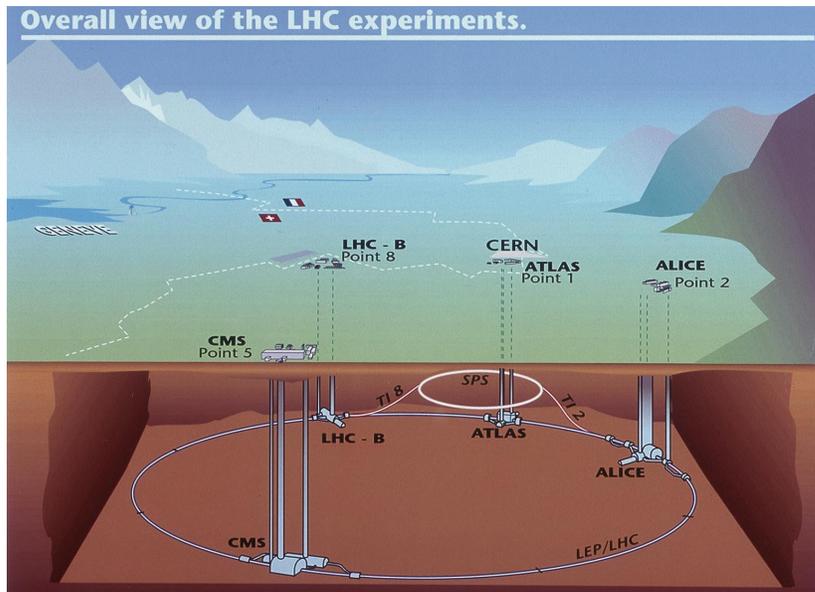
L'aimant a été refroidi à 4 K dans son ensemble en

juin et juillet 2006, avant d'être mis progressivement en fonctionnement à partir du mois de septembre 2006. Le 9 novembre 2006 il avait atteint avec une intensité de plus de 21000 A un champ magnétique de près de 4 T.

Une fois sous tension, cet aimant stocke une énergie magnétique de 1,1 GJ, équivalente à celle nécessaire pour soulever la tour Eiffel d'une hauteur de 15 m.

Il fait partie du détecteur ATLAS, une machine de 46 m de longueur et de 25 m de diamètre. D'une masse de 7000 t, ATLAS est constitué de 100 millions de capteurs, qui mesureront les particules produites lors des collisions au « Grand Collisionneur de Hadrons » du CERN, le LHC (Large Hadron Collider).

Le LHC consiste en un anneau de 27 km de circonférence formé de quelques 9300 aimants supraconducteurs^[3] et de structures accélératrices qui augmentent l'énergie des particules qui y circulent. A l'intérieur de l'accélérateur, deux faisceaux de particules (soit des protons, soit des noyaux de Pb) circulent en sens opposé à des énergies très élevées et à une vitesse proche de celle de la lumière ($v/c = 99,9999991\%$ à pleine puissance pour des protons) avant d'entrer en collision l'un avec l'autre. Parmi les aimants principaux, 1234 aimants dipolaires de 14,3 m de long ($B = 8,4\text{ T}$) sont utilisés pour courber la trajectoire et 392 aimants quadripolaires de 5 à 7 m de long pour



concentrer les faisceaux. Juste avant la collisions, un autre type d'aimant sert à « coller » les particules les une aux autres, de façon à augmenter les probabilités d'une collision. Ces particules sont si minuscules que les faire entrer en collision revient à lancer deux aiguilles éloignées de 10 km, l'une contre l'autre.

Le LHC est la machine la plus grande du monde, l'espace le plus vide du système solaire, le circuit le plus rapide de la planète. Il contient les points les plus chauds de la galaxie dans un anneau plus froid que l'espace intersidéral.

Le LHC a démarré en septembre 2008 ... pour s'arrêter 10 jours plus tard et rester en panne plus d'un an. Une mauvaise soudure était à l'origine de l'incident, qui a nécessité la réparation de plusieurs centaines de m de long de l'accélérateur. Finalement, le LHC est reparti en novembre 2009 et dès ce mois les protons sont parvenus à 1,18 TeV. En 2010 et 2011 le LHC a été exploité avec succès à une énergie de 3,5 TeV par faisceau. Le 5 avril 2012 le CERN a déclaré que deux faisceaux de particules stables d'une énergie de 4 TeV chacun sont entrés en collision au niveau des quatre points d'interaction du LHC. L'énergie de collision de 8 TeV constitue un nouveau record mondial et accroît considérablement le potentiel de découverte de la machine. Il est prévu de faire fonctionner le LHC jusqu'à la fin de 2012. Débutera ensuite le premier long arrêt afin de préparer la machine pour une exploitation à 6,5 TeV par faisceau dès la fin 2014, l'objectif final étant d'atteindre progressivement l'énergie nominale de 7 TeV par faisceau en 2015. 7 TeV est comparable à l'énergie d'un ... moustique en vol ! Dérisoire donc, sauf que cette énergie est concentrée dans un espace de millions de millions de fois plus petit que l'insecte.

Les expériences qui seront menées au LHC permettront aux physiciens de faire un grand pas en avant dans une aventure qui a commencé lorsque Newton a entrepris de décrire la gravité. La gravité est omniprésente, car elle agit sur la masse. Cependant, à ce jour, la science n'est pas en mesure d'expliquer pourquoi les particules ont les masses qu'on leur connaît. Des expériences telles qu'ATLAS pourront peut-être apporter une réponse à cette question. Les expériences du LHC chercheront également à percer le mystère de la matière noire et de l'énergie noire de l'Univers (constituant environ 95 % du tout et dont on ne connaît presque rien) et tenteront d'expliquer pourquoi la matière prédomine sur l'antimatière dans la Nature ; elles exploreront la matière telle qu'elle se présentait au tout début du temps.

^[3] La **supraconductivité** est un phénomène qui se traduit par l'annulation de la résistance électrique. Elle apparaît dans certains matériaux portés à des températures suffisamment basses, en dessous d'une température dite critique.

Petites questions de cours

1. Comment peut-on mettre en évidence l'existence d'un champ magnétique en un point de l'espace ?
2. Comment peut-on déterminer la direction et le sens du vecteur champ ?
3. Quelle est l'unité internationale de champ magnétique ? Avec quel appareil mesure-t-on l'intensité d'un champ magnétique ?
4. Quels sont les différents types de sources de champ magnétique ?
5. Quels sont les dispositifs qui permettent de créer des champs magnétiques uniformes ?
6. Définir le champ magnétique régnant à l'intérieur d'un solénoïde de longueur ℓ comportant N spires parcourues par un courant d'intensité I .
7. Énoncer la règle de la main droite.
8. Un champ magnétique dont l'intensité est supérieure à 2 T est-il exceptionnel ?

Vrai ou faux ?

1. Le champ magnétique d'un aimant agit sur une aiguille aimantée et réciproquement l'aiguille aimantée crée un champ magnétique qui agit sur l'aimant.
2. Le champ magnétique terrestre est uniforme.
3. Dans l'entrefer d'un aimant en U le champ magnétique est pratiquement uniforme.
4. Le champ magnétique créé par un courant est toujours proportionnel à l'intensité du courant.
5. À l'intérieur d'un solénoïde les lignes de champ sont orientées de la face nord vers la face sud.
6. Les lignes de champ d'un champ magnétique ne se coupent jamais.
7. À l'intérieur d'un solénoïde l'intensité du champ magnétique est proportionnelle à sa longueur.
8. La règle de la main droite permet de déterminer le sens du courant électrique quand on connaît le sens du champ magnétique créé par ce courant.