

Champs magnétiques

« *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 Introduction	3
I/A Notion de champ en physique	3
I/B Interaction entre aimants	4
I/C Le vecteur champ magnétique	4
II Sources et cartes de champ magnétique	4
II/A Aimant droit	4
II/B Champs magnétiques créés par des courants	5
III Intensité du champ magnétique	6
III/A Lire une intensité sur une carte	6
III/B Dispositifs créant un champ uniforme	7
III/C Lien entre courant et champ magnétique	7
IV Le moment magnétique	11
IV/A Boucle de courant	11
IV/B Cas des aimants	11

⚡ 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

- I1.1 : Champ 3
- I1.2 : Cartes et lignes de champ 3
- I1.3 : Boussole 4
- I1.4 : Champ magnétique 4
- I1.5 : Solénoïde 6
- I1.6 : Plans d'(anti)-symétrie de distrib. 8
- I1.7 : Moment magnétique 11

 ⚡ Propriétés

- I1.1 : Géométrie des lignes de champ 5
- I1.2 : Courant et champ magnétique 5
- I1.3 : Comparaison LdC aimant/bobine 6
- I1.4 : Intensité et lignes de champ 7
- I1.5 : Relation courant-champ 8
- I1.6 : Moment magnétique d'une spire 11

 💡 Interprétations

- I1.1 : Analogie magnéto-mécanique 8

 📊 Ordres de grandeur

- I1.1 : Intensité du champ magnétique 7
- I1.2 : Moment magnétique d'un aimant 11

 ✍ Applications

- I1.1 : Sens du courant et du champ 8
- I1.2 : Symétrie de 2 systèmes 9
- I1.3 : Invariances du fil infini 10
- I1.4 : Exercice bilan sur lignes de champ 10

 ❤ Points importants

- I1.1 : Règles de la main droite 7
- I1.2 : Symétries 9
- I1.3 : Invariances 10

 ⚠ Erreurs communes

- I1.1 : Différence invariance/symétrie 10
-

I Introduction

I/A Notion de champ en physique

Définition I1.1 : Champ

Un **champ** est une grandeur physique définie en tout point M . Sa valeur dépend en général également du temps. Il peut être :

- ◇ **Scalaire** :
- ◇ **Stationnaire** : indépendant temps :
- ◇ **Vectoriel** :
- ◇ **Uniforme** : indépendant position :

Exemple I1.1 : Champs scalaire et vectoriel

- ◇
- ◇
- ◇
- ◇

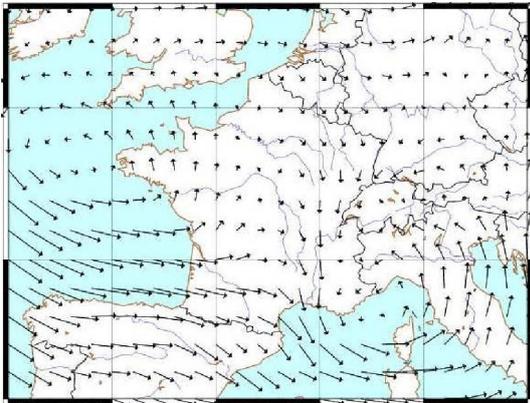


FIGURE I1.1 – Champ vectoriel du vent.

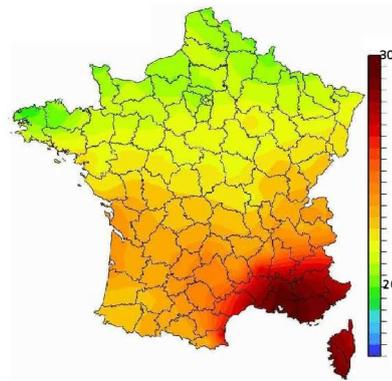
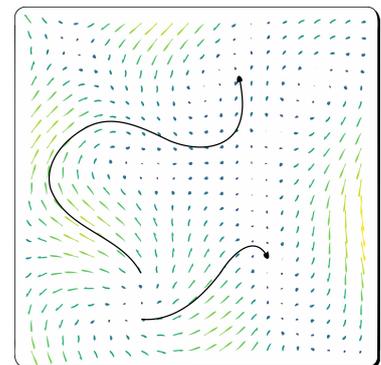


FIGURE I1.2 – Champ scalaire de la température.

Définition I1.2 : Cartes et lignes de champ

Pour représenter un champ vectoriel, on utilise des :

- ◇ **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 les **courbes orientées, tangentes au champ** que l'on obtient en suivant le champ de proche en proche. Chaque ligne indique le **sens** du champ.



I/B Interaction entre aimants

Observation I1.1 : Interactions entre aimants

Situation A



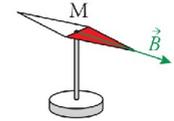
Situation B



Situation C

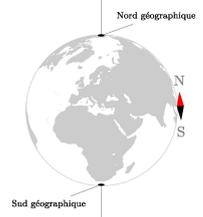


- ◇ Deux aimants peuvent s'**attirer** ou se **repousser** selon la façon dont on les oriente ;
- ◇ Le champ magnétique peut être mis en évidence avec un petit aimant en forme d'aiguille (boussole) ;



Définition I1.3 : Boussole

Une boussole est une aiguille aimantée libre de tourner. On appelle **nord magnétique** l'extrémité qui pointe vers le **nord géographique**.



I/C Le vecteur champ magnétique

♥ 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** :

II Sources et cartes de champ magnétique

II/A Aimant droit

Expérience I1.1 : Lignes de champ aimant droit

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

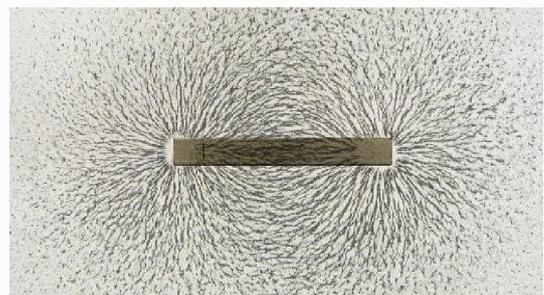


FIGURE I1.3 – Limaille sur aimant droit.

♥ Propriété I1.1 : Géométrie des lignes de champ

Exemple I1.2 : Aimant droit

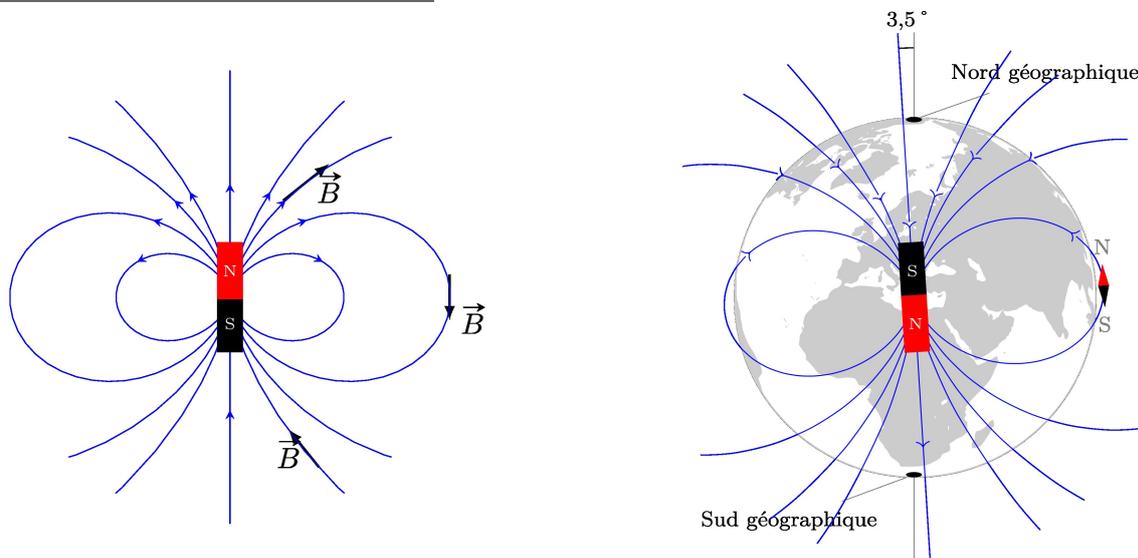


FIGURE I1.4 – Schématisation des lignes de champ dans un aimant droit, et schématisation du champ magnétique de la Terre comme celui d’un aimant droit. Une boussole à la surface de la Terre pointe vers le **pôle Sud magnétique** de la Terre, qui est proche du Nord géographique.

II/B Champs magnétiques créés par des courants

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.

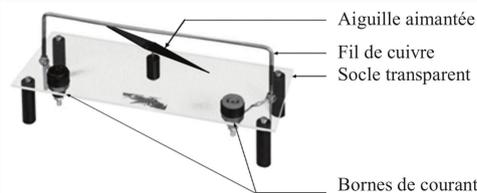


FIGURE I1.5 – Dispositif d’ØERSTED

Observation I1.2 : Expérience d’ØERSTED

- ◇
- ◇
- ◇

♥ Propriété I1.2 : Courant et champ magnétique

- ◇
- ◇

FIGURE I1.6

II/B) 1 Bobine plate

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).

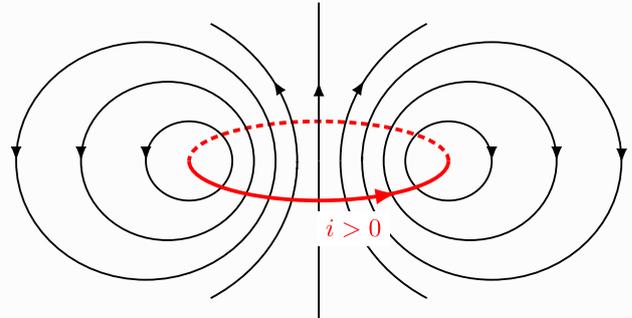
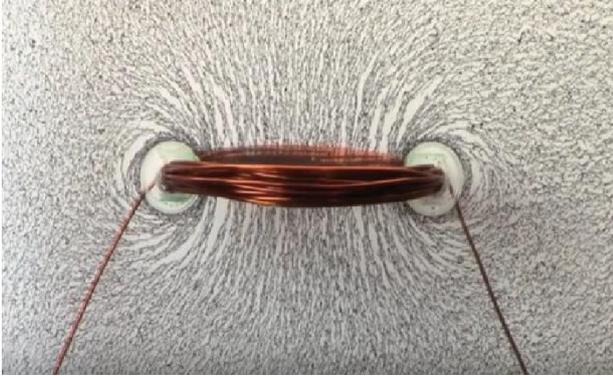


FIGURE I1.7 – Observation du champ créé par une bobine plate : limaille de fer et schématisation.

♥ Propriété I1.3 : Comparaison LdC aimant/bobine

II/B) 2 Solénoïde

Définition I1.5 : Solénoïde

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

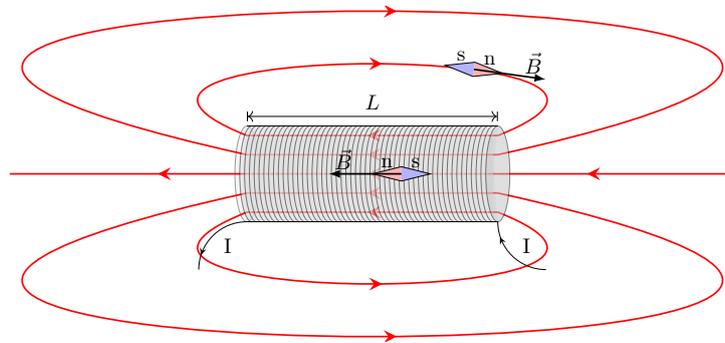


FIGURE I1.8 – Photo et représentation d'un solénoïde avec lignes de champ.

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.

III Intensité du champ magnétique

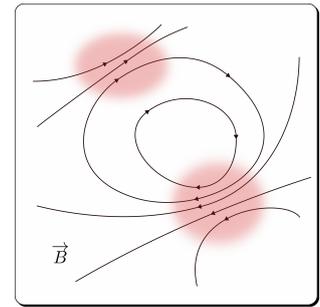
III/A Lire une intensité sur une carte

Plus une boussole est proche d'un aimant, plus elle s'aligne **rapidement** sur le champ magnétique. C'est au travers de ses effets sur les courants, les aimants etc. que nous mesurons l'intensité du champ magnétique, exprimé en tesla (T).

♥ **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
Norme	$\approx 5 \times 10^{-5} \text{ T}$	$\approx [0,01 ; 0,5] \text{ T}$	$\approx [1 ; 10] \text{ T}$	$\approx 10 \text{ T}$

III/B Dispositifs créant un champ uniforme

♥ **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.

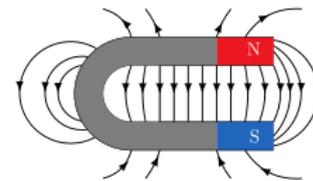
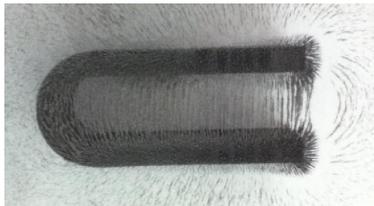
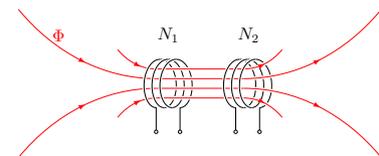


FIGURE I1.9 – Observation du champ créé par un aimant en U : limaille de fer et schématisation.

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



III/C Lien entre courant et champ magnétique

III/C) 1 Direction du champ magnétique

Important I1.1 : Règles de la main droite

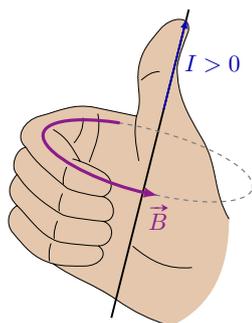


FIGURE I1.10 – Champ créé par un fil.

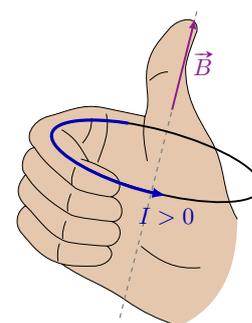
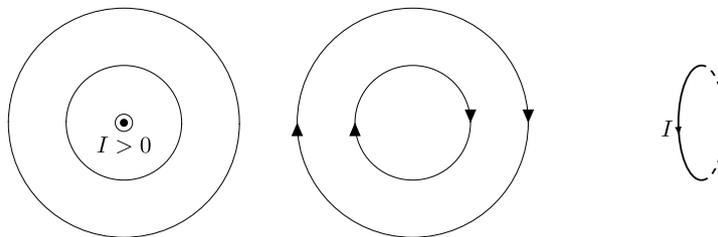


FIGURE I1.11 – Champ créé par une bobine.

♥ 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 pôle**, 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



III/C) 2 Proportionnalité

♥ Propriété I1.5 : Relation courant-champ

En général

Dans le vide, le champ magnétique 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 où le champ est uniforme, on a

avec \vec{u}_z l'axe orienté selon la règle de la main droite par rapport au courant, et $n = \frac{N}{L}$ le nombre de spires par mètre.

III/C) 3 Symétries de distribution et de champ

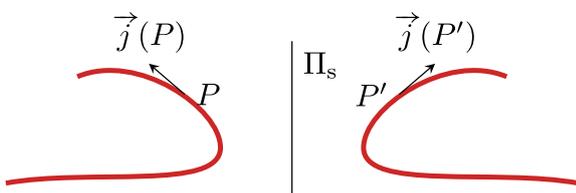
♥ Définition I1.6 : Plans d'(anti)-symétrie d'une distribution

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

Plan de symétrie Π_s

Les courants en tous **points P et P' symétriques** par rapport à Π_s sont **eux-mêmes symétriques** :

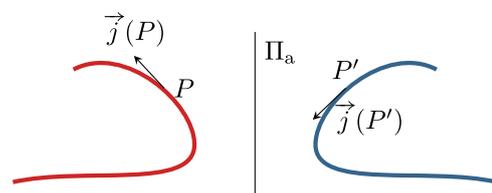
$$\vec{j}(P') = \text{sym}_{\Pi_s} \vec{j}(P) \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \vec{j}(P) \text{ et } \vec{j}(P') \text{ sont symétriques} \\ \vec{j}(P) \text{ et } \vec{j}(P') \text{ sont dans le même plan parallèle à } \Pi_s \end{array} \right.$$



Plan d'antisymétrie Π_a

Les courants en tous **points P et P' symétriques** par rapport à Π_a sont **antisymétriques** :

$$\vec{j}(P') = -\text{sym}_{\Pi_a} \vec{j}(P) \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \vec{j}(P) \text{ et } \vec{j}(P') \text{ sont antisymétriques} \\ \vec{j}(P) \text{ et } \vec{j}(P') \text{ sont dans des plans parallèles à } \Pi_a \end{array} \right.$$



L'étude des symétries est toute une science en soit, qui a mené à une des plus grandes découvertes scientifiques du monde : le théorème de NOETHER¹, démontré en 1915. Dans le cas du champ magnétique, on obtient les résultats suivants :

Important I1.2 : Symétries

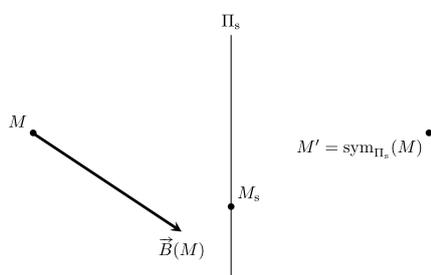
Soit M un point, Π_s un plan de symétrie de la distribution, et Π_a un plan d'antisymétrie.

Plan de symétrie Π_s

Pour M et M' symétriques par rapport à Π_s , le champ \vec{B} est **anti-symétrique** par rapport à Π_s :

$$\vec{B}(M') = -\text{sym}_{\Pi_s}(\vec{B}(M))$$

$$\Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \end{array} \right.$$



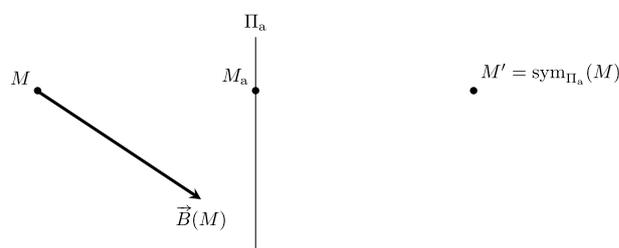
Soit $\forall M_s \in \Pi_s,$

Plan d'antisymétrie Π_a

Pour M et M' symétriques par rapport à Π_a , le champ \vec{B} est **symétrique** par rapport à Π_a :

$$\vec{B}(M') = \text{sym}_{\Pi_a}(\vec{B}(M))$$

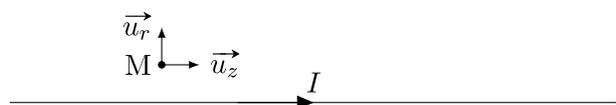
$$\Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \end{array} \right.$$



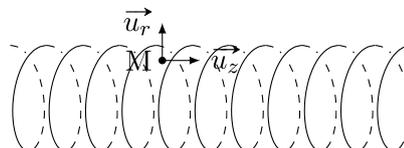
Soit $\forall M_a \in \Pi_a,$

Application I1.2 : Symétrie de 2 systèmes

1) Soit un fil doté de coordonnées cylindriques. Étudions ses symétries :



2) Soit un solénoïde avec des coordonnées cylindriques.



1. Figure incontournable de la physique moderne, Emmy NOETHER était une mathématicienne hors pair, reconnue dans le monde scientifique à une époque où les femmes étaient encore plus minimisées qu'aujourd'hui. EINSTEIN aurait qualifié son théorème de « monument de la pensée mathématique ».

III/C) 4 Invariances de la distribution de courants

Important I1.3 : Invariances

♥ Attention I1.1 : Différence invariance/symétrie

Symétrie

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

Invariance

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

Application I1.3 : Invariances du fil infini

Étudions les invariances de la distribution dans le cas du fil infini :

1)

2)

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

Si on ajoute l'étude des symétries, on a que $\vec{B} \parallel \vec{u}_\theta$. Tout combiné, on a donc

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

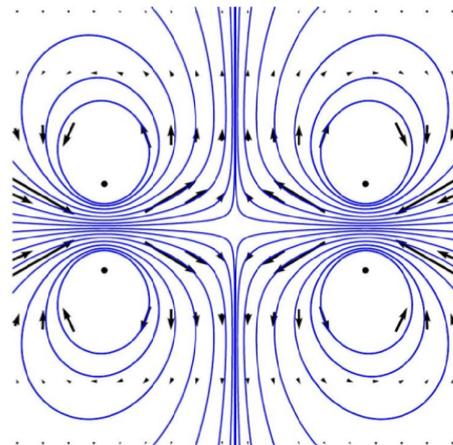
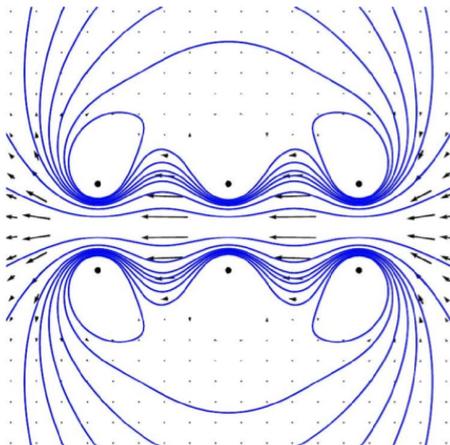
Les cartes de champ magnétique ci-dessous sont des vues en coupe du champ produit par des spires de courant circulaires. Dans les deux cas, indiquer

1] la position des sources

2] le sens du courant circulant dans les spires

3] les zones de champ fort et faible

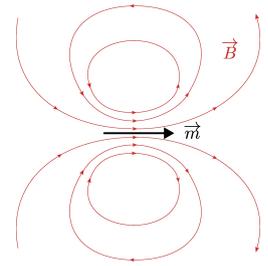
4] le cas échéant s'il existe une zone de l'espace où le champ magnétique est uniforme.



IV Le moment magnétique

♥ Définition I1.7 : 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**.



IV/A Boucle de courant

♥ Propriété I1.6 : 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.

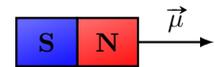
Le **moment magnétique** $\vec{\mu}$ de la spire plane est

en

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

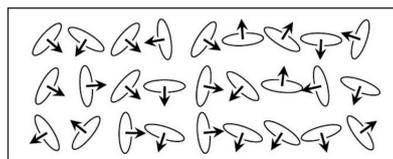
IV/B Cas des aimants

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 :

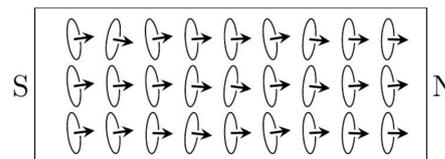


- ◇ **Moment magnétique orbital** dû au mouvement des électrons autour d'un noyau atomique, dessinant une boucle de courant auquel on associe un moment magnétique ;
- ◇ **Moment magnétique de spin** propriété intrinsèque des particules élémentaires. Elle n'a **pas d'équivalent classique**.

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 microscopiques².



Milieu désordonné



Milieu ordonné présentant des pôles

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

On a comme ordre de grandeur : aimant droit $\approx 1 \text{ A}\cdot\text{m}^2$; aimant néodyme $\approx 10 \text{ A}\cdot\text{m}^2$; pour la Terre $\approx 8 \times 10^{22} \text{ A}\cdot\text{m}^2$.

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