

Champ magnétique

« Astronomy and Pure Mathematics are the magnetic poles toward which the compass of my mind ever turns. »

Carl Friedrich GAUSS, lettre à BOLYAI, 30 juin 1803

Sommaire

I Généralités	2
I/A Champ magnétique	2
I/B Sources de champ magnétique	3
I/C Intensité du champ magnétique	4
II Relation courant et champ magnétique	6
II/A Orientation et intensité	6
II/B Invariances de la distribution de courants	6
II/C Symétries de distribution et de champ	7

Capacités exigibles

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Exploiter une représentation graphique d'un champ vectoriel, identifier les zones de champ uniforme, de champ faible et l'emplacement des sources. <input type="checkbox"/> Tracer l'allure des cartes de champs magnétiques pour un aimant droit, une spire circulaire et une bobine longue. <input type="checkbox"/> Décrire un dispositif permettant de réaliser un champ magnétique quasi uniforme. <input type="checkbox"/> Citer des ordres de grandeur de champs magnétiques : au voisinage d'aimants, dans un appareil d'IRM, dans le cas du champ magnétique terrestre. | <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Exploiter les propriétés de symétrie et d'invariance des sources pour prévoir des propriétés du champ créé. <input type="checkbox"/> Évaluer l'ordre de grandeur d'un champ magnétique à partir d'expressions fournies. <input type="checkbox"/> Définir le moment magnétique associé à une boucle de courant plane. <input type="checkbox"/> Associer à un aimant un moment magnétique par analogie avec une boucle de courant. <input type="checkbox"/> Citer un ordre de grandeur du moment magnétique associé à un aimant usuel. |
|--|---|

L'essentiel

Définitions

- II.1 : Champ 2
- II.2 : Cartes et lignes de champ 2
- II.3 : Boussole 2
- II.4 : Champ magnétique 2
- II.5 : Solénoïde 4
- II.6 : Moment magnétique 5
- II.7 : Invariance d'une source de champ 6
- II.8 : Plans d'(anti)-symétrie de distrib. 7

Propriétés

- II.1 : Géométrie des lignes de champ magnétique 3
- II.2 : Courant et champ magnétique 3
- II.3 : Comparaison LdC aimant/bobine 4
- II.4 : Intensité et lignes de champ 4
- II.5 : Moment magnétique d'une spire 5
- II.6 : Relation courant-champ 6

Interprétations

- II.1 : Analogie magnéto-mécanique 6

Ordres de grandeur

- II.1 : Intensité du champ magnétique 4
- II.2 : Moment magnétique d'un aimant 5

Applications

- II.1 : Sens du courant et du champ 6
- II.2 : Invariances du fil infini 7
- II.3 : Symétrie du fil infini 7
- II.4 : Exercice bilan sur lignes de champ 8

Outils

- II.1 : Étudier les symétries d'une distribution 8

Points importants

- II.1 : Règles de la main droite 6
- II.2 : Principe de CURIE 6
- II.3 : Symétries et champ magnétique 7

Erreurs communes

- II.1 : Différence invariance/symétrie 8

I Généralités

I/A Champ magnétique

Définition I1.1 : Champ

Un **champ** est une grandeur physique **définie en tout point M**. Il peut être :

- ◇ **Scalaire** :
- ◇ **Stationnaire** :
- ◇ **Vectorel** :
- ◇ **Uniforme** :

Exemple I1.1 : Champs scalaire et vectoriel

- ◇
- ◇

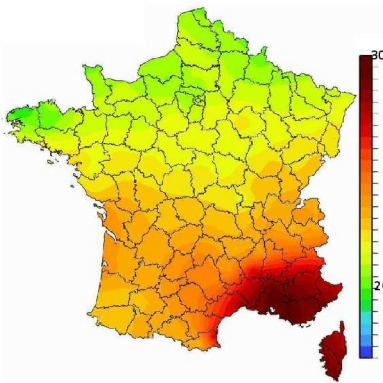


FIGURE I1.1 – Champ scalaire de la température.

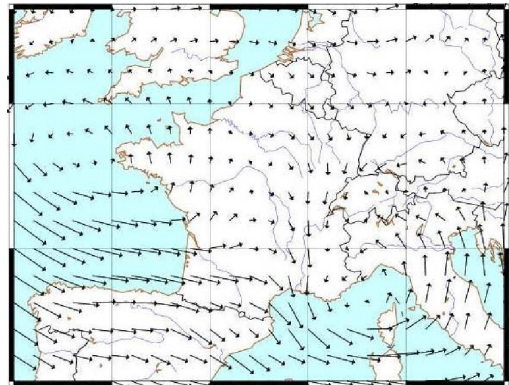
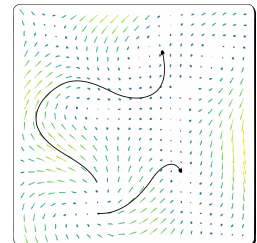


FIGURE I1.2 – Champ vectoriel du vent.

Définition I1.2 : Cartes et lignes de champ

Pour visualiser un champ vectoriel, on peut utiliser 2 types de représentations :

- ◇ **Cartes de champ** : à chaque point de l'espace est associé un **vecteur** donnant le **sens et la norme** du champ ;
- ◇ **Lignes de champ** : ce sont des **courbes orientées, tangentes au champ** que l'on obtient en suivant le champ de proche en proche. Chaque ligne indique le **sens** du champ.



Observation I1.1 : Interactions entre aimants

Deux aimants peuvent **s'attirer** ou **se repousser** selon la façon dont on les oriente :

Situation A



Situation B

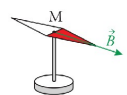


Situation C



Définition I1.3 : Boussole

Le champ magnétique peut être mis en évidence avec une boussole : c'est une **aiguille aimantée libre de tourner**. On appelle **nord magnétique** l'extrémité qui pointe vers le **nord géographique**.



♥ Définition I1.4 : Champ magnétique

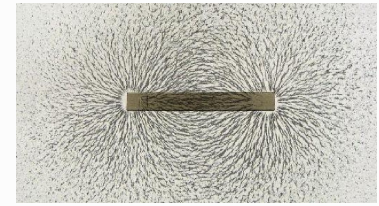
Le **champ magnétique** est caractérisé par un **vecteur**, noté $\vec{B}(M,t)$, défini par :

- ◇ **sa direction** :
- ◇ **son sens** :
- ◇ **sa norme** :

I/B Sources de champ magnétique

Expérience I1.1 : Lignes de champ aimant droit

On dispose de la limaille de fer, se comportant comme de petits aimants orientables, autour d'un aimant droit. On observe qu'ils **s'orientent**, parallèlement aux lignes de champ. D'où la propriété :



♥ Propriété I1.1 : Géométrie des lignes de champ magnétique

Exemple I1.2 : Aimant droit

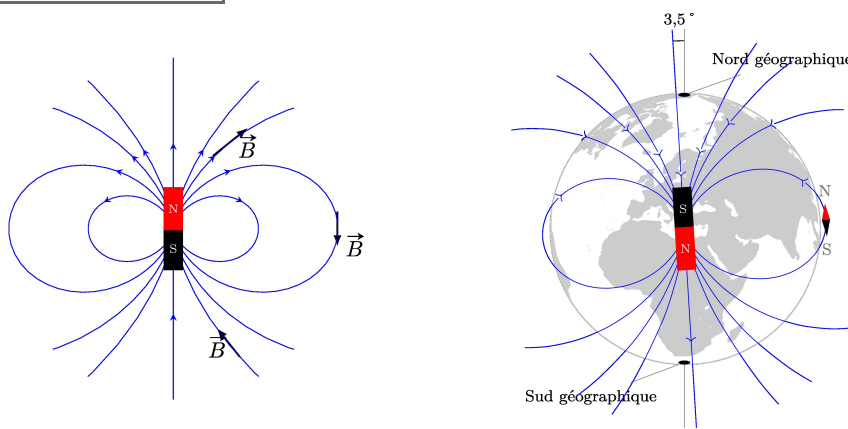


FIGURE I1.3 – Lignes de champ d'un aimant droit, et du champ magnétique de la Terre comme un aimant droit. Une boussole à sa surface pointe vers le **pôle Sud magnétique** de la Terre, qui est **proche du Nord géographique**.

Expérience I1.2 : Courant et champ magnétique

Soit un fil de cuivre horizontal, en-dessous duquel on place une boussole, alignée sur le champ magnétique terrestre. On place le dispositif de telle sorte à aligner les 2 initialement. On alimente alors le fil par un courant.

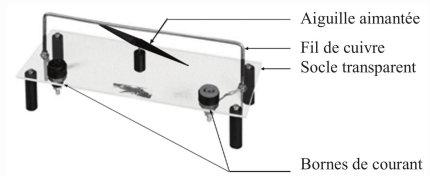


FIGURE I1.4 – Dispositif d'ERSTED

Observation I1.2 : Expérience d'ERSTED

- ◇
- ◇
- ◇

♥ Propriété I1.2 : Courant et champ magnétique

- ◇
- ◇

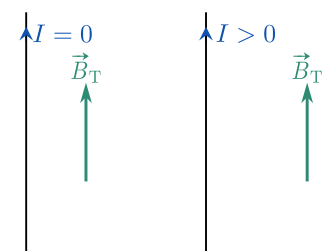


FIGURE I1.5

Expérience I1.3 : Lignes de champ bobine plate

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

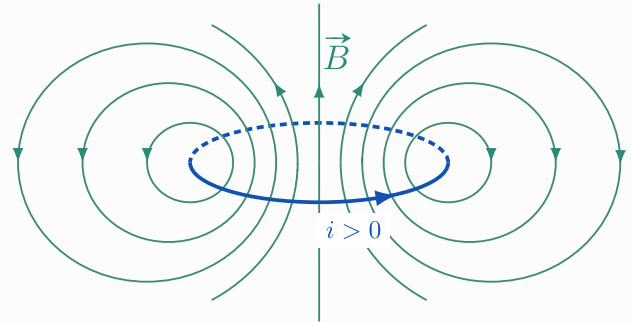
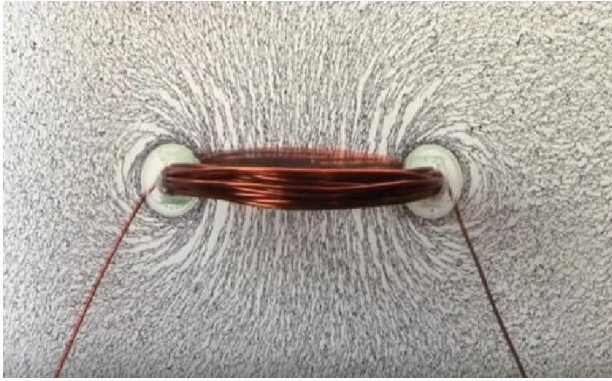


FIGURE I1.6 – Observation du champ créé par une bobine plate : limaille de fer et schématisation.

♥ Propriété I1.3 : Comparaison LdC aimant/bobine

Définition I1.5 : Solénoïde

En enroulant un fil le long d'un cylindre, on fabrique un **solénoïde**, ou bobine longue.

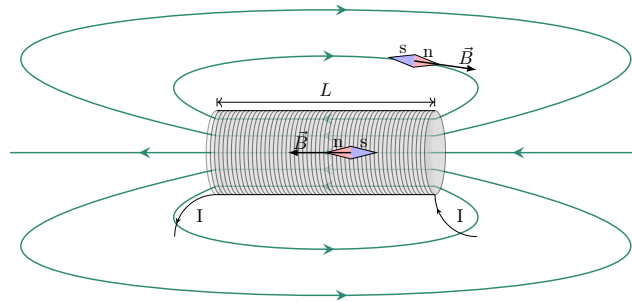


FIGURE I1.7 – Photo et représentation d'un solénoïde avec lignes de champ.

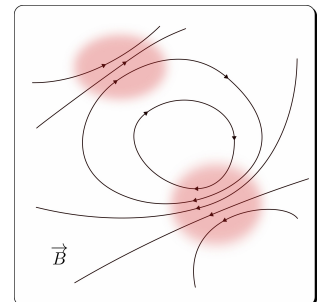
Étendre une bobine a pour effet de rendre les lignes de champ **parallèles dans le solénoïde**. En dehors, les lignes de champ se referment de façon analogue encore une fois à celle de l'aimant droit.

I/C Intensité du champ magnétique

♥ Propriété I1.4 : Intensité et lignes de champ

On lit l'intensité du champ \vec{B} par l'étude de la proximité de ses lignes de champ. Elles peuvent être :

- ◇ proches \equiv
- ◇ éloignées \equiv
- ◇ parallèles \equiv



♥ Ordre de grandeur I1.1 : Intensité du champ magnétique

Source	Terre	Aimant	Électroaimant	IRM
Champ magnétique	$\approx 5 \times 10^{-5} \text{ T}$	$\approx [0,01 ; 0,5] \text{ T}$	$\approx [1 ; 10] \text{ T}$	$\approx 10 \text{ T}$

♥ Exemple I1.3 : Dispositifs de champ uniforme

- 1) Dans un solénoïde, les lignes de champ sont parallèles donc le champ y est uniforme.
- 2) De même entre les deux pôles d'un aimant en U.

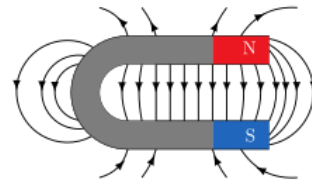
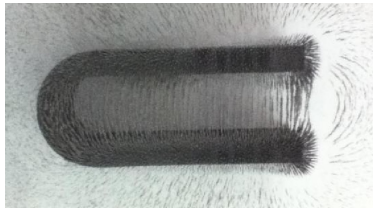
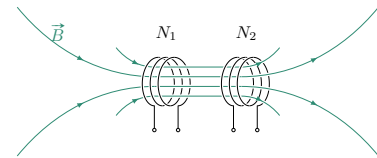


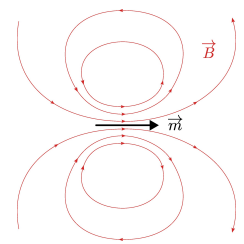
FIGURE I1.8 – Observation du champ créé par un aimant en U : limaille de fer et schématisation.

- 3) Idem au centre d'une bobine de HELMHOLTZ, voir l'animation sur [ce site](#). Elle se compose de deux bobines circulaires de même rayon R et espacée de R , parcourues par le même courant.



♥ Définition I1.6 : Moment magnétique

On remarque que les champs magnétiques créés par un aimant droit et par une spire se ressemblent. On les modélise donc par le même objet mathématique appelé **moment magnétique** $\vec{\mu}$ ou \vec{m} , caractérisé par le champ qu'il produit.



♥ Propriété I1.5 : Moment magnétique d'une spire

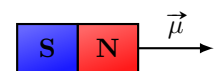
On considère une spire de rayon R parcourue par un courant i . La normale à la surface est notée \vec{n} , orientée dans le sens de la main droite par rapport au courant.

Le **moment magnétique** $\vec{\mu}$ de la spire plane est

Unité

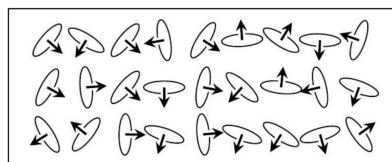
Dans ce cas, c'est le mouvement de **particules chargées** qui crée le champ magnétique. Cette notion s'applique également aux bobines.

La notion de moment magnétique s'applique aussi aux aimants, même si sa source n'est pas due à un mouvement de translation comme peut l'être le courant dans un fil : la source du magnétisme dans les aimants est intrinsèquement **quantique**, et vient de la nature « aimantée » des électrons. On distingue deux sources :

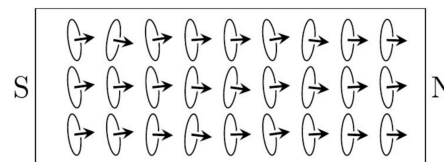


- ◇ **Moment magnétique orbital** dû au mouvement des électrons autour d'un noyau atomique ;
- ◇ **Moment magnétique de spin** propriété intrinsèque des particules élémentaires, **sans d'équivalent classique**.

Ce sont ensuite des effets à grande échelle qui permettent l'existence d'un champ à l'échelle d'un solide entier, selon l'orientation moyenne des moments microscopiques¹.



Milieu désordonné



Milieu ordonné présentant des pôles

♥ Ordre de grandeur I1.2 : Moment magnétique d'un aimant

Source	Aimant droit	Aimant néodyme	Terre
Moment magnétique	$\approx 1 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$	$\approx 10 \text{ A}\cdot\text{m}^2$	$\approx 8 \times 10^{22} \text{ A}\cdot\text{m}^2$

1. Pour plus de détails, voir [Scilabus](#) (en français) ou [minutephysics](#) (en anglais).

II Relation courant et champ magnétique

II/A Orientation et intensité

Important I1.1 : Règles de la main droite

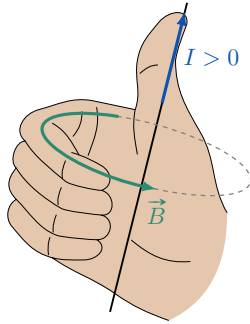


FIGURE I1.9 – Champ créé par un fil.

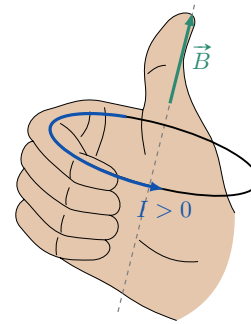
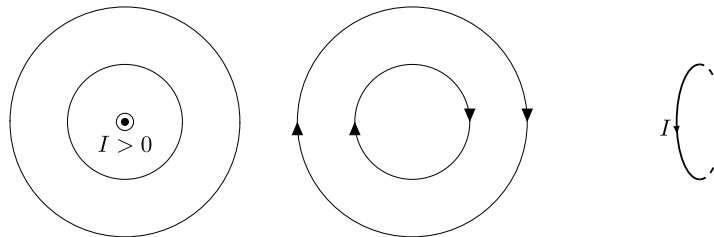


FIGURE I1.10 – Champ créé par une bobine.

♥ Interprétation I1.1 : Analogie magnéto-mécanique

Pour se créer une intuition de la direction du champ créé par un aimant ou par une bobine, il est utile d'essayer de se représenter la bobine comme un **ventilateur sans pale**, qui aspire lentement l'air en amont, puis rapidement en son milieu, pour l'éjecter ensuite de l'autre côté. L'aimant serait alors un tuyau d'aspirateur inversé.

Application I1.1 : Sens du courant et du champ



♥ Propriété I1.6 : Relation courant-champ

En général

Dans le vide, le champ \vec{B} créé par un courant i est donné par :

- ◇ $i(t)$ le courant ;
- ◇ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$ est la **perméabilité du vide** ;
- ◇ L est une longueur typique du système.

Solénoïde

À l'intérieur d'un solénoïde de N spires, le champ est uniforme et on a :

avec \vec{u}_z l'axe orienté selon la règle de la main droite par rapport au courant, et L la longueur du solénoïde.

II/B Invariances de la distribution de courants

Définition I1.7 : Invariance d'une source de champ

On appelle **invariance d'une distribution** toute **transformation de l'espace** (rotation, translation...) de la source de champ (magnétique ou non) qui ne **change pas la distribution** elle-même.

Important I1.2 : Principe de CURIE

Implication I1.1 : Invariance du champ magnétique

La **norme** du champ magnétique $\|\vec{B}\|$ a les **mêmes invariances** que la **distribution de courant** qui le crée.

Application I1.2 : Invariances du fil infini

Étudions la distribution dans le cas d'un fil infini en repère cylindrique :

- 1)
- 2)

Autrement dit, par l'étude des invariances pour un fil infini, on sait que

II/C Symétries de distribution et de champ

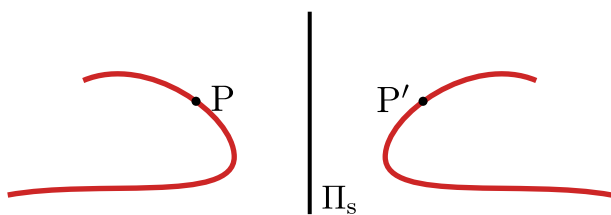
♥ Définition I1.8 : Plans d'(anti)symétrie d'une distribution

Soit $\vec{j}(M)$ le vecteur de distribution de courant. Il peut posséder deux plans intéressants :

Plan de symétrie Π_s

Un plan Π_s est un **plan de symétrie de la distribution** de courant si les courants en tous **points P et P' symétriques** par rapport à Π_s sont **eux-mêmes symétriques** :

$$\vec{j}(P') = \text{sym}_{\Pi_s} \vec{j}(P) \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{---} \end{array} \right.$$

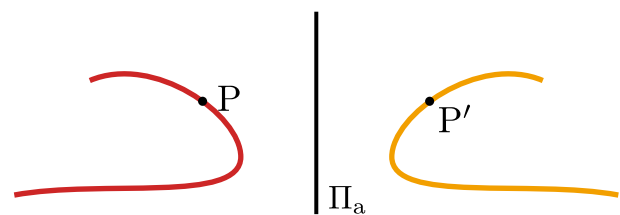


On a alors,

Plan d'antisymétrie Π_a

Un plan Π_a est un **plan d'antisymétrie de la distribution** de courant si les courants en tous **points P et P' symétriques** par rapport à Π_a sont **antisymétriques** :

$$\vec{j}(P') = -\text{sym}_{\Pi_a} \vec{j}(P) \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{---} \end{array} \right.$$



On a alors,

Important I1.3 : Symétries et champ magnétique

Puisque le **champ magnétique est perpendiculaire à la distribution** de courant, il **possède les symétries opposées de sa distribution** :

Plan de symétrie Π_s

On a alors,

Plan d'antisymétrie Π_a

et

Application I1.3 : Symétrie du fil infini

On a vu que la norme du champ en un point M ne dépendait que de la distance r au fil en coordonnées cylindriques, mais quelle est sa direction ? Étudions les symétries de la distribution de courant :

- ◇
- ◇
- ◇

Ainsi, tout combiné on a

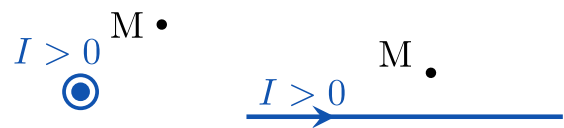


FIGURE I1.11 – Étude des symétries du fil infini.

♥ Outils I1.1 : Étudier les symétries d'une distribution

- 1 Choisir un repérage de l'espace pertinent pour la distribution de courant, selon ses invariances ;
- 2 Placer un point M quelconque, **qui n'appartient pas à la distribution** ;
- 3 Trouver des plans d'(anti)symétrie de la distribution **contenant le point M** ;
- 4 Conclure sur la direction du champ \vec{B} , notamment, si $\Pi_s = (M, \vec{u}_1, \vec{u}_2)$, alors $\vec{B}(M) = B(M)\vec{u}_3$.

Attention I1.1 : Différence invariance/symétrie

Invariance

Général à toute distribution ; dépend d'une **translation** ou **rotation** de la distribution, donne la dépendance aux **coordonnées**.

Symétrie

Spécifique à chaque champ, dépend d'un **plan miroir** de la distribution, donne la **direction**.

♥ Application I1.4 : Exercice bilan sur lignes de champ

Les cartes de champ magnétique ci-dessous sont des vues en coupe du champ produit par des spires de courant circulaires. Dans les deux cas, indiquer

- 1) la position des sources et le sens du courant circulant
- 2) les zones de champ fort et faible dans les spires
- 3) le cas échéant s'il existe une zone de l'espace où le champ magnétique est uniforme.
- 4) les plans de symétrie/d'antisymétrie de la distribution de courant et l'orientation du champ magnétique dans ces plans.

